МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНА
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Б1.В.09.06 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 43D659E81F59110FB2CEBF5795FF2768
Владелец: Зубов Владимир Владимирович
Действителен: с 20.08.2025 до 13.11.2026

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель работы ……4
2 Задание ……4
3 Необходимые приборы и пособия ……4
4 Основные теоретические сведения ……4
5 Методические указания по выполнению работы ……...13
6 Содержание отчета ……16
7 Контрольные вопросы ……...…17
Список литературы ……..……...…18
Приложение А ……..… 19
Приложение Б ……..… 22

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Практическое знакомство с методами расчета сопряжений с учетом допусков и посадок по ГОСТ 25347-82.

1.2 Получение навыков практического пользования таблицами допусков и посадок.

1.3 Освоение правил графического построения полей допусков, зазоров и натягов.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Для заданных посадок определить наибольшие, наименьшие предельные размеры и допуски размеров деталей, входящих в соединение;

2.2 Построить схемы расположения полей допусков деталей, входящих в соединение;

2.3 Определить наибольшие, наименьшие зазоры и натяги и допуски посадок; полученные данные занести в таблицу.

3 НЕОБХОДИМЫЕ ПРИБОРЫ И ПОСОБИЯ

ГОСТ 25347-82. ЕСДП. Поля допусков и рекомендуемые посадки.

4 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

4.1 Применяемые условные обозначения:

d – диаметр вала;

D – диаметр отверстия;

ES – верхнее отклонение отверстия;

EI – нижнее отклонение отверстия;

es – верхнее отклонение вала;

ei – нижнее отклонение вала;

d_{max}, d_{min} – наибольший и наименьший размеры вала;

D_{max}, D_{min} – наибольший и наименьший размеры отверстия;

S_{max}, S_{min} – наибольший и наименьший зазоры;

N_{max}, N_{min} – наибольший и наименьший натяги.

4.2 Основные понятия и терминология

Машины и механизмы состоят из деталей, которые в процессе работы должны совершать относительные движения или находиться в относительном покое. В большинстве случаев детали машин представляют собой определенные комбинации геометрических тел, ограниченных поверхностями простейших форм: плоскими, цилиндрическими, коническими и т. д. Это объясняется широким использованием в механизмах низших кинематических пар и технологическими соображениями, так как существующие станки приспособлены в основном для обработки простейших поверхностей и их комбинаций. Простейшие геометрические тела, составляющие детали, – будем называть их элементами.

Две детали, элементы которых входят друг в друга, образуют *соединение.* Такие детали называются *сопрягаемыми деталями,* а поверхности соединяемых элементов – *сопрягаемыми поверхностями.* Поверхности тех элементов деталей, которые не входят в соединение с поверхностями других деталей, называются *несопрягаемыми поверхностями.* Соединения подразделяются по геометрической форме сопрягаемых поверхностей. Соединение деталей, имеющих сопрягаемые цилиндрические поверхности с круглым поперечным сечением, называется *гладким цилиндрическим* (рисунок 4.1, а).

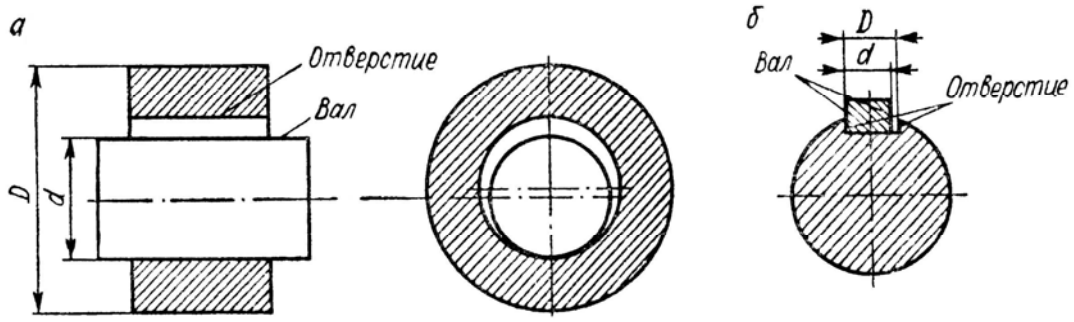


Рисунок 4.1 – Типы соединения деталей

Если сопрягаемыми поверхностями каждого элемента соединения являются две параллельные плоскости, то соединение называется *плоским соединением* с параллельными плоскостями или просто плоским (рис. 4.1, *б).*

В соединении элементов двух деталей один из них является внутренним (охватывающим), другой – наружным (охватываемым). В системе допусков и посадок гладких соединений всякий наружный элемент условно называется *валом,* всякий внутренний – *отверстием.* Термины «отверстие» и «вал» применяются и к несопрягаемым элементам.

Под *размером* элементов, образующих гладкие соединения, и аналогичных несопрягаемых элементов понимается: в цилиндрических соединениях – диаметр, в плоских – расстояние между параллельными плоскостями по нормали к ним. В более узком смысле в системе допусков и посадок *размер* – числовое значение линейной величины (диаметра, длины и т. д.) в выбранных единицах измерения (в машиностроении обычно в миллиметрах).

Номинальный размер – основной размер, полученный на основе расчетов и указанный на чертеже. Он служит началом отчета отклонений и относительно его определяются предельные размеры.

Действительный размер – размер элемента, установленный измерением, с допустимой погрешностью.

Отклонение – разность между действительным и номинальным размерами.

Предельные отклонения – два предельно допустимых размера, между которыми должен находиться действительный размер.

Верхнее отклонение – алгебраическая разность между наибольшим предельным и номинальным размерами.

ES, es – соответственно, верхнее отклонение отверстия и вала:

$$ES = D_{max} - D;\ es = d_{max} - d. \quad (4.1)$$

Нижнее отклонение – алгебраическая разность между наименьшим предельным и номинальным размерами.

EI, ei – соответственно, нижнее отклонение отверстия и вала:

$$EI = D_{min} - D;\ ei = d_{min} - d. \quad (4.2)$$

Допуск T – разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или алгебраическая разность между верхним и нижним отклонениями (рисунок 4.2):

$$T = D_{max} - d_{min};\ T = d_{max} - D_{min}$$

$$\text{или } T = ES - ei;\ T = es - EI. \quad (4.3)$$

Примечание. Допуск – это абсолютная величина без знака.

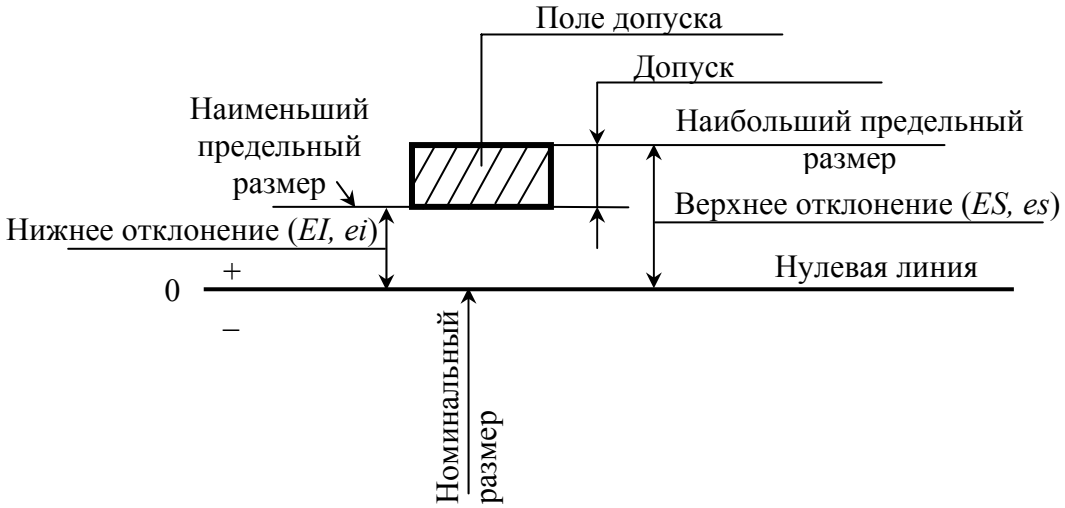


Рисунок 4.2 – Поле допуска

Поле допуска – поле между предельными отклонениями размера: оно определяется величиной допуска и его положением относительно номинального размера (рисунок 4.2).

Нулевая линия – линия, соответствующая номинальному размеру. При графическом изображении полей допусков и посадок от нее откладываются отклонения размеров (рисунок 4.2):

– положительные отклонения – вверх от нее;

– отрицательные отклонения – вниз.

Квалитет (степень точности) – совокупность допусков, которые соответствуют одному уровню точности для всех номинальных размеров.

Стандарт устанавливает 20 квалитетов: 01, 0, 1, 2, ... 18. В основном применяются квалитеты, начиная с 5-го.

Разность размеров отверстия и вала до сборки определяет характер соединения деталей, или *посадку,* т. е. большую или меньшую свободу относительного перемещения деталей или степень сопротивления их взаимному смещению. Разность размеров отверстия и вала, если размер отверстия больше размера вала, называется *зазором S* (рисунок 4.3, а):

$$S = D - d,$$

$$S_{max} = D_{max} - d_{min} \text{ или } S_{max} = ES - ei,$$

$$S_{min} = D_{min} - d_{max} \text{ или } S_{min} = EI - es. \qquad (4.4)$$

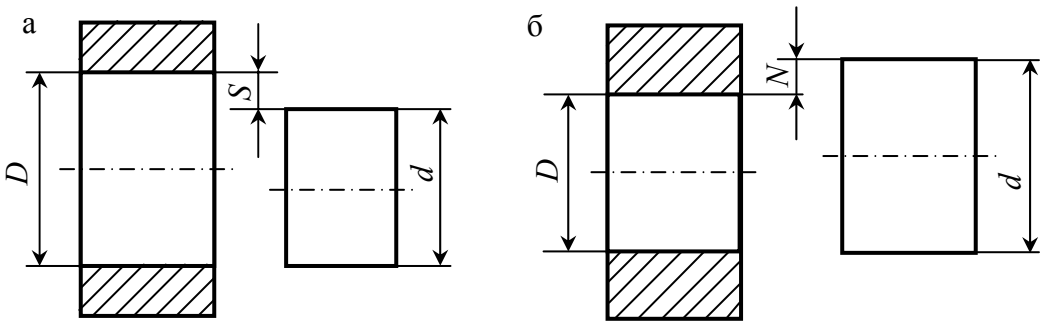


Рисунок 4.3 – Зазор и натяг

Зазор характеризует большую или меньшую свободу относительного перемещения деталей соединения.

Разность размеров вала и отверстия до сборки, если размер вала больше размера отверстия, называется *натягом N* (рисунок 4.3, б):

$$N = d - D,$$

$$N_{max} = d_{max} - D_{min} \text{ или } N_{max} = es - EI,$$

$$N_{min} = d_{min} - D_{max} \text{ или } N_{min} = ei - ES. \quad (4.5)$$

Натяг характеризует степень сопротивления взаимному смещению деталей в соединении.

При соединении двух деталей образуется *посадка*, определяемая разностью их размеров до сборки, т. е. величиной получающихся зазоров или натягов в соединении. Посадка характеризует свободу относительного перемещения соединяемых деталей или степень сопротивления их взаимному перемещению.

В зависимости от взаимного расположения полей допусков отверстия или вала (по характеру соединения) посадка может быть (рисунок 4.4):

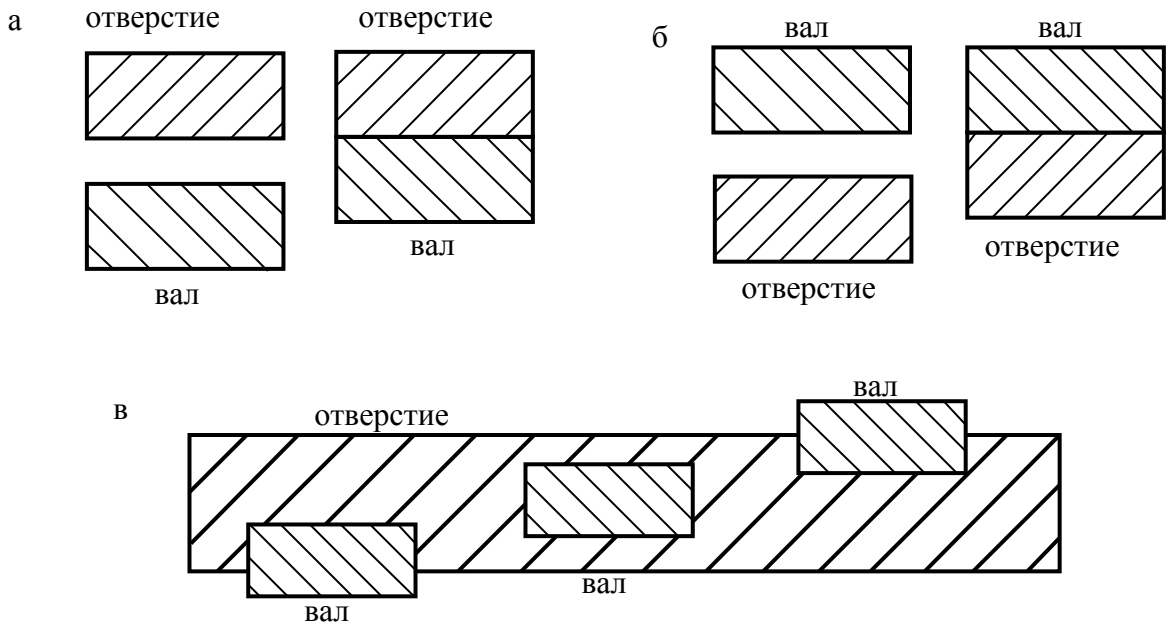


Рисунок 4.4 – Виды посадок

– подвижная (посадка с зазором): поле допуска отверстия над полем допуска вала (рисунок 4.4, а);

– неподвижная (посадка с натягом): поле допуска отверстия под полем допуска вала (рисунок 4.4, б);

– переходная (возможны натяг или зазор в зависимости от действительных размеров): поля допусков отверстия и вала перекрываются частично или полностью (рисунок 4.4, в).

Для сопрягаемых деталей установлены две системы расположения полей допусков:

– система отверстия;

– система вала.

Посадки в системе отверстия – посадки, в которых нужные зазоры и натяги получаются сочетанием различных полей допусков валов с одним и тем же полем допуска основного отверстия (рисунок 4.5, а).

Пример: *ø*20 *H*7/*f*6.

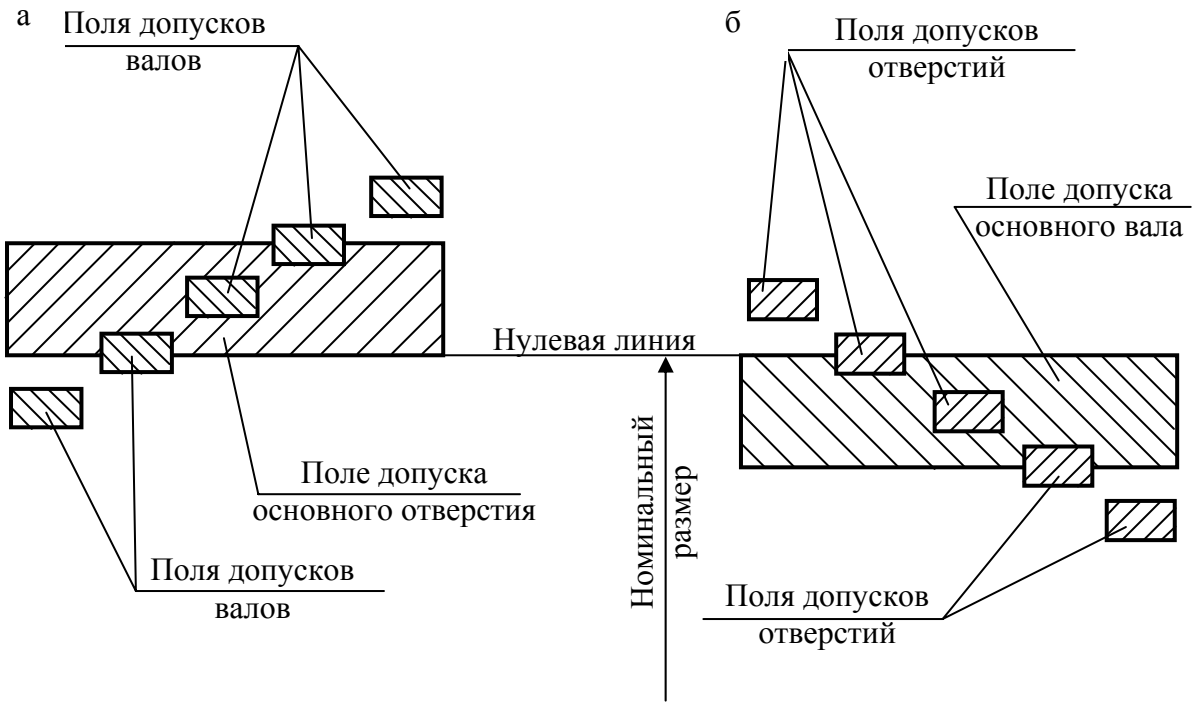


Рисунок 4.5 – Примеры посадок в системе отверстия и в системе вала

Применение системы отверстия предпочтительней.

Посадки в системе вала – посадки, в которых нужные зазоры и натяги получаются сочетанием различных полей допусков отверстий с одним и тем же полем допуска вала (рисунок 4.5, б).

Система вала применяется реже, например, если необходимо получить разные посадки нескольких деталей на одном гладком валу.

Пример: *ø*20 *K*7/*h*6.

Характеристикой расположения поля допуска в ЕСПД является числовое значение основного отклонения – того из двух предельных отклонений размера, которое находится ближе к нулевой линии. Для всех полей допусков, расположенных ниже нулевой линии, основным является верхнее отклонение *es* или *ES* (сокращение французского термина *ecart superieur* – верхнее отклонение); для полей допусков, расположенных выше нулевой линии, основным – нижнее отклонение *ei* или *EI* (сокращение французского термина *ecart inferieur* – нижнее отклонение) – (рисунок 4.6).

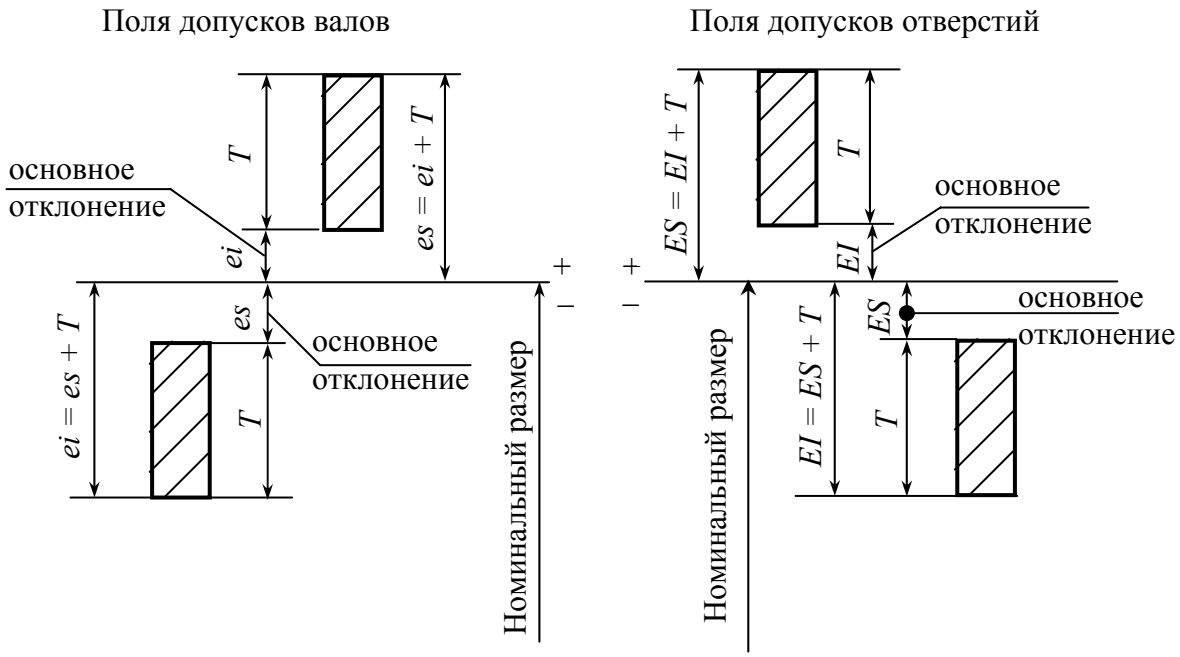


Рисунок 4.6 – Основные отклонения

Для удовлетворения требований в отношении отдельных деталей и их посадок для каждого номинального размера предусмотрены гаммы допусков и основных отклонений, характеризующих положение этих допусков относительно нулевой линии.

Допуск, величина которого зависит от номинального размера, обозначается цифрами (квалитет).

Положение поля допуска относительно нулевой линии, зависящее от номинального размера, обозначается буквой латинского алфавита (или в некоторых случаях двумя буквами) – прописной для отверстий и строчной для валов (рисунок 4.7).

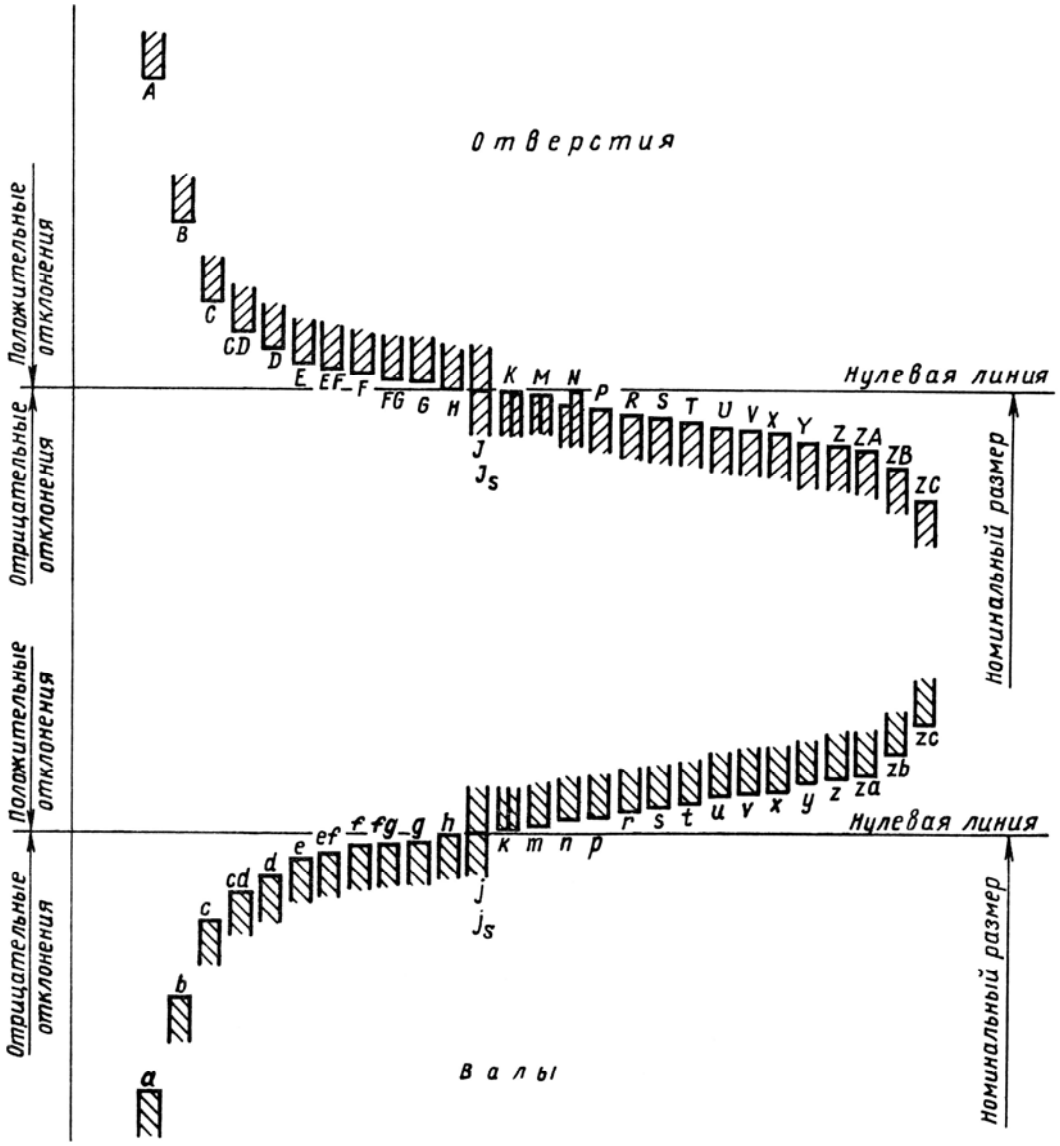


Рисунок 4.7 – Относительные положения полей допусков

Таким образом, размер, для которого указывается поле допуска, обозначается числом, за которым следует условное обозначение, состоящее из буквы (иногда из двух букв) и цифры (или двух цифр).

Примеры: 40 *g*6*,* 40 *H*7, 40 *H*11.

В обозначение посадки входит номинальный размер, общий для обоих соединяемых элементов (отверстия и вала), за которым следуют обозначения полей допусков для каждого элемента, начиная с отверстия. Условное обозначение посадки дается в виде дроби, причем в числителе указывают обозначение поля допуска отверстия, в знаменателе – обозначение поля допуска вала.

Пример: 40 *H*7/*g*6 (или $40\frac{H7}{g6}$).

Таким образом, основные отклонения обозначают:

– для отверстий прописными: *A* ... *ZC*;

– для валов строчными: *a* ... *zc*.

Поле допуска – сочетанием букв основного отклонения и порядкового номера квалитета: *g*6, j_s7, *H*7, *H*11.

5 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

5.1 Выполнение работы начинается с выбора посадки и номинального размера из приложения 1 по варианту, указанному преподавателем.

5.2 Задание 1

Используя таблицы ГОСТ 25347-82 (приложение 2), для заданных посадок определить:

- верхние и нижние предельные отклонения отверстия (*ES*, *EI*);
- верхние и нижние предельные отклонения вала (*es*, *ei*).

Применяя формулы 4.1–4.3, найти:

- наибольшие, наименьшие предельные размеры отверстия (D_{max}, D_{min});
- наибольшие, наименьшие предельные размеры вала (d_{max}, d_{min});

– допуски размеров деталей, входящих в соединение (отверстия T_D и вала T_d).

Пример: 24 *H*8/*f* 7.

Отверстие $24^{+0,033}_{0}$ мм; вал $24^{-0,020}_{-0,041}$ мм.

ES = +0,033 мм, *EI* = 0 мм, *es* = – 0,020 мм, *ei* = – 0,041 мм.

D_{max} = 24,033 мм, D_{min} = 24 мм,

d_{max} = 23, 980 мм, d_{min} = 23,959 мм.

T_D = 0, 033 мм, T_d = 0,021 мм.

5.3 Задание 2

Построить схемы расположения полей допусков деталей, входящих в соединение. Определить, к какой системе относится заданная посадка.

Построение начинается с проведения нулевой линии, которая соответствует номинальному размеру деталей. Выше этой линии откладываются положительные отклонения, ниже – отрицательные. Далее полученные значения соединяются в произвольные прямоугольники (свое поле допуска для отверстия и для вала), заштриховываются и подписываются.

На примере той же посадки 24 *H*8/*f* 7 построим схему расположения полей допусков (рисунок 5.1).

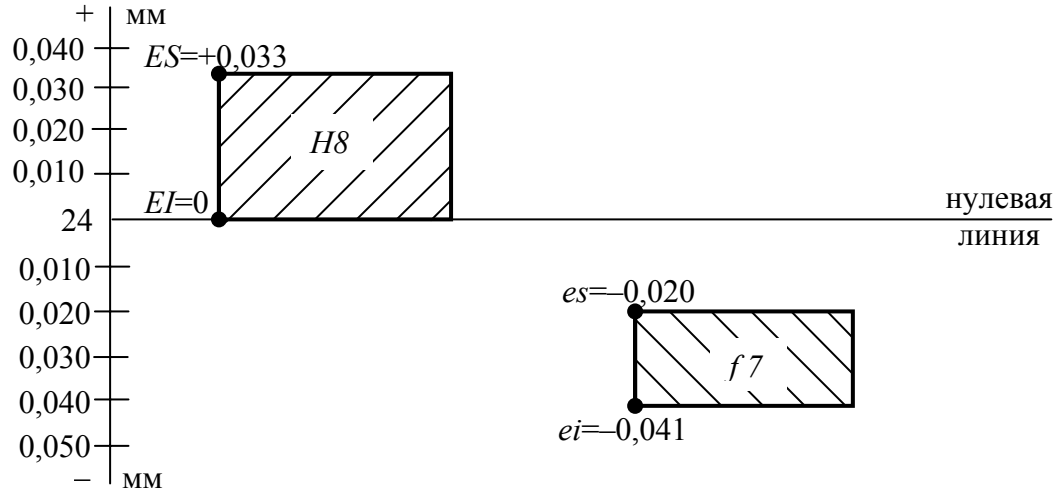


Рисунок 5.1 – Схема расположения полей допусков деталей

Согласно рисунка 4.5 посадка 24 *H*8/*f* 7 относится к системе отверстия.

5.4 Задание 3

Определить тип посадки: с зазором, с натягом или переходная. Найти наибольшие и наименьшие зазоры и (или) натяги, показать их на рисунке.

Если поле допуска отверстия находится над полем допуска вала, то *посадка с зазором.* В этом случае определяются максимальный и минимальный зазоры S_{max}, S_{min} по формуле 4.4.

Если поле допуска отверстия находится под полем допуска вала – *посадка с натягом*. В этом случае определяются максимальный и минимальный натяги N_{max}, N_{min} по формуле 4.5.

Если поля допусков отверстия и вала перекрываются (пересекаются) частично или полностью (рис. 4.4 в), то посадка переходная (возможны и натяг и зазор). В этом случае определяются максимальные значения зазора и натяга S_{max} , N_{max} по тем же формулам.

Продолжим исследовать посадку 24 *H*8/*f*7. Глядя на рисунок 5.1, видим, что поле допуска отверстия *H*8 находится над полем допуска вала *f*7. Следовательно, посадка с зазором. Определим значения зазоров:

$S_{max} = D_{max} - d_{min} = 24,033 - 23,959 = 0,074$ мм,

$S_{min} = D_{min} - d_{max} = 24,000 - 23,980 = 0,020$ мм.

Полученные значения показываем на рисунке 5.2

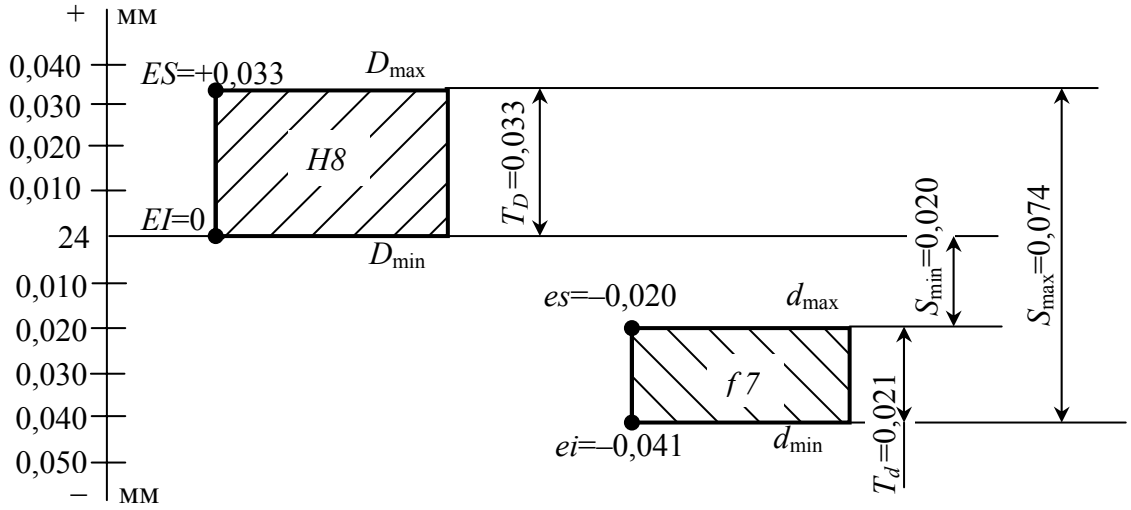


Рисунок 5.2 – Схема посадки 24 *H*8/*f* 7

5.5 Задание 4

Полученные данные занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Таблица результатов, мм

Посадка	D_{max}	D_{min}	T_D	d_{max}	d_{min}	T_d	$T_D + T_d$	**Зазоры**		**Натяги**		**Вид посадки**
								S_{max}	S_{min}	N_{max}	N_{min}	

Заполняем таблицу согласно рассматриваемому примеру:

Посадка	D_{max}	D_{min}	T_D	d_{max}	d_{min}	T_d	$T_D + T_d$	**Зазоры**		**Натяги**		**Вид посадки**
								S_{max}	S_{min}	N_{max}	N_{min}	
24*H*8/*f*7	24,033	24,000	0,033	23, 980	23,959	0,021	0,054	0,074	0,020	–	–	Посадка с зазором

6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1 Отчет оформляется на 4-х страницах формата А4.

6.2 На стр. 1 помещается титульный лист согласно установленному образцу.

6.3 На стр. 2 располагаются следующие данные:

– цель работы;

– задание на лабораторную работу;

– необходимые приборы и материалы;

– исходные данные (выбранные по варианту посадки);

6.4 На стр. 3 располагаются схемы полей допусков деталей с указанием:

– номинального размера;

– верхних и нижних предельных отклонений;

– допусков на размер;

– максимальных и минимальных зазоров или натягов в зависимости от типа посадки.

6.5 На стр. 4 должны быть:

– табл. 1 с результатами вычисленных величин;

– выводы.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое допуск размера и допуск посадки?

2. Чем характеризуется поле допуска?

3. В каких единицах изображаются допустимые отклонения на чертежах, а в каких – в таблицах полей допусков?

4. Что называется системой отверстия и системой вала? Какая система предпочтительней?

5. Как обозначается посадка?

6. Сколько квалитетов установлено стандартом?

7. Как различаются посадки по характеру соединения (3 вида)?

8. Что называется номинальным, действительным и предельным размерами?

9. Что называется нижним и верхним предельными отклонениями?

10. Что такое зазор и каково его назначение в сопряжении?

11. Что называют натягом и каково его назначение в сопряжениях деталей?

12. Чем характеризуется точность размера?

13. Есть ли связь между точностью размеров и шероховатостью поверхности?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкин И. М. Допуски и посадки. – М. : Машиностроение, 1992. – 340 с.

2. Ганевский Г. М., Гольдин И. И. Допуски, посадки и технические измерения в машиностроении. – М. : Высш. шк., 1998. – 288 с.

3. Допуски и посадки: Справочник / под ред. В. Д. Мягкова. Ч.1. – Л. : Машиностроение, 1982. – 544 с.

4. Допуски и посадки: Справочник / под ред. В. Д. Мягкова. Ч. 2 – Л. : Машиностроение, 1982. – 448 с.

5. Якушев А. И., Воронцов Л. Н., Федотов Н. М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.

Приложение А

Таблица 1

Исходные данные

№ варианта	Посадки			
1	250 *H*7/*e*8	40 *H*6/*n*6	62 *H*7/*s*6	32 *F*7/*h*5
2	315 *H*7/*c*8	24 *H*8/*k*7	50 *H*7/*s*7	48 *N*7/*h*6
3	400 *H*8/*d*8	32 *H*6/*k*5	60 *H*8/*u*8	80 *G*6/*h*5
4	200 *H*7/*e*7	50 *H*8/j_s7	42 *H*6/*s*5	10 *K*6/*h*5
5	105 *H*7/*f*7	8 *H*7/*m*6	40 *H*8/*x*8	24 *K*7/*h*6
6	30 *H*6/*f*7	48 *H*7/*n*7	12 *H*7/*s*6	120 *E*8/*h*7
7	120 *E*8/*h*7	12 *H*6/j_s5	42 *H*7/*t*6	80 *P*7/*h*7
8	60 *H*6/*g*5	8 *H*7/*n*6	32 *H*8/*s*7	120 *H*7/*h*6
9	140 *H*7/*g*6	24 *H*6/j_s5	42 *H*8/*x*8	12 *M*6/*h*5
10	10 *H*5/*g*4	24 *H*6/*k*5	80 *H*8/*s*7	8 J_s7/*h*6
11	42 *H*6/*g*5	5 *H*5/*k*4	50 *H*8/*z*8	80 *F*8/*h*6
12	220 *H*8/*d*9	12 *H*7/*n*6	40 *H*6/*s*5	105 *D*8/*h*6
13	400 *H*8/*e*8	10 *H*5/*n*4	52 *H*6/*s*5	120 *E*8/*h*6
14	120 *H*8/*f*8	48 *H*6/*n*5	62 *H*7/*s*5	8 *P*7/*h*6
15	20 *H*7/*g*6	45 *H*6/*m*5	60 *H*6/*p*5	80 *D*9/*h*9
16	120 *H*8/*f*7	12 *H*6/*k*5	32 *H*7/*u*7	60 *F*8/*h*6
17	315 *H*9/*d*9	48 *H*7/*k*6	32 *H*6/*s*5	10 J_s8/*h*7
18	140 *H*8/*d*8	8 *H*5/*m*4	62 *H*7/*p*5	48 *F*8/*h*7
19	105 *H*9/*n*6	6 *H*5/*m*4	36 *H*7/*u*7	54 *H*8/*h*8
20	80 *H*9/*d*9	16 *H*7/*k*6	48 *H*8/*s*7	12 *H*5/*h*4
21	400 *H*11/*d*11	32 *H*6/j_s5	60 *H*7/*s*6	120 *F*8/*h*6
22	80 *H*8/*h*7	12 *H*5/*m*4	48 *H*7/*p*6	62 *F*7/*h*6
23	82 *H*8/*f*9	40 *H*7/*k*6	120 *H*6/*p*5	12 *K*7/*h*6
24	140 *H*9/*d*9	8 *H*6/j_s5	80 *H*8/*x*8	36 *S*7/*h*6
25	64 *H*8/*h*8	20 *H*7/*n*6	52 *H*8/*s*7	8 *M*6/*h*5
26	36 *H*8/*h*8	12 *H*7/j_s6	50 *H*7/*p*6	52 *P*6/*h*5
27	400 *H*11/*d*11	120 *H*6/*p*5	32 *H*7/*u*7	10 *H*5/*n*4
28	10 *H*5/*n*4	120 *E*8/*h*7	80 *H*9/*d*9	52 *H*6/*s*5
29	8 *H*7/*n*6	48 *H*7/*n*7	62 *F*7/*h*6	105 *D*8/*h*6
30	5 *H*5/*k*4	250 *H*7/*e*8	10 J_s8/*h*7	140 *H*7/*g*6
31	315 *H*9/*d*9	50 *H*8/*z*8	105 *D*8/*h*6	6 *H*5/*m*4
32	32 *H*7/*u*7	6 *H*5/*m*4	120 *E*8/*h*7	80 *H*9/*d*9
33	52 *H*6/*s*5	400 *H*11/*d*11	5 *H*5/*k*4	250 *H*7/*e*8
34	140 *H*7/*g*6	10 J_s8/*h*7	50 *H*8/*z*8	48 *H*7/*n*7
35	62 *F*7/*h*6	8 *H*7/*n*6	315 *H*9/*d*9	120 *H*6/*p*5
36	12 *H*5/*m*4	82 *H*8/*f*9	40 *H*8/*x*8	400 *H*8/*e*8
37	140 *H*8/*d*8	40 *H*7/*k*6	315 *H*9/*d*9	32 *F*7/*h*5
38	40 *H*8/*x*8	250 *H*7/*e*8	50 *H*8/*z*8	12 *H*5/*m*4
39	12 *H*6/*k*5	8 *H*5/*m*4	120 *H*8/*f*7	48 *N*7/*h*6
40	400 *H*9/*e*8	16 *H*5/j_s6	62 *H*7/*s*6	30 *H*7/*h*5
41	450 *H*11/*d*11	52 *H*7/*k*6	32 *H*8/*u*8	42 *H*8/*h*8

Продолжение табл.1

№ варианта	Посадки			
42	250 *H*7/*e*8	24 *H*8/*k*7	22 *H*7/*s*6	10 *K*6/*h*5
43	105 *H*7/*f*7	48 *H*7/*n*6	160 *H*7/*t*6	12 *M*6/*h*5
44	42 *H*7/*h*6	10 *H*5/j_s4	32 *H*6/*s*6	16 *K*8/*h*7
45	80 *H*8/*e*9	32 *H*6/j_s5	48 *H*6/*p*5	24 *K*7/*h*6
46	32 *H*8/*h*9	8 *H*5/*n*4	60 *H*7/*t*6	16 *F*8/*h*6
47	124 *H*12/*h*12	16 *H*6/*m*5	24 *H*8/*x*8	32 *N*6/*h*5
48	42 *H*11/*h*11	*24 H7/k6*	30 *H*7/*p*6	40 *N*8/*h*7
49	64 *H*10/*d*10	*18 H5/m4*	124 *H*7/*s*6	32 *K*7/h6
50	24 *H*9/*h*8	40 *H*6/*k*5	82 *H*7/*s*6	140 *E*8/*h*8
51	72 *H*9/*e*8	12 *H*5/*k*4	42 *H*7/*s*7	64 *T*7/*h*6
52	220 *H*12/*b*12	22 *H*5/*k*4	64 *H*7/*s*7	16 *M*8/*h*7
53	80 *H*10/*h*9	42 *H*5/*k*4	24 *H*7/*p*6	124 *F*7/*h*6
54	105 *H*9/*e*9	22 *H*6/*k*5	84 *H*7/*p*6	8 *M*5/*h*4
55	84 *H*11/*c*11	6 *H*6/*k*5	24 *H*8/*u*8	42 *P*6/*h*5
56	32 *H*9/*h*9	24 *H*8/*n*7	64 *H*6/*s*5	105 *E*9/*h*9
57	124 *H*10/*h*10	12 *H*8/*n*7	48 *H*6/*s*5	60 *F*8/*h*7
58	160 *H*11/*d*11	8 *H*8/*m*7	36 *H*8/*z*8	24 J_s6/*h*5
59	48 *H*9/*e*9	18 *H*8/*m*7	105 *H*8/*z*8	60 *N*7/*h*6
60	64 *H*8/*e*8	24 *H*7/*m*6	96 *H*6/s5	110 *H*11/*h*11
61	105 *H*7/*e*7	60 *H*8/*m*7	16 *H*6/*s*5	48 *H*8/*h*7
62	24 *H*5/*h*4	64 *H*6/j_s5	110 *H*7/*s*7	140 *D*9/*h*8
63	48 *H*5/*h*4	24 *H*6/*n*5	120 *H*8/*u*8	164 *E*8/*h*6
64	10 *H*5/*g*4	60 *H*7/*t*6	140 *H*7/*g*6	24 *K*7/*h*6
65	42 *H*6/*g*5	24 *H*8/*x*8	6 *H*5/*m*4	16 *F*8/*h*6
66	220 *H*8/*d*9	30 *H*7/*p*6	80 *H*9/*d*9	32 *N*6/*h*5
67	400 *H*8/*e*8	124 *H*7/*s*6	250 *H*7/*e*8	40 *N*8/*h*7
68	120 *H*8/*f*8	82 *H*7/*s*6	48 *H*7/*n*7	32 *K*7/*h*6
69	20 *H*7/*g*6	42 *H*7/*s*7	120 *H*6/*p*5	140 *E*8/*h*8
70	20 *H*7/*n*6	80 *H*9/*d*9	160 *H*11/*d*11	32 *F*7/*h*5
71	12 *H*7/j_s6	62 *F*7/*h*6	48 *H*9/*e*9	48 *N*7/*h*6
72	120 *H*6/*p*5	10 J_s8/*h*7	64 *H*8/*e*8	80 *G*6/*h*5
73	120 *E*8/*h*7	105 *D*8/*h*6	105 *H*7/*e*7	10 *K*6/*h*5
74	48 *H*7/*n*7	120 *E*8/*h*7	24 *H*5/*h*4	24 *K*7/*h*6
75	102 *E*8/*h*7	15 *D*8/*h*6	305 *H*7/*e*7	70 *K*6/*h*5
76	23 *H*9/*h*9	94 *H*8/*n*7	364 *H*6/*s*5	105 *E*9/*h*9
77	64 *H*8/*e*8	44 *H*7/*m*6	6 *H*6/*s*5	310 *H*11/*h*11
78	80 *H*10/*h*9	41 *H*5/*k*4	204 *H*7/*p*6	12 *F*7/*h*6
79	204 *H*5/*h*4	14 *H*6/j_s5	90 *H*7/*s*7	140 *D*9/*h*8
80	200 *H*7/*g*6	4 *H*7/*s*7	121 *H*6/*p*5	40 *E*8/*h*8
81	48 *H*6/*g*5	104 *H*8/*x*8	206 *H*5/*m*4	16 *F*8/*h*6
82	280 *H*12/*b*12	2 *H*5/*k*4	64 *H*7/*s*7	116 *M*8/*h*7
83	400 *H*5/*h*4	84 *H*6/*n*5	12 *H*8/*u*8	164 *E*8/*h*6
84	16 *H*11/*d*11	308 *H*8/*m*7	136 *H*8/*z*8	4 J_s6/*h*5

Продолжение табл.1

№ варианта	Посадки			
85	10 *H*5/*g*4	66 *H*7/*t*6	340 *H*7/*g*6	124 *K*7/*h*6
86	408 *H*7/*n*7	125 *E*8/*h*7	4 *H*5/*h*4	84 *K*7/*h*6
87	28 *H*7/*n*6	480 *H*9/*d*9	180 *H*11/*d*11	3 *F*7/*h*5
88	122 *H*8/*d*9	38 *H*7/*p*6	280 *H*9/*d*9	3 *N*6/*h*5
89	201 *H*8/*f*8	88 *H*7/*s*6	148 *H*7/*n*7	32 *K*7/*h*6
90	40 *H*8/*e*8	14 *H*7/*s*6	250 *H*7/*e*8	40 *N*8/*h*7
91	84 *H*11/*c*11	36 *H*6/*k*5	324 *H*8/*u*8	4 *P*6/*h*5
92	21 *H*7/j_s6	262 *F*7/*h*6	348 *H*9/*e*9	8 *N*7/*h*6
93	10 *H*7/*e*7	300 *H*8/*m*7	106 *H*6/*s*5	68 *H*8/*h*7
94	214 *H*10/*h*10	120 *H*8/*n*7	8 *H*6/*s*5	60 *F*8/*h*7
95	48 *H*9/*e*9	180 *H*8/*m*7	15 *H*8/*z*8	360 *N*7/*h*6
96	72 H9/e8	112 *H*5/*k*4	402 *H*7/*s*7	6 *T*7/*h*6
97	15H9/e9	202 *H*6/*k*5	84 *H*7/*p*6	8 *M*5/*h*4
98	12 H6/p5	70 J_s8/*h*7	364 *H*8/*e*8	80 *G*6/*h*5
99	330 H6/f7	56 *H*6/*m*5	12 *H*7/*s*6	120 *E*8/*h*7
100	124 H12/h12	48 *H*7/*n*7	24 *H*8/*x*8	3 *N*6/*h*5

Приложение Б

ЕДИНАЯ СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК

ПОЛЯ ДОПУСКОВ
И РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОСАДКИ

ГОСТ 25347-82
(СТ СЭВ 144-75)

Квалитеты 4 и 5

Интервал размеров, мм	Поля допусков														
	*g*4	*h*4	j_s4	*k*4	*m*4	*n*4	*g*5	*h*5	j_s5	*k*5	*m*5	*n*5	*p*5	*r*5	*s*5
	Предельные отклонения, мкм														
От 1 до 3	-2 -5	0 -3	+1,5 -1,5	+3 0	+5 +2	+7 +4	-2 -6	0 -4	+2,0 -2,0	+4 0	+6 + 2	+8 +4	+10 + 6	+14 +10	+18 +14
Свыше 3 до 6	-4 -8	0 -4	+2,0 -2,0	+5 + 1	+8 +4	+12 + 8	-4 -9	0 -5	+2,5 -2,5	+6 +1	+9 +4	+13 +8	+17 +12	+ 20 +15	+24 +19
Свыше 6 до 10	-5 -9	0 -4	+2,0 -2,0	+5 +1	+10 +6	+14 +10	-5 -11	0 -6	+3,0 -3,0	+ 7 + 1	+12 + 6	+16 +10	+21 +15	+25 +19	+ 29 +23
Свыше 10 до 14	-6 -11	0 -5	+2,5 -2,5	+6 +1	+12 + 7	+17 +11	-6 -14	0 -8	+4,0 -4,0	+9 +1	+15 +7	+20 +12	+26 +18	+31 +23	+36 +28
Свыше 14 до 18															
Свыше 18 до 24	-7 -13	0 -6	+3,0 -3,0	+8 +2	+14 + 8	+21 +15	-7 -16	0 -9	+4,5 -4,5	+11 +2	+17 + 8	+24 +15	+31 +22	+37 +18	+44 +35
Свыше 24 до 30															
Свыше 30 до 40	-9 -16	0 -7	+3,5 -3,5	+9 +2	+16 +9	+24 +17	-9 -20	0 -11	+5,5 -5,5	+13 +2	+20 +9	+28 +17	+37 +26	+45 +34	+54 +43
Свыше 40 до 50															
Свыше 50 до 65	-10 -18	0 -8	+4,0 -4,0	+10 +2	+19 +11	+ 28 + 20	-10 -23	0 -13	+6,5 -6,5	+15 +2	+24 +11	+33 +20	+45 +32	+ 54 +41	+ 66 +53
Свыше 65 до 80														+56 +43	+72 +59
Свыше 80 до 100	-12 -22	0 -10	+5,0 -5,0	+13 +3	+23 + 13	+33 +23	-12 -27	0 -15	+7,5 -7,5	+18 + 3	+28 +13	+38 +23	+52 +37	+ 66 +51	+86 +71
Свыше 100 до 120														+ 69 +54	+94 +79
Свыше 120 до 140	-14 -26	0 -12	+6,0 -6,0	+15 +3	+17 +15	+39 +27	-14 -32	0 -18	+9,0 -9,0	+21 +3	+33 +15	+45 +27	+61 +43	+ 81 +63	+110 +92
Свыше 140 до 160														+83 +65	+118 +100
Свыше 160 до 180														+86 +68	+126 +108
Свыше 180 до 200	-15 -29	0 -14	+7,0 -7,0	+18 +4	+31 +17	+45 +31	-15 -35	0 -20	+10,0 -10,0	+24 +4	+37 +17	+51 +31	+70 +50	+97 +77	+142 +122
Свыше 200 до 225														+100 +80	+150 +130
Свыше 225 до 250														+104 +84	+160 +140
Свыше 250 до 280	-17 -33	0 -16	+8.0 -8,0	+20 +4	+36 +20	+50 +34	-17 -40	0 -23	+11,5 -11,5	+27 +4	+43 +20	+57 +34	+79 +56	+117 +94	+181 +158
Свыше 280 до 315														+121 +98	+193 +170
Свыше 315 до 355	-18 -36	0 -18	+9,0 -9,0	+22 +4	+39 +11	+55 +37	-18 -43	0 -25	+12,5 -12,5	+29 +4	+46 +21	+62 +37	+87 +62	+133 +108	+215 +190
Свыше 355 до 400														+139 +114	+233 +208
Свыше 400 до 450	-20 -40	0 -20	+10, 0 -10,0	+25 + 5	+43 +23	+60 +40	-20 -47	0 -27	+13,5 -13,5	+32 +5	+50 +23	+67 +40	+95 +68	+153 +126	+259 +232
Свыше 450 до 500														+159 +132	+279 +252

Квалитет 6

Интервал размеров, мм	Поля допусков										
	*f*6	*g*6	*h*6	j_s6	*k*6	*m*6	*n*6	*p*6	*r*6	*s*6	*t*6
	Предельные отклонения, мкм										
От 1 до 3	-6 -12	-2 -8	0 -6	+3,0 -3,0	+6 0	+8 +1	+10 +4	+12 +6	+16 +10	+20 +14	-
Свыше 3 до 6	-10 -18	-4 -12	0 -8	+4,0 -4,0	+9 +1	+12 +4	+16 +8	+10 +12	+23 +15	+27 +19	-
Свыше 6 до 10	-13 -22	-5 -14	0 -9	+4,5 -4,5	+10 +1	+15 +6	+19 +10	+24 +15	+28 +19	+32 +23	-
Свыше 10 до 14	-16 -27	-6 -17	0 -11	+5,5 -5,5	+12 +1	+18 + 7	+23 +12	+29 +18	+34 +23	+39 +28	-
Свыше 14 до 18											
Свыше 18 до 24	-20 -33	-7 -20	0 -13	+6,5 -6,5	+15 +2	+21 +8	+ 28 + 15	+ 35 + 22	+41 +28	+48 +35	-
Свыше 24 до 30											+54 + 41
Свыше 30 до 40	-25 -41	-9 -25	0 -16	+8,0 -8,0	+18 +1	+25 +9	+33 +17	+42 +26	+50 +34	+59 +43	+ 64 + 48
Свыше 40 до 50											+ 70 +54
Свыше 50 до 65	-30 -49	-10 -29	0 -19	+ 9,5 -9,5	+21 +1	+30 +11	+39 +20	+51 +32	+60 +41	+72 +53	+85 +66
Свыше 65 до 80									+62 +43	+78 +59	+94 +75
Свыше 80 до 100	-36 -56	-12 -34	0 -22	+11,0 -11,0	+25 +3	+35 +13	+45 +23	+59 +37	+73 +51	+93 +71	+113 +91
Свыше 100 до 120									+76 +54	+101 +79	+126 +104
Свыше 120 до 140	-43 -68	-14 -39	0 -25	+12,5 -12,5	+28 +3	+40 +15	+52 +27	+68 +43	+88 +63	+117 +92	+147 +122
Свыше 140 до 160									+ 90 + 65	+125 +100	+159 +154
Свыше 160 до 180									+93 +68	+133 +108	+171 +146
Свыше 180 до 200	-50 -79	-15 -44	0 -29	+14,5 -14,5	+33 +4	+46 +17	+60 +31	+79 +50	+106 +77	+151 +122	+195 +166
Свыше 200 до 225									+109 +80	+159 +130	+209 +180
Свыше 225 до 250									+113 +84	+169 +140	+226 +196
Свыше 250 до 280	-56 -88	-17 -49	0 -32	+16,0 -16,0	+36 +4	+52 +20	+66 +34	+88 +56	+126 +94	+190 +158	+250 +218
Свыше 280 до 315									+130 +98	+202 +170	+272 +240
Свыше 315 до 355	-62 -98	-18 -54	0 -36	+18,0 -18,0	+40 +4	+57 +21	+73 +57	+98 +62	+144 +108	+226 +190	+304 +268
Свыше 355 до 400									+150 +114	+244 +208	+330 +294
Свыше 400 до 450	-68 -108	-20 -60	0 -40	+20,0 -20,0	+45 +5	+63 +23	+80 +40	+108 +68	+166 +126	+272 +232	+370 +330
Свыше 450 до 500									+172 +132	+292 +252	+400 +360

Квалитет 7

Интервал размеров, мм	Поля допусков								
	*e*7	*f*7	*h*7	j_s7	*k*7	*m*7	*n*7	*s*7	*u*7
	Предельные отклонения, мкм								
От 1 до 3	-14 -24	-6 -16	0 -10	+5 -5	+10 0	-	+14 +4	+24 +14	+28 +18
Свыше 3 до 6	-20 -32	-12 -22	0 -12	+6 -6	+13 +1	+16 +4	+20 +8	+31 +19	+35 +23
Свыше 6 до 10	-25 -40	-13 -28	0 -15	+7 -7	+16 +1	+21 +6	+25 +10	+38 23	+43 +28
Свыше 10 до 14	-32 -50	-16 -34	0 -18	+9 -9	+19 +1	+25 +7	+30 +12	+45 +28	+51 +33
Свыше 14 до 18									
Свыше 18 до 24	-40 -61	-20 -41	0 -21	+10 -10	+23 +2	+29 +8	+36 +15	+56 +35	+62 +41
Свыше 24 до 30									+69 +48
Свыше 30 до 40	-50 -75	-25 -50	0 -25	+12 -12	+27 +2	+34 +9	+42 +17	+68 +43	+85 +60
Свыше 40 до 50									+95 +70
Свыше 50 до 65	-60 -90	-30 -60	0 -30	+15 -15	+32 +2	+41 +11	+50 +20	+83 +53	+117 +87
Свыше 65 до 80								+89 +59	+132 +102
Свыше 80 до 100	-72 -107	-36 -71	0 -35	+17 -17	+38 +3	+48 +13	+58 +23	+106 +71	+159 +124
Свыше 100 до 120								+114 +79	+179 +144
Свыше 120 до 140	-85 -125	-43 -83	0 -40	+20 -20	+43 +3	+55 +15	+67 +27	+132 +92	+210 +170
Свыше 140 до 160								+140 +100	+230 +190
Свыше 160 до 180								+148 +108	+250 +210
Свыше 180 до 200	-100 -145	-50 -96	0 -46	+23 -23	+50 +4	+63 +17	+77 +31	+168 +122	+282 +236
Свыше 200 до 225								+176 +130	+304 +259
Свыше 225 до 250								+186 +140	+330 +284
Свыше 250 до 280	-110 -162	-56 -108	0 -52	+26 -26	+56 +4	+72 +20	+86 +34	+210 +158	+367 +315
Свыше 280 до 315								+222 +170	+402 +350
Свыше 315 до 355	-125 -182	-62 -119	0 -57	+28 -28	+61 +4	+78 +21	+94 +37	+247 +190	+447 +390
Свыше 355 до 400								+265 +208	+492 +435
Свыше 400 до 450	-135 -198	-68 -131	0 -63	+31 -31	+68 +5	+86 +23	+103 +40	+295 +232	+553 +490
Свыше 450 до 500								+315 +252	+603 +540

Квалитеты 8 и 9

Интервал размеров, мм	Поля допусков													
	*c*8	*d*8	*e*8	*f*8	*h*8	j_s8*	*u*8	*x*8	*z*8	*d*9	*e*9	*f*9	*h*9	j_s9*
	Предельные отклонения, мкм													
От 1 до 3	-60 -74	-20 -34	-14 -28	-6 -20	0 -14	+7 - 7	+32 +18	+34 + 20	+ 40 +25	-20 -45	-14 -39	-6 -31	0 --25	+ 12 -12
Свыше 3 до 6	-70 -88	-30 -48	-20 -38	-10 -28	0 -18	+9 -9	+41 +23	+46 +28	+53 -35	-30 -60	-20 -50	-10 -40	0 -30	+15 -15
Свыше 6 до 10	-80 -102	-40 -62	-25 -47	-13 -35	0 -22	+11 -11	+ 50 +28	+56 +34	+64 + 42	-40 -76	-25 -61	-13 -49	0 -36	+18 -18
Свыше 10 до 14	-95	-50	-32	-16	0	+13	+ 60	+ 67 +40	+ 77 +50	-50	-32	-16	0	+21
Свыше 14 до 18	-122	-77	-59	-43	-27	-13	+ 33	+72 +45	+87 +60	-93	-75	-59	-43	-21
Свыше 18 до 24	-110	-65	-40	-20	0	+16	+74 +41	+87 + 54	+106 +73	-65	-40	-20	0	+26
Свыше 24 до 30	-143	-93	-73	-53	-33	-16	+81 +48	+97 +64	+121 +88	-117	-92	-72	-52	-26
Свыше 30 до 40	-120 -159	-80	-50	-25	0	+19	+99 +60	+119 +80	+151 +112	-80	-50	-25	0	+31
Свыше 40 до 50	-130 -169	-119	-89	-64	-39	-19	+109 +70	+136 +97	+175 +136	-142	-112	-87	-62	-31
Свыше 50 до 65	-140 -186	-100	-60	-30	0	+23	+133 +87	+168 +122	+218 +172	+100	-60	-30	0	+37
Свыше 65 до 80	-150 -196	-146	-106	-76	-46	-23	+148 +102	+192 +146	+256 +210	-174	-134	-104	-74	-37
Свыше 80 до 100	-170 -224	-120	-72	-36	0	+27	+178 +124	+232 +178	+312 +258	-120	-72	-36	0	+43
Свыше 100 до 120	-180 -234	-174	-126	-90	-54	-27	+198 +144	+264 +210	+354 +310	-207	-159	-123	-87	-43
Свыше 120 до 140	-200 -283						+233 +170	+311 +248	+428 +355					
Свыше 140 до 160	-210 -273	-145 -208	-85 -148	-43 -105	0 -63	+31 -31	+253 +190	+343 +280	+478 +415	-145 -245	-85 -185	-43 -143	0 -100	+50 - 50
Свыше 160 до 180	-230 -293						+273 +210	+373 +310	+528 +465					
Свыше 180 до 200	-240 -312						+308 +236	+422 +350	+592 +520					
Свыше 200 до 225	-260 -332	-170 -242	-100 -172	-50 -122	0 -72	+36 -36	+330 +258	+457 +385	+647 +575	-170 -285	-100 -215	-50 -165	0 -115	+57 -57
Свыше 225 до 250	-280 -352						+356 +284	+497 +425	+712 +640					
Свыше 250 до 280	-300 -381						+396 +315	+556 +475	+791 +710					
Свыше 280 до 315	-330 -411	-190 -271	-110 -191	-56 -137	0 -81	+40 -40	+431 +350	+606 +525	+871 +790	-190 -320	-110 -240	-56 -186	0 -130	+65 -65
Свыше 315 до 355	-360 -499						+479 +390	+ 679 +590	+989 +900					
Свыше 355 до 400	-400 -489	-210 -299	-125 -214	-62 -151	0 -89	+44 -44	+524 +435	+749 +660	+1089 +1000	-210 -350	-125 -265	-62 -202	0 -140	+70 -70
Свыше 400 до 450	-440 -537						+587 +490	+837 +740	+1197 +1100					
Свыше 450 до 500	-480 -577	-230 -327	-135 -232	-68 -165	0 -97	+48 -48	+637 +540	+917 +820	+1347 +1250	-230 -385	-135 -290	-68 -223	0 -155	+77 -77

Квалитеты от 10 до 12

Интервал размеров, мм	Поля допусков											
	*d*10	*h*10	j_s10*	*a*11	*b*11	*c*11	*d*11	*h*11	j_s11*	*b*12	*h*12	j_s12*
	Предельные отклонения, мкм											
От 1 до 3	-20 -60	0 -40	+20 -20	-270 -330	-140 -200	- 60 -120	-20 -80	0 -60	+30 -30	-140 -240	0 -100	+50 -50
Свыше 3 до 6	-30 -78	0 -48	+24 -24	-270 -345	-140 -215	- 70 -145	-30 -105	0 -75	+37 -37	-140 -260	0 -120	+60 -60
Свыше 6 до 10	-40 -98	0 -58	+29 -29	-280 -370	-150 -240	-80 -170	-40 -130	0 -90	+45 -45	-150 -300	0 -150	+75 -75
Свыше 10 до 14	-50 -120	0 -70	+35 -35	-290 -400	-150 -260	-95 -205	-50 -160	0 -110	+55 -55	-150 -330	0 -180	+90 -90
Свыше 14 до 18												
Свыше 18 до 24	-65 -149	0 -84	+42 -42	-300 -430	-160 -290	-110 -240	-65 -195	0 -130	+65 -65	-160 -370	0 -210	+105 -105
Свыше 24 до 30												
Свыше 30 до 40	-80 -180	0 -100	+50 -50	-310 -470	-170 -330	-120 -280	-80 -240	0 -160	+80 -80	-170 -420	0 -250	+125 -125
Свыше 40 до 50				-320 -480	-180 -340	-130 -290				-180 -430		
Свыше 50 до 65	-100 -220	0 -120	+60 -60	-340 -530	-190 -380	-140 -330	-100 -290	0 -190	+95 -95	-190 -490	0 -300	+150 -150
Свыше 65 до 80				-360 -550	-200 -390	-150 -340				-200 -500		
Свыше 80 до 100	-120 -260	0 -140	+70 -70	-380 -600	-220 -440	-170 -390	-120 -340	0 -220	+110 -110	-220 -570	0 -350	+175 -175
Свыше 100 до 120				-410 -630	-240 -460	-180 -400				-240 -590		
Свыше 120 до 140	-145 -305	0 -160	+80 -80	-460 -710	-260 -510	-200 -450	-145 -395	0 -250	+125 -125	-260 -660	0 -400	+200 -200
Свыше 140 до 160				-520 -770	-280 -530	-210 -460				-280 -680		
Свыше 160 до 180				-580 -830	-310 -560	-230 -480				-310 -710		
Свыше 180 до 200	-170 -355	0 -185	+ 92 -92	-660 -950	-340 -630	-240 -530	-170 -460	0 -290	+145 -145	-340 -800	0 -460	+230 -230
Свыше 200 до 225				-740 -1030	-380 -670	-260 -550				-380 -840		
Свыше 225 до 250				-820 -1110	-420 -710	-280 -570				-420 -880		
Свыше 250 до 280	-190 -400	0 -210	+105 -105	-920 -1240	-480 -800	-300 -620	-190 -510	0 -320	+160 -160	-480 -1000	0 -520	+260 -260
Свыше 280 до 315				-1050 -1370	-540 -860	-330 -650				-540 -1060		
Свыше 315 до 355	-210 -440	0 -230	+115 -115	-1200 -1560	-600 -960	-360 -720	-210 -570	0 -360	+180 -180	-600 -1170	0 -570	+285 -285
Свыше 355 до 400				-1350 -1710	-680 -1040	-400 -760				-680 -1250		
Свыше 400 до 450	-230 -480	0 -250	+125 -125	-1500 -1900	-760 -1160	-440 -840	-230 -630	0 -400	+200 -200	-760 -1390	0 -630	+315 -315
Свыше 450 до 500				-1650 -2050	-840 -1240	-480 -880				-840 -1470		

Квалитеты от 13 до 17

Интервал размеров, мм	Поля допусков									
	*h*13*	j_s13*	*h*14*	j_s14*	*h*15*	j_s15*	*h*16*	j_s16*	*h*17*	j_s17*
	Предельные отклонения, мкм									
От 1 до 3	0 -140	+70 -70	0 -250	+125 -125	0 -400	+200 -200	0 -600	+300 -300	0 -1000	+500 -500
Свыше 3 до 6	0 -180	+90 -90	0 -300	+150 -150	0 -480	+240 -240	0 -750	+375 -375	0 -1200	+600 -600
Свыше 6 до 10	0 -220	+110 -110	0 -360	+180 -180	0 -580	+290 -290	0 -900	+450 -450	0 -1500	+750 -750
Свыше 10 до 14	0 -270	+135 -135	0 -430	+215 -215	0 -700	+350 -350	0 -1100	+550 -550	0 -1800	+900 -900
Свыше 14 до 18										
Свыше 18 до 24	0 -330	+165 -166	0 -520	+260 -260	0 -840	+420 -420	0 -1300	+650 -650	0 -2100	+1050 -1050
Свыше 24 до 30										
Свыше 30 до 40	0 -390	+195 -195	0 -620	+310 -310	0 -1000	+500 -500	0 -1600	+800 -800	0 -2500	+1250 -1250
Свыше 40 до 50										
Свыше 50 до 65	0 -460	+230 -230	0 -740	+370 -370	0 -1200	+600 -600	0 -1900	+950 -950	0 -3000	+1500 -1500
Свыше 65 до 80										
Свыше 80 до 100	0 -540	+270 -270	0 -870	+435 -435	0 -1400	+700 -700	0 -2200	+1100 -1100	0 -3500	+1750 -1750
Свыше 100 до 120										
Свыше 120 до 140	0 -630	+315 -315	0 -1000	+500 -500	0 -1600	+800 -800	0 -2500	+1250 -1250	0 -4000	+2000 -2000
Свыше 140 до 160										
Свыше 160 до 180										
Свыше 180 до 200	0 -720	+360 -360	0 -1150	+575 -575	0 -1850	+925 -925	0 -2900	+1450 -1450	0 -4600	+2300 -2300
Свыше 200 до 225										
Свыше 225 до 250										
Свыше 250 до 280	0 -810	+405 -405	0 -1300	+650 -650	0 -2100	+1050 -1050	0 -3200	+1600 -1600	0 -5200	+2600 -2600
Свыше 280 до 315										
Свыше 315 до 355	0 -890	+445 -445	0 -1400	+700 -700	0 -2300	+1150 -1150	0 -3600	+1800 -1800	0 -5700	+2850 -2850
Свыше 355 до 400										
Свыше 400 до 450	0 -970	+485 -485	0 -1550	+775 -776	0 -2500	+1250 -1250	0 -4000	+2000 -2000	0 -6300	+3150 -3150
Свыше 450 до 500										

Квалитеты 5 и 6

Интервал размеров, мм	Поля допусков												
	*G*5	*H*5	J_s5	*K*5	*M*5	*N*5	*G*6	*H*6	J_s6	*K*6	*M*6	*N*6	*P*6
	Предельные отклонения, мкм												
От 1 до 3	+6 +2	+4 0	+2,0 -2,0	0 -4	-2 -6	-4 -8	+8 +2	+6 0	+3,0 -3,0	0 -5	-2 -8	-4 -10	-6 -12
Свыше 3 до 6	+9 +4	+5 0	+2,5 -2,5	0 -5	-3 -8	- 7 -12	+12 +4	+8 0	+4,0 -4,0	+2 -6	- 1 - 9	- 5 -13	- 9 -17
Свыше 6 до 10	+11 +5	+6 0	+3,0 -3,0	+1 -5	-4 -10	-8 -14	+14 +5	+9 0	+4,5 -4,5	+2 - 7	-3 -12	- 7 -16	-12 -21
Свыше 10 до 14	+14 +6	+8 0	+4,0 -4,0	+2 -6	-4 -12	-9 -17	+17 +6	+11 0	+ 5,5 -5,5	+2 - 9	-4 -15	- 9 -20	-15 -26
Свыше 14 до 18													
Свыше 18 до 24	+16 +7	+9 0	+4,5 -4,5	+1 -8	-5 -14	-12 -21	+20 +7	+13 0	+6,5 -6,5	+2 -11	-4 -17	-11 -24	-18 -31
Свыше 24 до 30													
Свыше 30 до 40	+20 +9	+11 0	+5,5 -5,5	+2 -9	-5 -16	-13 -24	+25 +9	+16 0	+8,0 -8,0	+3 -13	-4 -20	-12 -28	-21 -37
Свыше 40 до 50													
Свыше 50 до 65	+23 +10	+13 0	+6,5 -6,5	+3 -10	-6 -19	-15 -28	+29 +10	+19 0	+9,5 -9,5	+4 -15	-5 -24	-14 -33	-26 -45
Свыше 65 до 80													
Свыше 80 до 100	+27 +12	+15 0	+7,5 -7,5	+2 -13	-8 -23	-18 -33	+34 +12	+22 0	+11,0 -11,0	+4 -18	-6 -28	-16 -38	-30 -52
Свыше 100 до 120													
Свыше 120 до 140	+32 +14	+18 0	+9,0 -9,0	+3 -15	-9 -27	-21 -39	+39 +14	+25 0	+12,5 -12,5	+4 -21	-8 -33	-20 -45	-36 -61
Свыше 140 до 160													
Свыше 160 до 180													
Свыше 180 до 200	+35 +15	+20 0	+10,0 -10,0	+2 -18	-11 -31	-25 -45	+44 +15	+29 0	+14,5 -14,5	+5 -24	-8 -37	-22 -51	-41 -70
Свыше 200 до 225													
Свыше 225 до 250													
Свыше 250 до 280	+40 +17	+23 0	+11,5 -11,5	+3 -20	-13 -36	-27 -50	+49 +17	+32 0	+16,0 -16,0	+5 -27	-9 -41	-25 -57	-47 -79
Свыше 280 до 315													
Свыше 315 до 355	+43 +18	+25 0	+12,5 -12.5	+3 -22	-14 -39	-30 -55	+54 +18	+36 0	+18,0 -18,0	+7 -29	-10 -46	-26 -62	-51 -87
Свыше 355 до 400													
Свыше 400 до 450	+47 +20	+27 0	+13,5 -13,5	+2 -25	-16 -43	-33 -60	+60 +20	+40 0	+20,0 - 20,0	+8 -32	-10 -50	-27 -67	-55 -95
Свыше 450 до 500													

Квалитет 7

Интервал размеров, мм	Поля допусков										
	*F*7	*G*7	*H*7	J_s7	*K*7	*M*7	*N*7	*P*7	*R*7	*S*7	*T*7
	Предельные отклонения, мкм										
От 1 до 3	+16 +6	+12 +2	+10 0	+5 -5	0 -10	-2 -12	-4 -14	-6 -16	-10 -20	-14 -24	-
Свыше 3 до 6	+22 +10	+16 +4	+12 0	+6 -6	+3 -9	0 -12	-4 -16	-8 -20	-11 -23	-15 -27	-
Свыше 6 до 10	+28 +13	+20 +5	+15 0	+7 -7	+5 -10	0 -15	-4 -19	-9 -24	-13 -28	-17 -32	-
Свыше 10 до 14	+34 +16	+24 +6	+18 0	+9 -9	+6 -12	0 -18	-5 -23	-11 -29	-16 -34	-21 -39	-
Свыше 14 до 18											
Свыше 18 до 24	+41 +20	+28 +7	+21 0	+10 -10	+6 -15	0 -21	-7 -28	-14 -35	-20 -41	-27 -48	-
Свыше 24 до 30											-33 -54
Свыше 30 до 40	+50 +25	+34 +9	+25 0	+12 -12	+7 -18	0 -25	-8 -33	-17 -42	-25 -50	-34 -59	-39 -64
Свыше 40 до 50											-45 -70
Свыше 50 до 65	+60 +30	+40 +10	+30 0	+15 -15	+9 -21	0 -30	-9 -39	-21 -51	-30 -60	-42 -72	-55 -85
Свыше 65 до 80									-32 -62	-48 -78	-64 -94
Свыше 80 до 100	+71 +36	+47 +12	+35 0	+17 -17	+10 -25	0 -35	-10 -45	-24 -59	-38 -73	-58 -93	-78 -113
Свыше 100 до 120									-41 -76	-66 -101	-91 -126
Свыше 120 до 140	+83 +43	+54 +14	+40 0	+20 -20	+12 -28	0 -40	-12 -52	-28 -68	-48 -88	-77 -117	-107 -147
Свыше 140 до 160									-50 -90	-85 -125	-119 -159
Свыше 160 до 180									-53 -93	-93 -133	-131 -171
Свыше 180 до 200	+96 +50	+61 +15	+46 0	+23 -23	+13 -33	0 -46	-14 -60	-33 -79	-60 -106	-105 -151	-149 -195
Свыше 200 до 225									-63 -109	-113 -159	-163 -209
Свыше 225 до 250									-67 -113	-123 -169	-179 -225
Свыше 250 до 280	+108 +56	+69 +17	+52 0	+26 -26	+16 -36	0 -52	-14 -66	-36 -88	-74 -126	-138 -190	-198 -250
Свыше 280 до 315									-78 -130	-150 -202	-220 -272
Свыше 315 до 355	+119 +62	+75 +18	+57 0	+28 -28	+17 -40	0 -57	-16 -73	-41 -98	-87 -144	-169 -226	-247 -304
Свыше 355 до 400									-93 -150	-187 -244	-273 -330
Свыше 400 до 450	+131 +68	+83 +20	+63 0	+31 -31	+18 -45	0 -63	-17 -80	-45 -108	-103 -166	-209 -272	-307 -370
Свыше 450 до 500									-109 -172	-229 -292	-337 -400

Квалитеты 8 и 9

Интервал размеров, мм	Поля допусков													
	*D*8	*E*8	*F*8	*H*8	J_s8	*K*8	*M*8	*N*8	*U*8	*D*9	*E*9	*F*9	*H*9	J_s9*
	Предельные отклонения, мкм													
От 1 до 3	+34 +20	+28 +14	+20 +6	+14 0	+7 -7	0 -14	-	-4 -18	-18 -32	+45 +20	+39 +14	+31 +6	+25 0	+12 -12
Свыше 3 до 6	+48 +30	+38 +20	+28 +10	+18 0	+9 -9	+5 -13	+2 -16	-2 -20	-23 -41	+60 +30	+50 +20	+40 +10	+30 0	+15 -15
Свыше 6 до 10	+62 +40	+47 +25	+35 +13	+22 0	+11 -11	+6 -16	+1 -21	-3 -25	-28 -50	+76 +40	+61 +25	+49 +13	+36 0	+18 -18
Свыше 10 до 14	+77 +50	+59 +32	+43 +16	+27 0	+13 -13	+8 -19	+2 -25	-3 -30	-33 -60	+93 +50	+75 +32	+59 +16	+43 0	+21 -21
Свыше 14 до 18														
Свыше 18 до 24	+98 +65	+73 +40	+53 +20	+33 0	+16 -16	+10 -23	+4 -29	-3 -36	-41 -74	+117 +65	+92 +40	+72 +20	+52 0	+26 -26
Свыше 24 до 30									-48 -81					
Свыше 30 до 40	+119 +80	+89 +50	+54 +25	+39 0	+19 -19	+12 -27	+5 -34	-3 -42	-60 -99	+142 +80	+112 +50	+87 +25	+62 0	+31 -31
Свыше 40 до 50									-70 -109					
Свыше 50 до 65	+146 +100	+106 +60	+76 +30	+46 0	+23 -23	+14 -32	+5 -41	-4 -50	-87 -133	+174 +100	+134 +60	+104 +30	+74 0	+37 -37
Свыше 65 до 80									-102 -148					
Свыше 80 до 100	+174 +120	+126 +72	+90 +36	+54 0	+27 -27	+16 -38	+6 -48	-4 -58	-124 -178	+207 +120	+159 +72	+126 +36	+87 0	+43 -43
Свыше 100 до 120									-144 -198					
Свыше 120 до 140	+208 +145	+148 +85	+106 +43	+63 0	+31 -31	+20 -43	+8 -55	-4 -67	-170 -233	+245 +145	+185 +85	+143 +43	+100 0	+50 -50
Свыше 140 до 160									-190 -253					
Свыше 160 до 180									-210 -273					
Свыше 180 до 200	+242 +170	+172 +100	+122 +50	+72 0	+36 -36	+22 -50	+9 -63	-5 -77	-236 -308	+285 +170	+215 +100	+165 +50	+115 0	+57 -57
Свыше 200 до 225									-258 -330					
Свыше 225 до 250									-284 -356					
Свыше 250 до 280	+271 +190	+191 +110	+137 +56	+81 0	+40 -40	+25 -56	+9 -72	-5 -86	-315 -396	+320 +190	+240 +110	+186 +56	+130 0	+65 -65
Свыше 280 до 315									-350 -431					
Свыше 315 до 355	+299 +210	+214 +125	+151 +62	+89 0	+44 -44	+28 -61	+11 -78	-5 -94	-390 -479	+350 +210	+265 +125	+202 +62	+140 0	+70 -70
Свыше 355 до 400									435 -524					
Свыше 400 до 450	+327 +230	+232 +135	+165 +68	+97 0	+48 -48	+29 -68	+11 -86	-6 -103	-490 -587	+385 +230	+290 +135	+223 +68	+155 0	+77 -77
Свыше 450 до 500									-540 -637					

Квалитеты от 10 до 12

Интервал размеров, мм	Поля допусков											
	*D*10	*H*10	J_s10	*A*11	*B*11	*C*11	*D*11	*H*11	J_s11*	*B*12	*H*12	J_s12*
	Предельные отклонения, мкм											
От 1 до 3	+60 +20	+40 0	+20 -20	+330 +270	+200 +140	+120 +60	+80 +20	+60 0	+30 -30	+240 +140	+100 0	+50 -50
Свыше 3 до 6	+78 +30	+48 0	+24 -24	+345 +270	+215 +140	+145 +70	+105 +30	+75 0	+37 -37	+260 +140	+120 0	+60 -60
Свыше 6 до 10	+98 +40	+58 0	+29 -29	+370 +280	+240 +150	+170 +80	+130 +40	+90 0	+45 -45	+300 +150	+150 0	+75 -75
Свыше 10 до 14	+120 +50	+70 0	+35 -35	+400 +290	+260 +150	+205 +95	+160 +50	+110 0	+55 -55	+330 +150	+180 0	+90 -90
Свыше 14 до 18												
Свыше 18 до 24	+149 +65	+84 0	+42 -42	+430 +300	+290 +160	+240 +110	+195 +65	+130 0	+65 -65	+370 +160	+210 0	+105 -105
Свыше 24 до 30												
Свыше 30 до 40	+180 +80	+100 0	+50 -50	+470 +310	+330 +170	+280 +120	+240 +80	+160 0	+80 -80	+420 +170	+250 0	+125 -125
Свыше 40 до 50				+480 +320	+340 +180	+290 +130				+430 +180		
Свыше 50 до 65	+220 +100	+120 0	+60 -60	+530 +340	+380 +190	+330 +140	+290 +100	+190 0	+95 -95	+490 +190	+300 0	+150 -150
Свыше 65 до 80				+550 +360	+390 +200	+340 +150				+500 +200		
Свыше 80 до 100	+260 +120	+140 0	+70 -70	+600 +380	+440 +220	+390 +170	+340 +120	+220 0	+110 -110	+570 +220	+350 0	+175 -175
Свыше 100 до 120				+630 +410	+460 +240	+400 +180				+590 +240		
Свыше 120 до 140	+305 +145	+160 0	+80 -80	+710 +460	+510 +260	+450 +200	+395 +145	+250 0	+125 -125	+660 +260	+400 0	+200 -200
Свыше 140 до 160				+770 +520	+530 +280	+460 +210				+680 +280		
Свыше 160 до 180				+830 +580	+560 +310	+480 +230				+710 +310		
Свыше 180 до 200	+355 +170	+185 0	+ 92 -92	+950 +660	+630 +340	+530 +240	+460 +170	+290 0	+145 -145	+800 +340	+460 0	+230 -230
Свыше 200 до 225				+1030 +740	+670 +380	+550 +260				+840 +380		
Свыше 225 до 250				+1110 +820	+710 +420	+570 +280				+880 +420		
Свыше 250 до 280	+400 +190	+210 0	+105 -105	+1240 +920	+800 +480	+620 +300	+510 +190	+320 0	+160 -160	+1000 +480	+520 0	+260 -260
Свыше 280 до 315				+1370 +1050	+860 +540	+650 +330				+1060 +540		
Свыше 315 до 355	+440 +210	+230 0	+115 -115	+1560 +1200	+960 +600	+720 +360	+570 +210	+360 0	+180 -180	+1170 +600	+570 0	+285 -285
Свыше 355 до 400				+1710 +1350	+1040 +680	+760 +400				+1250 +680		
Свыше 400 до 450	+480 +230	+250 0	+125 -125	+1900 +1500	+1160 +760	+840 +440	+630 +230	+400 0	+200 -200	+1390 +760	+630 0	+315 -315
Свыше 450 до 500				+2050 +1650	+1240 +840	+880 +480				+1470 +840		

Квалитеты от 13 до 17

Интервал размеров, мм	Поля допусков									
	*H*13*	J_s13*	*H*14*	J_s14*	*H*15*	J_s15*	*H*16*	J_s16*	*H*17*	J_s17*
	Предельные отклонения, мкм									
От 1 до 3	+140 0	+70 -70	+250 0	+125 -125	+400 0	+200 -200	+600 0	+300 -300	+1000 0	+500 -500
Свыше 3 до 6	+180 0	+90 -90	+300 0	+150 -150	+480 0	+240 -240	+750 0	+375 -375	+1200 0	+600 -600
Свыше 6 до 10	+220 0	+110 -110	+360 0	+180 -180	+580 0	+290 -290	+900 0	+450 -450	+1500 0	+750 -750
Свыше 10 до 14	+270 0	+135 -135	+430 0	+215 -215	+700 0	+350 -350	+1100 0	+550 -550	+1800 0	+900 -900
Свыше 14 до 18										
Свыше 18 до 24	+330 0	+165 -166	+520 0	+260 -260	+840 0	+420 -420	+1300 0	+650 -650	+2100 0	+1050 -1050
Свыше 24 до 30										
Свыше 30 до 40	+390 0	+195 -195	+620 0	+310 -310	+1000 0	+500 -500	+1600 0	+800 -800	+2500 0	+1250 -1250
Свыше 40 до 50										
Свыше 50 до 65	+460 0	+230 -230	+740 0	+370 -370	+1200 0	+600 -600	+1900 0	+950 -950	+3000 0	+1500 -1500
Свыше 65 до 80										
Свыше 80 до 100	+540 0	+270 -270	+870 0	+435 -435	+1400 0	+700 -700	+2200 0	+1100 -1100	+3500 0	+1750 -1750
Свыше 100 до 120										
Свыше 120 до 140	+630 0	+315 -315	+1000 0	+500 -500	+1600 0	+800 -800	+2500 0	+1250 -1250	+4000 0	+2000 -2000
Свыше 140 до 160										
Свыше 160 до 180										
Свыше 180 до 200	+720 0	+360 -360	+1150 0	+575 -575	+1850 0	+925 -925	+2900 0	+1450 -1450	+4600 0	+2300 -2300
Свыше 200 до 225										
Свыше 225 до 250										
Свыше 250 до 280	+810 0	+405 -405	+1300 0	+650 -650	+2100 0	+1050 -1050	+3200 0	+1600 -1600	+5200 0	+2600 -2600
Свыше 280 до 315										
Свыше 315 до 355	+890 0	+445 -445	+1400 0	+700 -700	+2300 0	+1150 -1150	+3600 0	+1800 -1800	+5700 0	+2850 -2850
Свыше 355 до 400										
Свыше 400 до 450	+970 0	+485 -485	+1550 0	+775 -776	+2500 0	+1250 -1250	+4000 0	+2000 -2000	+6300 0	+3150 -3150
Свыше 450 до 500										

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНА
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Б1.В.09.06 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

1. Общие положения

Курсовая работа – одна из важнейших форм самостоятельной работы студентов, способствующая углубленному изучению курса «Технические измерения и приборы», позволяющая исследовать приобретенные знания, совершенствовать навыки литературного изложения своих мыслей с использованием общенаучной терминологии.

В ходе подготовки и написания курсовой работы студенты приобретают навыки самостоятельного изучения определенной проблемы и умения самостоятельно делать обобщения.

Работа студентов над курсовой работой проходит следующие этапы:

- выбор темы исследования;
- составление библиографии по рассматриваемой проблеме;
- изучение учебной и специальной литературы, нормативных актов, статистических данных, общественно-политической практики;
- составление плана работы;
- написание текста работы и ее оформление с последующим представлением для рецензирования на кафедру.

1.1 Выбор темы курсовой работы

Студент знакомится с тематикой курсовых работ, содержащейся в данных методических рекомендациях, и выбирает заинтересовавшую его тему. При выборе темы рекомендуется исходить из интереса к той или иной проблеме, уже накопленного жизненного опыта. Необходимо также учитывать, что узкая, специальная тема потребует глубокого научного исследования проблемы, анализа источников различного вида.

При этом работа над одной темой нескольких обучаемых не допускается.

С разрешения руководства кафедры студент может выбрать тему, которая не значится в указанном перечне.

Сведения об избранной теме подаются на кафедру в установленные сроки.

Если в отведенный период времени обучаемым тема не избрана, она может быть определена преподавателем, ведущим занятие.

2. Примерная тематика курсовых работ

1. Приборы для измерения температуры.
2. Приборы для измерения давления.
3. Принцип работы пирометры излучения.
4. Измерение переменных и постоянных напряжений электронным

вольтметром.

5. Изучение принципа действия электронно-лучевого осциллографа.

6. Измерение частоты переменного тока и коэффициента мощности с помощью электронного осциллографа и частотомера.

7. Измерение температуры бесконтактным методом.

8. Методы и средства измерения переменных токов.

9. Принцип работы приборы электродинамической системы.

10. Принцип работы приборы Ферродинамические приборы

11. Автоматические измерительные приборы с дифференциально трансформаторными и ферро-динамическими преобразователями.

12. Принцип работы термоэлектрические преобразователи.

13. Тензорезистивные манометры. Схемы их подключения.

14. Выбор средств измерения температуры на узле учета нефти.

15. Методы и приборы для измерения вязкости веществ.

16. Принцип работы биполярного транзистора.

17. Принцип работы полярного транзистора.

18. Бесконтактные методы и приборы для измерения расхода веществ (электромагнитные, ультразвуковые).

19. Выбор средства измерения давления на входе установки осушки газа.

20. Методы и приборы для измерения физических свойств веществ. Плотномеры.

21. Выбор средства измерения уровня в электродегидраторе на установке подготовки нефти.

22. Пирометры излучения.

23. Выбор средства измерения давления перегретого пара котельного агрегата.

24. Термоэлектрические преобразователи.

25. Выбор средства измерения температуры верха ректификационной колонны.

26. Принцип работы магнитоэлектрические приборы.

27. Преобразователь э.д.с. термопары и сопротивления термометра в ток.

28. Выбор средства измерения давления верха ректификационной колонны.

29. Принцип работы Пьезоэлектрические датчики.

30. Исследование датчиков углового перемещения.

31. Исследование датчиков частоты вращения.

32. Выбор средства измерения давления перед низкотемпературным сепаратором.

33. Одинарный индуктивный датчики.

34. Выбор средства измерения и сигнализации температуры в дренажной

емкости.

35. Принцип работы магнитоэлектрические приборы.

36. Индукционные преобразователи.

37. Выбор средства измерения давления в барабане котла.

38. Измерение мощностей и энергии.

39. Выбор средства измерения температуры в низкотемпературном сепараторе.

40. Классификация и принципы построения цифровые измерительные приборы (ЦИП).

41. Цифровые измерительные приборы основных видов и назначений.

42. Выбор средства измерения температуры пара для испарителя.

43. Измерительные мосты постоянного и переменного токов.

44. Цифровые измерительные приборы (ЦИП).

45. Выбор средства измерения и сигнализации температуры в дренажной емкости.

46. Измерения и регистрация изменяющихся во времени электрических величин. Электронно-лучевой осциллограф.

47. Метод измерения индуктивности, добротности, емкости и тангенса угла потерь.

3. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы

3.1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В настоящее время чрезвычайно расширяется ассортимент измерительных средств общего и специального назначения (датчиков, приборов и измерительных систем), устройство и применение которых осваивается студентами.

При курсовом проектировании ***студент должен***:

- развить навыки самостоятельной творческой работы;
- использовать элементы научно-исследовательского подхода при решении инженерных задач.

Выполнение курсового проекта должно способствовать закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых студентами в процессе изучения настоящего курса: знаний принципа действия; устройства основных узлов и приборов в целом; особенности характеристик и прикладные вопросы используемых измерительных устройств; общие соображения по выбору конкретных средств измерения (СИ), имея в виду их особенности, качество, возможность сочетания и обслуживания с другими устройствами для измерений и автоматизации; эксплуатационные характеристики при использовании СИ; правила

приемки и поверки СИ. Кроме того, в процессе работы усваиваются навыки применения этих знаний к комплексным разработкам конкретных инженерных проблем, подготавливая тем самым студентов к выполнению дипломного проектирования и к текущей самостоятельной работе на производстве. Все это преследует цель – развитие способностей к самостоятельному инженерному творчеству.

Наряду с этим выполнение курсового проекта должно научить студентов пользоваться всякого рода справочной литературой, каталогами и типовыми проектными разработками отечественных и зарубежных фирм. В ходе курсового проектирования студентам необходимо освоить практику проведения расчетов, применяемых для конкретных СИ, при оценке погрешностей результатов измерений в реальных условиях эксплуатации, а также научиться технически грамотно составлять пояснительные записки, включая составление спецификации по контрольно-измерительной аппаратуре при разработке принципиальных схем технологического контроля, измерения и автоматизации для рассматриваемого технологического процесса и обоснование выбора конкретных элементов и комплектов измерительной техники для систем контроля и управления.

3.2 ТЕМАТИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Так как от правильного определения тематики курсовых проектов зависят научность, современность и реальность разрабатываемого проекта, то ее выбору должно уделяться большое внимание. Последнее тем более справедливо, что задание на курсовое проектирование обязательно должно быть индивидуальным и согласованно с интересами, способностями и направлением работы каждого студента без снижения требований.

3.3СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из ***графической части*** и ***пояснительной записки*** к ней.

Графическая часть включает в себя:

- функциональную схему автоматизации (в части выбора средств измерения) технологического участка на одном листе формата А4;
- принципиальную механическую или электрическую схему выделенного из схемыизмерительного устройства на одном листе формата А4;
- установочный чертеж выделенного из схемы измерительного датчика или прибора илимонтажный чертеж установки прибора на щите на 1 листе формата А4.

Требования к оформлению графической части

Графическая часть должна быть выполнена в соответствии с требованиями стандартов на обозначения основных величин и условное изображение приборов в схемах автоматизации производственных процессов.

Пояснительная записка содержит:

- титульный лист (Приложение 1);
- задание на разработку проекта, подписанное руководителем проектирования и студентом, выполняющим проект (Приложение 2);
- *первую часть*, посвященную краткому описанию технологических процессов, их характеристик и параметров, а также особенности эксплуатационных характеристик используемого оборудования для выбранного участка (цеха) производства, подробной спецификации на измерительные устройства, используемые в схеме управления или контроля с подробным описанием обоснования выбора основных 5-6 измерительных комплектов;
- *вторую часть*, состоящую из расчета метрологических характеристик (мх) измерительного канала информационно-измерительной системы для определения одного из выбранных СИ;
- *третью часть*, - реферат, содержащий описание СИ (принцип действия, устройство, характеристики, область и особенности применения);
- библиографический список;
- содержание.

Требования к оформлению пояснительной записки

Пояснительная записка должна быть напечатана и изложена технически грамотно, четко и сжато. Решения, приводимые в ней, должны иметь обоснования путем сравнения имеющихся и возможных вариантов и выбором лучших из них под углом зрения метрологического обеспечения систем контроля, измерения и управления, унификации, простоты, дешевизны, а также удобства эксплуатации, ремонта и обеспечения техники безопасности в работе. Расчеты должны сопровождаться необходимыми схемами, графиками и эскизами. Располагать расчеты в записке следует в тойпоследовательности, в которой они выполнялись. Все расчетные формулы, приведенные в записке, следует вначале написать в буквенном выражении, а затем в том же порядке, в каком даны буквы, в формулы подставить их численные значения и полученные результаты. Входящие в формулы буквенные обозначения, за исключением общепринятых, должны иметь пояснения. Во всех расчетах должна применяться Международная система единиц.

Приводимые расчеты должны быть обоснованы ссылкой на соответствующую литературу и источники, список которых помещается в конце пояснительной записки.

3.4 УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Первая часть курсового проекта включает в себя:

- краткое описание технологического процесса; при этом необходимо:

- дать краткое описание места данного технологического процесса вобщем процессе выработки продукции;
- по возможности привести стехиометрические уравнения реакций, происходящие в данном аппарате, реакторе, цехе и дать краткое описание технологического процесса;
- привести технологический регламент работы оборудования данного участка производства;
- дать краткую техническую характеристику каждой единице оборудования, принадлежащей рассматриваемому объекту, аппарату, цеху;
- указать особое условие эксплуатации СИ с указанием температуры, статического давления, специфические характеристики измеряемой среды, агрессивность окружающей среды и ее параметры;

- выбор параметров, подлежащих контролю и управлению;

при этом необходимо, помимо перечня параметров, определить погрешности, допускаемые при контроле или измерении того или иного технологического параметра, руководствуясь основными условиями ведения технологического процесса и постановкой измерительной задачи.

- таблица контролируемых параметров;

в таблице необходимо указать специфические характеристики измеряемой среды и условия работы СИ, а также средние (номинальные) значения измеряемого параметра и необходимую погрешность измерения параметра в абсолютных или относительных значениях.

Форма таблицы представлена табл. 1. В таблицу заносятся все параметры, подлежащие контролю или измерению. Условия работы СИ и места их установки уточняются во время ознакомительной практики, либо используютсялитературные данные;

Таблица 1

Контролируемые параметры технологического процесса

Измеряемый параметр		особенности измеряемого параметра, характеристика измеряемой среды	характеристика окружающейсреды	требования к погрешности	примечание
наименование	пределы измерения				
1	2	3	4	5	6

- обоснование выбора измерительных комплектов;

подробное обоснование выбора измерительного комплекта должно производиться в соответствии с:

- *постановкой измерительной задачи,* при этом указывается, какой технологический параметр, где и в каких эксплуатационных условиях, при каких дополнительных требованиях должен быть измерен с заданными метрологическими характеристиками, удовлетворяющими требованиями технологического контроля производственного процесса;
- *перечислением возможных вариантов принципиального решения измерительной задачи,* при этом необходимо перечислить все измерительные устройства, которые могут решать поставленную задачу с точки зрения принципа действия;
- *выбором вариантов измерительных комплектов, реализующих метрологические требования:* здесь проводится расчет основных метрологических характеристик измерительных комплектов для измерения данного информативного параметра в соответствии с имеющимися метрологическими характеристиками датчиков и приборов и правилами их нормирования и суммирования;
- *выбор окончательного варианта измерительного комплекта,* при выборе окончательного варианта измерительной аппаратуры, если сравнение по метрологическим характеристикам равнозначно, должно отдаваться предпочтение:

а) современным средствам измерения;

б) комплектам ГСП, унифицированным по принципу действия с остальной аппаратурой, используемой на производстве;

в) наиболее простым, надежным и дешевым средствам измерения из сравниваемых вариантов;

- заполнение спецификации на контрольно-измерительные приборы;

порядокзаполнения спецификации желателен следующий:

1) температура;
2) давление;
3) расход;
4) уровень;
5) физико-химические свойства;
6) специальные приборы.

После заполнения спецификации на функциональную схему автоматизации проставляются номера измерительных комплектов согласно номерам позиций спецификации.

Форма спецификации должна соответствовать табл. 2.

Таблица 2

Позиция	Наименование и техни-ческая характеристика	Тип, марка	Завод-изготовитель	Количество

Приложение А

Образец выполнения курсовой работы

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРВОЙ ОБЩЕЙ ЧАСТИ

КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Описание технологического процесса на примере процесс сульфатной варки

Варка сульфатной целлюлозы осуществляется периодическим способом в вертикальных стационарных котлах клепаной или сварной конструкции, стальной корпус которых изнутри защищен кислотоупорной футеровкой.

Котел загружают щепой из бункера, заливают варочным раствором и герметически закрывают. Затем содержимое котла нагревают паром до температуры 105-110ºС (заварка)и выдерживают при этой температуре для завершения пропитки щепы кислотой. Далее нагрев продолжают до конечной температуры варки – до 128-155ºС. Различают прямой и непрямой нагрев варочного котла. При прямом нагреве пар поступает непосредственно в котел и там конденсируется, при непрямом нагреве пар поступает в установленный рядом с котлом поверхностный подогреватель, через который непрерывно прогоняется циркуляционным насосом варочная жидкость. В последнем случае конденсат пара не смешивается с раствором. Рабочее давление в котле может составлять от 0,6 до 1 МПа.

В зависимости от условий продолжительность варки колеблется в широких пределах – примерно от 5 до 12 ч. В процессе варки из котла периодически производят сдувки, т.е. удаляют из верхней части котла водяной пар и сернистый газ в систему регенерации, где они смешиваются с сырой щелочью, образуя варочные щелока.

Ход варки контролируется варщиком по показанию приборов и по результатам анализа варочной жидкости. В конце варки иногда отбирают из котла пробы сваренной массы. Отработанная варочная жидкость носит название черного сульфатного щелока.

По окончанию варки котел опоражнивают в сцежу или приемныйрезервуар способом выдувки или вымывки. При выдувке давление в котле снижают до 0,15-0,25МПа, открывают шабер на выдувном трубопроводе и целлюлозная масса остаточным давлением выдувается вместе со щелоком в выдувной резервуар. Продолжительность выдувки 10-20 минут. При вымывке давление в котле снижают до 0,25-0,35МПа и предварительно отбирают из котла сульфатный щелок, направляемый на регенерацию, то есть

восстановление. В котел, заполняя его до верху, подают воду или слабый оборотный щелок и еще некоторое время продолжают отбор крепкого щелока под гидравлическим давлением, затем выпускают массу с оставшимся слабым щелоком из котла в вымывной резервуар. Продолжительность всех операций при вымывке составляет 1,5-2 ч.

Выбор и анализ параметров, подлежащих контролю и управлению

Функциональная схема контроля, измерения и автоматизации процесса варки сульфатной целлюлозы приведена на рис. 1.

В процессе варки целлюлозы в котле наиболее важной величиной является **температура варочной жидкости**, так как она непосредственно влияет на пропитку древесины щелоком, время варки, выход и качество целлюлозы. Чрезмерная температура снижает потенциальный выход котла за счет физического и химического разрушения целлюлозы и ее частичного разложения на растворимые продукты, которые в дальнейшем удаляются из массы в процессе промывки. В это же время для обеспечения приемлемого качества целлюлозы температура в варочном котле должна быть достаточно высокой. Измерение температуры должно производиться с минимальной погрешностью дистанционно.

Давление газа, выделяющегося из щелока в процессе варки, непосредственно связано с крепостью щелока и скоростью проникновения последнего в щепу. Это давление должно быть достаточно высоким, чтобы обеспечить максимальную производительность котла, а для равномерной пропитки и получения продукции с минимальным содержанием серы

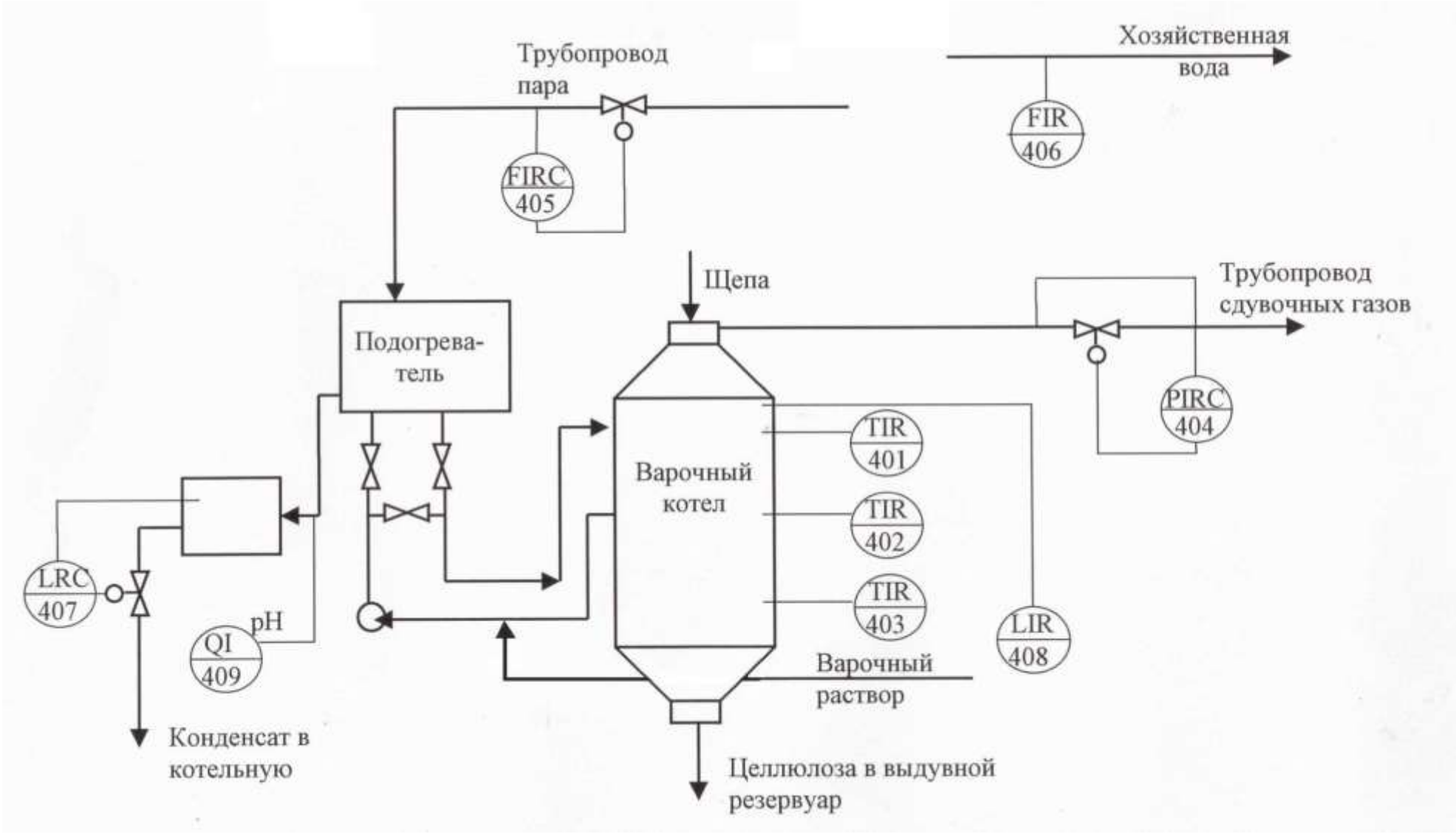


Рис. 1 Функциональная схема автоматизации процесса варки сульфатной целлюлозы

указанное давление необходимо стабилизировать с помощью системы автоматического управления. Управление предельным давлением сдувок имеет важное значение на протяжении всего варочного процесса, но особенно его значение возрастает во время заключительного периода сдувок газа в конце варки.

Необходимо осуществлять контроль **уровня щелока** в котле, он должен быть достаточным, чтобы накрывать щепу в начале варки, в то же время над щелоком должно оставаться некоторое пространство в верхней части варочного котла, позволяющее обеспечить максимальное извлечение газа и предотвратить «сырую» варку. Уровень в котле должен измеряться уровнемером с дистанционным представлением результатов измерений.

В подогревателе на линии конденсата пара необходимо контролировать **уровень конденсата** и **возможность попадания в конденсат варочной жидкости** в случае течи трубок. Для этого следует предусмотреть установку pH-метра с сигнальным устройством. Кроме того, важными контролируемыми параметрами являются температура, давление и расход пара, требуемого для нагревания содержимого варочного котла, а также температура, давление и расход хозяйственной воды.

Таблица контролируемых параметров

Все описанные в п. 5.2. контролируемые параметры заносятся в таблицу, указываются специфические характеристики измеряемой среды, номинальные значения измеряемого параметра и необходимую погрешность измерения.

Обоснование выбора измерительных комплексов

Рассмотрим пример обоснования выбора измерительных комплектов при измерении температуры в варочном котле.

Таблица 3

Контролируемые параметры процесса варки сульфатной целлюлозы

Измеряемый параметр		**Место измеря-емого параметра**	**Характеристи-ка среды**	**Абсолютная погрешность**	**Примечание**
наименова-ние параметра	**пределы измерения**				
Температура варочной жидкости	0-200 ºС	3 зоны варочного котла	Среда агрессивная, загазованная, Т=200 ºС	$\Delta \leq \pm 1^0$C	$\delta = \frac{1 * 100}{200} \pm 0{,}5\%$
Уровень варочной жидкости	13-18 мм	Варочный котел	Среда агрессивная, загазованная, Т=200 ºС	Δ=±0,20м	$\delta = \frac{0{,}2 * 100}{200} \pm 1\%$
Давление сдувочных газов	0-1МПа	Трубопровод сдувочных газов	Среда агрессивная, загазованная, Т=200 ºС	Δ=±0,05 МПа ±0,01МПа ±0,02МПа	$\delta = \frac{0{,}05 * 100}{1} \pm 5\%$
Уровень конденсата	0-5м	Подогрева-тель	Среда неагрессив-ная р=0,5МПа Т=200 ºС	Δ=±0,05м	$\delta = \frac{0{,}05 * 100}{5} \pm 1\%$
pH	0-7 pH	Паропроводник подачи пара в подогреватель	------	Δ=±0,05pH	$\delta = \frac{0{,}05 * 100}{7}$ + 0,9%
Температура пара	180 ºС	---		Δ=±1 ºС	$\delta = \frac{1 * 100}{180} \pm 0{,}5\%$
Давление пара	10 кг/см^2	---	Р=1МПа	Δ=±1 кг/см^2	$\delta = \frac{0{,}1 * 100}{10} \pm 1\%$
Расход пара	0-200 м^3/ч	---	Среда неагрессив-ная р=0,5МПа Т=200ºС	Δ=±1м^3/ч	$\delta = \frac{10 * 100}{200} \pm 0{,}5\%$
Температу-ра воды	40 ºС	Трубопров од хозяйствен -ной воды	Р=5кг/см^2	Δ=±1 ºС	$\delta = \frac{1 * 100}{40} \pm 2{,}5\%$

1. Сформулируем измерительную задачу: требуется измерить температуру от 80 до 200ºС в варочном котле при значительном давлении Р=1,0 МПа. Требование к погрешности измерения температуры самые жесткие, т.е.

следует выбирать наиболее точные и быстродействующие средства измерения. Измеряемую величину следует определять с помощью показывающего прибора, регистрировать дистанционно и предусмотреть унифицированный выходной сигнал для использования в системе управления.

2. Перечислим средства измерения, которые могут определять указанную температуру дистанционно (по принципу действия) и контактно (иначе говоря, с наибольшей

чувствительностью).

К ним относятся:

-манометрические термометры (дистанция до 60 м);

-термометры электрического сопротивления (ТЭС) (проводниковые и полупроводниковые с измерительными унифицирующими преобразователями (для унификации измерительного сигнала) и приборами (для регистрации);

-термоэлектрические термометры с измерительными унифицирующими преобразователями (для унификации измерительного сигнала) и приборами (для регистрации).

Манометрический термометр характеризуется по точности приведенной погрешностью γ = ±(1,5-2,5)%, что не соответствует заданным требованиям, не говоря о динамических характеристиках.

Термоэлектрические термометры стандартные из благородных материалов имеют, как правило, погрешность невоспроизводимости Δ=±0,01мВ, а при температуре, равной 200ºС, развивают ЭДС равную Е=1,436 мВ. Тогда относительная погрешность измерения составит:

$$\delta = \pm\frac{\Delta \cdot 100}{X} = \pm\frac{\Delta \cdot 100}{E} = \pm\frac{0{,}01 \cdot 100}{1{,}436} = \pm 0{,}7\ \%$$

или по абсолютной величине температуры:

$$\Delta = \pm\frac{\delta \cdot T}{100} = \pm\frac{0{,}7 \cdot 200}{100} = \pm 1{,}4^{\circ}C,$$

что не соответствует заданным требованиям к измерениям температуры.

Стандартные термоэлектрические термометры из неблагородных металлов оцениваются погрешностью невоспроизводимости около $\Delta = \pm 0{,}2 мВ$. Тогда относительная погрешность измерения заданной температуры для наиболее чувствительной термопары типа К(никель- хром/никель-алюминий) при

Составит $E_{(200C)} = 14{,}66 мВ$

а абсолютная погрешность равна:

$$\Delta = \frac{\delta \cdot T}{100} \pm \frac{1{,}36 \cdot 200}{100} = \pm 2{,}73^{\circ}C.$$

Сделаем вывод о непригодности термоэлектрических термометров для решения поставленной задачи, т.е. для измерения низких температур с малыми погрешностями.

ТЭС из платины (как наиболее стабильные и точные) выпускаются с допускаемым отклонением номинального значения сопротивления $\Delta R \cdot 100 / R_0 = \pm 0{,}06\%$ (группа А) и поэтому являются датчиками температуры с наименьшей погрешностью в диапазоне измеряемых температур от -260 до $+1100\,^{0}C$.

Выбор номинального значения сопротивления термопреобразователей при $0\,^{0}C$, т.е. R_0 в пределах от 1 до 2000 Ом должен учитывать то обстоятельство, что чем больше R_0, тем больше абсолютная чувствительность ТЭС, которая в первом приближении:

$$S_{abc} = R_0 \cdot \alpha,$$

где α- температурный коэффициент электрического сопротивления материала ТЭС, в данном случае платины.

Предпочтительные значения R_0 следует выбирать: 100, 200, 500 или 1000 Ом с учетом незначительной массы провода при разумном его диаметре для исключения большой инерционности и обрывов провода соответственно.

Тогда выберем R_0=500 Ом. Погрешности измерения ТЭС можно определить из следующих соображений, выбрав соответствующую марку платинного датчика, а именно, ТСПУ 015, который используется для измерения температур в диапазоне 0-200^{0}С. Он имеет следующие метрологические характеристики: основная приведенная погрешность $\gamma_0 = \pm 0.5\%$, дополнительная погрешность от изменения напряжения питания $\gamma_0 = \pm 0.1\%$; в диапазоне изменения температуры окружающей среды $T_{ср}$=(-50÷+70)^{0}С дополнительная температурная погрешность составляет

$$\Delta\gamma_T = \frac{\pm 0{,}2\%}{\pm 10^{\circ}C};$$

дополнительная погрешность от изменения сопротивления нагрузки $\gamma_{Rнна} = \pm 0{,}1\%;$ инерционность – 15с; допускаемое давление среды

$P_{ср} \leq 16$ МПа (что соответствует требованиям измерительной задачи)Тогда основная абсолютная погрешность составит:

$$\Delta_0 = \frac{\gamma_0 \cdot T_{мах}}{100\,\%} = \frac{\pm 0{,}5\% \cdot 200\,^0 C}{100\,\%} = \pm 1^0 C$$

Дополнительная погрешность при изменении температуры внешней среды от $T_н=(20\pm5)^0$C до $T_{ср}=40^0$C (температуры окружающей среды) составит:

$$\gamma_{Tдоп} = \gamma_T \cdot (T_{ср} - T_{нмах}) = \gamma_T \cdot (40-25)^0 C = \pm \frac{0{,}2\%}{10^0 C} \cdot 15^\circ C = \pm 0{,}3\%$$

Суммарная дополнительная погрешность ТЭС с учетом всех внешнихвлияющих факторов будет равна:

$$\gamma_{допТЭС} = (\sum_{i=1}^{3} \gamma_i^2)^{1/2} = (\gamma_н^2 + \gamma_{Tдоп}^2 + \gamma_{Rнна}^2)^{1,2} = \pm(0{,}1^2 + 0{,}3^2 + 0{,}1^2)^{1/2} \cong \pm 0{,}3\%$$

абсолютной форме:

$$\Delta_{допТЭС} = \frac{\gamma_{допТЭС} \cdot T_{мах}}{100\%} = \pm \frac{0{,}3 \cdot 200}{100} = \pm 0{,}6^0 C$$

Тогда полная погрешность ТСА Δ_p в реальных условиях эксплуатации составит:

$$\Delta_p = \Delta_o + \Delta_{допТЭС} = \pm(1+0{,}6)^0 C = \pm 1{,}6^0 C.$$

Для работы в комплексе с ТЭС используются (если необходимо устанавливать показывающие и (или) регистрирующие приборы):

-логометры магнитоэлектрической системы;

-неуравновешанные мосты постоянного и переменного тока с указателями неравновесия в виде логометров, милливольтметров или миллиамперметров (обычно магнитоэлектрической системы с выпрямителями, если используется мост переменного тока);

-пирометрические магнитоэлектрические узкопрофильные милливольтметры со встроенными предварительными преобразователями мостового типа, например, из серии АСК типов МВУ6 (последние со встроенными сигнализаторами, позиционными регуляторами и выходными преобразователями);

-миллиамперметры магнитоэлектрической системы в комплекте с блоками унифицированных стандартных преобразователей, имеющих выходной стандартный сигнал постоянного тока 4-20мА;

-автоматические электронные уравновешенные мосты постоянного тока, например, приборы типа КМС (самопишущие) и КПМ (показывающие).

Алгебраическая сумма абсолютных погрешностей датчика и моста дает максимально возможную абсолютную погрешность выбранного комплекта.

Геометрическая сумма абсолютных погрешностей как независимых случайных величин дает значение абсолютной погрешности выбранного комплекта для определения температуры:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_д^{\,2} + \Delta_M^2} = \sqrt{1{,}6^2 + 0{,}5^2} = \sqrt{2{,}56 + 0{,}25} = \pm\sqrt{0{,}25 =} \pm 0{,}5^0 C$$

Таким образом, из возможных вариантов следует остановиться на измерительном комплекте платинового ТЭС, класса точности А и КСМ-4 класса точности 0,25 со временем установления показаний 20 с и со встроенными преобразователями унифицированных сигналов с $I_{вых}$=4-20мА для использования в системе управления.

При выборе конкретных типов КСМ-4 и ТЭС следует учитывать условия работы в варочном цехе при изменении температуры варочного щелока (агрессивного вещества) в трубопроводе с учетом рабочего статистического давления Р=1МПа.

Правила установки датчика температуры должны соответствовать следующим основным положениям, вытекающим из анализа погрешностей измерения температур датчиками через потери тепла:

- датчики температур следует погружать как можно глубже в измеряемую среду;
- датчик устанавливают в месте наибольшей скорости движения среды и против направления ее движения;
- трубопровод или объект исследования в месте установки датчика тщательно теплоизолирован, защищая головку датчика от воздействия температуры окружающей среды.

После выбора средств измерений их заносят в спецификацию как показано в примере табл. 4.

Таблица 4

Спецификация на СИ для варочного котла

Позиция	Наименование и техническая характеристика	Тип, марка	Завод – изготовитель	Количество
	Приборы и средства автоматизации			
TIR-401	Контроль температуры в верхней зоне варочного котла	ТСПУ 015	СКБ Термоприбор, Москва	1
	Температура 80-155ºС			
PC-404	Регулирование давления сдувок в трубопроводе сдувочных газов. Давление 1 МПа			
PE-404-1	Отбор импульсов давления с разделительным устройством			1
PE-404-2	Измерительный преобразователь разностидавлений. Выход 4…20мА. Приведенная погрешность γ=±0,5%	Метран 100Д	Теплоприбор,г. Челябинск	1
FC-405	Регулирование расхода пара в трубопроводе. Расход 200 $м^3$/ч			
FE-405-1	Сужающее устройство.	ДК-10-200	Теплоприбор, г. Челябинск	1
FT-405-2	Измерительный преобразователь разности давлений. Выход 4…20мА. Приведенная погрешность γ=±0,5%	Метран 100 ДД		1

Окончание таблицы 4

Позиция	Наименование и техническая характеристика	Тип, марка	Завод – изготовитель	Количество
FIR-406	Контроль расхода хоз. воды F=180-200 $м^3$/ч			
FIR-406-1	Сужающее устройство	ДК-10-200		1
FT-406-2	Измерит. преобразователь разности давлений. Выход 4…20мА. Привед. погрешность γ=±0,5%	Метран 100 ДД	Теплоприбор, г. Челябинск	1
LRC-407	Регулирование уровня конденсата в подогревателе. Уровень 5м.			
LE-407-1	Отбор импульсов давления: разделительное устройство	Метран 100 ДД	Теплоприбор, г. Челябинск	1
LT-407-2	Измерит. преобразователь разности давлений. Выход 4…20мА. Привед. погрешность γ=±0,5%	Метран 100 ДД	Теплоприбор, г. Челябинск	1
LIR-408	Контроль уровня варочной жидкости в варочном котле. Уровень 13-18м			
LE-408-1	Отбор импульсов давления: разделительное устройство	Метран 100 ДД	Теплоприбор, г. Челябинск	1
LT-408-2	Измерит. преобразователь разности давлений. Выход 4…20мА. Привед. погрешность γ=±0,5%	Метран 100 ДД	Теплоприбор, г. Челябинск	1
QIR-409	Контроль pH конденсата в подогревателе. pH=7			
QE-409-1	Стеклянный электрод; хлорсеребряный электрод	«Атлант» Мод. 2101	ООО «Артеко», Москва	1

ПРИМЕР ОРИЕНТИРОВОЧНОГО РАСЧЕТА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ПО МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Ориентировочный расчет метрологических характеристик измерительного канала необходимый для основания выбора средств измерения, составляющих измерительный канал при их проектировании.

Так как при проектировании неизвестны условия эксплуатации, а также подробные характеристики средств измерения (СИ), то ориентировочный расчет метрологических характеристик (МХ) измерительного канала (ИК)ведется с рядом допущений:

1. СИ, входящие в состав ИК, являются линейными либо линеаризуемыми средствами автоматизации, так как, как правило, при контроле и управлении технологических параметров измерения осуществляется в незначительном диапазоне изменения физической величины, т.е. это допущение реализуется.

2. Погрешности СИ и результирующие погрешности каналов ИК представляют величины второго порядка малости по сравнению с параметрами соответствующих номинальных статических характеристик преобразования средств измерения в ИК.

3. Отклонения значений метрологических характеристик ИК, вызванные изменением погрешности под действием изменения внешних влияющих величин (ВВВ) в статических и динамических режимах малы по сравнению с самими номинальными значениями характеристик СИ.

4. Погрешности СИ ИК независимы друг от друга, т.е. коэффициенты их корреляции можно считать близкие к значениям, характеризующим независимые величины ($\rho=0\div0,7$).

5. Оценки пределов допускаемых погрешностей назначают по ГОСТ 8.401-80 для всех СИ ИК. Сопротивление отдельных элементов канала согласованы между собой. Взаимное влияние между ИК не учитывается.

Поскольку сделанные допущения не вседа справедливы, то конкретные значения погрешности ИК в реальных условиях эксплуатации определяются практикой, а именно в период опытно-промышленной эксплуатации каналов после их монтажа и отладки, проводится поверка или калибровка ИК.

Структура измерительного канала представлена на рис. 2.

Д – датчик
УП – унифицирующий преобразователь
ДЛС – дистанционная линия связи
МП – масштабирующий преобразователь
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь
ПР – процессор
Д – дисплей

Рис. 2. Структура измерительного канала

Для примера расчета МХ ИК рассмотрим канал измерения температуры вварочном котле, конкретная структура которого приведена на рис. 3.

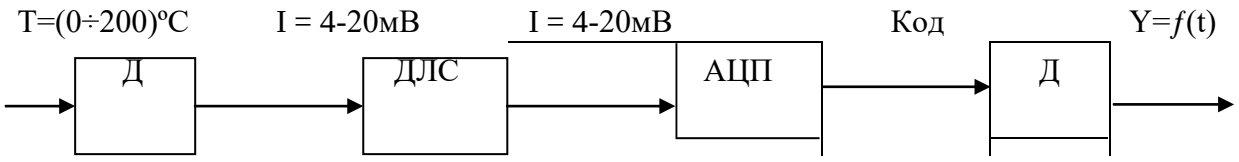


Рис. 3. Структурная схема канала измерения температуры в варочном

Исходные данные

1. ДТ – ТЭС тип ТСПУ 014. Предел измерения температуры (0-200)ºС. Погрешности датчика: основная – γ_u=±0,5 % /R0=500 Ом/; дополнительные: по напряжению γ_u=±0,1%; по температуре для интервала температур $T_{окр.ср}$=(-50÷+70)ºС γ_T=±0,2%/±10ºС; по изменению нагрузки следующего преобразователя $\gamma_{R\ нагр}$=±0,1 %.

2. ДЛС – витая пара. Погрешность для условий варочного цеха по экспериментальным данным составляет γ_p=±0,5 %.

3. АЦП – аналого-цифровой преобразователь с линейно-изменяющимся напряжением. Погрешность основная относительная 02/01. Дополнительная погрешность из-за изменения температуры $T_{окр.ср}$=(15÷40)ºС составит $\Delta\gamma_T = \frac{\pm 0{,}1\%}{\pm 10°C}$, дополнительная погрешность от изменения напряжения питания $\Delta\gamma_u$=±0,1 %.

4. Контроллер типа Simatik S7-300 или Simatik S7-700. Погрешность представления температуры δ=±0,05 %.

Вычисления при X = T_{max}

1. Как показано выше, для ТСПУ 014 полная погрешность ТЭС в реальных условияхэксплуатации на варочном котле составит

$$\Delta_p^1 = \pm 1{,}6°C,$$

или в приведенной форме

$$\gamma_p^1 = \frac{\pm \Delta_p \cdot 100\%}{T_н (= T_{max})} = \frac{\pm 1{,}6°C \cdot 100}{200°C} = \pm 0{,}8\,\%.$$

2. Для ДЛС приведенная погрешность

$$\gamma_p^2 = \pm 0{,}5\,\%$$

3. Для АЦП основная относительная погрешность составит

$$\delta = \pm\left[c + d\left|\frac{X_к}{X} - 1\right|\right]$$

или $\delta^3 = \pm\left[0{,}2 + 0{,}1\left|\frac{200}{200} - 1\right|\right] = \pm 0{,}2\%$, где c=±0,2%, d=0,1%, $X_к$=T_{max}=200°C, и в приведенной форме, так как $\delta = \frac{\pm \Delta^3 \cdot 100}{X}$ и X = T_{max} по условию расчета, то

$$\gamma^3 = \frac{\pm \Delta^3 \cdot 100}{T_{max}} = \delta^3 = \pm 0{,}2\,\%.$$

4. Контроллер имеет приведенную погрешность представления $\delta^4 = \gamma^4 = \pm 0{,}05$. Тогда результирующие погрешности ИК составят

$$\gamma_{РИК}\Big|_{min} = \pm\left[(\delta^1)^2 + (\delta^2)^2 + (\delta^3)^2 + (\delta^4)^2\right]^{1/2} = \pm\left[0{,}8^2 + 0{,}5^2 + 0{,}2^2 + 0{,}05^2\right]^{1/2},$$

$$\gamma_{РИК}\Big|_{max} = \pm(\delta + \delta + \delta + \delta) = \pm(0{,}8 + 0{,}5 + 0{,}2 + 0{,}05) = \pm 1{,}55\,\%$$

Следовательно, погрешность ИК лежит в интервале

$$\gamma_{РИК}\Big|_{min} < \gamma_{РИК} < \gamma_{РИК}\Big|_{max} = 1 < \gamma_{РИК} < \pm 1{,}55\,\%.$$

Это следует подтвердить при метрологической аттестации и поверке ИК при опытно-промышленной эксплуатации канала ИИС

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

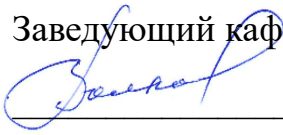
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ

На заседании кафедры технической механики

(протокол № 1 от 15.09.2025)

Заведующий кафедрой



_____ Е. Б. Волков

Лабораторный практикум

Б1.В.09.06 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность -

21.05.04 Горное дело

Специализация -

Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ» 3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ» 5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОПАРЫ» 8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ» 12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИЗУЧЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕРМОСТАТА» 23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКОВ ЦВЕТА И СВЕТА» 26

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ»

Цель работы – проведение исследований по работе прибора для измерения давления – датчика давления.

Теоретическая часть

Конструкция датчика избыточного давления представлена на рис.1 Преобразователь выполнен в цилиндрическом корпусе 3, в нижней части которого расположен штуцер 4, предназначенный для присоединения к линии измеряемого давления. В верхней части корпуса расположена «обойма» 9, которая крепится в корпусе с помощью специальных защелок, позволяющих ей вращаться вокруг своей оси (относительно корпуса 3). Для фиксации положения обоймы относительно корпуса служит крышка 10, которая навинчивается на наружную резьбу верхней части корпуса 3. На обойме установлена приборная часть 2 электрического соединителя типа DIN43650C. В кабельной части 1 соединителя производится подсоединение проводов внешних электрических цепей с помощью винтовых зажимов (клемм) без применения пайки. Во входном отверстии 5 приемной полости штуцера преобразователя предусмотрена резьба для установки гидравлического дросселя, предназначенного для предотвращения повреждения мембраны чувствительного элемента преобразователя в случае возникновения гидроудара.

В штуцере преобразователя размещен чувствительный элемент 6. В качестве чувствительного элемента применен тензопреобразователь, на котором размещена тензочувствительная полупроводниковая схема из четырех тензорезисторов, соединенных в мост Уитсона.

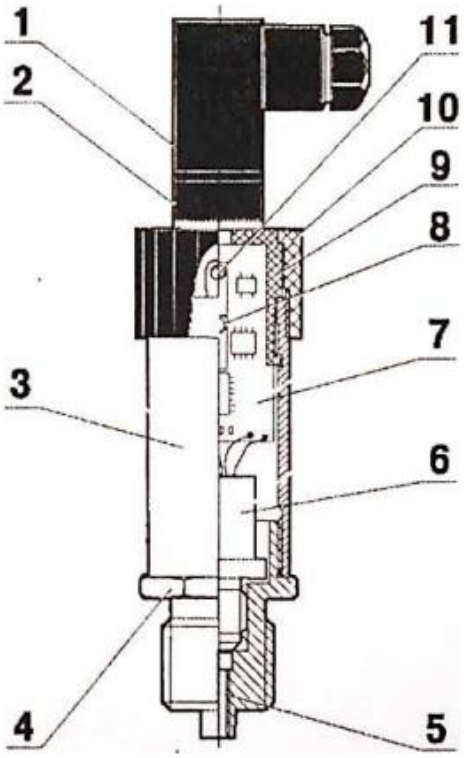


Рисунок 1

Под действием давления измеряемой среды мембрана чувствительного элемента прогибается. Тензорезисторы, деформируясь, изменяют свое сопротивление. В результате происходит разбалансировка моста пропорционально измеряемому давлению. Разбалансированный сигнал в виде

электрического сигнала преобразуется электронным блоком, расположенным в корпусе преобразователя, в выходной унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление.
5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.
6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Подготовить стенд к работе
2. Включить компрессор.
3. Подключить пневматическую трубку от компрессора в быстросъемный разъем на тыльной стенке модуля набор датчиков давления а1.
4. С помощью регулятора давления установить величину давления 0,1 Мпа на компрессоре.
5. Занести показания манометра и датчика давления в таблицу 1
6. С помощью регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 МПа.
7. Занести показания манометра и датчика давления в таблицу
8. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,4 МПа.
9. Выключить компрессор. Принять показания манометра за истинное значение давления. Вычислить абсолютную и относительную погрешность датчика давления.
10. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе
11. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 1 Результаты исследования работы датчика давления

Номер измерения	Р манометра кПа	Р датчика давления кПа	ΔР датчика давления кПа
1			
2			
3			
4			
5			

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ»

Цель работы: проведение исследований по работе прибора для измерения давления – датчика дифференциального давления.

Теоретическая часть

Датчики дифференциального (перепада) давления применяются для преобразования перепада давления (разности давлений) в унифицированный выходной сигнал напряжения, тока или индуктивности. Наиболее популярными являются датчики с унифицированным токовым выходом 4-20 мА.

Устройство датчика и принцип работы.

Основным элементом датчика дифференциального давления служит измерительная мембрана, изготовленная из упругого металла. К ней крепятся чувствительные тензоризисторы, которые способны измерять величину ее деформации. Мембрану датчика и рабочая среда изолированы друг от друга, через защитные эластичные перепонки к ней передается давление. Специальная жидкость заполняет полости, которые расположены между ними.

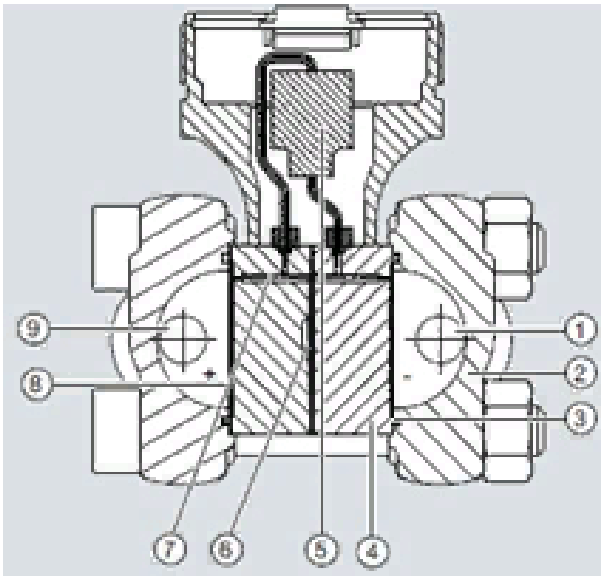


Рисунок 1 - Устройство датчика дифференциального давления: 1 - входное давление Р ; 2 - фланцевые соединения подключениями к процессу; 3 - О-кольцо; 4 - корпус измерительной ячейки ; 5 - тонкий металлический проводник ; 6- перегрузочная мембрана ;7 - наполнительная жидкость ; 8 - разделительная мембрана ; 9 - входное давление Р+

Датчики, способные измерять дифференциальное давление, работают следующим образом: на защитные перепонки прибора воздействует давление рабочей среды, что в виде импульса передается на измерительную мембрану, которая оказывает влияние на тензисторы и влечет за собой изменение величины сопротивления. Электроника датчика фиксирует подобные модификации и на выходе преобразует их в аналоговый сигнал определенного значения.

Особенности приборов

Дифференциальные датчики от обычных преобразователей напора отличает ряд характерных отличительных черт. У дифференциальных датчиков 2 защитные мембраны, поэтому давление передается с двух сторон одновременно. В их конструкции предусмотрены 2 штуцера: минусовой и плюсовой. Когда измеряется

давление в рабочей среде, и показатели от напора на штуцер со знаком плюс превышают показатели минусового штуцера, то разница будет зафиксирована прибором с плюсовым значением, и наоборот.

Области применения приборов.

Сферы применения датчиков давления на сегодняшний день достаточно широка. Приборы данного типа используют в системах газоснабжения, вентиляции, водоподготовки, в нефтехимической, химической промышленности, на фармацевтическом производстве.

Измерение разницы напора в различных жидкостных средах необходимо для нормальной работы вентиляционных систем, а также устройств кондиционирования. Датчиками дифференциального давления пользуются для контроля загрязнённости систем фильтрации, управления демпферами, для регулирования и индикации воздушных потоков.

Принцип работы и строение датчика давления.

Главным элементом для такого датчика служит измерительная мембрана. Она изготавливается из упругого материала. Измеряется величина её деформации при помощи чувствительных тензорезисторов. Сама мембрана находится в изоляции от рабочих сред, давление на нее, оказывается, через защитные эластичные перепонки. Расположенные между мембраной и перепонками полости заполнены специальной жидкостью.

Давление оказывается из рабочей среды на перепонки, а они, в свою очередь, давят на измерительную мембрану. Мембрана передаёт импульс тензорезисторам, где меняется величина сопротивления. Эти слабые колебания улавливает встроенная электроника и преобразует их в аналоговый сигнал на выходе.

Особенности данных датчиков.

Отличием от прочих преобразователей напора является то, что дифференциальные датчики имеют две защитные мембраны и измеряют давление с двух сторон сразу. Также в них установлены плюсовой и минусовой штуцеры. Таким образом, прибор отражает разницу давления по обе стороны датчика.

Сферы применения приборов.

Данные датчики применяются при устройстве систем вентиляции, водоподготовки, газоснабжения.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление.
5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.
6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.

9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

1. подготовить стенд к работе
2. включить компрессор.
3. подключить пневматическую трубку от компрессора в быстросъемный разъем на тыльной стенке «модуля набор датчиков давления» А2.
4. При помощи регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 Мпа на компрессоре.
5. Занести показания манометра и датчика давления А2 в таблицу
6. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,4 МПа.
7. Выключить компрессор.
8. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Номер измерения	Р манометра кПа	Р А2 датчика давления кПа
1		
2		
3		
4		
5		

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОПАРЫ»

Цель работы: изучение термопар как устройства для контактного контроля над температурой объекта.

Теоретическая часть

Термопара – термоэлемент, представляющий собой пару проводников из различных материалов, соединенных на одном конце. На свободных концах в результате действия термоэлектрического эффекта наводится ЭДС.

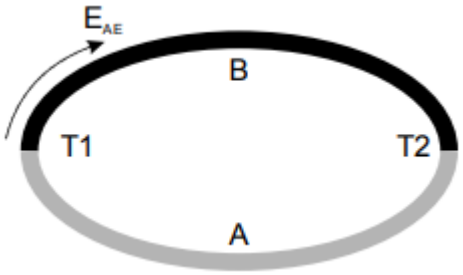


Рисунок 1

Термоэлектрический эффект, он же Эффект Зеебека – явление возникновения ЭДС в замкнутой электрической цепи (рис.1), состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников (A и B), контакты между которыми находятся при различных температурах (T1 и T2).

Непосредственное практическое значение применительно к термопарам имеют следующие термоэлектрические законы.

Первый закон:

Возникающее в термопаре термо-ЭДС зависит от температуры спаев и не зависит от распределения температур по длине проводника (закон промежуточных температур Магнуса).

Иная его формулировка: термо-ЭДС термопары AB с температурами спаев T1 и T2 равна алгебраической сумме двух термо-ЭДС этой же термопары с температурами спаев T1 и T3, T3 и T2:

$$EAA(T1T2) = EAA(T1T3) + EAA(T3T2) \quad (1)$$

Это правило позволяет не заботиться о термостатировании термопары по всей ее длине и используется для градуировки термопар и определения поправок на температуру холодного спая.

Второй закон:

Если цепь состоит из трех проводников ABC, то термо-эдс термопары AB со спаями при температурах T1 и T2 равняется алгебраической сумме термо-эдс термопар AC и CB, спаи которых находятся при тех же температурах.

$$EAA(T1T2) = EAA(T1T2) + ECC(T1T2) \quad (2)$$

Этот закон ("промежуточных металлов") позволяет использовать удлинительные концы к термопарам и присоединять термопару к приборам с другими проводниками.

Нетрудно сообразить, что присоединенный в термостате к обоим проводам (A и B) термопары медный провод, который ведет к измерительному прибору (провод C в приведенной формуле) не меняет величины возникшей

электродвижущей силы термопары AB, поскольку эффекты от спаев CA и CB, находящихся при одной температуре компенсируют друг друга.

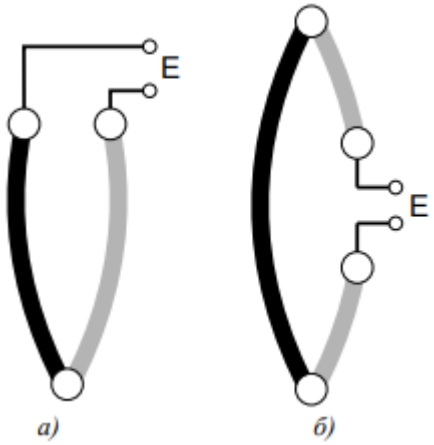


Рисунок 2

Таким образом, термопара может образовывать устройство или его часть, использующее термоэлектрический эффект для измерения температуры. В сочетании с электроизмерительным прибором термопара образует термоэлектрический термометр. Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам термоэлектродов (рис. 2,а), либо в разрыв одного из них (рис. 2,б). В местах подключения проводников термопары к измерительной системе возникают дополнительные термо-ЭДС, которые взаимно компенсируется при равенстве температур вспомогательных спаев.

Так как термо-ЭДС термопары зависит от разности температур холодного и горячено концов,

для успешного преобразования ЭДС в температуру необходимо так же контролировать температуру холодного спая. На практике при измерении температур широко используется техника «компенсации холодного спая»: температура холодного спая измеряется другим датчиком температуры, а затем величина термо-ЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары.

Рисунок 3

Места подключения термопары к измерительной системе должны иметь одинаковую температуру, то есть находиться в изотермальной зоне. Кроме того, в схеме с компенсацией холодного спая в этой же зоне должен находиться и датчик температуры холодного спая. При конструировании измерительной системы эти требования должны учитываться.

При выборе термопары для производства замеров температуры в некотором диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона. Для достижения высокой

точности измерений термопарного термометра во всем диапазоне рабочих температур необходима его калибровка.

Среди основных можно выделить следующие типы термопар:

ТХА (хромель-алюмелевая термопара) – предназначена для работы в окислительных и инертных

средах. Обладает более близкой к прямой характеристикой.

ТХК (хромель-копелевая термопара) – предназначена для работы в окислительных и инертных средах. Обладает наибольшей чувствительностью, высокой термоэлектрической стабильностью при температурах до 600°С. Недостаток: высокая чувствительность к деформациям.

ТПП (платинародий-платиновая термопара) – предназначена для длительной эксплуатации в

окислительных средах. Обладает хорошей устойчивостью к газовой коррозии (особенно на воздухе при высоких температурах); высокой надежностью при работе в вакууме, но менее стабильны в нейтральных средах. Недостаток: высокая чувствительность термоэлектродов к любым загрязнениям, появившимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации термопар.

ТВР (вольфрам-рениевая термопара) – может использоваться как стандартные для установления

номинальных статических характеристик термопар методом сравнения. Обладает возможностью длительного применения при температурах до 2200°С в неокислительных средах; устойчивостью в аргоне, гелии, сухом водороде и азоте. Недостаток: плохая воспроизводимость термо-ЭДС, вынуждающая группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками.

ТНН (нихросил-нисиловая термопара) – предназначена в качестве универсального средства измерения температур в диапазоне температур 0 - 1230°С. Обладает высокой стабильностью термо-ЭДС (по сравнению с ТХА, ТПП, ТПР), высокой радиационной стойкостью, высокой стойкостью к окислению электродов.

В зависимости от конструкции и назначения различают термопары погружаемые и поверхностные; с обыкновенной, взрывобезопасной, влагонепроницаемой или иной оболочкой (герметичной или негерметичной), а также без оболочки; обыкновенные, вибротряскоустойчивые и ударопрочные; стационарные и переносные и т.д.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление.
5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.
6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок проведения эксперимента

Все исследования датчиков температуры проводятся в диапазоне: от температуры окружающей среды до 80°С˚.

Ознакомиться с электрической схемой соединения датчика с измерительным прибором для снятия статической характеристики. Статическая характеристика датчика - функциональная зависимость между изменениями входной X и выходной Y величинами.

Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика «ТЕРМОПАРА».

Рисунок 4

Представить схему для проверки преподавателю.

Включить питание модулей.

Включить нагревательный ТЭН.

Включить питание модулей. Произвести измерение напряжения на выходных клеммах термопары (0,2 – 2,0 мВ), изменяя температуру нагрева датчика от 25°С до 75°С.

По мере увеличения температуры записывать показания с дисплея прибора и показания величины показания напряжения с прибора через 1…2 °С.

Данные занести в таблицу и построить график зависимости Э.Д.С термопары от температуры.

Таблица.

	1	2	3	4	5	…	N
Время, сек							
Температура, °С							
Напряжение, мВ							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ»

Цель работы: изучение динамических характеристик терморезистивного преобразователя.

Теоретическая часть

Термосопротивления представляют собой измерительный преобразователь с чувствительным элементом (проводник или полупроводник), который под воздействием температуры изменяет активное сопротивление электрическому току. Изменение электросопротивления данного материала при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления □ (1/□С), который определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\mathrm{R}_t - R_0}{R_0 t} \qquad (1)$$

где *t* – температура материала, °С; R_0 и R_t – электросопротивление при 0 °С и при температуре *t*, Ом.

Проводниковые ТС

Материалы, которые используют для изготовления проводниковых ТС должны быть устойчивыми к нагреванию, что обуславливает однозначность зависимости сопротивления от температуры и стойкость проводника против коррозии и, следовательно, достаточную точность измерений; иметь большой α обеспечивающий высокую чувствительность прибора; значительное удельное сопротивление проводника позволяющее изготовить термометры малых размеров; линейность характеристики.

Наиболее полно указанным требованиям отвечают платина (интервал температур – 260 ÷ +750 °С) и медь (интервал – 60 ÷ +180 °С).

Электрическое сопротивление проволоки платиновых термометров сопротивления в интервале температур от 0 до +650 °С определяется по формуле:

$$R_t = R_0\left(1 + At + Bt^2\right) \qquad (2)$$

где R_t – сопротивление термометра при температуре *t* °С; R_0 – сопротивление термометра при температуре 0 °С; *A* и *B* – постоянные коэффициенты.

Для платины марки «Экстра»

R_{100}/R_0=1,391;

A=3,96847·10^{-3} °С$^{-1}$;

B=5,847·10^{-7} °С$^{-2}$.

Сопротивление платины в интервале температур от –200 до 0 °С изменяется по закону:

$$R_t = R_0\left[1 + At + Bt^2 + Ct^3\left(t - 100\right)\right] \qquad (3)$$

где C = – 4,22·10^{-12} °С$^{-1}$.

У платины, применяемой для изготовления технических термометров α=3,9·10^{-3} 1/°С.

Из уравнений 1 и 2 видно, что характеристики платиновых термометров нелинейны однако отклонение от линейной характеристики не превышает 5% в интервале от 0 до 500°С и 19% в интервале температур от –200 до 0°С.

Электрическое сопротивление проволоки медных термометров сопротивления в интервале температур от –50 до +180°С определяется по формуле:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \qquad (4)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления меди (α=4,26·10^{-3} °С$^{-1}$).

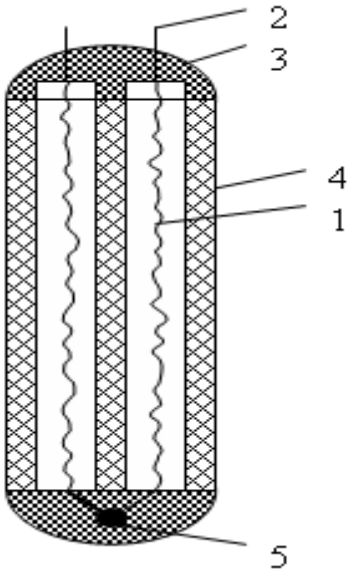


Рисунок 1 – Чувствительный элемент платинового ТС

К преимуществам меди следует отнести низкую стоимость, легкость получения ее в чистом виде, сравнительно высокий α=4,26·10^{-3} 1/°С и линейную зависимость сопротивления от температуры.

К недостаткам меди относятся малое удельное сопротивление и легкая окисляемость при температуре выше 100°С.

Кроме того, для изготовления ТС используется никель и железо.

На рисунке показан чувствительный элемент платинового термометра. Он состоит из двух соединенных последовательно платиновых спиралей 1, расположенных в каналах керамического каркаса 4. К двум верхним концам этих спиралей припаяны платиновые или иридиево-родиевые (60% родия) выводы 2, к которым приварены выводные проводники изолированные керамическими бусами. Для крепления платиновых спиралей и выводов в керамическом каркасе используют глазурь (или термоцемент) 3 на основе окисей алюминия и кремния. Пространство между платиновыми спиралями и стенками каналов каркаса заполнено порошком окиси алюминия, который служит изолятором и улучшает тепловой контакт между спиралями и каркасом.

Для подгонки сопротивления при 0°С изменяют длину нижних концов платиновых спиралей с последующей пайкой 5.

Для защиты от воздействия химически агрессивных сред и механических повреждений чувствительные элементы помещают в кожух, выполненный из алюминия или нержавеющей стали. Все ТС выпускаются взаимозаменяемыми.

Термометры сопротивления ТСП выпускают с сопротивлением R_0=1 Ом (градуировка гр 1П), R_0=10 Ом (градуировка гр 10П) и R_0=50 Ом (градуировка гр 50П).

Термометры сопротивления ТСМ выпускают с сопротивлением R_0=10 Ом (градуировка гр 10М), R_0=50 Ом (градуировка гр 50М) и R_0=100 Ом (градуировка гр 100М).

Полупроводниковые ТС

Полупроводниковые термометры сопротивления, которые называются термисторами или терморезисторами, применяются для измерения температуры в интервале от –90 до +180 °С. Существенным их преимуществом является большой температурный коэффициент электрического сопротивления. Вследствие большого удельного электрического сопротивления полупроводников из них можно изготовить термометры малых размеров с большим начальным сопротивлением, что позволяет не учитывать сопротивление соединительных проводов и других элементов электрической измерительной схемы термометра.

Чувствительные элементы термисторов, изготовляемые из окислов меди, марганца, магния, никеля, кобальта и других металлов, имеют форму небольших цилиндров, дисков или шариков.

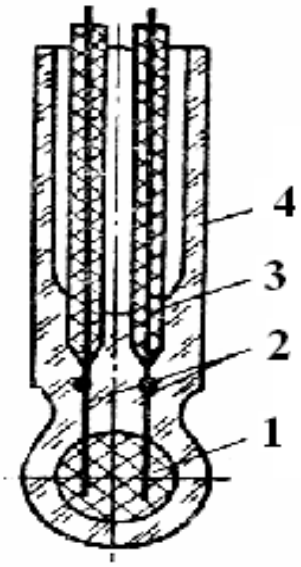


Рисунок 2 - Бусинковый полупроводниковый терморезистор

Сопротивление термисторов уменьшается с повышением температуры. Для большинства полупроводниковых сопротивлений зависимость электрического сопротивления от температуры имеет нелинейный характер и может быть в общем виде описана зависимостью:

$$R_{\mathrm{T}} = A \cdot e^{B/T} \qquad (4)$$

где R_{T} – электрическое сопротивление термистора при абсолютной температуре *T*, К; *A* и *B* – константы термистора.

На рисунке 2 показан бусинковый терморезистор, состоящий из полупроводникового элемента 1, защищенного стеклянной оболочкой 4. В шарик 1 вмонтированы электроды 2 из платиновой проволоки, соединенные с никелевыми выводами 3.

Основным препятствием, ограничивающим широкое внедрение полупроводниковых терморезисторов в промышленность, является плохая воспроизводимость их параметров, что исключает их взаимозаменяемость, а также сравнительно невысокая максимальная рабочая температура (от –60 до 180°С).

В качестве устройств, измеряющих электрическое сопротивление термометров в функции температуры, применяют мосты и логометры. Мосты бывают уравновешенные и неуравновешенные, автоматические и неавтоматические.

Принципиальная схема уравновешенного моста показана на рис. Здесь R_1 и R_3 – постоянные сопротивления, R_2 – переменное сопротивление (реохорд), с помощью которого мост приводят в равновесное состояние, $R_\text{Т}$ – сопротивление термометра, НП – нуль-прибор.

При равновесии мостовой схемы ток I_0 в измерительной диагонали равен нулю, а падения напряжений на сопротивлениях R_1 и R_3 должны быть равны между собой, т.е.

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \tag{5}$$

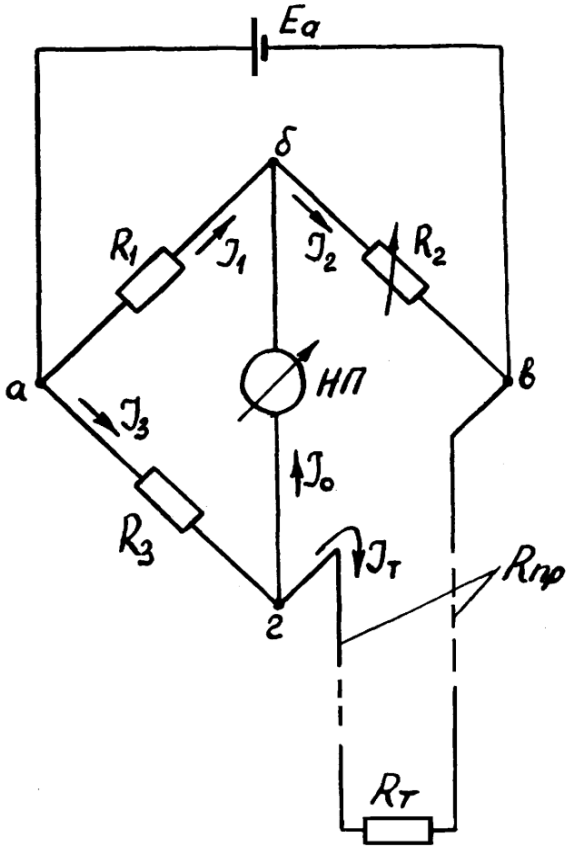


Рис. 3 – Принципиальная схема уравновешенного моста

Кроме того, падения напряжений на плечах «*бв*» и «*вг*» также должны быть равными между собой, т.е.

$$I_2 R_2 = I_\text{Т}\left(R_\text{Т} + R_\text{пр}\right) \tag{6}$$

где $R_{\text{пр}}$ – сопротивление соединительных проводов.

Разделив (6) на (7) и принимая во внимание, что при равновесии моста $I_1 = I_2$; $I_3 = I_{\text{Т}}$, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_{\text{Т}} + R_{\text{пр}}} \tag{7}$$

или

$$R_2 \cdot R_3 = R_1\left(R_{\text{Т}} + R_{\text{пр}}\right) \tag{8}$$

Следовательно, условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч.

Из равенства (9) сопротивление термометра $R_{\text{Т}}$ будет равно:

$$R_{\text{Т}} = \frac{R_3}{R_1} R_2 - R_{\text{пр}} \tag{9}$$

Каждому значению R_T при равновесном состоянии мостовой схемы соответствует определенное значение R_2. Шкалу реохорда R_2 градуируют в °С, что позволяет по положению движка определить температуру нагрева термометра.

Для исключения влияния на результаты измерений колебаний сопротивления соединительных проводов применяют трехпроводную схему включения термометра (рисунок).

В этом случае для симметричного моста (когда $R_1 = R_3$) при условии равенства сопротивлений соединительных проводов равновесие моста будет иметь место при $R_{\text{Т}} = R_2$, т.е. изменение сопротивления проводов не будет влиять на результаты измерений.

Уравновешенные мосты имеют высокий класс точности, допускают колебания напряжения источника в пределах ±20 %, позволяют автоматизировать процесс измерения.

В неуравновешенном измерительном мосту тремя плечами являются постоянные сопротивления, а термометр сопротивления включается в четвертое плечо. К одной из диагоналей подключается источник питания, а в другую пирометрический милливольтметр (ПМ), показания которого зависят от сопротивления термометра. Сопротивление $R_{\text{к}}$ служит для контроля напряжения питания схемы.

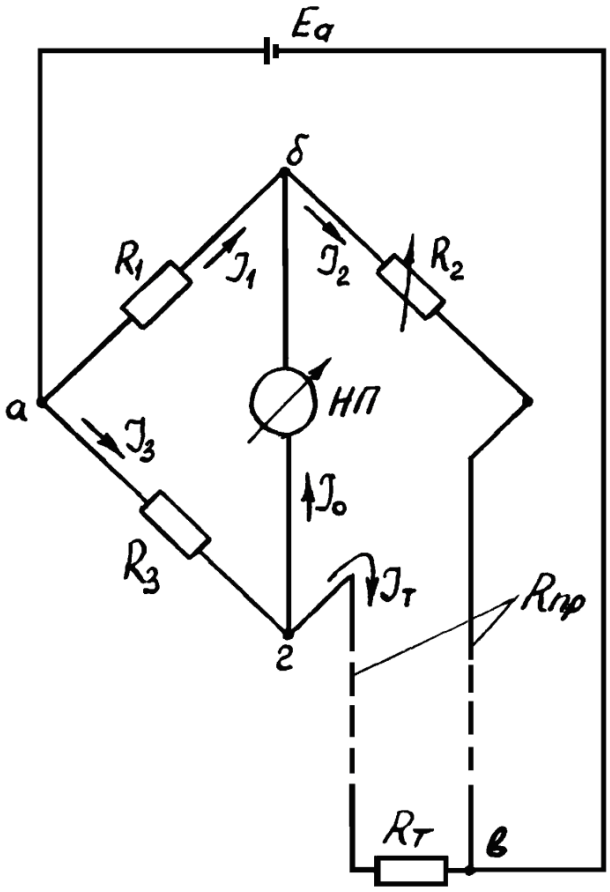


Рисунок 4 – Трехпроводная схема включения термометра сопротивления в уравновешенный мост

Перед началом измерений переключатель П ставят в положение 1. В этом случае четвертым плечом моста будет сопротивление $R_к$. Если питающее напряжение U_{ab} имеет номинальное значение, то стрелка милливольтметра устанавливается против контрольной отметки на шкале. Если этого нет, то, изменяя положение движка реостата R, выводят стрелку милливольтметра на контрольную отметку. При измерении переключатель ставят в положение 2. В этом случае четвертым плечом моста будет сумма сопротивлений $(R_Т + R_{пр})$, ток через рамку милливольтметра будет функцией этой суммы сопротивлений. Отсчет результата измерения производят по заранее проградуированной шкале милливольтметра. Такие мосты применяют крайне редко, так как результаты измерений зависят от колебаний сопротивления соединительных проводов и питающего мост напряжения. Рекомендуется применять неуравновешенные мосты в тех случаях, когда сопротивление датчика во много раз превышает сопротивление соединительных проводов.

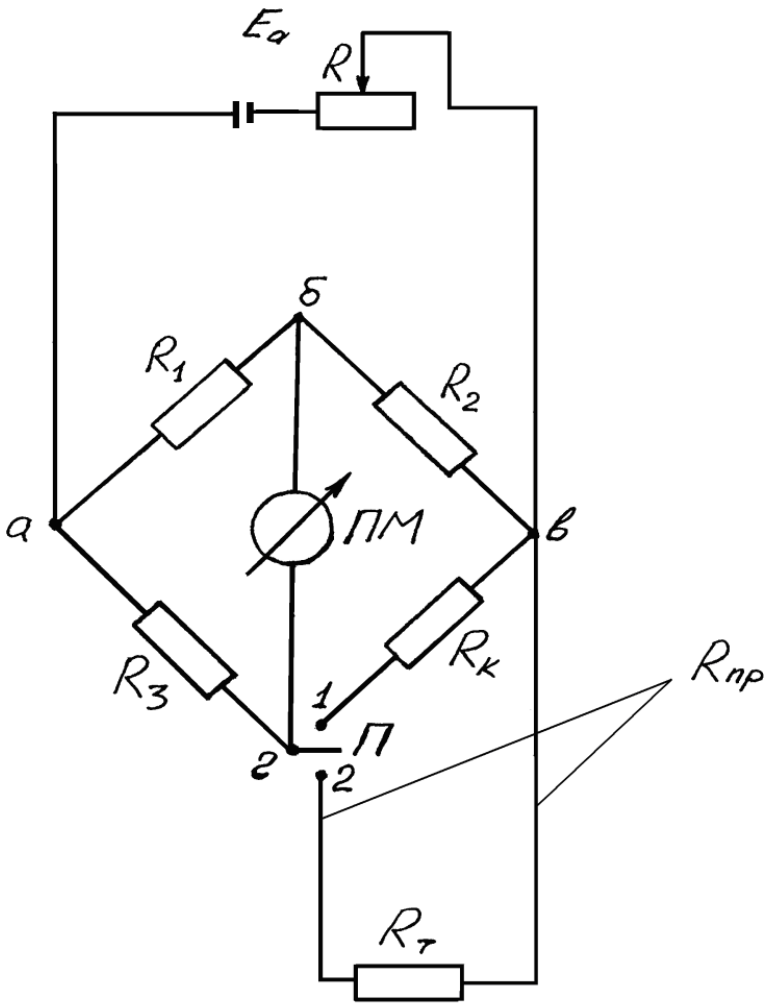


Рисунок 5 – Принципиальная схема неуравновешенного моста: E_a – источник питания; R – реостат для установки номинальной величины напряжения питания схемы; R_1, R_2, R_3 – постоянные сопротивления; П – переключатель; $R_к$ – контрольное сопротивление; $R_т$ – сопротивление термометра; $R_{пр}$ – сопротивление проводов;

Автоматические уравновешенные мосты широко используются для измерения и регистрации температуры в комплекте с ТС, а также других параметров, изменение которых может быть преобразовано в изменение активного сопротивления. Их характеризуют высокая точность и возможность использования в системах автоматического регулирования. Они выпускаются различных модификаций: одно- и многоточечные, с дисковой и ленточной диаграммой, с сигнальными устройствами и др.

На рисунке приведена принципиальная схема автоматического уравновешенного моста, работающего на переменном токе, который также как ручной равновесный мост, реализует нулевой метод измерения сопротивления.

Напряжение разбаланса на вершинах моста *a* и *b* подается на вход электронного усилителя ЭУ. В нем оно усиливается до величины, достаточной для приведения в действие реверсивного электродвигателя РД. Ротор двигателя вращается в ту или другую сторону в зависимости от знака напряжения разбаланса, через систему передач перемещает движок компенсирующего переменного резистора (реохорда) $R_р$, уравновешивая измерительную схему моста, а также перемещает показывающую стрелку. Если мост находится в равновесии, то ротор РД не вращается, т.к. напряжения на вход электронного усилителя не подается.

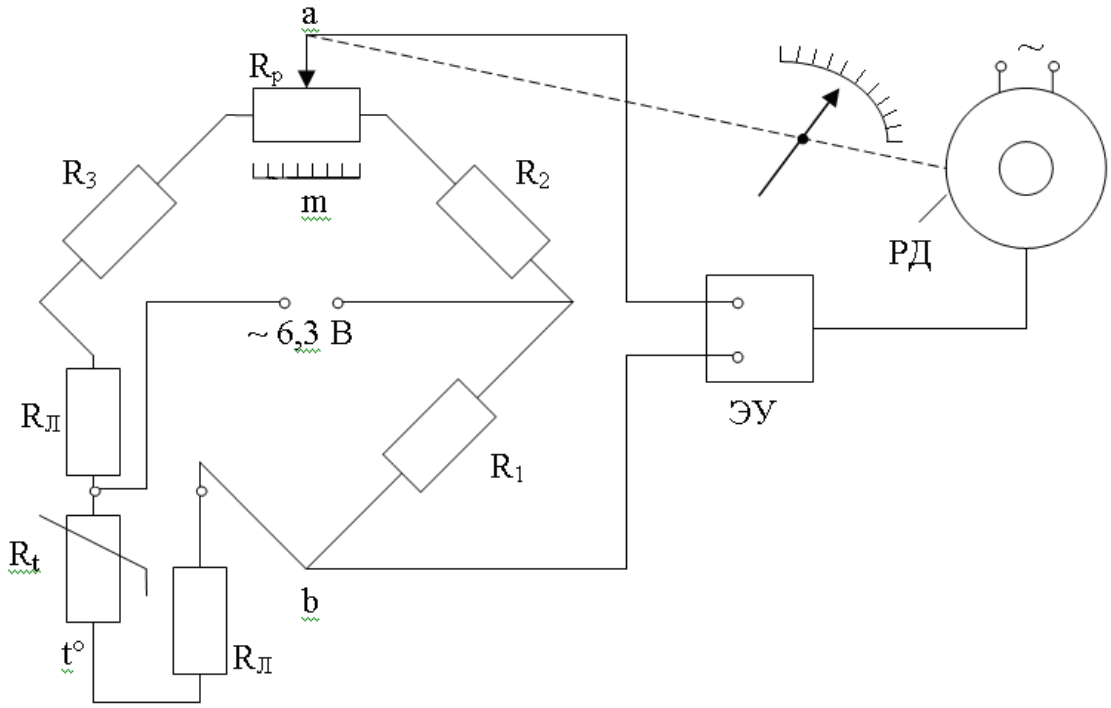


Рисунок 6 - Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

Кроме мостов, в качестве измерительных приборов для термометров сопротивления иногда применяют логометры, представляющие собой разновидность электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы (рисунок).

Постоянный магнит снабжен полюсными наконечниками *N* и *S* с цилиндрическими выточками. Центры выточек полюсных наконечников смещены относительно центра сердечника. Между полюсными наконечниками расположен цилиндрический сердечник из стали, вокруг которого вращается подвижная система из двух рамок RI и R2. К рамкам прикреплена стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы. Воздушный зазор между полюсными наконечниками и сердечником неравномерный, поэтому магнитная индукция меняется (наибольшее значение в середине полюсных наконечников, наименьшее - у края), являясь функцией угла поворота от среднего положения.

К рамкам подводится ток от общего источника питания (*G*). В рамку R_1 ток поступает через термометр сопротивления R_T., в рамку R_2 – через резистор *R* постоянного сопротивления. Направление сил тока I_1 и I_2 таково, что вращающие моменты рамок оказываются направленными навстречу один другому.

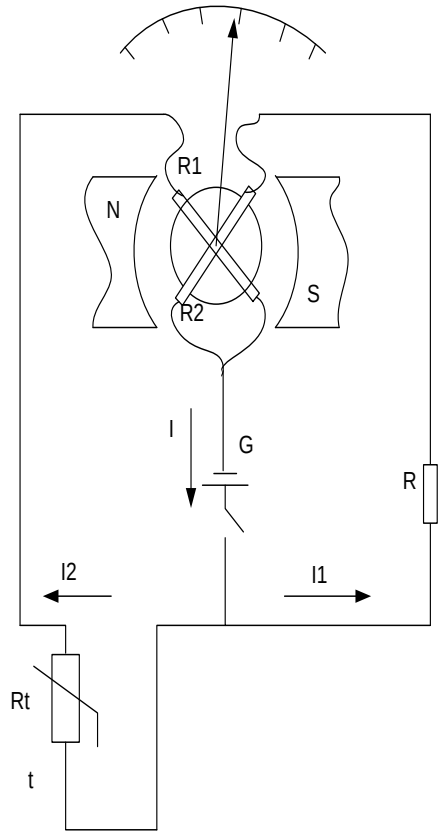


Рис. 7 - Принципиальная схема логометра

Вращающие моменты рамок:

$$M_1 = C_1 \cdot B_1 \cdot \mathrm{I}\ , \tag{10}$$

$$M_2 = C_2 \cdot B_2 \cdot \mathrm{I}_2, \tag{11}$$

где C_1 и C_2 – постоянные, геометрических размеров и числа витков рамок; B_1 и B_2 – индукции в зоне расположения рамок.

Если сопротивление рамок одинаковое $R_1 = R_2$ и $R = R_t$, то $I_1 = I_2$, т.е. вращающие моменты рамок $M_1 = M_2$. При этом подвижная система находится в среднем положении. При изменении сопротивления термометра вследствие нагрева (или охлаждения) через одну из рамок потечет ток большей силы, равенство моментов нарушится, и подвижная система начнет поворачиваться в сторону действия большего момента. При вращении подвижной системы рамка, по которой течет ток большей силы, попадает в зазор с меньшей магнитной индукцией, вследствие чего действующий на нее момент уменьшается. При этом другая рамка входит в зазор с большей магнитной индукцией, и ее момент увеличивается. Вращение рамок продолжается до тех пор, пока их вращающие моменты станут снова равны. В момент равновесия

$$C_1 \cdot B_1 \cdot \mathrm{I}_1 = C_2 \cdot B_2 \cdot \mathrm{I}_2 \tag{12}$$

или

$$\frac{\mathrm{I}_1}{\mathrm{I}_2} = \frac{C_2}{C1} \cdot \frac{B_2}{B_1} = C \cdot \frac{B_2}{B_1}. \tag{13}$$

Подставив в это уравнение значения I_1 и I_2, выраженные через напряжение источника питания U и сопротивление цепей, получим:

$$\frac{\dfrac{U}{R+R_t}}{\dfrac{U}{R_t+R_2}} = \frac{R_t+R_2}{R+R_1} = C\frac{B_2}{B_1}. \qquad (14)$$

Так как $B = f\ (\varphi)$, то и отношение $B_2/B_1 = f\ (\varphi)$; тогда

$$\frac{R_t+R_2}{R+R_1} = \mathrm{f}(\varphi) \qquad (15)$$

или

$$\varphi = f\left(\frac{R_t+R_2}{R+R_1}\right). \qquad (16)$$

В этом выражении R, R_1 и R_2 постоянные, поэтому угол поворота подвижной системы зависит только от сопротивления термометра: $\varphi = f(R_t)$.

Показания прибора не зависят от колебания напряжения источника питания только в определенных границах. Так, при колебаниях напряжения питания $\pm$ 20 % возникает угловая погрешность $\Delta\varphi \approx 0{,}5 - 1\%$.

К рамкам логометра ток подводится тремя тонкими спиральными волосками, служащими одновременно для возвращения стрелки прибора к началу шкалы при прекращении питания прибора током.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление.
5 . Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.
6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

Ознакомиться с электрической схемой соединения датчика с измерительным прибором для снятия статической характеристики. Статическая характеристика датчика - функциональная зависимость между изменениями входной X и выходной Y величинами.

Собрать схему пр8

Представить схему для проверки преподавателю.

Включить питание модулей. Произвести измерение сопротивления на выходных клеммах датчика (2 – 10 Ом), изменяя температуру нагрева датчика от 25°С до 75°С

По мере увеличения температуры записывать показания с дисплея прибора и показания величины показания напряжения с прибора(мультиметра) через 1…2 °С.

Данные занести в таблицу и построить график зависимости сопротивления от температуры.

	1	2	3	4	5	…	N
Время, сек							
Температура, °С							
Сопротивление млОм							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИЗУЧЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕРМОСТАТА»

Цель работы – изучение биметаллического регулируемого термостата.

Теоретическая часть:

Впервые биметаллические пластины были применены в XVIII веке английским часовщиком Джоном Харрисоном, который использовал их для регулирования точности хода морских хронометров. Современный биметаллический терморегулятор - это наиболее практичное и дешевое решение проблемы контроля рабочего диапазона температур.

Принцип работы биметаллического термостата.

При нагреве металлы расширяются. Каждый имеет свой коэффициент линейного расширения, из-за чего происходит искажение размеров и формы изделий из них. Это свойство определяет механизм работы биметаллических термостатов, который имеет такую последовательность:

Происходит нагрев пластины, один из слоев которой удлиняется быстрее.

В зависимости от видов металлов происходит постепенный или мгновенный изгиб пластины. Второй вариант изменения ее формы также называется механической бифуркацией.

Пластина приводит в действие исполнительный механизм термостата, который разрывает цепь.

Пластина остывает и возвращается в первоначальное состояние. Контакты устройства срабатывают автоматически или принудительно через кнопку, включая при этом цепь.

По своей сути регулируемый биметаллический термостат является тепловым реле, препятствующим перегреву оборудования. Такие устройства обычно рассчитаны на относительно небольшие температуры (до 180°С). Они также имеют нерегулируемое исполнение.

Преимущества использования биметаллических терморегуляторов.

Тепловые реле имеются в счетчиках, автоматических выключателях, электромоторах, бытовой технике и различном промышленном оборудовании. Биметаллический терморегулятор имеет несомненные достоинства: предельную простоту и надежность – устройство выдерживает до 100 тыс. циклов срабатывания; высокую точность срабатывания – ±1°С; низкую цену – биметаллическое реле в разы, а иногда и на порядок дешевле термостатов капиллярного типа; компактность, энергонезависимость и прочее.

Недостатком является инерционность – устройство может срабатывать с некоторым запозданием, но эта проблема решается путем настройки реле на более слабый нагрев.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление.
5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.

6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.

7. Провести эксперимент.

8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.

9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика «биметаллический термостат».

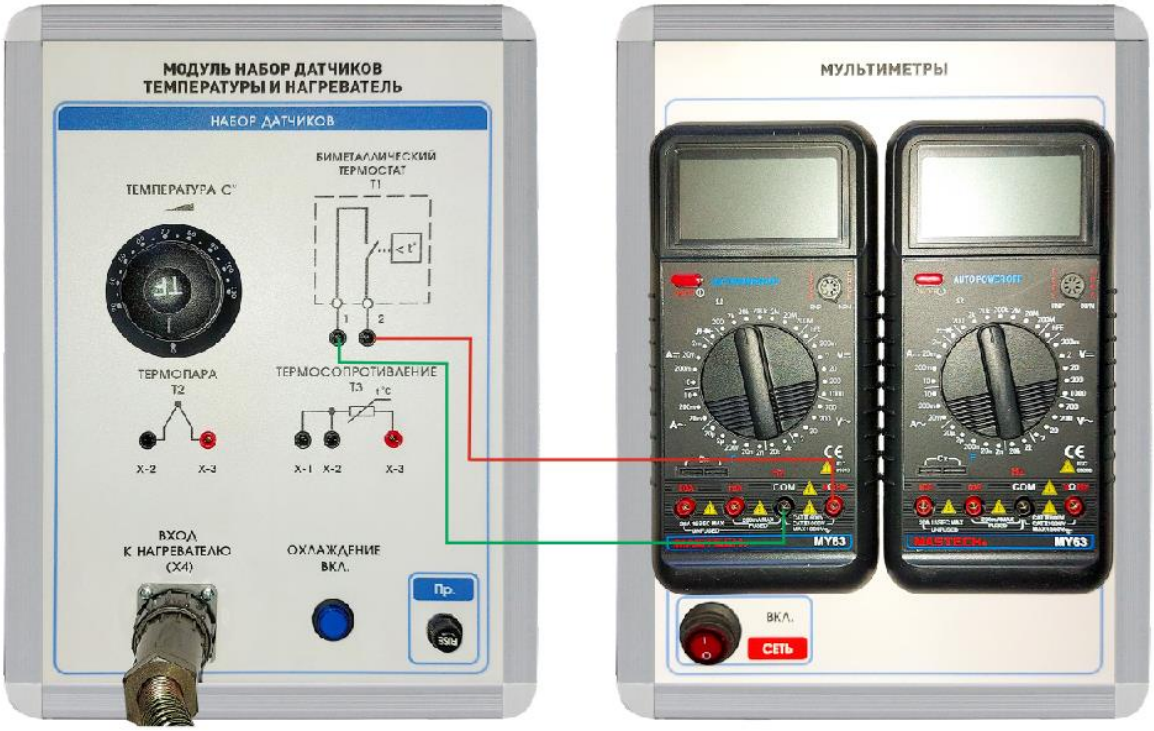


Рис. 9

2. Представить схему для проверки преподавателю.

3. Включить питание модулей. На модуле «МУЛЬТИМЕТРЫ» установить режим (прозвонки)

4. выставить температуру на биметаллическом термостате 30 С˚

5. Выставить уставку по температуре 75 С˚на блоке «модуль электронагреватель»

6. Засечь на секундомере за какое время нагреется электронагреватель и замкнуться концы биметаллического термостата.

7. Повторить пункты 4-6 для 40,50,60 ,70 С˚

8. Записать показания в таблицу

9. Построить график зависимости температуры срабатывания термостата от времени

Таблица

Температура уставки теромостата, °С	30С˚	40С˚	50С˚	60С˚	70С˚
Температура уставки нагревателя, °С	75С˚	75С˚	75С˚	75С˚	75С˚
Время, сек					

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКОВ ЦВЕТА И СВЕТА»

1.1. Цель работы:

1. Изучение датчика цвета.
2. Изучение фотодиода и влияния силы света на его характеристики.
3. Изучение фоторезистора и влияния силы света на его характеристики.
4. Изучение фототранзистора и влияния силы света на его характеристики.

1.2. Теоретические сведения

1. Датчик цвета TCS3200 можно использовать для распознавания цветов окружающих предметов в роботизированных системах. Датчик состоит из четырех светочувствительных сенсоров с оптическими фильтрами – красным, зеленым, голубым и бесцветным. Это позволяет выделить из света, отражающегося от исследуемого материала, четыре цветовых компонента.

Также на датчике располагаются четыре белых светоизлучающих диода, которые нужны для подсветки исследуемой поверхности.

Рисунок 1.2.1

Основа модуля определения цвета RKP-TSC3200 это микросхема TCS3200 (TAOS TCS3200 RGB sensor chip) представляет собой матрицу из фотодиодов 8 x 8, всего 64 фотодиода в одном кристалле. Из них 16 фотодиодов имеют синий светофильтр, 16 фотодиодов имеют зеленый светофильтр, 16 фотодиодов имеют красный светофильтр и 16 фотодиодов без светофильтра.

Такая внутренняя компоновка микросхемы TCS3200 позволяет датчику измерять интенсивность цвета в четырех цветовых диапазонах: синем, зеленом, красном и белом.

Питание датчика цвета необходимо осуществлять от источника питания напряжением +5 В. Управлять работой датчика можно сигналами S0, S1, S2, S3 и S4.

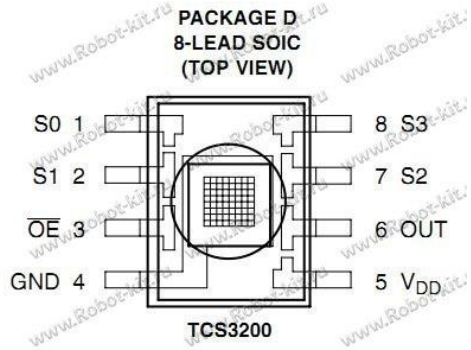


Рисунок 1.2.2

Датчик выдает информацию о цвете в виде импульсов, частота которых пропорциональна интенсивности света поступающего на соответствующий сенсор. Для удобства исследований цифровой выходной сигнал преобразован в аналоговый при помощи ЦАП.

2. Фотодиод - прибор, основанный на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенный как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него.

В настоящее время при создании фотодиодов чаще других применяются p-n переходы, поэтому рассмотрим работу таких фотодиодов.

Фотодиод представляет собой пластинку полупроводникового материала, внутри которого имеются области примесной электронной (*n* – область) и дырочной (*p* – область) проводимостей. Границу между этими областями называют контактным *p-n* переходом (рисунок 1.2.3). Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами с присоединенными к ним выводами, с помощью которых осуществляется связь с внешней цепью. С целью предохранения чувствительного слоя фотодиода от воздействия внешней среды он покрывается лаком или монтируется в герметичном корпусе, изготовленном или из металла (со стеклянным входным окном) или из пластмасс.

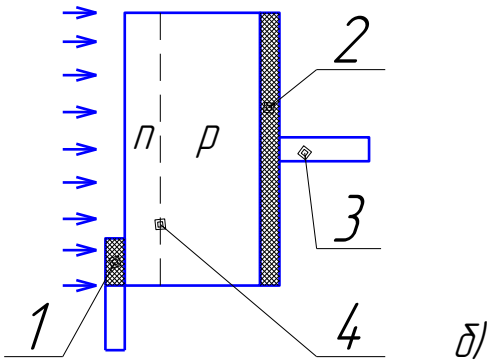


Рисунок 1.2.3 - Принципиальная схема фотодиода

Если внутри полупроводника граничат две области с разным типом проводимости, то возникает диффузия основных носителей тока: диффузионные токи электронов из *n* – области в *p* – область (ток I_{nn}) и дырок из *p* – области в *n* – область (ток I_{pp}). Приконтактные области объединяются основными носителями. Это приводит к появлению объемных зарядов вблизи границы, образованных неподвижными зарядами ионизированных атомов примеси (рисунок 1.2.4).

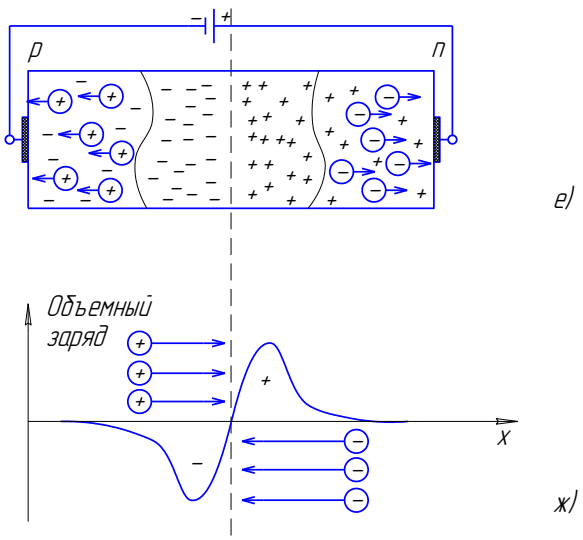


Рисунок 1.2.4 – Формирование p-n перехода

По мере нарастания объемных зарядов нарастает электрическое поле, противодействующее диффузии основных носителей (возникает потенциальный

барьер движению основных носителей и диффузионные токи основных носителей уменьшаются. Разность потенциалов этого поля называют контактной разностью потенциалов V_k, знак ее соответствует обеднению приконтактных областей основными носителями тока. Преодолеть потенциальный барьер могут только те из основных носителей, энергия которых больше энергии потенциального барьера ($E_k=eV_k$, e – заряд электрона).

Одновременно с диффузионным током основных носителей возникает встречный дрейфовый ток неосновных, т.к. для них контактное электрическое поле является ускоряющим. Дырки из n – области переходят в p – область (ток I_{pn}), а электроны из p – области – в n – область (ток I_{np}). Контактная разность потенциалов возрастает до тех пор, пока потоки основных и неосновных носителей через p-n переход не достигнут динамического равновесия:

$$I_{nn} = I_{np};\ \ I_{pp} = I_{pn} \tag{1.1.1}$$

При этом во внешней цепи ток отсутствует:

$$I_1 = I_{nn} + I_{pp} - I_{np} - I_{pn} = 0 \tag{1.1.2}$$

При приложении внешнего напряжения V_D потенциальный барьер изменяется на величину eV_D. Равновесие тока нарушается. При этом поток неосновных носителей через p-n переход изменяется незначительно, а ток основных носителей зависит от V_D: при прямом включении (плюс к p – области, минус к n – области) контактная разность потенциалов уменьшается и ток основных носителей очень быстро возрастает с увеличением V_D. При обратоном включении контактная разность потенциалов увеличивается и ток основных носителей практически прекращается. Вольт-амперная характеристика неосвещенного p-n перехода приведена на рисунок 1.2.5 (кривая $Ф$ = 0), где за положительные приняты: запирающее напряжение на диоде и обратный ток диода.

При облучении одной из областей излучением с энергией квантов $E_Ф$, превышающей ширину запрещенной зоны собственного полупроводникового материала этой области (ΔE) – $E_Ф > \Delta E$ – в объеме полупроводника генерируются пары неравновесных носителей тока – фотоэлектроны и фотодырки (внутренний фотоэффект в собственном полупроводнике). Когда дифференцирующие в объеме полупроводника фотоносители достигают области p-n перехода, в контактном электрическом поле происходит пространственное разделение пар: основные фотоносители остаются в объеме той области, где они возникли; неосновные свободно проходят через p-n переход, так как для них контактное поле является ускоряющим. Таким образом, неосновные фотоносители создают внутри p-n перехода дополнительный ток, который называют фототоком I_F.

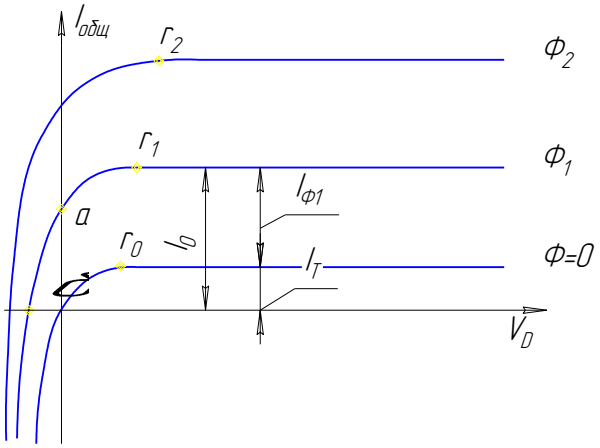
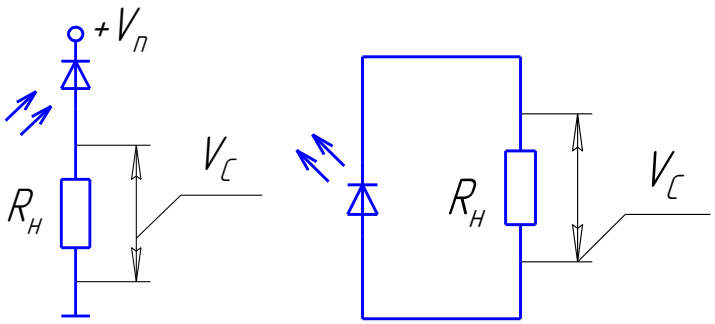


Рисунок 1.2.5 - Вольт-амперная характеристика *p-n* перехода

В зависимости от способа включения фотодиода и способа измерения фотосигналом цепи включения может служить или фототок или напряжение фотосигнала.

Фототок фотодиода преобразуется в напряжение фотосигнала посредством включения в электрическую цепь сопротивления нагрузки R_H

Применяют два способа (основных) включения фотодиода: фотодиодный режим (рисунок1.2.6(а)), вентильный режим (рисунок 1.2.6(б))



а б

Рисунок 1.2.6 - Фотодиодный (а) и вентильный (б) режимы работы фотодиода

Вентильный режим характерен отсутствием внешнего источника питания, т.е. используется способность *p-n* перехода фотодиода генерировать фотосигналы – фототок или фото ЭДС.В фотодиодном режиме внешнее напряжение V_D прикладывается в запирающем направлении.

3. Фоторезистор – это датчик, электрическое сопротивление которого меняется в зависимости от интенсивности падающего на него света. Чем интенсивней свет, тем больше создается свободных носителей зарядов и тем меньше становится сопротивление элемента.

Фоторезистор представляет собой тонкую пластинку или пленку полупроводника 1 с омическими контактами 2 на двух противоположных концах (рисунок 1.2.7), к которым подключается электрический источник питания. Полупроводник обычно наносится на стеклянную подложку 3.

Наиболее распространены фоторезисторы на основе CdS и CdSe, спектральные характеристики которых располагаются в видимой области спектра. В Инфракрасном диапазоне работают фоторезисторы из Ge, Si и т.д.

Падающее на поверхность фоторезистора излучение генерирует в нем свободные носители за счет собственного или примесного поглощения. Принцип

работы фоторезистора приведен на рисунке 1.2.8.

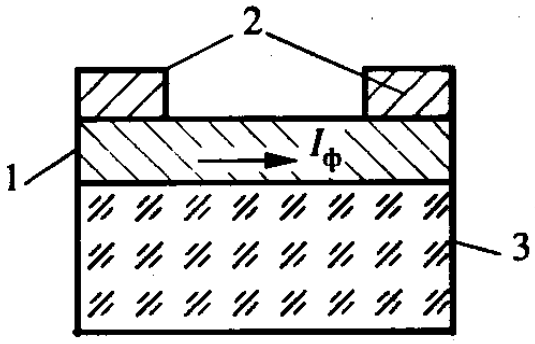
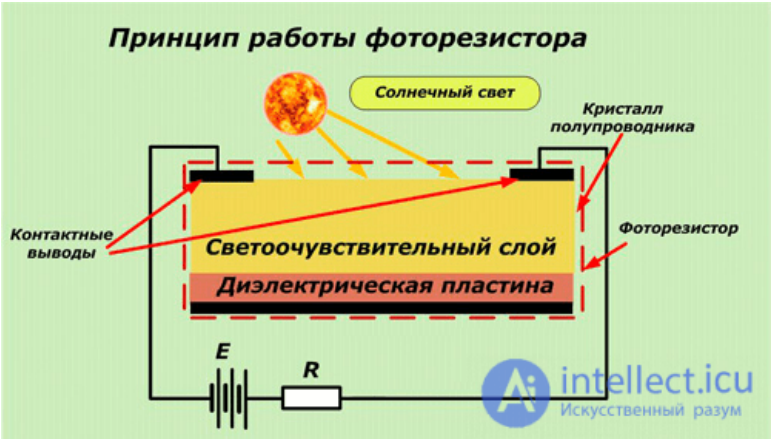


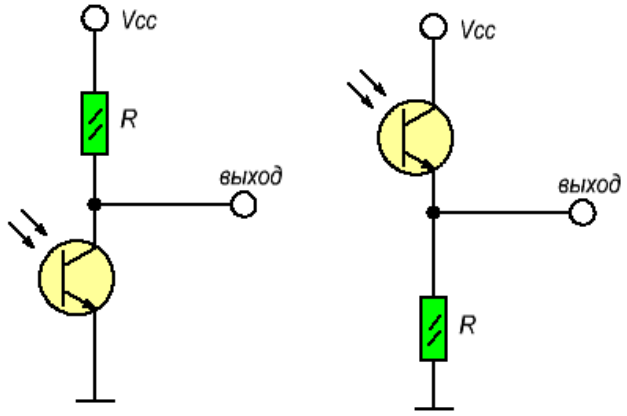
Рисунок 1.2.7 – Схема фоторезистора



1.2.8 – Принцип работы фоторезистора

4. Фототранзистор представляет собой твердотельное полупроводниковое устройство с внутренним усилением, которое используется для обеспечения аналоговых и цифровых сигналов. Фототранзисторы используются в детекторах дыма, лазерных радарах, системах дистанционного управления. Фототранзисторы более чувствительны по сравнению с фотодиодами, а также создают больший фототок.

Существует 2 основные схемы включения фототранзистора (рисунок 1.2.9).



1.2.9 – Схемы включения NPN транзистора. а – с общим эмиттером,

б – с общим коллектором

В случае включения по рисунку 1.2.9(а) сигнал переходит из высокого состояния в низкое в момент освещения фототранзистора, в случае 1.2.9(б) происходит обратное.

В обоих случая фототранзисторы могут использоваться в двух режимах работы: работа в активном режиме, работа в режиме переключения.

Работа в активном режиме подразумевает, что фототранзистор генерирует выходной сигнал пропорциональный степени его освещенности. То есть значение выходного сигнала имеет обратную зависимость от освещенности. Работа в режиме переключения подразумевает, что фототранзистор в ответ на его освещение будет либо «выключен», либо «включен». Активный режим используется тогда, когда необходимо различать несколько порогов напряжения. Режим переключения используется тогда, когда необходимо получить цифровой выходной сигнал. Переход от одного режима к другому осуществляется подбором резистора (в цепи коллектора в случае 1.2.9(а) или эмиттера в случае 1.2.9(б)). Обычно для режима переключения используется резистор номиналом более 5кОм, а для активного режима менее 5кОм.

Структура

1.3. Порядок проведения экспериментов:

В работе используются:

- модули: «Мультиметры», «Датчики цвета и света», «Регулируемый источник питания постоянного тока».

1. Изучение датчика цвета.

1.1 Ознакомиться с схемой соединения датчика с измерительным прибором (рисунок 1.3.1). В качестве измерительных приборов используются измерительные приборы модуля «Мультиметры».

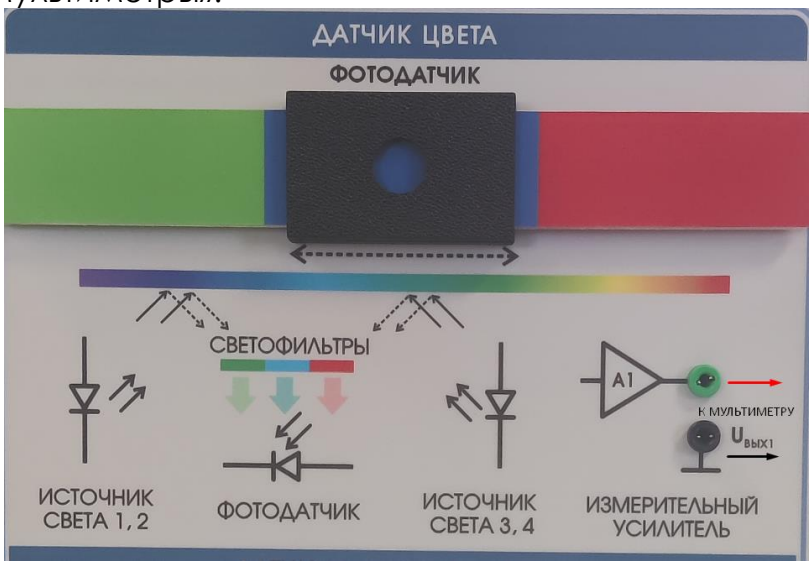


Рисунок 1.3.1 – Подключение мультиметра для исследования датчика цвета

1.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика.

1.3 Включить питание модулей.

1.4 Произвести исследование датчика без фильтра, с красным светофильтром, с зеленым светофильтром и синим светофильтром. Для этого произвести выбор светофильтра нажатием кнопки «ВЫБОР СВЕТОФИЛЬТРА» до зажигания контрольного светодиода «ЦВЕТ» цветом, соответствующем выбранному светофильтру.

1.5 Поочередно изменяя цвета полос, измерить выходное напряжение каждого датчика с различными светофильтрами.

1.6 Данные занести в таблицу 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Фильтр\Цвет полосы	красный	синий	зеленый
Uвых (мВ)без фильтра			
Uвых (мВ)красный			
Uвых (мВ)синий			
Uвых (мВ)зеленый			

1.7 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы.

2. Изучение фотодиода и влияния силы света на его характеристики

2.1 Ознакомьтесь с схемой соединения фотодиода с измерительными приборами и источником питания (рисунок 1.3.2). Вольтметр необходимо установить в положение – измерение постоянного напряжения 20В. Амперметр необходимо установить в положение – измерение постоянного тока 2 мА.

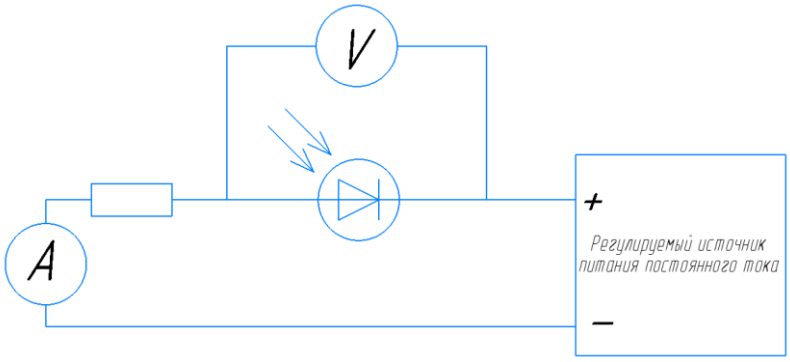


Рисунок 1.3.2 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фотодиода в фотодиодном режиме работы

2.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию характеристик фотодиода.

2.3 Включить питание модулей.

2.4 Установить напряжение питания 3В на модуле «Регулируемый источник питания постоянного тока».

2.5 Изменяя значение силы света (E(lx) при помощи ручки, зафиксировать значения напряжения и тока на мультиметрах и записать их в таблицу 1.3.2. В таблице указано значение освещенности для 11 рисок на поворотной ручке в порядке возрастания (0 соответствует 0 Lx, 1 соответствует 2150 Lx).

Таблица 1.3.2

Хар-ки\E(lx)	0	150	320	630	850	1100	1350	1610	1860	1990	2150
U_d											
I_d											

2.6 На основании полученных значений постройте зависимость фототока от освещенности.

2.7 Измените значение напряжения питания на 5В и повторите пункты 2.5 и 2.6.

2.8 Измените значение напряжения питания на 7В и повторите пункты 2.5 и 2.6.

2.9 Провести аналогичные опыты без источника питания (схема на рисунке 1.3.3).

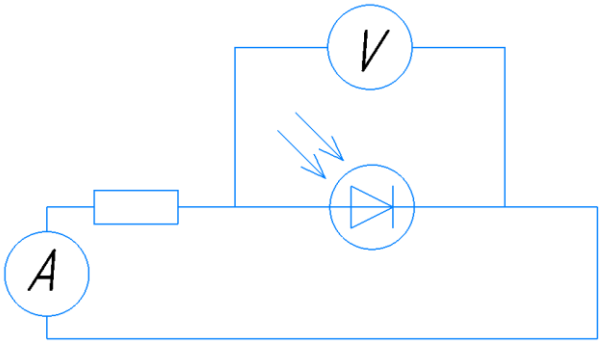


Рисунок 1.3.3 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фотодиода в вентильном режиме работы

2.10 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы.

3. Изучение фоторезистора и влияния силы света на его характеристики

3.1 Ознакомьтесь с схемой соединения фоторезистора с измерительными приборами и источником питания (рисунок 1.3.4). Вольтметр необходимо установить в положение – измерение постоянного напряжения 20В. Амперметр необходимо установить в положение – измерение постоянного тока 20 мА.

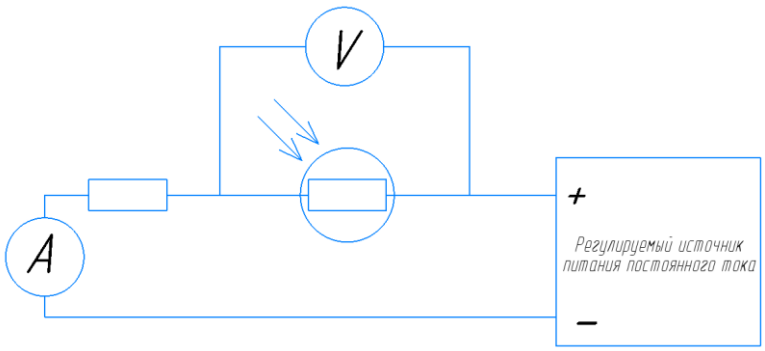


Рисунок 1.3.4 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фоторезистора

3.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию характеристик фоторезистора.

3.3 Включить питание модулей.

3.4 Установить напряжение питания 3В на модуле «Регулируемый источник питания постоянного тока».

3.5 Изменяя значение силы света (E(lx) при помощи ручки, зафиксировать значения напряжения и тока на мультиметрах и записать их в таблицу 1.3.3. В таблице указано значение освещенности для 11 рисок на поворотной ручке в порядке возрастания (0 соответствует 0 Lx, 1 соответствует 2150 Lx).

Таблица 1.3.3

Хар-ки\E(lx)	0	150	320	630	850	1100	1350	1610	1860	1990	2150
U_{fr}											
I_{fr}											

3.6 На основании полученных значений постройте зависимость фототока от освещенности.

3.7 Измените значение напряжения питания на 5В и повторите пункты 3.5 и 3.6.

3.8 Измените значение напряжения питания на 7В и повторите пункты 3.5 и 3.6.

3.9 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы.

4. Изучение фототранзистора и влияния силы света на его характеристики

4.1 Ознакомьтесь с схемой соединения фототранзистора с измерительными приборами и источником питания (рисунок 1.3.5). Вольтметр необходимо установить в положение – измерение постоянного напряжения 20В. Амперметр необходимо установить в положение – измерение постоянного тока 20 мА.

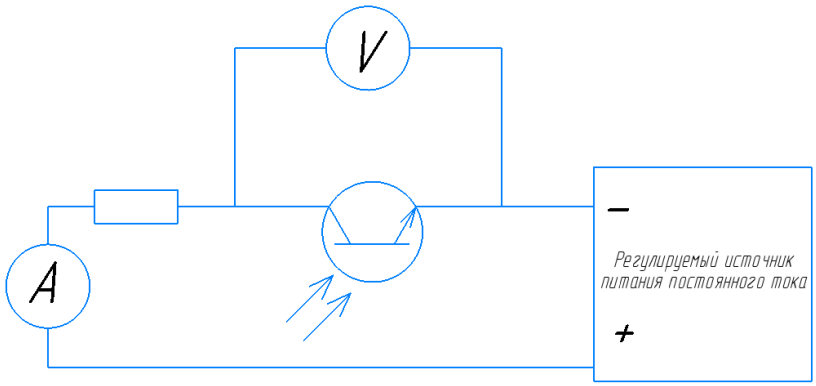


Рисунок 1.3.5 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фототранзистора в активном режиме

4.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию характеристик фоторезистора.

4.3 Включить питание модулей.

4.4 Установить напряжение питания 3В на модуле «Регулируемый источник питания постоянного тока».

4.5 Изменяя значение силы света (E(lx) при помощи ручки, зафиксировать значения напряжения и тока на мультиметрах и записать их в таблицу 1.3.4. В таблице указано значение освещенности для 11 рисок на поворотной ручке в порядке возрастания (0 соответствует 0 Lx, 1 соответствует 2150 Lx).

Таблица 1.3.4

Хар-ки\E(lx)	0	150	320	630	850	1100	1350	1610	1860	1990	2150
U_{vt}											
I_{vt}											

4.6 На основании полученных значений постройте зависимость фототока от освещенности.

4.7 Измените значение напряжения питания на 5В и повторите пункты 4.5 и 4.6.

4.8 Измените значение напряжения питания на 7В и повторите пункты 4.5 и 4.6.

4.9 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы, определить режим работы фототранзистора.

ЗАМЕТКИ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНА
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.09.06 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 9
Основы метрологии 11
1.1. Краткий исторический обзор 11
1.2. Термины и определения 14
1.3. Задачи метрологии 18
1.4. Международная система единиц 22
1.4.1. Общие положения 22
1.4.2. Основные единицы 23
1.4.3. Производные единицы 25
1.4.4. Внесистемные единицы 27
1.4.5. Кратные и дольные единицы 32
1.4.6. Единицы количества информации 33
1.4.7. Достоинства Международной системы единиц 33
2. Основы теории погрешностей 34
2.1. Общие положения 34
2.2. Нормальный закон распределения 38
2.3. Распределение Стьюдента 40
2.4. Распределение χ^2 41
2.5. Классификация погрешностей 43
2.6. Количественные характеристики погрешностей 46
3. Характеристики средств измерений 48
3.1. Общие положения 48
3.2. Статические характеристики 49
3.3. Динамические характеристики 50
3.4. Универсальные характеристики 53
3.5. Характеристики погрешностей 54
3.6. Классы точности 55
4. Статические погрешности средств измерений 60

4.1. Общие положения ... 60
4.2. Выявление промахов ... 62
4.3. Систематические погрешности ... 65
4.4. Случайные погрешности ... 67
4.5. Суммарные погрешности ... 69
4.6. Правила округления ... 72
4.7. Пример расчета ... 73
5. Доверительные интервалы и погрешности погрешностей ... 78
5.1. Общие положения ... 78
5.2. Погрешность арифметического среднего ... 78
5.3. Погрешность систематической погрешности ... 79
5.4. Погрешность среднего квадратического отклонения ... 81
5.5. Необходимое число измерений ... 82
5.6. Пример расчета ... 86
6. Динамические погрешности средств измерений ... 90
6.1. Общие положения ... 90
6.2. Передаточные функции ... 92
6.3. Частотные характеристики ... 95
6.4. Пример расчета ... 97
7. Погрешности результатов измерений ... 102
7.1. Погрешности прямых многократных измерений ... 102
7.1.1. Порядок оценки ... 102
7.1.2. Пример расчета ... 106
7.2. Погрешности прямых однократных измерений ... 109
7.2.1. Порядок оценки ... 109
7.2.2. Примеры расчета ... 112
7.3. Погрешности косвенных измерений ... 116
7.3.1. Порядок оценки погрешностей классическим методом ... 116
7.3.2. Порядок оценки погрешностей по МИ 2083–90 ... 120
7.3.3. Примеры расчета ... 124

7.4. Неопределенности измерений 129
8. Измерения физических величин 135
8.1. Общие положения 135
8.2. Датчики 137
8.3. Измерительные схемы 139
8.4. Средства измерения электрических величин 141
9. Построение и применение датчиков 143
9.1. Общие положения 143
9.2. Классификация датчиков 144
9.3. Параметрические датчики 147
9.3.1. Реостатные датчики 147
9.3.2. Датчики контактного сопротивления 149
9.3.3. Тензорезисторные датчики 151
9.3.4. Фоторезисторные датчики 155
9.3.5. Терморезисторные датчики 157
9.3.6. Индуктивные датчики 160
9.3.7. Емкостные датчики 167
9.4. Генераторные датчики 169
9.4.1. Термоэлектрические датчики 169
9.4.2. Пьезоэлектрические датчики 175
9.4.3. Индукционные датчики 178
9.4.4. Датчики Холла 180
9.4.5. Трансформаторные датчики 182
9.5. Тенденции развития датчикостроения 186
10. Динамика термочувствительных датчиков 188
10.1. Исходные данные 188
10.2. Скачкообразное изменение температуры 190
10.3. Линейное изменение температуры 195
11. Мостовые измерительные схемы 199
11.1. Общие положения 199

11.2. Основные соотношения при исследовании чувствительности 201
11.3. Основные соотношения при исследовании линейности 203
12. Неравновесные токовые мостовые измерительные схемы 204
12.1. Чувствительность токовых мостовых схем 204
12.1.1. Общие положения 204
12.1.2. Основные соотношения 206
12.1.3. Выводы и рекомендации 213
12.2. Линейность токовых мостовых схем 215
12.2.1. Общие положения 215
12.2.2. Основные соотношения 217
12.2.3. Выводы и рекомендации 226
13. Неравновесные потенциальные мостовые схемы 228
13.1. Чувствительность потенциальных мостовых схем 228
13.1.1. Общие положения 228
13.1.2. Основные соотношения 229
13.2. Линейность потенциальных мостовых схем 231
13.2.1. Общие положения 231
13.2.2. Основные соотношения 233
13.2.3. Выводы и рекомендации 242
14. Равновесные мостовые схемы 245
14.1. Общие положения 245
14.2. Датчик в первом плече 245
14.3. Датчик во втором плече 248
14.4. Датчик в третьем плече 250
14.5. Датчик в четвертом плече 251
14.6. Примеры расчета равновесных схем 253
15. Мостовые схемы переменного тока 257
15.1. Общие положения 257
15.2. Измерения параметров катушек индуктивности 262
15.3. Измерение параметров конденсаторов 267

15.4. Шестиплечие мостовые схемы 271
15.5. Трансформаторные мостовые схемы 272
15.6. Выводы и рекомендации 274
16. Примеры использования равновесных мостовых измерительных схем 276
16.1. Двух- и трехпроводные схемы включения датчиков 276
16.2. Автоматические мостовые схемы 277
17. Аналоговые электромеханические приборы 279
17.1. Общие положения 279
17.2. Магнитоэлектрические приборы 281
17.3. Электромагнитные приборы 284
17.4. Электродинамические приборы 288
17.5. Электростатические приборы 291
17.6. Индукционные приборы 294
17.7. Логометры 296
18. Приборы сравнения 299
18.1. Общие положения 299
18.2. Компенсаторы постоянного тока с ручным управлением 299
18.3. Автоматические компенсаторы постоянного тока 302
18.4. Полярно-координатные компенсаторы переменного тока 305
18.5. Прямоугольно-координатные компенсаторы переменного тока 306
19. Аналоговые электронные приборы 309
19.1. Общие положения 309
19.2. Вольтметры средних значений 310
19.3. Вольтметры амплитудных значений 314
19.4. Конденсаторные частотомеры 317
19.5. Омметры 320
20. Цифровые измерительные приборы 324
20.1. Общие положения 324
20.2. Электромеханические цифровые приборы 326
20.3. Электронные цифровые приборы 328

20.3.1. Времяимпульсные вольтметры ... 328
20.3.2. Уравновешивающие вольтметры ... 330
20.3.3. Электронно-счетные частотомеры ... 333
20.3.4. Измерители временных интервалов ... 335
20.3.5. Измерители разности фаз ... 338
20.4. Мультиметры ... 340
21. Измерительно-компьютерные системы ... 341
22. Измерение электрических токов ... 344
22.1. Общие положения ... 344
22.2. Измерение постоянного тока ... 346
22.3. Измерение переменного тока ... 351
23. Измерение электрических напряжений ... 354
23.1. Общие положения ... 354
23.2. Измерение постоянного напряжения ... 356
23.3. Измерение переменного напряжения ... 360
24. Измерение электрических сопротивлений ... 365
24.1. Общие положения ... 365
24.2. Измерение малых сопротивлений ... 370
24.3. Измерение средних сопротивлений ... 376
24.4. Измерение больших сопротивлений ... 384
25. Измерение температуры ... 389
25.1. Общие положения ... 389
25.2. Термометры ... 394
25.3. Пирометры ... 403
Заключение ... 411
Библиографический с писок ... 413
Приложение 1. Статистические таблицы ... 418
Приложение 2. Критерий согласия по ГОСТ 8.508 – 84 ... 423
Приложение 3. Характеристики датчиков ... 426
Приложение 4. Условные обозначения на шкалах и корпусах приборов ... 438

Приложение 5. Характеристики электроизмерительных приборов..... 441
Приложение 6. Условные графические обозначения в схемах 447
Приложение 7. Обозначение единиц измерения, их кратных и дольных значений 450
Приложение 8. Классификация электронных электроизмерительных приборов и система их обозначения..... 451
Приложение 9. Технические характеристики стандартных измерительных шунтов 454
Приложение 10. Технические характеристики устройства типа И58М 455
Приложение 11. Технические характеристики добавочного сопротивления типа Р-109..... 457
Приложение 12. Технические характеристики жидкостных термометров 458
Приложение 13. Технические характеристики манометрических термометров.. 460
Приложение 14. Визуальный оптический пирометр «Проминь» 461
Приложение 15. Телескоп пирометра суммарного излучения типа ПИРС-019 с усилителем 462

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие посвящено методам и средствам измерения. В работе приводятся основные понятия, встречающиеся в теории и практике метрологического обеспечения измерений. Рассмотрены методы и средства измерений физических величин, в том числе датчики, мостовые измерительные схемы, электроизмерительные приборы и приборы для измерения неэлектрических величин.

Особенно детально рассмотрены вопросы, связанные с погрешностями, так как в задачу каждого измерения входит не только определение искомой величины, но и оценка погрешности полученного результата.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют учебники и учебные пособия (см., например, [1–12]), которые бы в полной мере отвечали учебным планам специальностей: 230101 – ВМКСС; 230102 – АСУ; 280101 – БЖТ; 280103 – ЗЧС; 280104 – ПБ и рабочим программам по дисциплинам «Методы и средства измерений», «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов всех форм обучения перечисленных выше специальностей.

Монографии [13; 20–22] написаны для специалистов и по своему содержанию не могут служить учебными пособиями. В других случаях [1; 2; 7], стремясь к краткости и лаконичности, авторы опускают ряд существенных разделов курса. К тому же некоторые положения (например, по Международной системе единиц, по оценке погрешностей и др.) получили новую трактовку, что потребовало внести соответствующие изменения и дополнения.

При написании данного учебного пособия была сделана попытка охватить все вопросы, возникающие при изучении методов и средств измерений, а также основ метрологии, стандартизации и сертификации в соответствии с требованиями учебных планов и рабочих программ. Особенно большое внимание уделяется метрологии как науке об измерениях и их единстве. Значительная часть учебного пособия посвящена методам оценки погрешностей результатов и средств измерений.

Для сокращения объема учебного пособия некоторые второстепенные положения рассмотрены сравнительно кратко, без подробных доказательств и выкладок, а некоторые разделы изложены в виде инструкций и рекомендаций.

Работа снабжена приложениями, содержащими справочные данные, что может облегчить ее использование как практического руководства при оценке, например, погрешностей результатов и средств измерений без привлечения других книг и справочников. Последнее обстоятельство расширяет область использования учебника. И хотя учебник предназначен в основном для студентов, он с успехом может быть использован аспирантами, инженерами, преподавателями и научными работниками.

Библиографический список, приведенный в конце работы, включает в себя учебники, учебные пособия, монографии, справочники, нормативные документы и статьи, опубликованные в журналах и научных трудах. Ссылки на конкретные литературные источники приводятся по мере необходимости при рассмотрении соответствующих тем и задач метрологии и технических измерений. Новая литература, изданная в последние годы, приведена в конце библиографического списка. Здесь также представлен перечень нормативных документов, ссылки на которые сделаны в учебнике.

Автор благодарит рецензентов – закафедрой автоматизации производственных процессов УГЛТУ, кандидата технических наук, доцента С.П. Санникова и старшего научного сотрудника ИММ УрО РАН, кандидата технических наук, доцента С.И. Кумкова – за доброжелательное отношение к рукописи и за полезные замечания, сделанные ими при рецензировании.

Автор выражает признательность научному редактору, кандидату технических наук, доценту кафедры автоматики и управления в технических системах УГТУ–УПИ В.И. Паутову за большую работу по научному редактированию учебного пособия. Особую признательность автор выражает кандидату технических наук, доценту кафедры автоматики и информационных технологий УГТУ–УПИ Н.П. Бессонову за ценные советы и предложения, высказанные им при обсуждении рукописи.

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1.1. Краткий исторический обзор

Термин «метрология» образован из двух греческих слов: «метрон» – мера и «логос» – учение. В дословном переводе «метрология» – это учение о мерах или, как принято определять в настоящее время это понятие, – наука об измерениях (более полное определение термина «метрология» приведено ниже в разделе «Термины и определения»).

Измерения выполнялись человечеством с незапамятных времен. Уже в древности проводились измерения времени, расстояния между поселениями, веса (массы) физических тел, площади земельных участков и т. д. Как правило, при этом использовались антропологические единицы измерений, т. е. единицы измерений, связанные с человеком и размерами его тела. Например, в России использовались следующие меры [10; 11; 23]:

1) *перст* – ширина указательного пальца (в метрической системе мер около 2 см);

2) *вершок* – ширина сложенных вместе двух пальцев, указательного и среднего (около 4,4 см);

3) *пядь малая* – расстояние между концами вытянутых большого и указательного пальцев руки (около 19 см);

4) *пядь великая* – от кончика мизинца до кончика большого пальца, растянутых по одной линии (от 22 до 23 см);

5) *косая сажень* – расстояние от носка левой ноги до конца пальцев правой руки, вытянутой по диагонали (от 216 до 248 см).

Антропологические единицы обладают очевидными недостатками (у разных людей разные «пяди», «вершки», «сажени» и т. д.). Для преодоления недостатка «чистых» антропологических единиц уже сравнительно давно стали использовать в качестве образцовых мер и эталонов деревянные сажени, медные фунты, мерные бутыли и т. д. Вещественные образцовые меры и эталоны не могли преодолеть всех недостатков измерений, основанных на антропологи-

ческих единицах. Требовался переход на принципиально новые единицы измерений, что и было сделано при создании метрической системы мер. Научное обоснование такого перехода обеспечила метрология.

Метрология как наука зародилась в конце XVIII века во времена Великой французской буржуазной революции 1789 г. Основоположники метрологии – Кулон, Лавуазье, Лагранж, Лаплас и другие известные ученые – предложили перейти от антропологических единиц к естественным единицам измерений (в дальнейшем получившим название естественнонаучных единиц). В основу естественных единиц измерений были положены такие единицы, как метр, килограмм и секунда, связанные с размерами Земли и с вращением ее вокруг своей оси. За единицу массы (единицу «веса» в первоначальной редакции) был принят килограмм, приравненный к массе («весу») воды определенного объема при заданной температуре. 7 мая 1795 г. Конвент принял закон о внедрении метрической системы мер во Франции. Фактически же это внедрение происходило длительное время и потребовало больших усилий.

Приведем первые определения основных единиц метрической системы мер:

1) *метр* – это одна сорокамиллионная часть земного меридиана, проходящего через город Париж.

2) *килограмм* – вес 1 дм^3 чистой воды при +4 ^{0}С.

3) *секунда* – это 1/86 400 часть солнечных суток.

Таким образом, от единиц, связанными с размерами тела человека, был сделан пере

Первые определения метрических мер измерения имели чисто академический (научный) вид (отсюда и название «естественно-научные единицы»), и их практическое использование было затруднено. Например, в определении килограмма есть нечеткое понятие «чистая вода». Это какая вода: из озера, из реки, из родника или как-то специально приготовленная? Кроме того, возникают трудности при воспроизведении объема 1 дм^3 и при поддержании температуры воды +4 ^{0}С, что требуется по приведенному определению килограмма. Для преодоления этих недостатков был сделан переход на материальное воспроизведе-

ние единиц измерений. Например, метр был воспроизведен в виде платиновой линейки, а затем в виде расстояния между штрихами, нанесенными на двутавровую балочку из сплава платины и иридия. Аналогично килограмм стал воспроизводиться в виде цилиндрической гири из сплава платины и иридия. Соответственно изменились определения единиц измерений, причем определение метра просуществовало до 1960 г., а определение килограмма (как массы международного прототипа килограмма) оказалось настолько удачным, что существует до сих пор. Более подробно единицы измерений рассмотрены ниже, в последующих разделах учебного пособия.

В России основоположником метрологии принято считать Дмитрия Ивановича Менделеева (1834–1907), хотя и до него проводились отдельные работы по метрологии и метрологическому обеспечению измерений. Д.И. Менделеев был разносторонним ученым. Он хорошо известен как химик и создатель периодической системы химических элементов. Кроме того, он занимался воздухоплаванием и даже летал на воздушном шаре. По заданию правительства разработал для русской армии бездымный порох. До этого в русской армии использовался дымный порох, малоэффективный и дающий много дыма (особенно при стрельбе из орудий большого калибра).

Кроме чисто научной деятельности, Д.И. Менделеев проводил большую организационную работу. В 1893 г. им была создана Главная палата мер и весов, являвшаяся, по существу, научно-исследовательским институтом метрологического профиля. В Англии аналогичная организация (Метрологическое отделение Национальной физической лаборатории) была создана в 1900 г., а в США – в 1901 г. (Национальное бюро стандартов).

Под руководством Д.И. Менделеева была проведена работа по сличению русской системы эталонов (аршин, сажень, фунт) с английскими и метрическими эталонами мер и весов. Была сделана попытка перейти на метрическую систему мер (метр, килограмм), но удалось добиться лишь ее факультативного применения.

Метрическая система мер как обязательная была официально признана лишь после Октябрьской революции 1917 года. 14 сентября 1918 г. был принят декрет Совнаркома «О введении Международной метрической системы мер и весов». Практически же это удалось сделать лишь через 9 лет – в 1927 г.

Для внедрения Международной метрической системы были созданы Палаты мер и весов во всех союзных республиках СССР и во многих крупных городах страны (в том числе и в Свердловске).

В дальнейшем Палаты мер и весов были преобразованы в Метрологические институты. Головным стал Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева, преобразованный в настоящее время в Федеральное государственное унитарное предприятие «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург).

Организационную работу по метрологии и стандартизации до 2005 года возглавлял Госстандарт России. В 2005 году создано Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование), которое заменило Госстандарт.

В области научной метрологии головной организацией по-прежнему остается Федеральное государственное унитарное предприятие (ФГУП) «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». В Екатеринбурге работу по научной метрологии проводит Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ).

Кроме того, в составе Минпромэнерго организован Департамент технического регулирования и метрологии, на который возложена разработка технических регламентов.

1.2. Термины и определения

Термины и определения, используемые в настоящем учебном пособии, соответствуют межгосударственным рекомендациям РМГ 29 – 99 [53], введенным с 01.01.2001 взамен ГОСТ 16263 – 70.

Приводимые ниже метрологические термины и их определения заимствованы также из словаря-справочника [26] и частично из периодических изданий в той части, в которой они не противоречат рекомендациям [117].

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение – это совокупность операций по сравнению опытным путем измеряемой величины с некоторым ее значением, принятым за единицу измерения.

Единица измеряемой величины – это значение измеряемой величины, которому по определению присвоено числовое значение, равное 1.

Например, при измерении массы тела единицей измерения является «тело» с массой 1 килограмм (по определению килограмм равен массе международного прототипа килограмма); при измерении размеров комнаты шагами единицей измерения является 1 шаг.

Истинное значение величины – это значение величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую величину.

Действительное значение величины – это значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

В качестве действительного значения измеряемой величины принимаются номинальные значения эталонов, образцовых мер, стандартных образцов, образцовых средств измерений и т. п.

Результат измерения – это значение величины, полученное путем ее измерения.

Равноточные измерения – это ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений и в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения – это ряд измерений какой-либо величины, выполненных разными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными.

Неравноточные измерения обрабатывают в целях получения результатов измерений только в том случае, когда невозможно получить ряд равноточных измерений.

Однократное измерение – это измерение, выполненное один раз.

Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам проводится один раз, т. е. выполняется однократное измерение.

Для большей уверенности в получаемом результате одного измерения иногда недостаточно, поэтому выполняются два, три и более измерений одной и той же величины. В этом случае могут быть допущены выражения «двукратное измерение», «трехкратное измерение» и т. д.

Многократное измерение – это измерение одного и того же значения искомой величины, состоящее из ряда однократных измерений.

При многократных измерениях возникает вопрос, начиная с какого числа измерений их можно считать многократными. Строгого ответа на этот вопрос нет. Однако известно, что при числе измерений, равном четырем (и более), ряд измерений может быть обработан в соответствии с требованиями математической статистики. Это означает, что при четырех измерениях (и более) их можно считать многократными [26]. За результат многократных измерений одной и той же величины обычно принимают среднее арифметическое значение x, полученное по формуле (1.1) для равноточных измерений и по формуле (1.2) – для неравноточных измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \,, \tag{1.1}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \,, \tag{1.2}$$

где x_i – результат i-го измерения;

n – число измерений;

P_i – весовой коэффициент i-го измерения.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) – это значение величины, полученное по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \qquad (1.3)$$

где σ – СКО;

x_i – результат i-го измерения;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое значение, полученное по формуле (1.1) или (1.2);

n – число измерений.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего арифметического значения ($\sigma_{\bar{x}}$) – это значение величины, полученное по формуле

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \qquad (1.4)$$

Отметим, что среднее квадратическое отклонение σ по формуле (1.3) характеризует разброс результатов измерений около среднего арифметического значения $\bar{x}$ (чем больше σ, тем больше результаты отдельных измерений отклоняются от $\bar{x}$). Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения $\sigma_{\bar{x}}$ по формуле (1.4) характеризует разброс средних арифметических значений $\bar{x}_j$ около генерального среднего значения $\bar{\bar{x}}$ (чем больше $\sigma_{\bar{x}}$, тем больше $\bar{x}_j$ отклоняется от $\bar{\bar{x}}$; здесь $\bar{x}_j$ – среднее арифметическое значение j-й серии многократных измерений одной и той же величины; $\bar{\bar{x}}$ – генеральное среднее арифметическое значение по результатам всех серий многократных измерений одной и той же величины).

Прямое измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных путем считывания с отчетных устройств используемых средств измерений.

Например, измерение массы на циферблатных весах, измерение температуры термометром, измерение длины с помощью линейных мер и т. д.

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямому измерению.

Например, нахождение плотности однородного тела по его массе.

Рабочее средство измерений – это средство измерений (СИ), предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений. К рабочим СИ относят средства измерений, применяемые в научных целях, при контроле параметров продукции и технологических процессов, в сельском хозяйстве, в торговле, спорте и других видах деятельности, где необходимо получить значение той или иной физической величины.

Метрологическое средство измерений – это средство измерений (СИ), предназначенное для метрологических целей: воспроизведения единицы и (или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим СИ. К метрологическим СИ относят эталоны, образцовые средства измерений (ОСИ), поверочные установки, стандартные образцы, средства сравнения (компараторы) и др.

Поверка средства измерений – это экспериментальное определение метрологических характеристик средства измерений и установление его пригодности к применению.

1.3. Задачи метрологии

К задачам метрологии относятся:

1) разработка и обоснование единиц измерений (единиц величин);
2) воспроизведение единиц измерений (единиц величин);
3) разработка, обоснование и аттестация методик выполнения измерений (МВИ);
4) аттестация средств измерений (СИ) по нормируемым метрологическим характеристикам;
5) стандартизация;
6) сертификация.

Разработка, обоснование и воспроизведение единиц измерений, а также аттестация МВИ и СИ подробно рассмотрены ниже, и в данном разделе учебного пособия эти задачи не рассматриваются.

Стандартизация и сертификация, строго говоря, к метрологии как науке об измерениях прямого отношения не имеют. Это самостоятельные дисциплины.

Стандартизация – это работа по установлению и применению норм и правил с целью упорядочить и оптимизировать деятельность в конкретной области (например, в области машиностроения, науки, экономики, торговли, транспорта и т. д.).

Сертификация – это подтверждение качества продукции или производства и их соответствия действующим стандартам и другим нормативно-техническим документам (НТД).

Хотя стандартизация и сертификация являются самостоятельными дисциплинами, они тесно «увязаны» с метрологией и опираются на нее. Часто трудно сказать, где заканчивается стандартизация и сертификация и начинается метрология, – настолько эти дисциплины тесно переплетены. В связи с этим стандартизация и сертификация отнесены к задачам метрологии (хотя это и является, как уже было сказано, несколько условным).

Деятельность в области стандартизации определяется принятыми в установленном порядке нормативными документами.

Нормативные документы, принятые в Российской Федерации:

1) **Законы Российской Федерации** (РФ).

2) **Указы Президента РФ**.

3) **Постановления Правительства РФ**.

Законы РФ, указы Президента и постановления Правительства обязательны к исполнению на всей территории РФ и на всех предприятиях, во всех организациях и учреждениях независимо от форм собственности.

4) **Государственные стандарты (ГОСТы)** – нормативные документы, обязательные к исполнению на всей территории РФ и во всех отраслях народного хозяйства. ГОСТы, введенные еще в СССР, действуют на всей территории

РФ до их официальной отмены и до замены на Государственные стандарты России (на ГОСТ Р).

5) **Отраслевые стандарты (ОСТы)** – нормативные документы, обязательные к исполнению на всей территории РФ в тех отраслях, к которым они относятся.

6) **Стандарты предприятий (СТП)** – нормативные документы, обязательные к исполнению на том предприятии, на котором они приняты и утверждены в установленном порядке.

7) **Технические условия (ТУ)** – технические документы, которым должны соответствовать те изделия, на которые данные ТУ распространяются.

8) **Руководящие документы (РД)** и **методические указания метрологических институтов (МИ)** носят рекомендательный характер и регламентируют деятельность в тех областях, на которые распространяются.

Примеры обозначения и наименования основных нормативных документов, используемых в настоящее время, приведены в конце учебного пособия в библиографическом списке [44–54].

Нормативных документов разного уровня насчитывается более 250 тысяч (в том числе около 25 тысяч ГОСТов, около 40 тысяч ОСТов и около 160 тысяч СТП и ТУ). Более точное число нормативных документов назвать затруднительно, так как они находятся в постоянном «движении»: часть нормативных документов регулярно отменяется, часть – вводится вновь, часть – видоизменяется и т. д.

В настоящее время намечаются серьезные преобразования в области стандартизации. Начало преобразований положено Законом РФ «О техническом регулировании», принятым в самом конце 2002 г. Основным нормативным документом по этому Закону становится технический регламент (ТР). В качестве ТР могут выступать соответствующие Законы РФ, указы Президента и постановления Правительства. ТР могут действовать и как самостоятельные обязательные нормативные документы, в которых приводятся ссылки на Законы, Указы, постановления, ГОСТы и другие нормативные документы. При этом

намечается отменить ОСТы, а часть ГОСТов перевести из обязательных в рекомендательные. Преобразования планируется проводить постепенно на протяжении нескольких лет. В течение всего переходного периода действует прежняя система стандартизации.

Кроме перечисленных выше нормативных документов (НД), все большее распространение получают следующие, относительно новые, НД.

1) **Межгосударственный стандарт СНГ** (обозначается ГОСТ, как и стандарт СССР) – принимается странами СНГ и становится обязательным после утверждения.

2) **Гармонизованные стандарты** – становятся обязательными после утверждения в качестве национального стандарта, требования которого соответствуют международным или региональным стандартам (обозначаются: ГОСТ Р ИСО; ГОСТ Р МЭК и т. д., где ИСО, МЭК и пр. – обозначение соответствующего международного стандарта).

3) **Рекомендации межгосударственные (РМГ)** – нормативный документ стран СНГ. Утверждается как рекомендательный или обязательный на территории РФ.

4) **Правила (ПР) и рекомендации (Р)** – нормативные документы. После утверждения могут иметь обязательный или рекомендательный статус.

Подробнее затронутые вопросы освещены в учебных пособиях [17–19]. Примеры обозначения стандартов приведены в библиографическом списке (см., например, [44–54]).

Следует отметить большую значимость для народного хозяйства нормативных документов, без которых фактически невозможно современное производство. Известно, например, шутливое высказывание, что стандарты для промышленности – то же, что воздух для человека. Есть воздух – и человек его не замечает, нет воздуха – и человек задыхается. Аналогично и со стандартами. Есть стандарты – и их не замечают, нет стандартов – и производство замирает.

1.4. Международная система единиц

1.4.1. Общие положения

Унификация единиц измерений, получившая с созданием метрической системы мощный импульс, в дальнейшем сменилась появлением и распространением многочисленных и разнообразных систем единиц. В начале XX века насчитывалось едва ли не два десятка различных систем единиц. Назовем некоторые из этих систем: СГС (сантиметр – грамм – секунда), электромагнитная система СГСМ, электростатическая система СГСЭ, практическая система МКС (метр – килограмм – секунда), система МКСА (метр – килограмм – секунда – ампер) и т. д. Проблема унификации единиц снова стала актуальной.

Вопрос о создании единой Международной системы единиц впервые был поднят еще в 1913 г. на V Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ), но практические работы в этой области начались лишь в середине XX века.

В 1948 г. на IX ГКМВ было рассмотрено предложение о принятии Международной практической системы с основными единицами – метром, килограммом, секундой и одной из практических электрических единиц.

В 1954 г. на X ГКМВ было решено, что Международная система должна быть универсальна, т. е. охватывать все области измерений, и в качестве ее основных единиц следует принять метр, килограмм, секунду, ампер, градус Кельвина и свечу (канделу).

Наконец, в 1960 г. XI ГКМВ приняла решение:

1) присвоить системе, основанной на шести основных единицах, наименование «Международная система единиц»;

2) установить международное сокращенное наименование этой системы «SI» (от начальных букв Sisteme International);

3) ввести таблицу приставок для образования кратных и дольных единиц.

Международная система продолжала совершенствоваться и развиваться. Так, была добавлена седьмая основная единица – моль (единица измерения количества вещества). Кроме того, наименование «градус Кельвина» было заме-

нено наименованием «кельвин» и дало новое определение единице измерения времени (секунде).

В русской транскрипции Международная система единиц сокращенно называется СИ. В Советском Союзе (СССР) Международная система единиц введена как обязательная с 1 января 1982 г., и с этой же даты действовал ГОСТ 8.417–81.ГСИ. Единицы физических величин, замененный в настоящее время на ГОСТ 8.417–2002 [49], введенный в действие с 1 сентября 2003 г.

Единицы СИ должны применяться во всей вновь разрабатываемой технической документации и в публикациях, а также в учебных процессах всех учебных заведений, в учебниках и в учебных пособиях. Оговорено применение и некоторых единиц, не входящих в СИ.

Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикациях их результатов, если в них не рассматриваются и не используются результаты измерений конкретных физических величин, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам (например, шкалы твердости Роквелла и Виккерса, светочувствительности фотоматериалов и др.).

В настоящее время Международную систему составляют следующие единицы величин:

1) семь основных (табл. 1.1);

2) производные единицы (табл. 1.2–1.4);

3) двадцать абсолютных и десять относительных внесистемных единиц, допускаемых к применению наравне с единицами СИ (табл. 1.5; 1.6);

4) восемь внесистемных единиц, временно допускаемых к применению (табл. 1.7).

1.4.2. Основные единицы

Основные единицы Международной системы СИ приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Основные единицы СИ

Величина		**Единица**			
Наименование	**Размерность**	**Наименование**	**Обозначение**		**Определение**
			международное	русское	
1	2	3	4	5	6
Длина	*L*	метр	m	м	Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 s [XVII ГКМВ (1983 г.), Резолюция 1]
Масса	*M*	килограмм	kg	кг	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889 г.) и III ГКМВ (1901 г.)]
Время	*T*	секунда	s	с	Секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция I]
Электрический ток (сила электрического тока)	*I*	ампер	A	А	Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 m один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 m силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ N [МКМВ (1946 г.), Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К	Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция 4]

Продолжение таблицы 1.1

Количество вещества	*N*	моль	mol	моль	Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 kg. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицам или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971 г.), Резолюция 3]
Сила света	*J*	кандела	cd	кд	Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Hz, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет1/683 W/sr [XVI ГКМВ(1979 г.), Резолюция 3]

Примечания

1. Кроме термодинамической температуры (обозначение T), допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273{,}15$ К. Термодинамическую температуру выражают в кельвинах, температуру Цельсия – в градусах Цельсия. По размеру градус Цельсия равен кельвину. Градус Цельсия – это специальное наименование, используемое в данном случае вместо наименования «кельвин».

2. Интервал или разность термодинамических температур выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

Обозначение Международной практической температуры в Международной температурной шкале 1990 г., если ее необходимо отличить от термодинамической температуры, образуют путем добавления к обозначению термодинамической температуры индекса «90» (например, T_{90} или t_{90}) [3].

1.4.3. Производные единицы

Примеры производных единиц СИ, образованных с использованием основных единиц СИ, приведены в табл. 1.2. Примеры производных единиц СИ, имеющих специальное название, приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.2

Примеры производных единиц СИ, наименования которых образованы из наименований основных единиц

№ п/п	Измеряемая величина	Единица		
		Наименование	Обозначение	
			международное	русское
1	Площадь	квадратный метр	m^2	$м^2$
2	Скорость	метр в секунду	m/s	м/с
3	Ускорение	метр на секунду в квадрате	m/s^2	$м/с^2$
4	Плотность	килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$
5	Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	A/m^2	$А/м^2$
6	Напряженность магнитного поля	ампер на метр	A/m	А/м
7	Молярная концентрация компонента	моль на кубический метр	mol/m^3	$моль/м^3$
8	Яркость	кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кд/м^2$

Таблица 1.3

Примеры производных единиц СИ, имеющих специальные наименования

№ п/п	Измеряемая величина	Единица			Выражение через основные единицы СИ
		Наименование	Обозначение		
			международное	русское	
1	Частота	герц	Hz	Гц	s^{-1}
2	Сила, вес	ньютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot s^2$
3	Давление	паскаль	Pa	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^2$
4	Количество электричества	кулон	C	Кл	$s \cdot A$
5	Электрическое напряжение	вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
6	Электрическая емкость	фарад	F	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
7	Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$

Продолжение таблицы 1.3

8	Индуктивность	генри	H	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
9	Плоский угол	радиан	rad	рад	$m \cdot m^{-1}=1$
10	Телесный угол	стерадиан	sr	ср	$m^2 \cdot m^{-2}=1$

Таблица 1.4

Примеры производных единиц СИ, наименования которых образованы с использованием наименований, приведенных в табл. 1.3

№ п/п	Измеряемая величина	Единица			Выражение через основные единицы СИ
		Наименование	Обозначение		
			международное	русское	
1	Момент силы	ньютон-метр	N·m	Н·м	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
2	Динамическая вязкость	паскаль-секунда	Pa·s	Па·с	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
3	Плотность заряда (пространственная)	кулон на кубический метр	C/m^3	$Кл/м^3$	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
4	Электрическое смещение	кулон на квадратный метр	C/m^2	$Кл/м^2$	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
5	Напряженность электрического поля	вольт на метр	V/m	В/м	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
6	Диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	F/m	Ф/м	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^{-2}$
7	Магнитная проницаемость	генри на метр	H/m	Гн/м	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$

1.4.4. Внесистемные единицы

Внесистемные единицы, постоянно допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в табл. 1.5 и 1.6

Таблица 1.5

Абсолютные внесистемные единицы, постоянно допускаемые к применению наравне с единицами СИ

№ п/п	Наименование измеряемой величины	Единица				
		Наименование единицы	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Область применения
			международное	русское		
1	Масса	тонна	T	Т	$1\cdot10^{3}$ kg	Все области
		атомная единица массы	U	а.е.м.	$1{,}660502\cdot10^{-27}$ kg	Атомная физика
2	Время	минута	Min	мин	60 s	Все области
		час	*H*	ч	3600 s	
		сутки	*D*	сут	86400 s	
3	Плоский угол	градус	...°	...°	(π/180) rad	Все области
		минута	...'	...'	(π/10800) rad	
		секунда	..."	... "	(π/648000) rad	
		град (гон)	Доп	град	(π/200) rad	Геодезия
4	Объем, вместимость	литр	*L*	л	$1\cdot10^{-3}$ m^3	Все области
5	Длина	астрономическая единица	*U*a	а.е.	$1{,}49598\cdot10^{11}$ m	Астрономия
		световой год	*L*y	св.год	$9{,}4605\cdot10^{15}$ m	
		парсек	*P*c	пк	$3{,}0857\cdot10^{16}$ m	
6	Оптическая сила	диоптрия	-	дптр	1 m^{-1}	Оптика
7	Площадь	гектар	Ha	га	$1\cdot10^{4}$ m^2	Сельское хозяйство
8	Энергия	электрон-вольт	*eV*	эВ	$1{,}60218\cdot10^{-19}$ j	Физика
		киловатт-час	*kW·h*	кВт·ч	$3{,}6\cdot10^{6}$ j	Для счетчиков электрической энергии
9	Полная мощность	вольт-ампер	*V·A*	В·А		Электротехника

Продолжение таблицы 1.5.

10	Реактивная мощность	вар	*V*az	вар		Электротехника
11	Электрический заряд; количество электричества	ампер-час	*A·h*	А·ч	$3{,}6\cdot10^3$ С	Электротехника

Примечания

1. Наименования и обозначения единиц времени (минута, час, сутки), плоского угла (градус, минута, секунда), астрономической единицы, диоптрии и атомной единицы массы не допускается применять с приставками.

2. Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например неделя, месяц, год, век, тысячелетие.

3. Обозначения единиц плоского угла пишут над строкой.

4. Единицу объема «литр» не рекомендуется применять при точных измерениях (например, вместо 1l следует применять $1\cdot10^{-3}$ m^3 = 1 $дм^3$). При возможности смещения обозначения «l» («эль») с цифрой «1» допускается использовать обозначение «L».

Таблица 1.6

Внесистемные относительные и логарифмические величины и их единицы, постоянно допускаемые к применению наравне с единицами СИ

№ п/п	Наименование измеряемой величины	Наименование единицы	Обозначение		Значение
			международное	русское	
1	Относительная величина; КПД; относительное удлинение; относительная плотность; деформация; относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости; магнитная восприимчивость и т. п.	единица	*1*	*1*	1
		процент	%	%	$1 \cdot 10^{-2}$
		промилле	‰	‰	$1 \cdot 10^{-3}$
		миллионная доля	ppm	млн$^{-1}$	$1 \cdot 10^{-6}$
2	Логарифмическая величина; уровень звукового давления; усиление; ослабление и т. п.	бел	B	Б	1 B = $\lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$ 1 B = $2\lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10}\,F_1$, где P_1, P_2 – мощность, энергия и т. п.; F_1, F_2 – напряжение, сила тока и т. п.
		децибел	dB	дБ	0,1 B
3	Логарифмическая величина; уровень громкости	фон	phon	фон	1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Hz равен 1dB (1phon = 1dB при f = 1000 Hz)
4	Логарифмическая величина; частотный интервал	октава	–	окт	1 октава равна $\log_2(f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 2$

Продолжение таблицы 1.6

		декада	–	дек	1 декада равна $\lg(f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 10$, где f_2, f_1 – частоты
5	Логарифмическая величина (натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	непер	Np	Нп	1 Np = 0,8686…B 1 Np = 8,686… dB

Внесистемные единицы временно (до их отмены), допускаемые к применению наравне с единицами, СИ приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Внесистемные единицы, временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ

п/п	Измеряемая величина	Наименование единицы	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Применение
			международное	русское		
1	Длина	морская миля	n mile	миля	1852 m	В морской навигации
2	Масса	карат	–	кар	$2\cdot10^{-4}$kg	Для драгоценных камней и жемчуга
3	Линейная плотность	текс	tex	текс	$1\cdot10^{-6}$kg/m	В текстильной промышленности
4	Скорость	узел	kn	уз	0,514 m/s	В морской навигации
5	Частота вращения	оборот в секунду	r/s	об/с	1 s^{-1}	Электротехника
		оборот в минуту	r/min	об/мин	0,016 s^{-1}	
6	Давление	бар	bar	бар	$1\cdot10^5$ Pa	Физика
7	Ускорение	гал	Gal	Гал	0,01 m/s^2	Гравиметрия

1.4.5. Кратные и дольные единицы

Десятичные кратные и дольные единицы, а также их наименования и обозначения следует образовывать с помощью множителей и приставок, приведенных в табл. 1.8.

Присоединение к названию единицы двух и более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы *микромикрофарад* следует писать – *пикофарад*.

Приставку или ее обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или соответственно с ее обозначением.

Таблица 1.8

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Наименование приставки	Обозначение		Множитель	Наименование приставки	Обозначение	
		международное	русское			международное	русское
10^{24}	иотта	Y	И	10^{-1}	деци	d	д
10^{21}	зетта	Z	З	10^{-2}	санти	c	с
10^{18}	экса	E	Э	10^{-3}	милли	m	м
10^{15}	пета	P	П	10^{-6}	микро	μ	мк
10^{12}	тера	T	Т	10^{-9}	нано	n	н
10^{9}	гига	G	Г	10^{-12}	пико	p	п
10^{6}	мега	M	М	10^{-15}	фемто	f	ф
10^{3}	кило	k	к	10^{-18}	атто	a	а
10^{2}	гекто	h	г	10^{-21}	зепто	z	з
10^{1}	дека	da	да	10^{-24}	иокто	y	и

Примечания

1. Примеры использования дольных и кратных приставок: $5 \cdot 10^{3}$ В = 5 кВ; $7 \cdot 10^{-3}$ А = 7 мА; $6 \cdot 10^{6}$ Ом = 6 МОм; $6 \cdot 10^{-3}$ Ом = 6 мОм.

2. Между последней цифрой числа и обозначением оставляют пробел. Например: 100 кВт; 80 %; 20 ˚С; (100,0 ± 0,1) кг; (1/50) s или (1/50) с.

3. В связи с тем, что наименование основной единицы массы – килограмм – содержит приставку «кило», для образования дольных и кратных единиц массы используют дольную единицу массы – грамм и приставки присоединяют к слову «грамм», например миллиграмм (mg или мг) вместо микрокилограмм (mkg или мкг).

1.4.6. Единицы количества информации

Стандарт 8.417–2002 [116] содержит справочные приложения, в которые вошли единицы величин, нашедшие широкое применение, но не в полной мере отвечающие требованиям международной системы единиц СИ. Одними из таких величин являются единицы количества информации (табл. 1.9), приведенные в справочном прил. А [116].

Таблица 1.9

Единицы количества информации

Наименование величины	**Единица**				**Примечание**
	Наименование	**Обозначение**		**Значение**	
		международное	**русское**		
Количество информации	бит	bit	Бит	1	Бит – единица информации в двоичной системе счисления (двоичная единица информации)
	байт	B (byte)	Б (байт)	1 Б = 8 бит	

Примечания

1. В соответствии с международным стандартом МЭК 60027-2 [121] единицы «бит» и «байт» применяются с приставками СИ (раздел 1.3.4 и табл. 1.8).

2. Исторически сложилось так, что с наименованием «байт» некорректно (вместо $1000 = 10^3$ принято $1024 = 2^{10}$) используют приставки СИ: 1 Кбайт = 1024 байт, 1 Мбайт = 1024 Кбайт, 1 Гбайт = 1024 Мбайт и т. д. При этом обозначение Кбайт начинают с прописной (большой) буквы «К» в отличие от строчной (малой) буквы «к» для обозначения множителя 10^3.

1.4.7. Достоинства Международной системы единиц

В заключение отметим ряд достоинств Международной системы единиц (СИ).

СИ – универсальна. Она охватывает почти все области физических явлений и почти все отрасли народного хозяйства.

Построение СИ отвечает современному уровню метрологии – оптимальный выбор основных единиц и, в частности, их числа и размеров, согласован-

ность (когерентность) производных единиц, образование кратных и дольных единиц посредством десятичных приставок и некоторые другие положения.

Международной системе присуща достаточная гибкость. Она допускает применение и некоторого числа внесистемных единиц. Это живая и развивающаяся система. Так, например, число основных единиц сравнительно недавно увеличено с шести до семи и может быть еще увеличено, если это будет необходимо для охвата какой-либо дополнительной области явлений. В будущем не исключено также смягчение некоторых действующих в СИ регламентирующих правил.

Международная система призвана стать повсеместно применяемой единственной системой единиц физических величин. Унификация единиц представляет давно назревшую необходимость. Уже сейчас СИ принята в большинстве стран мира и сделала ненужным многочисленные системы единиц, котировавшиеся еще несколько десятилетий назад.

Международная система единиц признана многими влиятельными международными организациями, включая Организацию Объединенных Наций (ООН). Среди признавших СИ – Международная организация по стандартам (ИСО), Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международный союз фундаментальной и прикладной физики и др. [23; 24–26].

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

2.1. Общие положения

На практике измерение той или иной величины проводят обычно один раз. Имеет ли ценность такое измерение и какова его погрешность? На первую часть вопроса ответ должен быть положительным, т. е. даже единичное измерение имеет определенную ценность. На вторую часть вопроса ответ будет неоднозначным. Имея паспорт прибора или результаты его исследования, невозможно сказать, какова погрешность единичного измерения. Можно лишь сказать, что она не более некоторой величины, определяемой классом точности

этого прибора. Например, классу 0,05 соответствует погрешность не более ±0,05 % от верхнего предела шкалы, классу 0,02 соответствует погрешность не более ±0,02 % от верхнего предела шкалы и т. д. Отметим, что все сказанное правомерно, если методические и другие погрешности малы и ими можно пренебречь. Такое положение, когда известна лишь верхняя возможная граница погрешности, обычно допустимо и вполне приемлемо при проведении практических измерений. Если же этого недостаточно, то каждый раз необходимо проводить специальное исследование.

Целью такого исследования, как правило, бывает определение погрешности результата измерения и разделение этой погрешности на систематическую и случайную составляющие.

Кроме того, в ходе измерений могут появляться промахи (из-за которых появляются грубые погрешности), вызванные неверными действиями оператора или неисправностью измерительных устройств. Выявление и исключение промахов также является составной частью исследования.

Систематические и случайные погрешности в малой степени всегда присутствуют в самых точных измерениях. Появления грубых погрешностей почти всегда можно избежать, и их не следует допускать в качественной работе.

Систематические погрешности присущи измерительной системе и вызываются, как правило, рядом причин. Погрешность, вызванная какой-либо одной причиной, имеет один знак. Погрешности же, вызванные несколькими причинами, могут компенсировать друг друга. Систематические погрешности могут быть обусловлены используемым прибором, ошибочными действиями оператора, методом измерений, воздействием окружающей среды и т. д.

Случайные погрешности, получаемые при одинаковых или почти одинаковых условиях, обусловливаются механическими сотрясениями, случайными колебаниями температуры, вибрациями, помехами и т. д. В силу вероятностного характера случайных погрешностей они могут быть оценены статистическими методами. Некоторые из наиболее общих методов будут рассмотрены ниже.

Рассмотренные типы погрешностей (систематические и случайные) можно проиллюстрировать следующим примером (рис. 2.1).

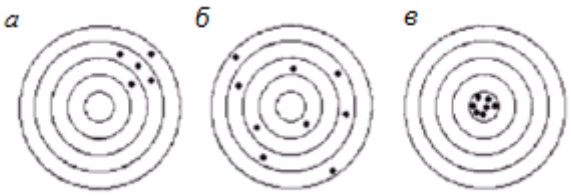


Рис. 2.1. Мишени, иллюстрирующие стрельбу с систематической погрешностью (*а*), со случайной погрешностью (*б*), с пренебрежимо малыми погрешностями (*в*)

Три человека делают по n выстрелов в мишень. Попадания первого стрелка оказались выше и правее «яблочка» (см. рис. 2.1, *а*). Отклонение среднего попадания от «яблочка» представляет собой систематическую погрешность. Эта погрешность могла быть вызвана неисправным прицелом, ветром, неправильным положением винтовки и т. д. Независимо от причины, такую погрешность можно избежать или сделать на нее поправку регулировкой прицела.

Второй стрелок разбросал свои выстрелы по всему полю мишени (см. рис. 2.1, *б*). В этом случае выстрелы свободны от систематической погрешности (среднее попадание в центре «яблочка»), но имеют большие случайные погрешности. Эти погрешности могли быть вызваны порывами ветра, плохими патронами, низкой квалификацией стрелка и т. д. Независимо от причины, избежать такие погрешности введением поправки невозможно. Эти погрешности можно лишь учесть и описать статистическими методами.

Третий стрелок сделал все выстрелы точно в центр мишени (см. рис. 2.1, *в*). Этот случай представляет собой точную стрельбу, в которой отсутствуют систематические погрешности, промахи и имеется незначительная случайная погрешность.

Поскольку случайные погрешности имеют вероятностный характер, то они могут быть описаны как случайные величины. В связи с этим, прежде чем перейти к изучению случайных погрешностей и методов их определения, напомним кратко основные характеристики случайных величин.

Случайной величиной будем называть такую величину, которая в результате опыта может принимать различные (случайные) числовые значения.

Различают случайные величины дискретные и непрерывные в зависимости от того, принимает случайная величина только определенные дискретные значения или может принимать любые значения в заданном интервале (или интервалах).

Случайные величины характеризуются законами распределения. При этом различают два вида законов: интегральный и дифференциальный.

Интегральный закон распределения или *интегральная функция распределения случайной величины* $F(x)$ характеризует вероятность события того, что конкретная реализация случайной величины X будет принимать значения, меньшие некоторой текущей величины x:

$$F(x) = P[X<x]. \tag{2.1}$$

Интегральный закон распределения – это неубывающая функция, которая при значении $x = -\infty$ равна нулю, а при $x = +\infty$ равна единице (т. е. $F(-\infty) = 0$, $F(+\infty) = 1$).

Интегральная функция распределения – самая универсальная характеристика случайной величины. Она существует для всех случайных величин, как дискретных, так и непрерывных, и полностью представляет случайную величину с вероятностной точки зрения.

Для непрерывной случайной величины с непрерывной и дифференцируемой функцией распределения можно найти *дифференциальный закон распределения* $f(x)$, выраженный как

$$f(x) = F'(x). \tag{2.2}$$

Эта функция называется также *плотностью распределения вероятности непрерывной случайной величины*. Функция $f(x)$ неотрицательна и подчиняется условию

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot dx = 1. \tag{2.3}$$

2.2. Нормальный закон распределения

Плотность вероятностей при нормальном законе распределения случайной величины *x* описывается соотношением

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x}_0)^2}{2\cdot\sigma_0^2}}, \qquad (2.4)$$

где σ_0 – среднее квадратическое отклонение (СКО);

$\bar{x}_0$ – математическое ожидание.

Отметим, что объем выборки ограничен и вместо σ_0 и $\bar{x}_0$ (σ_0 и $\bar{x}_0$ соответствуют числу измерений $n\to\infty$) на практике используются оценки СКО и среднего арифметического значения (соответственно σ и $\bar{x}$).

График функции *f*(*x*) приведен на рис. 2.2. При изменении $\bar{x}_0$ и постоянстве СКО вся кривая распределения плотности вероятностей перемещается вдоль оси абсцисс, не изменяя своей формы (рис. 2.2, *а*, кривые 1, 2, 3).

Параметр σ_0 характеризует форму кривой распределения плотности вероятностей и является количественным показателем степени рассеивания случайных величин около их математического ожидания. При уменьшении σ_0 и неизменности $\bar{x}_0$ кривая распределения вытягивается вдоль оси ординат, а при увеличении – становится более плоской и растягивается вдоль оси абсцисс (рис. 2.2, *б*, кривые 1, 2, 3).

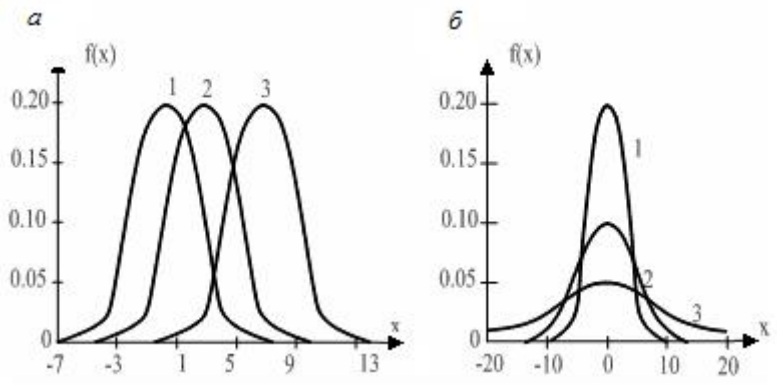


Рис. 2.2. Влияние параметров $\bar{x}_0$ (*а*) и σ_0(*б*) на вид функции *f*(*x*)

Интегральная функция распределения *F(x)* (для нормального закона) описывается соотношением

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-\bar{x}_0)^2}{2\sigma_0^2}} dx , \qquad (2.5)$$

где x, σ_0, $\bar{x}_0$ – определены выше.

Интеграл, стоящий в правой части уравнения, не может быть сведен к элементарным функциям в конечном виде, однако может быть выражен через *функцию Лапласа* Ф(Т), называемую также *интегралом вероятности*:

$$F(x) = \frac{1}{2}[1 + \Phi(\mathrm{T})], \qquad (2.6)$$

где

$$\Phi(\mathrm{T}) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{0}^{\mathrm{T}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt , \qquad (2.7)$$

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{X} - x_0}{\sigma_0}, \qquad (2.8)$$

$$t = \frac{x - x_0}{\sigma_0}. \qquad (2.9)$$

Интеграл вероятности Ф(Т) табулирован, и его численные значения приведены табл. П.1.1, а на рис. 2.3 приведен график функции Ф(Т).

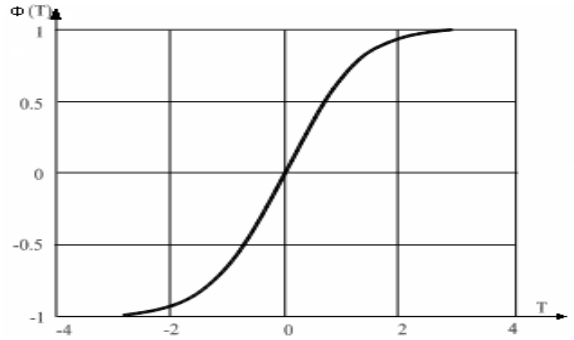


Рис. 2.3. Интегральная функция Ф(Т) для нормального закона распределения

Интеграл вероятности Ф(T) – монотонная функция, обладающая следующими свойствами:

$$\Phi(-T) = -\Phi(T), \qquad (2.10)$$

$$\Phi(+\infty) = 1, \qquad (2.11)$$

$$P(T) = \Phi(-T < t < +T). \qquad (2.12)$$

Соотношение (2.12) означает, что с вероятностью P(T) случайная величина t не выйдет за пределы интервала $\pm T$. В теории погрешностей интервал от $-T$ до $+T$ обычно называют доверительным интервалом, а соответствующую ему вероятность $P(T)$ – доверительной вероятностью. В дальнейшем доверительную вероятность будем обозначать P.

2.3. Распределение Стьюдента

Плотность вероятностей $\varphi(z)$ при распределении случайной величины z по закону Стьюдента описывается соотношением (2.13). Отметим, что закон распределения Стьюдента часто называют *t-распределением*, а величину $\varphi(z)$ – соответственно *плотностью вероятностей t-распределения*.

$$\varphi(z)=\frac{\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi(n-1)}\cdot\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}\cdot\left(1+\frac{z^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}}, \qquad (2.13)$$

где $\Gamma(n)$ – гамма-функция;

n – число случайных величин (аргумент).

$$\Gamma(n)=\int_0^{\infty}U^{n-1}e^{-U}dt\,. \qquad (2.14)$$

Приведенные в математических справочниках (см., например, [30]) таблицы значений гамма-функции обычно охватывают диапазон изменения аргумента n от 1 до 2, и там же дается порядок определения гамма-функции для других значений аргумента.

На рис. 2.4 приведены графики функции $\varphi(z)$ для различных значений n. Кривые симметричны относительно оси ординат и по форме напоминают кривую нормального распределения, к которой они стремятся в пределе при $n\to\infty$. Площадь между каждой кривой и осью абсцисс при изменении аргумента от $-\infty$ до $+\infty$ равняется 1, т. е. вероятность попадания случайной величины z в бесконечно большой интервал равна единице.

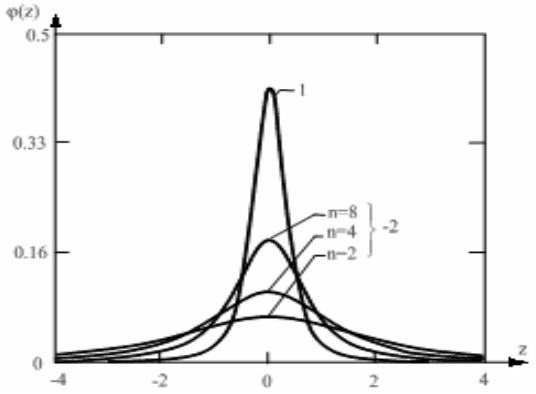


Рис. 2.4. Дифференциальная функция φ(z) для различных значений n:
1 – нормальный закон распределения; 2 – закон распределения Стьюдента;
n – число измерений

Для оценки вероятности попадания случайной величины *z* в границы заданного доверительного интервала ±*t* с доверительной вероятностью *P* необходимо проинтегрировать функцию φ(*z*) в заданных пределах:

$$P = \varphi(-t < z < +t) = \int_{-t}^{+t} \varphi(z)dz = 2 \cdot \int_{0}^{+t} \varphi(z)dz \quad . \tag{2.15}$$

Последняя форма записи интеграла с заменой пределов сделана из допущения, что функция φ(*z*) симметрична относительно начала координат.

Обычно на практике по заданной доверительной вероятности *P* и по заданному числу измерений *n* находят доверительный интервал ±*t*.

Численные значения *t*, носящие название *коэффициентов Стьюдента*, табулированы для конкретных значений *P* и *n* и приводятся в справочниках. Аналогичная таблица помещена в табл. П.1.2.

2.4. Распределение χ^2

Плотность вероятностей ψ(*v*) случайных величин *v*, подчиняющихся закону распределения χ^2, описывается соотношением

$$\psi(v) = \frac{v^{m-1}}{2^m \cdot \Gamma(m)} \cdot e^{-\frac{v}{2}}, \tag{2.16}$$

где $m = \frac{n-1}{2}$; *n* – число случайных величин (аргумент); Γ – гамма-функции.

При больших значениях n максимум кривых уменьшается, смещается в область повышенных значений v, а сами кривые приобретают симметричный характер.

Площадь, заключенная между каждой из рассматриваемых кривых и осью абсцисс, при изменении аргумента от нуля до бесконечности есть величина постоянная и равная единице, т. е. вероятность попадания случайной величины v в бесконечно большой интервал равна единице.

Для оценки попадания случайной величины v в некоторый заданный интервал от V_1 до V_2 с доверительной вероятностью P необходимо проинтегрировать функцию $\psi(v)$ с учетом заданных пределов:

$$P = \psi(V_1 < v < V_2) = \int_{V_2}^{\infty} \psi(v)dv \quad . \tag{2.17}$$

Значения приведенных интегралов табулированы в зависимости от V и n (см., например, справочник [30]). При практическом использовании распределения χ^2 (применительно к погрешностям) удобнее пользоваться коэффициентами γ_1 и γ_2:

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{n-1}{V_1}} \quad , \tag{2.18}$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{n-1}{V_2}} \quad . \tag{2.19}$$

Таблица коэффициентов γ_1 и γ_2 в зависимости от доверительной вероятности P и числа случайных величин (или числа измерений) n приведена в табл. П.1.3.

Методы практического использования рассмотренных законов распределения случайных величин (нормального, Стьюдента и χ^2) при оценке погрешностей и погрешности погрешностей приведены в последующих параграфах учебного пособия.

2.5. Классификация погрешностей

Один из возможных вариантов классификации погрешностей измерений представлен на рис. 2.5.

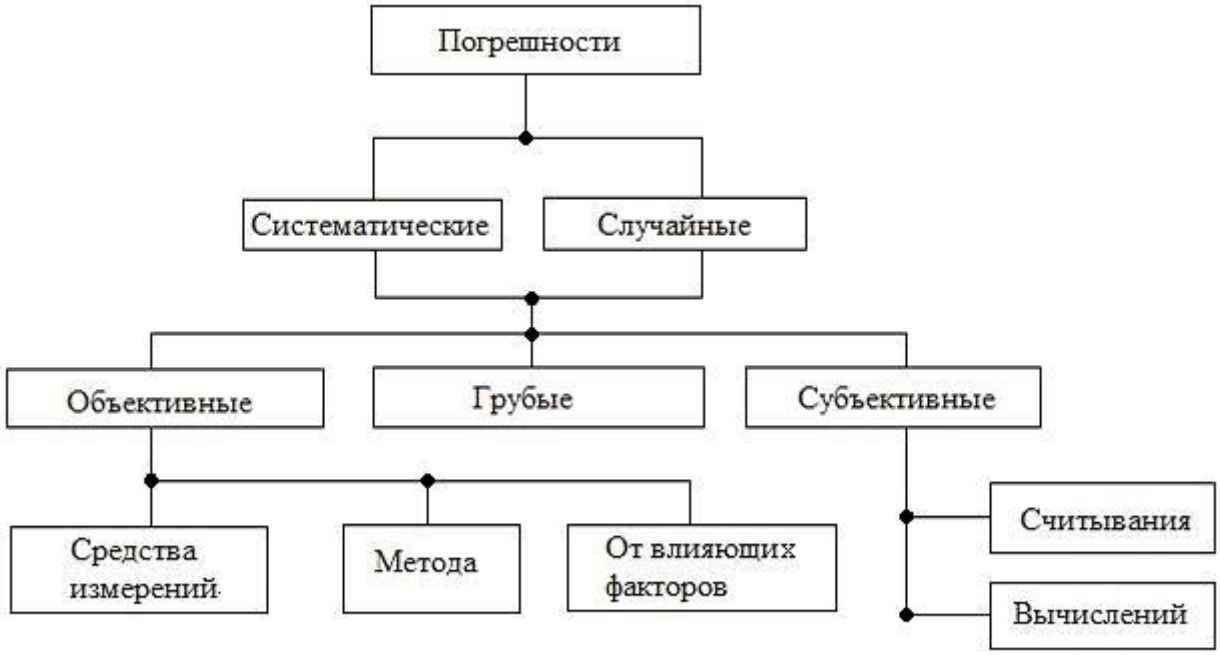


Рис. 2.5. Классификация погрешностей измерений

При описании погрешностей и их классификации использованы следующие термины.

Абсолютная погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Точность измерения – это качество измерения, отражающее близость его результатов к истинному значению измеряемой величины.

Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям всех видов, как систематических, так и случайных.

Количественно точность может быть выражена обратной величиной модуля относительной погрешности. Например, если погрешность измерения равна 10^{-3}, то точность равна 10^{3}. Следует отметить, что термин «точность измерений» не нашел широкого применения на практике, и для «точностной» характеристики результатов измерений рекомендуется использовать термин «погрешность измерений».

Систематическая составляющая погрешности измерения – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная составляющая погрешности измерения – это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Объективные погрешности измерений – это составляющие погрешности измерений, не зависящие от действий оператора.

Субъективные погрешности измерений – это составляющие погрешности измерений, зависящие от действий оператора.

Грубые погрешности – это погрешности, существенно превышающие по своему значению оправдываемые объективными условиями измерений систематические и случайные погрешности.

Вместо термина «грубая погрешность» иногда используется термин «промах». В настоящем учебном пособии термин «промах» используется в несколько ином смысле. В дальнейшем под промахом будем подразумевать результат измерения, содержащий грубую погрешность.

Промахи возникают, как правило, из-за неверных действий оператора, но могут также появляться из-за неисправности аппаратуры. Во всех случаях промахи не являются характеристикой измерений, и их необходимо отбросить.

Инструментальные погрешности измерений – составляющая погрешности измерений, обусловленная погрешностями применяемых средств измерений (образцовых и рабочих).

Образцовые средства измерений – это средства, предназначенные для калибровки, аттестации или поверки других средств измерений и не используемые для проведения «рабочих» измерений.

Отметим, что под *рабочими средствами измерений* подразумеваются те средства, которые используются непосредственно «в работе» для проведения измерений.

Отметим, что на практике учитываются, как правило, только погрешности «рабочих» средств измерений. Погрешности образцовых средств малы, и ими обычно пренебрегают. Погрешности образцовых средств измерений учитываются при проведении метрологических работ (калибровка, поверка, аттестация) или при повышенных требованиях к результатам измерений.

Погрешности измерений от воздействия влияющих факторов – это составляющие погрешности измерений, являющиеся следствием неучтенного влияния на результаты измерений внешних факторов, например температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и т. п. При проведении электрических измерений такими влияющими факторами могут быть термоЭДС и контактные сопротивления в измерительных цепях, полярность измеряемого тока или напряжения и т. д.

Методические погрешности – это погрешности, обусловленные используемым методом измерений и не зависящие от погрешности самих измерительных устройств.

Погрешности считывания – это погрешности, возникающие при считывании показаний со средств измерений. Обычно эти погрешности малы или вообще отсутствуют (например, при использовании цифровых приборов).

Погрешности вычислений – это погрешности, возникающие при подсчетах конечных результатов по данным проведенных измерений. Эти погрешности могут появиться, например, при проведении косвенных измерений из-за неверных действий оператора.

Выявление последних двух погрешностей и их выделение из суммарной погрешности относится к области субъективных психологических факторов и в настоящем руководстве подробно не рассматривается. Следует, однако, отметить, что эти погрешности косвенно учитываются при определении погрешностей измерений и входят в состав как их систематических, так и случайных частей.

2.6. Количественные характеристики погрешностей

Наиболее употребительны нижеследующие количественные характеристики погрешностей.

1. *Абсолютная погрешность* Δ, представляющая собой разность между результатом измерения x и истинным значением измеряемой величины x_0:

$$\Delta = x - x_0. \tag{2.20}$$

Могут быть также рассмотрены абсолютные систематические погрешности Θ, абсолютные случайные погрешности ε, абсолютные методические погрешности Θ_M и т. д. Определение каждой из этих погрешностей будет представлено ниже. Абсолютные погрешности имеют ту же размерность, что и измеряемая величина.

2. *Относительная погрешность* δ, представляющая собой отношение абсолютной погрешности Δ к истинному значению измеряемой величины x_0:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100\% . \tag{2.21}$$

Соответственно рассматриваются относительные систематические, случайные, методические и т. д. погрешности. Обычно относительные погрешности выражаются в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

Использование в знаменателе формулы (2.21) значения x_0 соответствует рекомендациям РМГ 29–99 [53]. Так как истинное значение x_0 обычно неизвестно, то вместо него может быть использовано действительное значение измеряемой величины $x_д$. Государственный стандарт ГОСТ 8.401–80 [45] допускает использовать в знаменателе формулы (2.21) также значение результата измерения x (вместо x_0 или $x_д$). На практике значение x используется в тех случаях, когда неизвестно истинное значение измеряемой величины x_0 и заменяющее его действительное значение $x_д$.

3. *Приведенная погрешность* средств измерения γ, представляющая собой отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению x_N:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100\% \quad . \tag{2.22}$$

Обычно $x_N = x_k$, где x_k – верхний предел шкалы (при этом нулевое значение прибора должно быть в начале шкалы).

Нормирующее значение x_N следует устанавливать равным большему из пределов измерений используемого прибора или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов нормирующее значение допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений.

Для средств измерений физических величин, имеющих шкалу с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений (более подробно см. ГОСТ 8.401–80 [45]).

Приведенные погрешности используются для характеристики точностных свойств только средств измерений (такое понятие, как приведенная погрешность результата измерения, не используется). Могут быть рассмотрены приведенные систематические и случайные составляющие погрешности средств измерений. Приведенные погрешности выражаются обычно в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

В заключение отметим, что при правильно организованных измерениях грубые погрешности должны отсутствовать. Погрешности коммутационные, от влияния факторов и методические должны быть малыми по сравнению с инструментальными погрешностями. В этом случае определяющими становятся инструментальные погрешности (или, как их еще называют, – погрешности средств измерений). Именно этим погрешностям посвящены три последующих главы учебного пособия.

Вместе с тем погрешность является важной, но не единственной характеристикой средств измерений (СИ). В силу этого ниже рассмотрены и другие характеристики СИ, нормируемые стандартами [44, 45 47].

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Общие положения

Различают метрологические и неметрологические характеристики средств измерений (СИ).

Метрологические характеристики – это характеристики свойств средств измерений, влияющие на результаты измерений и на их погрешности. Нормируются метрологические характеристики СИ Государственными стандартами ГОСТ 8.009–84 [44] и ГОСТ 8.508–84 [47], а также методическими указаниями РД 50–453–84 [53]. Для каждого типа средств измерений устанавливаются свои метрологические характеристики.

Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативными документами, называются *нормируемыми метрологическими характеристиками*, а определяемые – *экспериментально-действительными метрологическими характеристиками*.

Неметрологические характеристики – это характеристики свойств средств измерений, не оказывающие прямого (непосредственного) влияния на результаты измерений и на их погрешности. К неметрологическим характеристикам СИ относятся, например, следующие: геометрические размеры и масса средства измерения, его цвет, наличие (или отсутствие) переносных ручек.

Ниже описываются нормируемые метрологические характеристики СИ. Для наглядности на рис. 3.1 приведена схема, позволяющая пояснить и оценить искомые характеристики.

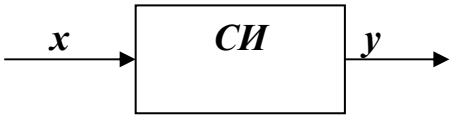


Рис. 3.1 Схема эксперимента:
СИ – средство измерения; *x* – измеряемая величина
(входная величина; входной сигнал); *y* – показание средства измерения
(выходная величина, выходной сигнал)

Различают статические и динамические свойства средств измерения. Статистические свойства средств измерения проявляются при измерении неизменных во времени величин или при измерении установившихся периодических

процессов. Динамические свойства средств измерения проявляются при измерении изменяющихся во времени величин или при измерении неустановившихся периодических процессов. Статистические и динамические свойства средств измерения описывают соответственно статистические и динамические характеристики.

3.2. Статические характеристики

Статическая характеристика преобразования (функция преобразования) – функциональная зависимость между входной «*x*» и выходной «*y*» величинами:

$$y = f(x). \tag{3.1}$$

Эта зависимость может выражать некоторый закон (или законы), которому подчиняется явление, положенное в основу работы средства измерения (СИ). Иногда выходная величина зависит не только от измеряемой величины x, но и от ряда других воздействующих на СИ факторов z_1, z_2, $\ldots z_n$, являющихся помехами и искажающих результат измерения. В этом случае

$$y = f(x, z_1, z_2, \ldots z_n). \tag{3.2}$$

Очевидно, что воздействие на СИ посторонних факторов z_1, z_2, $\ldots z_n$ необходимо устранить или уменьшить. Это достигается путем экранирования и изоляции СИ от воздействия помех, их компенсации, стабилизации и т. д.

Статические характеристики преобразования могут быть аналоговые и дискретные, без гистерезиса и с гистерезисом (рис. 3.2).

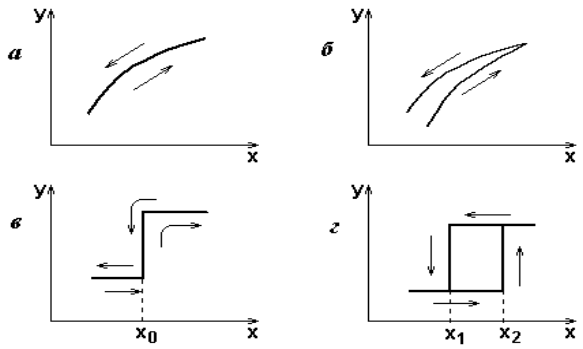


Рис. 3.2. Статические характеристики преобразования средств измерений:
а – аналоговая без гистерезиса; *б* – аналоговая с гистерезисом;
в – дискретная без гистерезиса; *г* – дискретная с гистерезисом;
x_0, x_1, x_2 – значения величины x, при которых величина y изменяется скачком

3.3. Динамические характеристики

Динамические характеристики определяют быстродействие средств измерения и могут быть представлены в различных видах: в виде переходных характеристик, передаточных функций, частотных характеристик и т. д.

Переходная характеристика – это зависимость выходной величины $y(t)$ при скачкообразном изменении измеряемой входной величины $x(t)$. Возможные типы переходных характеристик приведены на рис. 3.3.

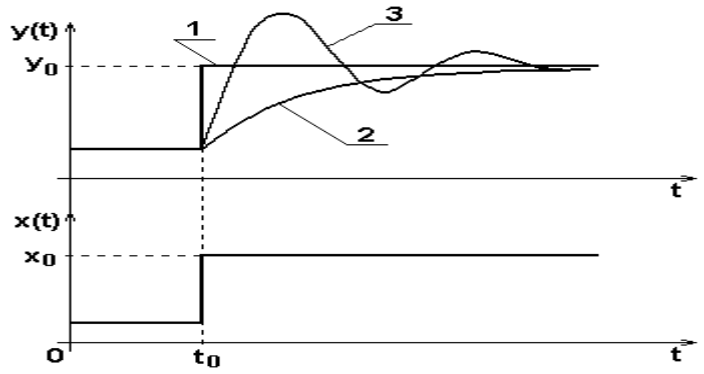


Рис. 3.3. Переходные характеристики средств измерения:
1 – идеальная (безынерционная) характеристика; 2 – апериодическая характеристика первого порядка; 3 – периодическая (колебательная) характеристика

Передаточная функция W(p) – это отношение изображений по Лапласу выходного и входного сигналов при нулевых начальных условиях.

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}, \tag{3.3}$$

где $y(p)$ – изображение по Лапласу выходного сигнала;

$x(p)$ – изображение по Лапласу входного сигнала;

p – комплексная переменная величина.

$$y(p) = \int_0^\infty y(t) \cdot e^{-pt} \cdot dt, \tag{3.4}$$

$$x(p) = \int_0^\infty x(t) \cdot e^{-pt} \cdot dt, \tag{3.5}$$

где $y(t)$, $x(t)$ – оригиналы выходных и входных сигналов СИ.

Амплитудно-фазовая характеристика W(jω) формально может быть получена из передаточной функции $W(p)$ путем замены величины *«p»* на мнимую

величину «$j\omega$», где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – циклическая частота рассматриваемых сигналов.

Алгебраическая форма записи амплитудно-фазовой характеристики:

$$W(j\omega) = G(\omega) + jQ(\omega), \tag{3.6}$$

где $G(\omega)$ – вещественная часть; $Q(\omega)$ – мнимая часть.

По вещественным и мнимым частям может быть построен график амплитудно-фазовой характеристики (рис. 3.4).

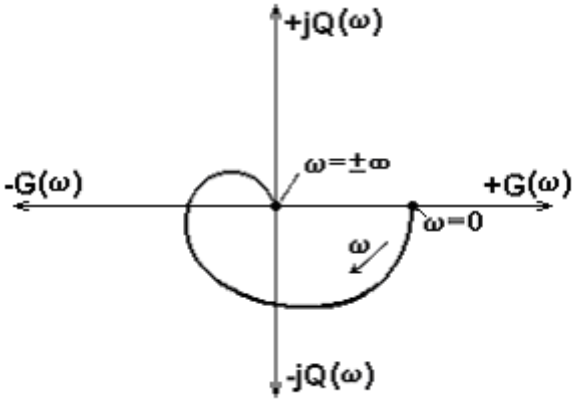


Рис. 3.4. Типичный вид амплитудно-фазовой характеристики
средства измерения

Для описания динамических свойств отдельных средств измерений амплитудно-фазовые характеристики применяются сравнительно редко. Гораздо чаще эти характеристики используются при анализе устойчивости автоматических систем (в состав которых, как правило, входят и средства измерения, например датчики).

Показательная форма записи амплитудно-фазовой характеристики имеет вид

$$W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \tag{3.7}$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика;

$\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика.

Параметры амплитудно-фазовой характеристики в алгебраической и показательной формах записи связаны между собой соотношениями

$$A(\omega)=\sqrt{[G(\omega)]^2+[Q(\omega)]^2}\,, \tag{3.8}$$

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{Q(\omega)}{G(\omega)}\,. \tag{3.9}$$

В качестве примера ниже приведены динамические характеристики для апериодических динамических устройств первого порядка.

Передаточная функция для апериодических динамических устройств первого порядка имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1}, \tag{3.10}$$

где K – статический передаточный коэффициент; T – постоянная времени.

Отметим, что статический передаточный коэффициент определяется соотношением

$$K=\frac{\Delta y}{\Delta x}, \tag{3.11}$$

где Δy – приращение выходной величины; Δx – приращение входной величины.

Значение постоянной времени T может быть найдено в соответствии с рекомендациями, изложенными в литературе [27] и в настоящем учебном пособии (см. главу 6).

Кроме того, эта задача будет рассмотрена ниже при исследовании динамических свойств датчиков температуры.

Аналитические выражения, связывающие амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики с параметрами передаточной функции, имеют вид

$$A(\omega)=\frac{K}{\sqrt{\omega^2T^2+1}}\,, \tag{3.12}$$

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\omega T. \tag{3.13}$$

Графики зависимостей (3.14) и (3.15) приведены на рис. 3.5.

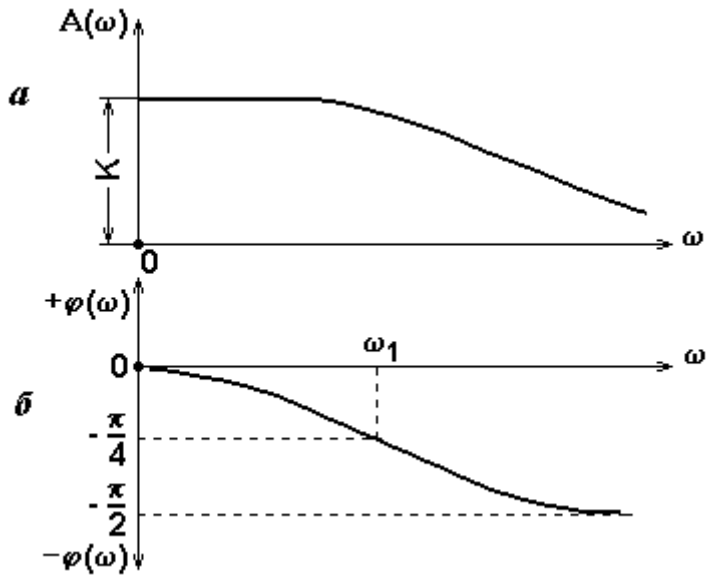


Рис. 3.5. Графики амплитудно-частотных (*а)* и фазово-частотных характеристик (*б)*

Приведенные характеристики (и их графики) свидетельствуют, что амплитуда сигнала на выходе средства измерения уменьшается с ростом частоты входного сигнала, а его фаза увеличивается (при $\omega\to\infty$ $\varphi(\omega)\to(-\pi/2)$ и $A(\omega)\to 0$).

3.4. Универсальные характеристики

К *универсальным* относятся характеристики средств измерений (СИ), которые правомерны как для статистических, так и для динамических режимов работы СИ.

Чувствительность СИ – отношение приращения выходной величины Δy к приращению входной величины Δx при $\Delta x\to 0$.

$$S = \lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}, \tag{3.14}$$

где S – чувствительность средств измерения.

Для ориентировочной оценки чувствительности может быть использовано соотношение

$$S \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}. \tag{3.15}$$

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от x, а при линейной характеристике чувствительность постоянна и не зависит от измеряемой величины.

Чувствительность не следует смешивать с *порогом чувствительности*, под которым понимают наименьшее изменение входной величины, обнаруживаемое с помощью данного средства измерения. Порог чувствительности выражают в единицах входной величины.

Диапазон измерения – область значений измеряемой (входной) величины, для которой нормированы допускаемые наибольшие x_{max} и наименьшие x_{min} значения входных величин.

Кроме диапазона измерения «по входу», может быть указан диапазон измерения «по выходу» (от y_{max} до y_{min}).

Цена деления шкалы – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Цена деления многозначной меры – разность значений величин, соответствующих двум соседним заданным размерам, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

3.5. Характеристики погрешностей

Погрешность средства измерений – это разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Для меры показанием является ее номинальное значение.

Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то на практике используют ее действительное значение.

Приведенное определение понятия «погрешность средства измерений» соответствует определению по РМГ 29–99 [53].

Классификация погрешностей средств измерений (СИ) приведена на рис. 3.6.

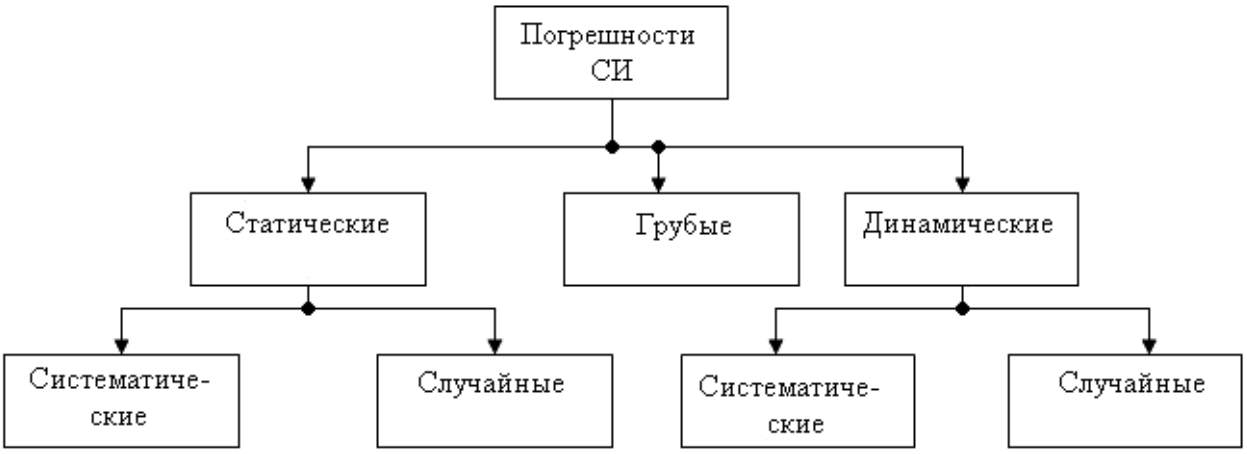


Рис. 3.6. Классификация погрешностей средств измерений

Статистические и динамические погрешности СИ могут быть определены следующим образом.

Статистические погрешности СИ – это погрешности средств измерений, возникающие при измерении неизменных во времени величин или установившихся периодических процессов. Статические погрешности детально рассмотрены в 4-й главе настоящего учебного пособия.

Динамические погрешности – это погрешности средств измерений, возникающие при измерении изменяющихся во времени величин или неустановившихся периодических процессов. Динамические погрешности детально рассмотрены в 6-й главе настоящего учебного пособия.

Погрешности грубые, систематические и случайные, а также количественные характеристики погрешностей (в том числе и погрешностей СИ) уже описаны во 2-й главе, в силу чего в данной главе учебного пособия не рассматриваются.

3.6. Классы точности

Класс точности средства измерений – это обобщенная характеристика средства измерений, выражаемая пределами его допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность.

Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность средств измерений этого класса, но не является непосредственным показателем погрешности измерений, выполняемых с помощью этих средств.

Класс точности может выражаться в форме абсолютных Δ, приведенных γ или относительных δ погрешностей в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средств измерений конкретного вида (см. ГОСТ 8.401–80 [45]):

$$\Delta = \pm a\,, \tag{3.16}$$

$$\Delta = \pm\left(a + b \cdot x\right), \tag{3.17}$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100 \quad \% \le \pm p\,, \tag{3.18}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \quad \% \le \pm p\,, \tag{3.19}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \quad \% \le \pm \left[c + d\left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right] \quad \% \lim_{x \to \infty}\,, \tag{3.20}$$

где x – значение измеряемой величины;

a, b – положительные числа, не зависящие от x;

$x_к$ – верхний предел шкалы;

x_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ (обычно $x_N = x_к$);

p, q, c, d – отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда $1\cdot10^n$; $1{,}5\cdot10^n$; ($1{,}6\cdot10^n$); $2\cdot10^n$; $2{,}5\cdot10^n$; ($3\cdot10^n$); $4\cdot10^n$; $5\cdot10^n$; $6\cdot10^n$; (n = 1; 0; –1; –2; –3 и т. д.).

Значения, указанные в скобках, не используют для вновь разрабатываемых средств измерений.

В обоснованных случаях (см. ГОСТ 8.401–80 [45]) пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

Допускаемые основные и дополнительные погрешности приводятся в технических описаниях и формулярах средств измерений.

Кроме того, на циферблаты, шкалы, щитки и корпуса средств измерений наносятся условные обозначения классов точности.

Например, могут быть нанесены обозначения в виде 1,5; (1,5) или 0,02/0,01, что означает следующее:

1,5 – предел допускаемой приведенной основной погрешности определяется по формуле (3.18) и не превосходит ±1,5 % от верхнего предела измерения для рассматриваемого прибора (или диапазона измерения);

(1,5) – предел допускаемой относительной основной погрешности определяется по формуле (3.19) и не превосходит ±1,5 % от значения измеряемой величины;

0,02/0,01 – предел допускаемой относительной основной погрешности определяется по формуле (3.20) и не превосходит $\pm\left[0{,}02+0{,}01\left(\left|\frac{x_k}{x}\right|-1\right)\right]$ % от значения измеряемой величины.

Правила построения и примеры обозначения классов точности приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Примеры построения и обозначения классов точности

Форма выражения погрешности	**Пример обозначения класса точности**	**Пределы допускаемой основной погрешности**	**Значение основной погрешности**
Абсолютная Δ	±0,1 мм	$\Delta = \pm 0{,}1$ мм	±0,1 мм
Относительная δ	(1,5)	$\delta = \pm 0{,}5$ %	± 0,5 % от «x»
Относительная δ	0,2/0,1	$\delta = \pm[0{,}2 + 0{,}1(\frac{x_K}{x} - 1)]$ %	$\pm\delta$ % от «x»
Приведенная γ	1,0	$\gamma = \pm 1{,}0$ %	± 1,0 % от «x_K»
Приведенная γ	2,5 (в треугольнике)	$\gamma = \pm 2{,}5$ %	± 2,5 % от длины шкалы или ее части

В табл. 3.1 приняты следующие обозначения:

x – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанных по шкале;

$x_К$ – верхний предел шкалы.

Тот или иной класс точности присваивается средству измерений по результатам оценки статистической погрешности, полученной в ходе специального метрологического исследования искомого средства измерения (СИ). Порядок оценки статистических погрешностей СИ рассмотрен ниже в главе 4 настоящего учебного пособия.

Отметим еще раз, что класс точности устанавливает пределы допускаемой основной погрешности средства измерения (СИ). Основная погрешность СИ – это погрешность средства измерения в нормальных условиях эксплуатации. Дополнительная погрешность СИ – это погрешность средства измерения в условиях эксплуатации отличных от нормальных (в пределах рабочих условий эксплуатации). Нормальные и рабочие условия эксплуатации оговариваются в технической документации на каждый конкретный тип средства измерения.

Например, для универсального вольтметра В7-34 предусмотрены следующие нормальные и рабочие условия эксплуатации (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Условия эксплуатации универсального вольтметра В7-34

Нормируемый параметр	**Условия эксплуатации**	
	Нормальные	**Рабочие**
Температура окружающего воздуха, ^{0}С(К)	От 18 до 22 (от 291 до 295)	От 5 до 40 (от 278 до 313)
Относительная влажность воздуха, %	65±15	До 95
Напряжение питающей сети, В	220,0±4,4	220±22
Частота питающей сети, Гц	50,0±0,5	50,0±0,5

Поверка средств измерений должна проводиться в нормальных условиях эксплуатации (см. табл. 3.2). Рабочие условия эксплуатации (см. табл. 3.2)

должны соблюдаться при практическом использовании средств измерений. Дополнительные погрешности, возникающие при отличии условий эксплуатации от нормальных, выражаются обычно в дольных или кратных частях от основной погрешности. Соотношения, используемые для оценки дополнительных погрешностей, приводятся в инструкциях по эксплуатации конкретных типов средств измерений. Например, для универсального вольтметра В7-34 погрешность измерения в рабочих условиях для диапазона от 5 до 40 ^{0}С вычисляется по формуле

$$\delta = \delta_0 \left[1 + 0{,}1 / \left(20 - t\right)\right], \qquad (3.21)$$

где δ – относительная дополнительная погрешность вольтметра в рабочих условиях, %;

δ_0 – относительная основная погрешность вольтметра, определяемая его классом точности, %;

t – температура окружающего воздуха, ^{0}С.

Формула (3.21) правомерна при всех режимах работы универсального вольтметра В7-34, за исключением измерения отношения двух постоянных напряжений.

4. СТАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Общие положения

Для определения погрешностей средств измерений необходимо провести специальные исследования. При этом может быть использована одна из схем, приведенных на рис. 4.1. В первом случае (рис. 4.1, *а*) для генерирования значений x_0 может быть использован любой (не образцовый) генератор. Например, при исследовании вольтметра – любой источник ЭДС, значения которых могли бы изменяться в необходимых пределах. Измерение значения x_0 производится с помощью образцового средства и исследуемого средства измерений одновременно. Во втором случае (рис. 4.1, *б*) само образцовое средство измерений выступает в роли генератора сигналов. Например, при исследовании вольтметра – это источник образцовых ЭДС (образцовый калибратор напряжений); при исследовании датчиков давления – образцовый грузопоршневой манометр и т. д.

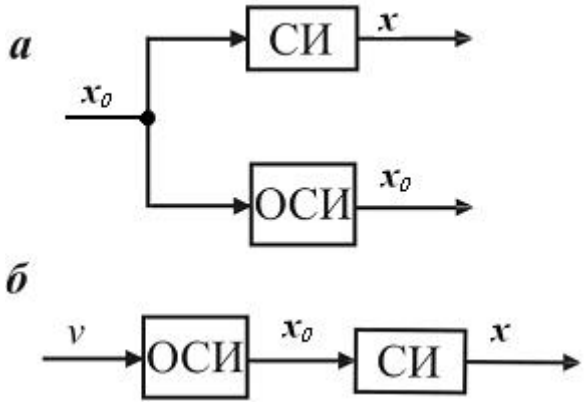


Рис. 4.1. Схемы исследования средств измерений:
СИ – исследуемое средство измерений; ОСИ – образцовое средство измерений; x_0 – "истинное" значение измеряемой величины; x – показания исследуемого средства измерений; v – управляющий сигнал, воздействующий на ОСИ

После выбора одной из схем, приведенных на рис. 4.1, проводится выбор исследуемых точек на шкале прибора. При этом можно воспользоваться следующими правилами:

1) чем выше класс прибора, тем большее число исследуемых точек необходимо выбрать;

2) для рабочих измерительных приборов число исследуемых точек обычно составляет 5–6, а их число и расположение должно соответствовать требованиям ГОСТ 8.508–84 [47].

В каждой из выбранных точек шкалы прибора проводится заданное число измерений. Если число измерений не задано, то оно выбирается произвольно, но не менее 10 [47]. Для повышения достоверности результатов число измерений целесообразно увеличить до 16–20, а в ответственных случаях – до 50 и более.

Отметим, что число измерений зависит от принятой доверительной вероятности P (растет с ростом P) и от допускаемой погрешности среднего квадратического отклонения $\Delta\sigma$ (растет при уменьшении $\Delta\sigma$).

Таблица значений $n = f(P, \Delta\delta)$ для нормального закона распределения приведена в государственном стандарте ГОСТ 8.508–84 [47].

При законе распределения результатов измерений, отличном от нормального, необходимое число измерений стандартом [47] не рассматривается.

Измерения рекомендуется проводить путем постепенного увеличения измеряемой величины до предельного значения для исследуемого устройства с последующим постепенным уменьшением ее до минимума. Увеличение и уменьшение измеряемой величины проводятся столько раз, сколько измерений необходимо провести, фиксируя каждый раз показания исследуемого измерительного устройства в выбранных точках шкалы.

По результатам эксперимента в каждой исследуемой точке оцениваются значения величин $\bar{x}$ и σ по следующим формулам:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i , \tag{4.1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} , \tag{4.2}$$

где $\overline{x}$ – среднее арифметическое значение;

σ – среднее квадратическое отклонение;

x_i – результат *i*-го изменения;

n – число измерений.

Полученные описанным методом экспериментальные данные и расчетные значения являются исходными, позволяющими путем соответствующей обработки получить необходимые сведения об исследуемом средстве измерений (т. е. его систематическую, случайную и суммарную погрешности).

4.2. Выявление промахов

Выявление промахов необходимо провести до определения погрешностей измерений. Эта операция особенно целесообразна в том случае, если среди ряда измерений встречаются отдельные значения, резко отличные от других.

Промахи возникают, как правило, из-за неверных действий оператора, но могут также явиться результатом неисправности используемых средств измерений. Во всех случаях промахи не являются характеристикой измерений, и для избежания значительных искажений результатов их необходимо отбросить.

Для объективного решения вопроса о том, является ли промахом какой-либо результат измерения, применяются специальные методы. Наибольшее распространение получили два из них: метод (критерий) 3σ и табличный метод (критерий Смирнова–Греббса).

В основу метода 3σ («три сигма») положено допущение, что результаты однократных измерений x могут отклоняться от их среднего арифметического значения $\bar{x}$ не более чем на 3σ. Если же какой-либо результат однократного измерения $x_П$ отклоняется от *x* более чем на 3σ, то $x_П$ – промах.

Метод 3σ универсален и может быть использован при любом законе распределения рассматриваемых величин. Если закон распределения рассматриваемых величин неизвестен, то метод 3σ формально применим, но при этом остается неизвестной доверительная вероятность, с которой выявляются промахи.

Рассмотрим для примера нормальное распределение. Известно, что при нормальном распределении случайных величин их рассеивание около арифмети-

ческого среднего с вероятностью 0,997 не превосходит величины ±3σ. Этот вывод следует непосредственно из рассмотрения нормального закона распределения случайных величин. Иначе говоря, принято считать, что результаты, вероятность получения которых меньше 0,003, могут появиться только при наличии в ряду измерений промахов. Для обнаружения промахов по методу 3σ необходимо выполнить следующие операции:

1) подсчитать среднее арифметическое значение ряда измерений $\bar{x}$ по формуле (4.1);

2) подсчитать среднее квадратическое отклонение σ по (4.2);

3) найти по абсолютной величине разность A между предполагаемым промахом $x_{\text{п}}$ и средним арифметическим значением ряда измерений.

$$A = |x_{\text{п}} - \bar{x}|; \tag{4.3}$$

4) провести сравнение полученной величины A с 3σ. Если выполняется условие

$$A < 3\sigma, \tag{4.4}$$

то величина $x_{\text{п}}$ не является промахом. Если условие (4.4) не выполняется, то $x_{\text{П}}$ – промах, и его следует отбросить.

Используя метод 3σ, следует помнить: существует очень малая, но отличная от нуля вероятность того, что отброшенный результат измерения является не промахом, а естественным статистическим отклонением.

Идея табличного метода была высказана еще в 1941 году Н.В. Смирновым, а затем развита в 1950 году Греббсом. Поэтому иногда в литературе табличный метод выявления промахов называют критерием Греббса (или критерием Смирнова–Греббса).

Табличный метод разработан из предположения, что результаты измерений равноточные и подчиняются нормальному закону распределения.

Для практического использования рассматриваемого метода (на основе положений теории вероятностей и математической статистики [3]) составлены специальные таблицы (см. табл. П.1.4).

В таблице помещены значения некоторых табличных коэффициентов $W_т$, подсчитанные в зависимости от доверительной вероятности P и числа измерений n. Коэффициенты $W_т$ представляют собой, по сути дела, отношение доверительных интервалов, соответствующих выбранной доверительной вероятности, к среднему квадратическому отклонению.

При практическом применении табличного метода необходимо выполнить следующие операции:

1) подсчитываются величины $\bar{x}$ и σ для данного ряда измерений;

2) находится величина W:

$$W = \left| \frac{x_П - \bar{x}}{\sigma} \right|, \qquad (4.5)$$

где $x_П$ – предполагаемый промах;

3) по специальным таблицам (см. табл. П.1.4) в зависимости от проведенного числа измерений и принятой доверительной вероятности находится величина табличного коэффициента $W_т$;

4) проводится сравнение величины W, полученной согласно (4.5) по экспериментальным данным, с табличной величиной $W_т$.

Если выполняется условие

$$W < W_т,$$

то величина $x_п$ не является промахом, и ее следует оставить в ряду измерений.

Если же окажется, что

$$W > W_т,$$

то величина $x_п$ с принятой доверительной вероятностью является промахом, и ее следует отбросить.

После выявления и исключения промахов подсчитываются новые значения величин $\bar{x}$ и σ, и уже эти новые значения участвуют в дальнейших расчетах.

4.3. Систематические погрешности

Систематические погрешности средств измерений – это, как уже отмечалось выше, составляющие погрешности, которые в данном ряду измерений остаются постоянными или закономерно изменяются.

Следует отметить, что систематические погрешности (как и случайные) в различных точках шкалы одного и того же прибора или измерительного устройства могут быть различны. Поэтому после проведения исследований можно с уверенностью говорить о величине погрешностей лишь в выбранных точках шкалы прибора. Что касается интервалов между точками, то здесь обычно исходят из предположения, что от точки к точке погрешности прибора изменяются плавно (без скачков).

Оценка систематической погрешности проводится в следующей последовательности:

1) в каждой из выбранных точек шкалы прибора определяется среднее арифметическое значение $\bar{x}$;

2) систематическая погрешность средства измерений Δ_C определяется в каждой из выбранных точек шкалы как разность между средним арифметическим и истинным значением измеряемой величины в этой точке:

$$\Delta_C = \bar{x} - x_0, \tag{4.6}$$

где x_0 – определено выше.

Систематическая погрешность Δ_C может быть как положительной (при $\bar{x} > x_0$), так и отрицательной (при $\bar{x} < x_0$).

Истинное значение измеряемой величины x_0, как правило, неизвестно, и вместо x_0 используется действительное значение измеряемой величины, за которое принимают показания образцовых средств измерений.

Систематическая погрешность, подсчитанная по формуле (4.6), является абсолютной и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Кроме абсолютных значений, подсчитываются относительная δ_C и приведенная γ_C систематические погрешности:

$$\delta_C = \frac{\Delta_C}{x_0} 100\ \%, \qquad (4.7)$$

$$\gamma_C = \frac{\Delta_C}{x_N} 100\ \%, \qquad (4.8)$$

где x_N – нормирующее значение (в большинстве случаев $x_N = x_K$);

x_K – верхний предел шкалы прибора.

Относительная и приведенная погрешности выражаются обычно в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

На рис. 4.2 изображена числовая ось, на которой отложено истинное значение измеряемой величины x_0 и нанесены результаты измерений этой величины исследуемым средством измерений. В результате первого измерения получено значение x_1, второго – x_2, третьего – x_3, и т. д. (на рис. 4.2 обозначены результаты только первых четырех измерений). На числовой оси отложены также величины $x_П$ и $\overline{x}$. На рисунке представлены, кроме того, среднее квадратическое отклонение (σ) систематическая погрешность (Δ_C), случайная погрешность ($\overset{0}{\Delta}$) и суммарная погрешность (Δ).

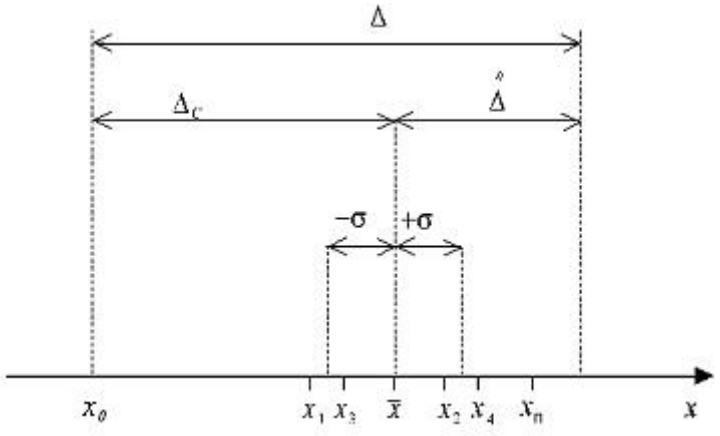


Рис. 4.2. Графическая интерпретация статических погрешностей средств измерений

Таким образом, из приведенного рисунка следует, что систематическая погрешность является некоторой постоянно присутствующей средней величиной, но отнюдь не исчерпывает всех погрешностей измерительного устройства. Действительно, разность между результатами отдельных измерений и истинным значением измеряемой величины может превосходить систематическую

погрешность (как, например, разности $x_2 - x_0$, $x_4 - x_0$ и т. д.), т. е. кроме систематической явно видна погрешность случайная.

4.4. Случайные погрешности

Случайные погрешности средств измерений (СИ) – это, как уже отмечалось, составляющие погрешности, которые в данном ряду измерений, выполненных исследуемым СИ, изменяются случайным образом.

Определение случайной погрешности (так же как и систематической) проводится в каждой из выбранных точек шкалы (или диапазона измерений) исследуемого СИ в следующей последовательности:

1) определяются средние арифметические значения $\bar{x}$;

2) определяются средние квадратические отклонения σ;

3) определяются случайные погрешности по формуле (4.9) без учета знака

$$\overset{0}{\Delta} = K \cdot \sigma, \qquad (4.9)$$

где K – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и закона распределения результатов измерений, рассматриваемых как случайные величины.

Стандарты (см., например, ГОСТ 8.009–84 [44] и ГОСТ 8.508–84 [47]) допускают использование в качестве характеристики случайной погрешности средств измерений значение среднего квадратического отклонения σ, оцениваемого по формуле (4.2).

Отметим, что значение СКО характеризует разброс результатов измерений около среднего арифметического значения (см. рис. 4.2).

Переходя к точностным характеристикам средств измерений, еще раз отметим, что следует рассматривать положительные значения СКО ($+\sigma$) и положительные значения случайной погрешности $\overset{0}{\Delta}$.

Коэффициент K, как уже отмечалось, зависит от принятой доверительной вероятности и закона распределения результатов измерений. Значение K для различных законов распределения приведены в методических указаниях по

применению ГОСТ 8.009–84 [44]. В настоящем учебном пособии при оценке случайных погрешностей используется предположение, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения.

Ниже приведены значения K в зависимости от доверительных вероятностей P при нормальном законе распределения:

$P = 0{,}68$; $K = 1{,}00$;

$P = 0{,}95$; $K = 1{,}96$;

$P = 0{,}99$; $K = 2{,}58$.

Подробная таблица значений K приведена в табл. П.1.5.

Отметим, что при нормальном законе распределения результатов измерений коэффициент K обычно называют «квантиль нормального распределения». Это обстоятельство отражено в заголовке табл. П.1.5.

Случайная погрешность, подсчитанная по формуле (4.9), является абсолютной и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Кроме абсолютных значений, могут также подсчитываться относительная и приведенная случайные погрешности:

$$\overset{\circ}{\delta} = \frac{\overset{\circ}{\Delta}}{x_0} 100\ \%, \tag{4.10}$$

$$\overset{\circ}{\gamma} = \frac{\overset{\circ}{\Delta}}{x_N} 100\ \%, \tag{4.11}$$

где x_0, x_n – определены выше.

Относительная и приведенная случайные погрешности выражаются, как правило, в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

Проиллюстрируем изложенное с помощью рис. 4.2. Как уже указывалось выше, на рисунке изображена числовая ось с отложенными на ней результатами измерения x_1, x_2, x_3, ... известной величины x_0. Кроме того, на рисунке показаны величины $\overline{x}$, σ, Δ_C и Δ. Рассмотрим последнюю величину подробнее. Согласно выражению (4.9), случайная погрешность определяется как произведение K и σ.

Выражение

$$\overset{0}{\Delta} = K \cdot \sigma$$

обозначает, что случайная погрешность с вероятностью P не превзойдет величины $K \cdot \sigma$.

Например, при $K = 2$ и $P = 0{,}95$ случайная погрешность с вероятностью 0,95 будет не больше величины 2σ.

Таким образом, когда речь идет о случайной погрешности, кроме ее значений необходимо указывать доверительную вероятность результата.

При подсчете случайных погрешностей основная трудность возникает при определении коэффициента K, так как закон распределения результатов измерений, как правило, неизвестен.

Правомерность предположения о нормальности закона распределения результатов измерений может быть проверена по одному из критериев согласия, изложенных, например, в Государственных стандартах (ГОСТ 8.207–76 [46]; ГОСТ 8.508–84 [47]) или по критерию Романовского, приведенному в [30].

В прил. 2 описан критерий согласия по ГОСТ 8.508–84 [47].

4.5. Суммарные погрешности

Суммарная погрешность средства измерения Δ равняется арифметической сумме систематической и случайной погрешностей и характеризует наибольшую статическую погрешность средства измерения (СИ) в исследуемой точке шкалы (ГОСТ 8.009–84 [44]; ГОСТ 8.508–84 [47]).

$$\Delta = \pm\left(\left|\Delta_C\right| + \left|\overset{0}{\Delta}\right|\right). \qquad (4.12)$$

Отметим, что в разных точках шкалы измерительного устройства величины Δ (как и Δ_c, и $\overset{0}{\Delta}$) могут быть различны, поэтому для характеристики устройства в целом рассматривают наибольшую суммарную погрешность Δ_m. В этом случае говорят, что погрешность СИ не превосходит величины Δ_m.

Аналогично могут быть рассмотрены максимальная систематическая погрешность Δ_{cm} и максимальная случайная погрешность $\overset{\circ}{\Delta}_m$ как наибольшие погрешности из полученных в различных точках шкалы средства измерений.

Суммарная погрешность, подсчитанная по формуле (4.12), является абсолютной и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Кроме абсолютных значений, подсчитываются относительная δ и приведенная γ суммарные погрешности:

$$\sigma = \frac{\Delta}{x_0} 100\ \%, \tag{4.13}$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} 100\ \%, \tag{4.14}$$

где x_N – нормирующее значение.

Относительная и приведенная суммарные погрешности обычно выражаются в процентах, но могут выражаться и в виде относительных величин.

Для иллюстрации изложенного на рис. 4.2 наряду с другими величинами отложена величина суммарной погрешности.

Поскольку в состав суммарной погрешности входит случайная погрешность, то суммарная погрешность также является случайной величиной. Оценим доверительную вероятность *P,* с которой найдена абсолютная суммарная погрешность Δ, если доверительная вероятность оценки абсолютной случайной погрешности составляет *P* (аналогично могут быть рассмотрены доверительные вероятности относительных и приведенных погрешностей).

Напомним, что систематическая погрешность Δ_C – это погрешность, которая остается постоянной при повторных измерениях одной и той же величины. Другими словами, Δ_C, по определению, есть постоянная величина и в силу этого имеет доверительную вероятность, равную единице.

Воспользуемся теоремой умножения вероятностей, которая гласит: если сложное событие *C* состоит из ряда независимых исходов простых событий A_1, A_2, ..., A_n и его осуществление означает одновременное появление всех исхо-

дов, то вероятность такого сложного события равна произведению вероятностей исходов (см. [17, с. 46]), т. е.

$$P(C) = P(A_1 \cap A_2 \cap ... \cap A_n) = \prod_{j=1}^{n} P(A_j), \qquad (4.15)$$

где знак $\cap$ соответствует операции «и».

Независимость исходов при этом означает, что осуществление одного из них не влияет на вероятность осуществления остальных.

В нашем случае выражение (4.15) принимает вид

$$P(\Delta) = P(\Delta_c) \cdot P(\overset{o}{\Delta}) = P(\overset{0}{\Delta}), \qquad (4.16)$$

где $P(\Delta_c)$ – доверительная вероятность систематической погрешности ($P(\Delta_c) = 1$);

$P(\overset{o}{\Delta})$ – доверительная вероятность случайной погрешности;

$P(\Delta)$ – доверительная вероятность суммарной погрешности.

Таким образом, в рассмотренном случае доверительная вероятность суммарной погрешности численно равна доверительной вероятности случайной погрешности. Другими словами, с доверительной вероятностью P абсолютная суммарная погрешность исследованного средства измерения не превосходит величины Δ.

Соотношения (4.12), (4.13) и (4.14), приведенные выше, позволяют оценить значения абсолютной, относительной и приведенной суммарных погрешностей средств измерений.

Полученные значения абсолютной суммарной погрешности Δ (или относительной δ, или приведенной γ суммарных погрешностей) позволяют присвоить исследованному средству измерений тот или иной класс точности (см. п. 3.4 учебного пособия). Присвоенный класс точности должен соответствовать требованиям ГОСТ 8.401–80 [45].

Отметим, что для решения поставленной задачи по определению численного значения класса точности полученные значения Δ, или δ, или γ округляются до ближайшего большего значения стандартного ряда и являются классом точ-

ности данного средства измерений (СИ). Например, для СИ, имеющего $\delta =$ $= \pm 1{,}2$ %, класс точности $\left(1{,}5\right)$; для СИ, имеющего $\gamma = \pm 3{,}2$ %, класс точности 4,0 и т. д.

Присвоенный класс точности заносится в техническую документацию на СИ. Кроме того, класс точности наносится на шкалы, щитки или корпуса средств измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 8.401–80 [45].

4.6. Правила округления

Результаты измерений и погрешности следует округлять по сложившимся правилам.

Основные положения этих правил округления:

1. Округление проводится только один раз при получении окончательных результатов. Все промежуточные результаты целесообразно представлять тем числом разрядов, которые удается получить.

2. Округление начинается с округления погрешности результата измерения.

3. Погрешность результата измерения округлятся до двух значащих цифр, если при движении слева направо первая значащая цифра округляемой погрешности меньше 3.

Погрешность результата измерения округляется до одной значащей цифры, если при движении слева направо первая значащая цифра округляемой погрешности больше 3 или равна 3.

4. Результат измерения округляется так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Если числовое значение результата измерения представляется десятичной дробью, оканчивающейся нулями, то нули отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

5. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры в числе не изменяют. Если эта цифра больше 5, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Лишние цифры в целых числах

заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, результат измерения U = 25,4587 мВ при погрешности результата Δ = ±0,0213 мВ. Округление начинается с погрешности. После округления погрешность Δ = ±0,021 мВ и результат измерения U = 25,459 мВ. Результат измерения с учетом погрешности запишется в виде U' = (25,459±0,021) мВ. Если погрешность (при том же результате измерения) Δ = ±6,25 мВ, то после округления Δ = ±6 мВ, U = 25 мВ и результат измерения с учетом погрешности U' = (25±6) мВ.

6. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры отсутствуют или нули, то последнюю сохраняемую цифру числа не изменяют.

Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры отличны от нуля, то последнюю сохраняемую цифру числа увеличивают на единицу.

7. Примеры округления:

а) результат измерения A = 625,47; погрешность ΔA = ±7,24. После округления: ΔA = ±7; A = 625 и результат измерения с учетом погрешности A' = (625±7);

б) результат измерения B = 1055,53; погрешность ΔB = ±5,29. После округления: ΔB = ±5; B = 1056 и результат измерения с учетом погрешности B' = (1056±5);

в) результат измерения C = 72,85; погрешность ΔC = ±0,35. После округления: ΔC = ±0,3; C = ±72,8 и результат измерения с учетом погрешности C = (72,8±0,3). Остающиеся цифры в числе не изменяют.

4.7. Пример расчета

В качестве примера рассмотрен расчет точностных характеристик вольтметра по результатам измерений с его помощью заданного напряжения. Расчет проведен в соответствии с рекомендациями, изложенными в пп. 4.1–4.6 учебного пособия.

Пример

При многократных измерениях напряжения $U_0 = 60{,}00$ В получены следующие показания исследуемого вольтметра: 60,12; 60,15; 60,16; 60,18; 60,20;

60,23; 60,25; 60,27; 60,28; 60,31 В. Предполагая, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения, найти (с доверительной вероятностью P = 0,95) систематическую, случайную и суммарную погрешности вольтметра. Верхний предел измерения вольтметра $U_K = 200$ В.

Оценка искомых величин проводится в нижеследующей последовательности.

1. Рассчитывается среднее арифметическое значение рассматриваемого ряда измерений:

$$\overline{U} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i = \frac{1}{10}(60{,}15 + ...60{,}31) = 60{,}215 \text{ В},$$

где $\overline{U}$ – среднее арифметическое значение;

n – число измерений (n = 10);

U_i – значение i-го измерения.

2. Определяется среднее квадратическое отклонение σ по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(U_i - \overline{U}\right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(60{,}15-60{,}215)^2 + ... + (60{,}31-60{,}215)^2}{10-1}} = 0{,}0628 \text{ В},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение;

U_i, $\overline{U}$ и n – определены выше.

3. Выявляются возможные промахи методом 3σ и методом Смирнова–Греббса (табличным методом).

Метод 3σ

Для реализации этого метода подсчитывается значение 3σ = 3·0,0628 = 0,1884 В, которое сравнивается с разностью между $U_{\text{П}}$ и $\overline{U}$.

$$\left|U_{\text{П}} - \overline{U}\right| = \left|60{,}31 - 60{,}215\right| = 0{,}095 < 3\sigma,$$

где $U_{\text{П}}$ – предполагаемый промах ($U_{\text{П}} = 60{,}31\ B$);

$\overline{U} = 60{,}215B$ – определено выше.

Поскольку $\left|U_{\text{П}} - \overline{U}\right| < 3\sigma$, то $U_{\text{П}} = 60{,}31B$ – не промах, и это значение следует оставить в ряду измерений.

Табличный метод

Для реализации табличного метода оцениваются значения:

$$W = \frac{\left|U_{\text{П}} - \overline{U}\right|}{\sigma} = \frac{60,31 - 60,215}{0,0628} = 1,5127;$$

$$W_{\text{Т}} = f\left(p_i n\right) = 2,29 \text{ (для } p = 0,95 \text{ и } n = 10),$$

где W_T – табличное значение, зависящее от принятой доверительной вероятности p и числа измерений n (см. табл. П.1.4);

$U_{\text{П}}, \overline{U}$ и σ – определены выше.

Поскольку $W < W_T$, то $U_П = 60,31B$ _ не промах, и это значение следует оставить в ряду измерений.

4. Оценивается абсолютная систематическая погрешность вольтметра:

$$\Delta_C = \overline{U} - U_0 = 60,215 - 60,00 = 0,215 \text{ В},$$

где Δ_C – систематическая погрешность вольтметра в рассматриваемой точке шкалы или диапазона измерения;

U_0 – рассматриваемая точка шкалы (диапазона измерения), значение напряжения в которой принимается за истинное значение измеряемой величины (U_0 = 60,00 В);

$\overline{U}$ – определено выше.

5. Оценивается абсолютная случайная погрешность вольтметра:

$$\overset{0}{\Delta} = \kappa \cdot \sigma = 1,96 \cdot 0,0628 = 0,1231 \text{ В},$$

где $\overset{0}{\Delta}$ – случайная погрешность вольтметра в рассматриваемой точке шкалы (диапазоне измерения);

κ – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности p и от закона распределения результатов измерений (для p = 0,95 и нормального закона распределения результатов измерений κ = 1,96);

σ – определено выше.

6. Оценивается абсолютная суммарная погрешность вольтметра:

$$\Delta = \pm(|\Delta_C| + |\overset{0}{\Delta}|) = \pm(0{,}215 + 0{,}1231) = \pm 0{,}3381 \text{ В};$$

$$\Delta = \pm 0{,}3381 \text{ В},$$

где Δ – абсолютная суммарная погрешность вольтметра;

Δ_C, $\overset{0}{\Delta}$ – определены выше.

7. Оценивается относительная суммарная погрешность вольтметра:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{U_0} 100\ \% = \pm \frac{0{,}3381}{60{,}00} 100\ \% = \pm 0{,}5635\ \%;$$

$$\delta = \pm 0{,}5635\ \%,$$

где δ – относительная суммарная погрешность;

U_0 – определено выше (U_0= 60,00 В).

8. Оценивается приведенная суммарная погрешность вольтметра:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{U_k} 100\ \% = \pm \frac{0{,}3381}{200} 100\ \% = \pm 0{,}1690\ \%;$$

$$\gamma = \pm 0{,}1690\%,$$

где γ – приведенная суммарная погрешность;

U_k – верхний предел шкалы или диапазона измерения вольтметра (U_k = 200 В).

9. Провести округление полученных величин. После округления рассматриваемые величины принимают следующие значения:

$$\Delta = \pm 0{,}3\ \ B;$$

$$\delta = \pm 0{,}6\ \%;$$

$$\gamma = \pm 0{,}17\ \%;$$

$$\overline{U'} = (60{,}2 \pm 0{,}3)\ \text{В}, p = 0{,}95.$$

Следовательно, с доверительной вероятностью p = 0,95 суммарные погрешности (при измерении напряжения U_0= 60,00 В) составляют: абсолютная $\pm$ 0,3 В; относительная $\pm$ 0,6 %; приведенная $\pm$ 0,17 %. При этом результат измерения исследуемым вольтметром в выбранной точке шкалы (или диапазона

измерения) может быть записан как $(60{,}2 \pm 0{,}3)$ В. Отметим, что термин «шкала» применяется для отсчетного устройства стрелочных приборов, а термин «диапазон измерения» – для отсчетного устройства цифровых измерительных приборов. В приведенном примере не уточняется тип прибора (стрелочный прибор или цифровой) и, в силу этого, используются оба термина при характеристике рассматриваемых величин.

5. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ПОГРЕШНОСТИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

5.1. Общие положения

В учебном пособии широко используются такие величины, как среднее арифметическое значение ($\bar{x}$), среднее квадратическое отклонение (σ), систематические (Δ_C), случайные ($\overset{0}{\Delta}$) и суммарные (Δ) погрешности средств измерений (СИ). Все перечисленные величины зависят от числа измерений «*n*» и принимают разные значения в зависимости от «*n*». За истинные значения $\bar{x}$, σ, Δ_C, $\overset{0}{\Delta}$ и Δ принимаются их значения при бесконечно большом числе измерений (при $n \to \infty$). На практике число измерений всегда ограничено, что приводит к появлению погрешностей при оценке рассматриваемых величин. Причем погрешность из-за конечного числа измерений тем больше, чем меньше проведенное число измерений.

Ниже рассматривается порядок оценки погрешностей при определении величин $\bar{x}$, Δ_C и σ. Аналогичные погрешности могут быть найдены для величины $\overset{0}{\Delta}$ и Δ, но фактически эти погрешности рассчитываются исключительно редко и в силу этого в данном учебном пособии не рассматриваются.

5.2. Погрешность арифметического среднего

При конечном числе измерений в значении арифметического среднего появляется погрешность, которая тем больше, чем меньше проведенное число измерений.

Погрешность среднего арифметического значения определяется по формуле

$$\Delta\bar{x} = \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \qquad (5.1)$$

где *t* – коэффициент Стьюдента, зависящий от принятой доверительной вероятности *P* и числа измерений *n* (значения *t* приведены в табл. П.1.2).

Область значений $\Delta\bar{x}$ может быть записана в виде

$$F\left(a_1\langle\bar{x}\langle a_2\right)=P\,, \tag{5.2}$$

т. е. с доверительной вероятностью P значение $\bar{x}$ больше значения a_1 и меньше значения a_2, где a_1 – нижняя и a_2 – верхняя доверительные границы.

Изложенное иллюстрируется на рис. 5.1, *а*, где изображена числовая ось, на которой отложены среднее арифметическое значение $\bar{x}$, верхняя a_2 и нижняя a_1 границы доверительного интервала $\bar{x}$ и погрешности среднего арифметического $+\Delta\bar{x}$ и $-\Delta\bar{x}$. Нижняя и верхняя границы доверительного интервала определяются соотношениями

$$a_1=\left(\bar{x}-\Delta\bar{x}\right), \tag{5.3}$$

$$a_2=\left(\bar{x}+\Delta\bar{x}\right). \tag{5.4}$$

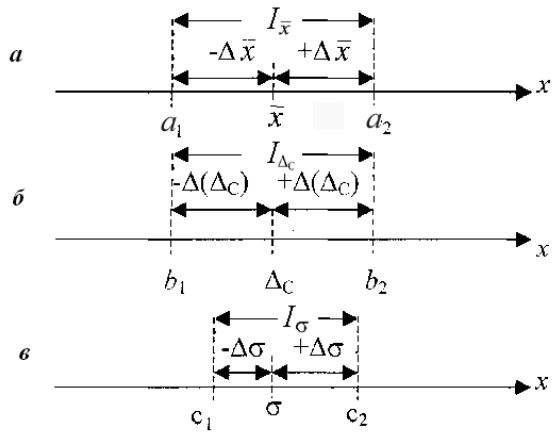


Рис. 5.1. Графическая интерпретация доверительных интервалов и погрешности погрешностей

5.3. Погрешность систематической погрешности

Систематическая погрешность Δ_C определяется как разность между средним арифметическим значением и истинным значением измеряемой величины

$$\Delta_C=\bar{x}-x_0\,. \tag{5.5}$$

Предположим теперь, что известна погрешность среднего арифметического значения, равная $\pm\Delta\bar{x}$.

Тогда с учетом этой погрешности можно записать

$$\bar{x}=\bar{x}\pm\Delta\bar{x}\,. \tag{5.6}$$

Подставляя значение $\bar{x}$ в уравнение (5.5) и обозначая полученную при этом величину через Δ'_C, получим

$$\Delta'_C = \bar{x} \pm \Delta\bar{x} - x_0 = \bar{x} - x_0 \pm \Delta\bar{x} = \Delta_C \pm \Delta\bar{x}. \qquad (5.7)$$

Введем обозначение $\Delta(\Delta_C) = \Delta\bar{x}$ и будем называть в дальнейшем эту величину погрешностью систематической погрешности.

Следовательно, погрешность систематической погрешности численно равна погрешности арифметического среднего, если действительное значение измеряемой величины известно точно и не содержит каких-либо погрешностей:

$$\Delta(\Delta_c) = \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \qquad (5.8)$$

Таким образом, при малом числе измерений нельзя указать точное значение систематической погрешности, а можно лишь сказать, что с принятой доверительной вероятностью систематическая погрешность будет находиться в определенных границах. Нижняя b_1 и верхняя b_2 границы доверительного интервала определяются соответственно выражениями

$$b_1 = \Delta_C - \Delta(\Delta_C), \qquad (5.9)$$

$$b_2 = \Delta_C + \Delta(\Delta_C). \qquad (5.10)$$

Изложенное здесь иллюстрируется на рис. 5.1, *б*, где изображена числовая ось с отложенными на ней величинами Δ_C, b_1, b_2, $-\Delta(\Delta_C)$, $+\Delta(\Delta_C)$ и I_{Δ_C}.

Величина доверительного интервала систематической погрешности (т. е. промежуток, заключенный между верхней и нижней границей) зависит от проведенного числа измерений и от принятой доверительной вероятности. При заданной доверительной вероятности с ростом числа измерений доверительный интервал уменьшается и при числе измерений $n \to \infty$ стягивается в точку. Другими словами, при бесконечно большом числе измерений погрешности среднего арифметического и систематической погрешности равны нулю. Подчеркнем еще раз это обстоятельство. Увеличение числа измерений уменьшает не систематическую погрешность, а ее неопределенность. С ростом числа измерений уменьшается не сама погрешность, а погрешность погрешности.

5.4. Погрешность среднего квадратического отклонения

При малом числе измерений величина среднего квадратического отклонения σ, подобно среднему арифметическому значению измеряемой величины и систематической погрешности, также будет иметь погрешность. Погрешность среднего квадратического отклонения $\Delta\sigma$ может быть найдена по приближенной формуле

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2\cdot(n-1)}}. \qquad (5.11)$$

Выражение (5.11) справедливо для *n,* большего 25–30, но в случае грубых оценок это выражение можно использовать и для меньшего числа измерений.

Из (5.11) следует, что при $n = 30$ $\Delta\sigma = \pm 1/8\sigma$, т. е. при тридцати измерениях погрешность в определении среднего квадратического отклонения составит примерно 13 %. При $n = 50$ погрешность определения σ составит около 10 %, при $n = 100$ – примерно 7 %. Таким образом, погрешность в определении величины σ уменьшается медленнее, чем происходит рост числа измерений.

Для более строгой оценки погрешности среднего квадратического отклонения используется уже рассмотренное ранее распределение χ^2.

На основе распределения χ^2 для коэффициентов γ составлены специальные таблицы, в которых приводятся значения этих коэффициентов в зависимости от числа измерений и принятой доверительной вероятности. Поскольку распределение χ^2 асимметрично, то погрешности равного значения, но противоположного знака, не равновероятны, как в случае нормального распределения. Введем нижнюю и верхнюю границы погрешности:

$$\Delta_{1\sigma} = (\gamma_1 - 1)\sigma, \qquad (5.12)$$

$$\Delta_{2\sigma} = (\gamma_2 - 1)\sigma. \qquad (5.13)$$

Поскольку $\gamma_1 \langle 1$, а $\gamma_2 \rangle 1$, то величина $\Delta_1\sigma$, определяемая по (5.12), всегда отрицательна, а величина $\Delta_2\sigma$, определяемая по (5.13), всегда положительна. Отметим также, что $|\Delta_1\sigma| \langle |\Delta_2\sigma|$, т. е. положительная погрешность среднего квад-

ратического отклонения (СКО) всегда больше по абсолютной величине отрицательной погрешности СКО.

Подробная таблица значений коэффициентов γ_1 и γ_2 приводится в приложении (табл. П.1.3).

Вместо расчетных соотношений вида (5.12) и (5.13) можно использовать запись вида

$$F\left(c_1 < \sigma < c_2\right) = P,$$

т. е. с доверительной вероятностью P среднее квадратическое отклонение σ больше величины c_1 и меньше c_2.

На рис. 5.1, *в* изображена числовая ось и отложены величины σ, $\left|-\Delta\sigma\right| = \left|\Delta_1\sigma\right|, \left|+\Delta\sigma\right| = \Delta_2\sigma,$, c_1, c_2, где c_1 и c_2 – нижняя и верхняя границы доверительного интервала I_σ. Границы доверительного интервала I_σ определяются соотношениями

$$c_1 = \sigma - \left|\Delta_1\sigma\right| \tag{5.14}$$

$$c_2 = \sigma + \left|\Delta_2\sigma\right|. \tag{5.15}$$

Значение и асимметрия доверительного интервала зависят от проведенного числа измерений и принятой доверительной вероятности. При заданной доверительной вероятности с ростом числа измерений ширина доверительного интервала и его асимметрия уменьшаются, а при $n \to \infty$ доверительный интервал стягивается в точку.

Следует отметить, что при большом числе измерений приближенная формула (5.11) и более строгие соотношения (5.12) и (5.13) дают близкие результаты.

5.5. Необходимое число измерений

Для увеличения достоверности результата измерения могут быть использованы два пути: повышение точности измерений за счет улучшения измерительных приборов и методов измерений и увеличение числа измерений. Рас-

смотрим последний прием, считая, что все возможности совершенствования техники уже реализованы.

Сами погрешности (и систематические, и случайные) от числа измерений непосредственно не зависят. От числа измерений непосредственно зависят погрешности погрешностей и соответствующие доверительные интервалы, т. е. при увеличении числа измерений уменьшаются такие величины, как $\Delta\bar{x}$, $\Delta(\Delta_C)$ и $\Delta(\sigma)$.

Отметим, что уменьшать погрешность погрешностей целесообразно до тех пор, пока погрешность измерений не будет значительно превосходить соответствующую погрешность погрешности. Для этого необходимо, чтобы доверительный интервал, определенный с выбранной доверительной вероятностью, был бы существенно меньше величины погрешности измерений. Обычно в этих случаях сравнивают между собой погрешность среднего арифметического значения и систематическую погрешность Δ_C и добиваются, чтобы

$$\Delta\bar{x} << \Delta_C. \qquad (5.16)$$

На практике обычно считают, что условие (5.16) выполняется, если $\Delta\bar{x}$ составляет примерно одну десятую часть от Δ_C. Иногда удовлетворяются гораздо менее жесткими требованиями: $\Delta\bar{x} = 1/5\Delta_C$ или даже $\Delta\bar{x} = 1/3\Delta_C$.

В пункте 5.1 уже отмечалось, что погрешность арифметического среднего определяется с использованием распределения Стьюдента по соотношению (5.1). Выражение (5.1) позволяет решить и обратную задачу, т. е. по заданным величинам *t* и σ найти соответствующее им число измерений *n.* Правда, решение обратной задачи с помощью табл. П.1.2 приходится вести методом последовательного приближения, задаваясь различными значениями *n.* Необходимость последнего объясняется тем, что коэффициент Стьюдента *t,* значения которого приводятся в табл. П.1.2, зависит не только от доверительной вероятности, но и от проведенного числа измерений. Для облегчения решения поставленной задачи составлены специальные таблицы, в которых приводится необходимое число измерений для получения относительной погрешности $\Delta\bar{x}/\sigma$ в зависимости от требуемой доверительной вероятности *P* (см. табл. П.1.6).

Сущность пересчета от данных табл. П.1.2 к данным табл. П.1.6 заключается в следующем.

Выше было показано, что доверительная вероятность P попадания случайной величины z в интервал $\pm t$ зависит как от заданной величины t, так и от числа измерений n. На этой основе составлена табл. П.1.2. Коэффициенты Стьюдента представляют собой численные значения доверительного интервала $\pm t$ в зависимости от двух параметров P и n. Очевидно, с помощью такой таблицы можно определить любую из трех величин P, n и t по известным двум другим. В частности, таким образом можно найти n по заданным значениям P и t.

В практических условиях доверительный интервал задается не для величины t, а непосредственно для исследуемой случайной величины $\Delta\bar{x}$ (см. (5.1)).

На основании зависимости (5.1) можно записать

$$t = \sqrt{n} \cdot \frac{\Delta x}{\sigma}. \tag{5.17}$$

Откуда окончательно получаем

$$M = \frac{\Delta\bar{x}}{\sigma} = \frac{t}{\sqrt{n}}, \tag{5.18}$$

где M – обозначение приведенной величины доверительного интервала.

Таким образом, для решения поставленной задачи по определению необходимого числа измерений n по заданным значениям доверительного интервала $\pm\Delta\bar{x}$ и доверительной вероятности P необходимо коэффициенты Стьюдента t (см. табл. П.1.2) разделить на корень квадратный из соответствующего числа измерений n.

Полученная таким образом таблица приведена в прил. 1 (табл. П.1.6).

Приведем пример расчета необходимого числа измерений.

Пример 5.1. Систематическая погрешность вольтметра Δ_C = 0,8 В; σ = 1,0 В. Сколько измерений нужно проделать, чтобы с вероятностью 0,95 погрешность среднего арифметического была меньше половины систематической погрешности?

Находим $\Delta\bar{x}$ и отношение $\Delta\bar{x}$ к σ:

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{2}\cdot\Delta_C = \frac{1}{2}\cdot 0{,}8 = 0{,}4\ \text{В};$$

$$\frac{\Delta\bar{x}}{\sigma} = \frac{0{,}4}{1{,}0} = 0{,}4\,.$$

Из табл. П.1.2 находим в колонке $P = 0{,}95$ для $\Delta\bar{x}/\sigma = 0{,}4$, $n = 27$.

Иначе говоря, надо провести 27 измерений, чтобы погрешность среднего арифметического значения не превысила 0,4 В с вероятностью $P = 0{,}95$.

В данном случае получилось сравнительно небольшое число измерений, которое можно осуществить практически. Из табл. П.1.6 следует, что при высоких доверительных вероятностях и жестких требованиях к результатам измерений могут получаться очень большие числа измерений, исчисляемые десятками и даже сотнями тысяч. Очевидно, что реализовывать такие большие числа измерений невозможно, поэтому требования к результатам измерений должны быть согласованы с возможностями измерительных устройств и их не следует необоснованно завышать.

Выше подробно рассмотрен порядок расчетов, когда задана величина погрешности арифметического среднего. В случае, когда задана величина погрешности систематической погрешности, порядок расчетов остается тот же самый и поэтому здесь не рассматривается.

Погрешности среднего квадратического отклонения Δ_σ и тем более погрешность случайной погрешности $\Delta(\overset{0}{\Delta})$ в качестве исходных величин используются редко, и в силу этого в настоящем учебном пособии данный вопрос подробно не рассматривается. Отметим только, что при необходимости можно воспользоваться приближенным соотношением (5.11), решив его относительно числа измерений *n.* Можно также воспользоваться табл. П.1.3 γ-коэффициентов, но в этом случае задачу придется решать методом последовательного приближения.

В заключение параграфа опишем, какие и в какой последовательности следует выполнить операции, чтобы найти необходимое число измерений при заданной погрешности среднего арифметического значения $\bar{x}$.

Определение минимально необходимого числа измерений n для получения с выбранной доверительной вероятностью P заданной погрешности арифметического среднего приводится в нижеследующей последовательности.

В исследуемой точке шкалы прибора проводится 10–20 измерений и находятся величины $\bar{x}$ и σ. Измерения следует проводить таким образом, как описано в п. 4.1.

Находится отношение $\Delta\bar{x}/\sigma$, где $\Delta\bar{x}$ – заданная погрешность арифметического среднего.

По величине соотношения $\Delta\bar{x}/\sigma$ и заданной доверительной вероятности P находится минимально необходимое число измерений (см. табл. П.1.6).

Полученное согласно изложенному число измерений n_1 является первым приближением. Для получения второго приближения необходимо провести n_1 измерений и повторить все необходимые расчеты, порядок которых приведен выше. Если полученное число измерений n_1 меньше предварительно проведенного числа измерений или равно ему, то второго приближения делать не следует.

Из всего изложенного можно заключить, что увеличением числа измерений можно устранить влияние случайных воздействий на результат измерения только в том случае, если стандартное отклонение σ не более чем в несколько раз превосходит систематическую погрешность Δ_C. Реально это возможно, если $\sigma \le 5\Delta_C$. При больших значениях σ для получения удовлетворительных результатов уже требуются сотни и тысячи измерений, что практически невыполнимо. В этих случаях следует коренным способом менять методику измерений или используемые измерительные устройства, чтобы уменьшить величину среднего квадратического отклонения.

5.6. Пример расчета

Расчет погрешности погрешностей, доверительных интервалов и доверительных границ проведен с использованием условия задачи примера 4.1 (п. 4.7).

Для расчетов использованы следующие величины из примера 4.1:

$$\overline{U} = 60{,}215 \text{ В}; \ \sigma = 0{,}0628 \text{ В}; \ \Delta_C = 0{,}215 \text{ В}.$$

1. Погрешность среднего арифметического значения оценивается по формуле:

$$\Delta\overline{U} = \pm t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm\frac{2,26\cdot 0,0628}{\sqrt{10}} = \pm 0,0449 \text{ В};$$

где $\Delta\overline{U}$ – погрешность среднего арифметического значения;

t – коэффициент Стьюдента, зависящий от принятой доверительной вероятности P и числа измерений n (для $P = 0,95$ и $n = 10$ $t = 2,26$; см.табл. П.1.2);

σ, n – определены выше.

2. Доверительные границы среднего арифметического значения оценивается по формулам

$$a_1 = \overline{U} - \left|\Delta\overline{U}\right| = 60,215 - 0,0449 = 60,1701 \text{ В};$$

$$a_2 = \overline{U} + \left|\Delta\overline{U}\right| = 60,215 + 0,0449 = 60,2599 \text{ В};$$

где a_1 и a_2 – нижняя и верхняя доверительные границы среднего арифметического значения;

$\Delta\overline{U}$ и $\overline{U}$ – определены выше.

3. Доверительный интервал среднего арифметического значения оцениваются по формуле

$$I_{\overline{U}} = a_2 - a_1 = 60,2599–60,1701 = 0,0898 \text{ В}.$$

4. Погрешность систематической погрешности численно равна погрешности арифметического среднего значения, т. е.

$$\Delta(\Delta_C) = \pm 0,0449 \text{ В},$$

где $\Delta(\Delta_C)$ – погрешность систематической погрешности.

5. Доверительные границы систематической погрешности оцениваются по формулам

$$b_1 = \Delta_C - \left|\Delta(\Delta_C)\right| = 0,2150–0,0449 = 0,1701 \text{ В};$$

$$b_2 = \Delta_C - \left|\Delta(\Delta_C)\right| = 0,2150+0,0449 = 0,2599 \text{ В};$$

где b_1 и b_2 – нижняя и верхняя доверительные границы систематической погрешности;

Δ_C и $\Delta(\Delta_C)$ – определены выше.

6. Доверительный интервал систематической погрешности определяется по формуле

$$I_{\Delta_C} = b_2 - b_1 = 0{,}2599 - 0{,}1701 = 0{,}0898 \text{ В};$$

где I_{Δ_C} – доверительный интервал систематической погрешности;

b_1 и b_2 – определены выше.

7. Приближенное значение погрешности среднего квадратического отклонения (СКО) оценивается по формуле

$$\Delta\sigma = \pm\frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}} = \pm\frac{0{,}0628}{\sqrt{2(10-1)}} = \pm 0{,}0148 \text{ В};$$

где Δσ – приближенное значение погрешности СКО;

σ и n – определены выше.

8. Уточненные значения погрешностей среднего квадратического отклонения (СКО) оцениваются по формулам

$$\Delta_1\sigma = (\gamma_1 - 1)\sigma = (0{,}69 - 1)\cdot 0{,}0628 = -0{,}0195 \text{ В};$$

$$\Delta_2\sigma = (\gamma_2 - 1)\sigma = (1{,}83 - 1)\cdot 0{,}0628 = 0{,}0521 \text{ В};$$

где $\Delta_1\sigma$ и $\Delta_2\sigma$ – уточненные погрешности (СКО);

γ_1 и γ_2 – коэффициенты, зависящие от принятой доверительно вероятности P и числа измерений n (для $P = 0{,}95$ и $n = 10$ $\gamma_1 = 0{,}69$ и $\gamma_2 = 1{,}83$, см. табл. П.1.3);

σ – определено выше.

9. Уточненные доверительные границы среднего квадратического отклонения (СКО) оцениваются по формулам

$$C_1 = \sigma - |\Delta_1\sigma| = 0{,}0628 - 0{,}0195 = 0{,}0433 \text{ В};$$

$$C_2 = \sigma + |\Delta_2\sigma| = 0{,}0628 + 0{,}0521 = 0{,}1149 \text{ В},$$

где C_1 и C_2 – уточненные нижняя и верхняя доверительные границы СКО;

σ, $\Delta_1\sigma$, $\Delta_2\sigma$ – определены выше.

10. Уточненный доверительный интервал среднего квадратического отклонения (СКО) оценивается по формуле

$$I_\sigma = C_2 - C_1 = 0,1149 - 0,0433 = 0,0716 \text{ В};$$

где I_σ – уточненное значение доверительного интервала СКО;

C_1 и C_2 – определены выше.

После округления найденных величин получены следующие их значения:

$$\Delta\overline{U} = \pm 0,04 \text{ В};\ a_1 = 60,10 \text{ В};\ a_2 = 60,26 \text{ В};\ I_{\overline{U}} = 0,09 \text{ В}.$$

$$\Delta(\Delta_C) = \pm 0,04 \text{ В};\ b_1 = 0,17 \text{ В};\ b_2 = 0,26 \text{ В};\ I_{\Delta_C} = 0,09 \text{ В}.$$

$$\Delta\sigma = \pm 0,01 \text{ В}.$$

$$\Delta_1\sigma = -0,02 \text{ В};\ \Delta_2\sigma = +0,05 \text{ В};$$

$$C_1 = 0,04 \text{ В};\ C_2 = 0,11 \text{ В};\ I_\delta = 0,07 \text{ В}.$$

В заключение напомним еще раз основные положения.

При малом числе измерений появляются погрешности погрешностей, которые уменьшаются с ростом числа измерений. Приведенный пример позволяет количественно оценить погрешности погрешностей при n = 10 (где n – число измерений).

Подсчет погрешностей среднего квадратического отклонения (СКО) по приближенной формуле всегда дает симметричные и несколько меньшие значения, чем значения, полученные по уточненным формулам с использованием коэффициентов γ_1 и γ_2 (см. приведенный пример).

Погрешности СКО, найденные по уточненным формулам, всегда асимметричны, причем отрицательная погрешность по абсолютной величине всегда меньше положительной погрешности. Уточненная отрицательная погрешность по абсолютной величине близка погрешности, получаемой по приближенной формуле (см. результаты расчетов, приведенные в рассмотренном примере).

6. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Общие положения

Динамическая погрешность измерений – это погрешность, возникающая при измерении переменных во времени величин или неустановившихся периодических процессов и обусловленная инерционными свойствами средств измерений [1, 2, 26].

Динамическая погрешность средства измерения $d(t)$ может быть определена как разность между сигналом на выходе средства измерения $x(t)$ и истинным значением измеряемой величины $x_0'(t)$, приведенной к выходу.

$$d(t) = x(t) - x_0'(t), \tag{6.1}$$

где значения величин $d(t)$, $x(t)$ соответствуют моменту времени t.

Выражение (6.1) свидетельствует, что динамическая погрешность является функцией времени и зависит от характера входного сигнала.

Истинным значением измеряемой величины является ее значение на входе измерительного устройства $x_0(t)$. Для сравнения входных и выходных величин между собой необходимо сделать их приведение «к входу» или «к выходу» средства измерения. Воспользовавшись приведением «к выходу», запишем значение динамической погрешности $d(t)$ в виде

$$d(t) = x(t) - Kx_0(t), \tag{6.2}$$

где $x(t)$ – выходной сигнал;

$x_0(t)$ – входной сигнал;

K – статический передаточный коэффициент.

Статический передаточный коэффициент находится в статических условиях работы измерительного устройства как отношение приращения выходной величины Δx к приращению входной величины Δx_0:

$$K = \Delta x / \Delta x_0. \tag{6.3}$$

При классификации погрешностей средств измерений отмечалось, что динамическая погрешность может быть представлена в виде суммы двух со-

ставляющих – систематической и случайной. Однако из-за большой сложности разделения динамических погрешностей на систематические и случайные составляющие такого разделения обычно не проводят, а ограничиваются рассмотрением суммарной динамической погрешности, определяемой выражением (6.2).

Вместе с тем следует отметить, что динамическая погрешность в виде (6.2) сравнительно редко используется на практике. Это объясняется тем, что $d(t)$ характеризует реакцию измерительного устройства на вполне определенный входной сигнал $x_0(t)$. Величина погрешности в этом случае зависит как от динамических свойств измерительного устройства, так и от вида входного сигнала, причем каждому входному сигналу соответствует своя динамическая погрешность. В силу этого для описания динамических свойств самих измерительных приборов (или устройств), а не системы прибор-сигнал предпочитают использовать другие характеристики. Наиболее полно динамические свойства измерительного устройства описываются передаточной функцией $W(p)$, которая, как известно, определяется соотношением

$$W(p) = \frac{x(p)}{x_0(p)}, \tag{6.4}$$

где p – комплексная переменная величина(параметр);

$x_0(p)$, $x(p)$ – входной и выходной сигналы, преобразованные по Лапласу, при нулевых начальных условиях.

Другими важными характеристиками измерительных устройств являются амплитудно- и фазово-частотные характеристики.

Амплитудно-частотной характеристикой измерительного устройства называется зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты выходного сигнала (при постоянстве амплитуды входного сигнала).

Фазово-частотной характеристикой измерительного устройства называется зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты изменения входного сигнала.

Методы определения передаточных функций и частотных характеристик подробно рассматриваются в курсе теории автоматического управления и детально освещены в соответствующей литературе. Более подробно с методами определения передаточных функций и частотных характеристик можно ознакомиться по работе [27]. В данном учебном пособии эти вопросы рассмотрены очень кратко.

6.2. Передаточные функции

Существует несколько методов экспериментального определения параметров передаточной функции $W(p)$, правомерных для линейных средств измерений, не имеющих чистого запаздывания. Наибольшее распространение получил метод, основанный на использовании переходных характеристик $L(t)$ исследуемых устройств и характеристик типовых динамических звеньев.

Переходной характеристикой $L(t)$ динамической системы называется ее реакция на входной сигнал, имеющий вид ступенчатой функции, при нулевых начальных условиях. На рис. 6.1 приводится характерный вид входных и выходных сигналов при исследовании измерительных устройств.

Рекомендуется следующая последовательность операций для определения передаточной функции измерительного устройства.

На вход исследуемого измерительного устройства подается сигнал в виде единичной функции, т. е. на входе устройства изменяются скачком напряжение, ток и т. д. Скачок входной величины может быть как положительным, так и отрицательным. Для определенности все последующие рассуждения проводятся применительно к положительному скачку входного сигнала.

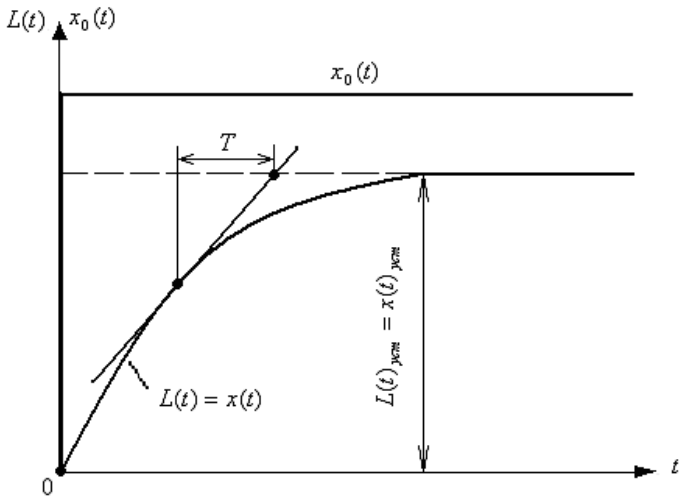


Рис. 6.1. Характерный вид входных и выходных сигналов
при исследовании измерительных устройств первого порядка

В зависимости от свойств исследуемого устройства переходная характеристика может иметь апериодический или колебательный характер, а работа устройства может быть описана дифференциальным уравнением первого, второго, третьего и т. д. порядков. При этом измерительные устройства соответственно называются устройствами первого, второго, третьего и т. д. порядков.

По переходным характеристикам, полученным экспериментально в соответствии с изложенным, отыскивается передаточная функция измерительного устройства. Вид передаточной функции определяется главным образом порядком устройства.

Для измерительных устройств первого порядка передаточная функция имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1}. \tag{6.5}$$

Для измерительных устройств второго порядка передаточная функция имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{T_2^2 p^2+T_1 p+1} \tag{6.6}$$

или

$$W(p)=\frac{K}{(T_3 p+1)(T_4 p+1)}. \tag{6.7}$$

Для измерительных устройств третьего порядка передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \qquad (6.8)$$

или

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2T\lambda p + 1)} . \qquad (6.9)$$

Для измерительных устройств четвертого порядка:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)} . \qquad (6.10)$$

Неизвестные параметры T, T_1, T_2, T_3 и T_4 передаточных функций измерительных устройств первого и второго порядков рекомендуется определять графически [27].

Неизвестные параметры T, T_1, T_2, T_3, T_4, λ передаточных функций измерительных устройств третьего и четвертого порядков рекомендуется определять графоаналитическим методом Цыпкина–Максимова. Измерительные устройства старших порядков – третьего, четвертого и т. д. – встречаются на практике сравнительно редко, и поэтому определение их параметров в данном пособии не рассматривается.

Оценка параметров передаточных функций устройств высоких порядков может быть проведена по работе [27].

В настоящем учебном пособии рассматривается оценка параметров передаточной функции устройства первого порядка (см. соотношение (6.5)).

Неизвестный параметр T (постоянная времени) для измерительных устройств первого порядка определяется по графику переходной характеристики как величина проекции касательной в данной точке на линию установившегося значения $L(t) = L(t)_{уст}$(см. рис. 6.1), причем в идеальном случае T одинакова во всех точках кривой $L(t)$. Поскольку проводить точно касательные к экспериментально полученной кривой $L(t)$ затруднительно, то рекомендуется провести

касательные к трем- етырем точкам кривой, найти для каждой точки T и взять среднее арифметическое значение.

Отметим, что длительность переходного процесса для устройств первого порядка (т. е. время затухания переходной характеристики) с погрешностью около 5 % равна $3T$ и с погрешностью около 1 % равна $5T$.

Неизвестный статический передаточный коэффициент K оценивается по соотношению (6.3), привиденному выше.

6.3. Частотные характеристики

Частотные характеристики измерительных устройств (амплитудные и фазовые) могут быть получены экспериментально или расчетным путем по передаточным функциям. При экспериментальном определении частотных характеристик на вход измерительных устройств подаются переменные (синусоидальные) сигналы, частота которых изменяется от нуля до максимально возможного для данного устройства значения. При этом проводятся замеры амплитудных значений сигналов на входе и выходе устройства и фазовые сдвиги между входными и выходными сигналами.

Под термином *«входной сигнал»* подразумевается сигнал той или иной природы, поступающий на вход устройства (для вольтметра это напряжение, для амперметра – электрический ток и т. д.).

Под термином *«выходной сигнал»* подразумеваются показания устройства, считываемые с его выхода (для стрелочных приборов это отсчет по шкале, для осциллографа – изображение на экране и т. д.).

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики (и вообще динамические характеристики) имеет смысл рассматривать для датчиков (преобразователей неэлектрических величин в электрические), осциллографов и некоторых других приборов, используемых для измерения параметров неустановившихся (переходных) процессов. Для стрелочных приборов, компенсаторов с ручным управлением и подобных им приборов, предназначенных для измерений в установившемся режиме, эти характеристики, как правило, не рассматриваются. В паспортах приборов, предназначенных для измерения параметров ус-

тановившихся процессов в цепях переменного тока, обычно указывается частотный диапазон, в котором они работают без значительных погрешностей.

Следует отметить, что если амплитудно- и фазово-частотные характеристики и передаточная функция позволяют судить о динамических свойствах измерительного устройства и его возможности при измерениях в неустановившихся (переходных) режимах, то частотный диапазон характеризует возможности измерительного устройства при измерениях периодических процессов в установившихся режимах.

Ниже приводятся аналитические выражения, связывающие амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики с параметрами передаточных функций T_1, T_2, T_3, T_4, T.

Для измерительных устройств первого порядка

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}. \tag{6.11}$$

Для апериодических устройств второго порядка

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\omega^2 T_3^2 + 1} \cdot \sqrt{\omega^2 T_4^2 + 1}}. \tag{6.12}$$

Для колебательных устройств второго порядка

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left(1 - \omega^2 T_2^2\right)^2 + \omega^2 T_1^2}}, \tag{6.13}$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\omega T_1}{1 - \omega^2 T_2^2} \tag{6.14}$$

Типичный вид амплитудно- и фазово-частотных характеристик рассмотренных динамических звеньев приведен на рис. 6.2.

Таким образом, динамические свойства измерительных устройств можно охарактеризовать:

1) динамической погрешностью;
2) передаточной функцией измерительного устройства;
3) амплитудно- и фазово-частотными характеристиками.

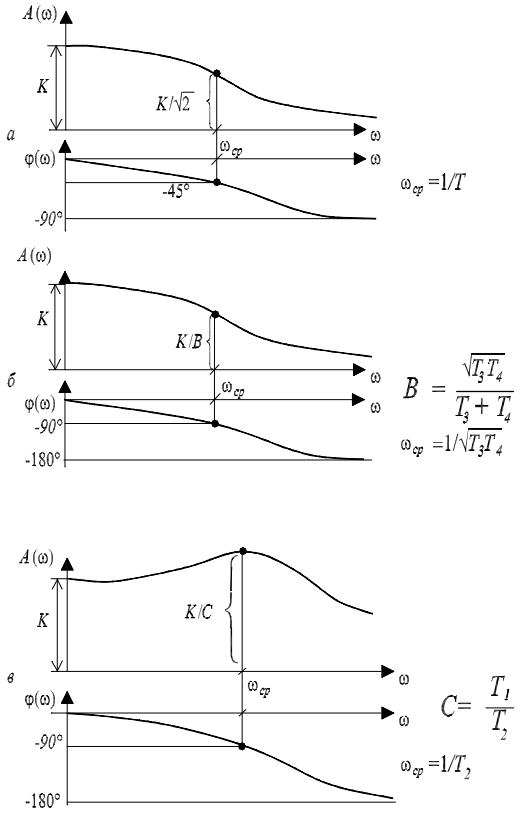


Рис. 6.2. Характерный вид амплитудно-частотных А(ω) и фазово-частотных φ(ω) характеристик типовых динамических звеньев: *а* – апериодическое звено первого порядка; *б* – апериодическое звено второго порядка; *в* – колебательное звено второго порядка

Более подробно с динамическими характеристиками различных устройств можно ознакомиться по работе [27].

Динамические характеристики средств измерений нормирует ГОСТ 8.009–84 [44].

6.4. Пример расчета

Сформулируем постановку задачи. Задана переходная характеристика линейного измерительного устройства (рис. 6.3).

Требуется определить: передаточную функцию устройства; амплитудно- и фазово-частотные характеристики; динамическую погрешность устройства при изменении входного сигнала по закону

$$x_{вх}(t) = 1{,}1 + 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t}.$$

Определение параметров передаточной функции

По виду переходной характеристики (см. рис. 6.3) можно заключить, что исследуемое измерительное устройство является устройством первого порядка и его передаточная функция имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1}.$$

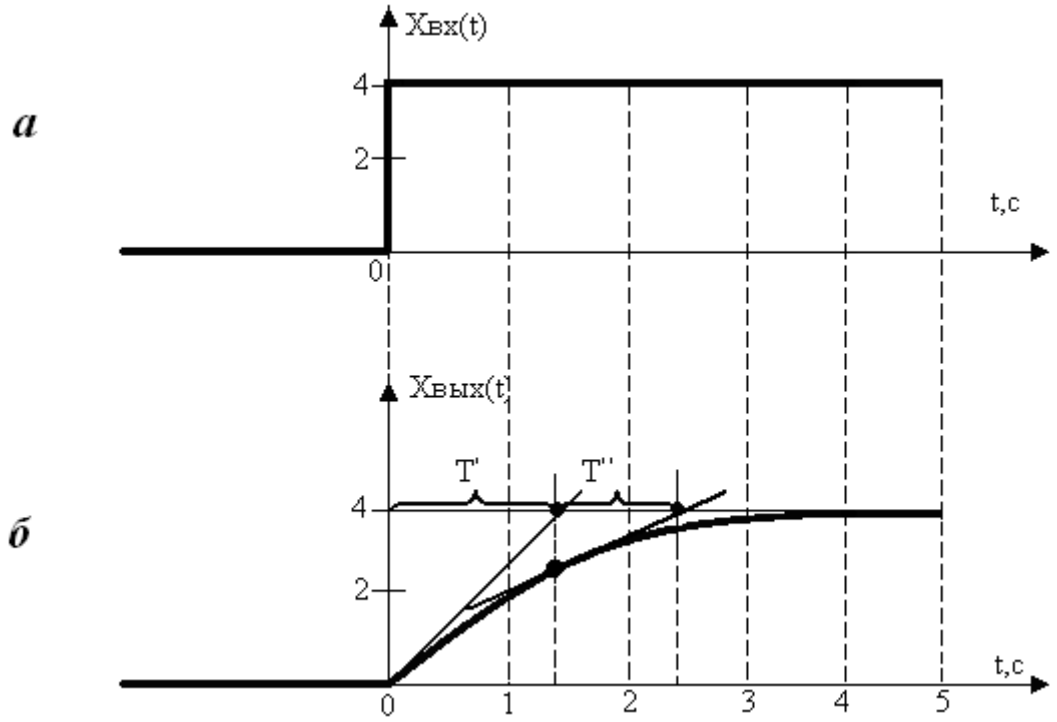


Рис. 6.3. Сигнал на входе и на выходе исследуемого измерительного устройства: *X*вх(t) – входной сигнал; *X*вых(t) – выходной сигнал

На основании методики, изложенной в пособии, неизвестные параметры передаточной функции запишутся в виде

$$K=\frac{\Delta x_{вых}}{\Delta x_{вх}}=\frac{4-0}{4-0}=1; \qquad K=1,$$

$$T=\frac{T'+T''}{2}=\frac{1{,}4+1{,}2}{2}=1{,}3; \qquad T=1{,}3 \text{ с}.$$

Таким образом,

$$W(p)=\frac{1}{1{,}3p+1}.$$

Определение амплитудно- и фазово-частотных характеристик

Искомые характеристики исследуемого измерительного устройства запишутся следующим образом:

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1,3^2\omega^2 + 1}},$$

$\varphi(\omega) = -\text{arctg}\, T = -\text{arctg}\, 1,3\, \omega$.

Численные значения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ при изменении угловой частоты от $\omega = 0$ до $\omega = 6$ приведены ниже, а графики зависимостей $A = f(\omega)$ и $\varphi = f(\omega)$ представлены в табл. 6.1 и на рис. 6.4.

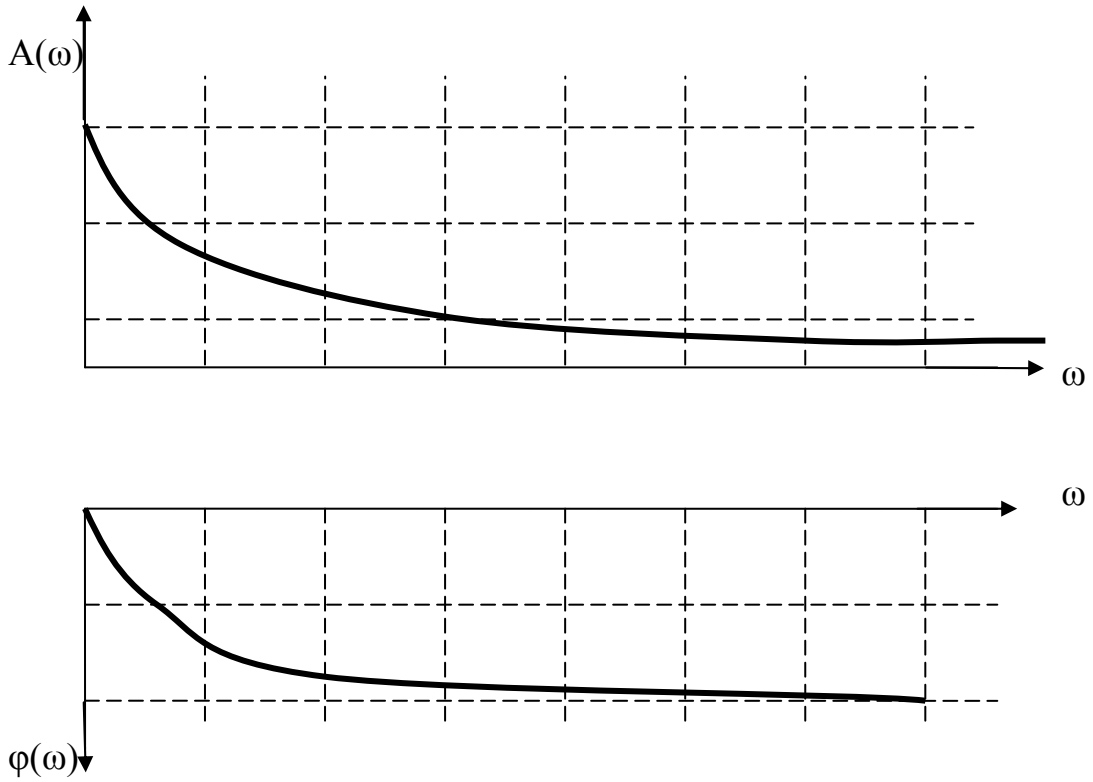


Рис 6.4. Амплитудно- и фазово-частотные характеристики

Таблица 6.1

Зависимость амплитуды и фазы от угловой частоты

Ω	0,00	0,30	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
A(ω)	1,00	0,93	0,84	0,61	0,36	0,25	0,19	0,15	0,13
φ(ω)	0,00	25°40’	38°40’	58°00’	72°40’	78°20’	81°10’	83°50’	84°05’

Определение погрешности

Динамическая погрешность для входного сигнала $x_{вх}(t) = 1{,}1 + 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t}$ запишется в виде

$$d(t) = \frac{x_{вых}(t)}{K} - x_{вх}(t) = \frac{x_{вых}(t)}{1} - 1{,}1 - 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t}.$$

Воспользуемся рекомендациями, изложенными в пособии, и на их основании определим закон изменения выходного сигнала. Для этого найдем изображение по Лапласу входного сигнала, затем изображение по Лапласу выходного сигнала $x_{\text{вых}}(t)$.

Изображение входного сигнала:

$$x_{вх}(t) = 1{,}1 + 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t} = \frac{1{,}1}{p} + \frac{2{,}0}{p - 0{,}5};$$

$$x_{вх}(p) = \frac{1{,}1}{p} + \frac{2{,}0}{p - 0{,}5}.$$

Изображение выходного сигнала

$$x_{вых}(p) = W(p) \cdot x_{вх}(p),$$

где $x_{вых}(p)$ – изображение по Лапласу выходного сигнала;

$W(p)$ – передаточная функция измерительного устройства, используемого для измерения входного сигнала.

Отметим, что передаточная функция уже найдена выше и определяется соотношением

$$W(p) = \frac{1}{1{,}3 + 1}.$$

Изображение выходного сигнала с учетом $W(p)$ и $x_{вх}(p)$ имеет вид

$$x_{вых}(p) = \frac{1{,}1}{p(1{,}3p + 1)} + \frac{2{,}0}{(p - 0{,}5)(1{,}3p + 1)}.$$

После деления числителя и знаменателя на 1,3 и приведения значения $x_{вых}(p)$ к табличному виду получим

$$x_{вых}(p) = 1{,}1 \cdot \frac{0{,}8}{p(p+0{,}8)} + 1{,}5 \cdot \frac{1}{(p+0{,}8)(p-0{,}5)}.$$

По таблицам преобразования Лапласа (см. табл. П.1.7) оригинал выходного сигнала по его изображению запишется в виде

$$x_{вых}(t) = 1{,}1 - 2{,}3 \cdot e^{-0{,}8t} + 1{,}2e^{0{,}5t}.$$

Динамическая погрешность рассматриваемого средства измерения с учетом найденного выходного сигнала запишется в виде

$$d(t) = -2{,}3 \cdot e^{-0{,}8t} - 0{,}8e^{0{,}5t}.$$

График, иллюстрирующий изменение динамической погрешности во времени, представлен на рис. 6.5.

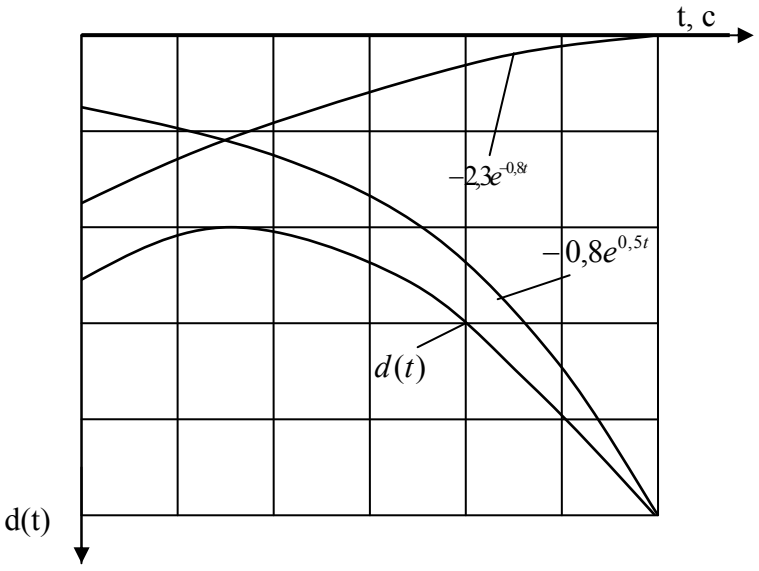


Рис. 6.5. Динамическая погрешность $d(t)$ апериодического средства измерения первого порядка при экспоненциальном изменении входного сигнала

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно заключить, что исследованное измерительное устройство пригодно для измерений постоянных во времени или медленно изменяющихся сигналов. При измерении переменных во времени сигналов, изменяющихся с частотами более 0,1 Гц, появляются значительные динамические погрешности, а при измерении экспоненциально возрастающих сигналов появляются увеличивающиеся с течением времени динамические погрешности, как показано на рис. 6.5.

7. ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Погрешности прямых многократных измерений

7.1.1. Порядок оценки

Порядок оценки погрешностей прямых многократных измерений регламентирует стандарт ГОСТ 8.207–76 [46].

Стандарт [46] регламентирует оценку погрешностей прямых измерений с многократными независимыми наблюдениями, подчиняющимися нормальному закону распределения, и устанавливает основные положения методов обработки результатов наблюдений. Отметим, что в стандарте [46] принята терминология, отличная от терминологии, используемой в настоящее время. Так, например, использованы термины «наблюдение» (под наблюдением подразумевается однократное измерение) и «результат измерения», за которое принимается среднее арифметическое значение рассматриваемых многократных измерений.

При обработке результатов наблюдений необходимо выполнить нижеследующие операции.

1. Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений.

2. Вычислить среднее арифметическое значение результатов наблюдений , принимаемое за результат измерения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ ,$$

где x_i – i-й результат наблюдения;

n – число результатов наблюдений.

3. Вычислить среднее квадратическое отклонение σ результата наблюдений:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \ .$$

4. Выявить и отбросить результаты наблюдений, содержащие промахи (если они есть).

5. Вычислить среднее квадратическое отклонение результата измерения:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

6. Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону распределения. Проверка гипотезы может быть проведена по критерию, приведенному в ГОСТ 8.207–76 [46], или по критерию, приведенному в прил. 2 к данному учебному пособию. При $n < 10$ проверка гипотезы не проводится. При этом применение ГОСТа 8.207–76 возможно, если заранее известно, что результаты наблюдений подчиняются нормальному закону распределения.

7. Вычислить случайную составляющую погрешности результата измерения ε (без учета знака) по формуле

$$\varepsilon = t \cdot \sigma\left(\bar{x}\right),$$

где t – коэффициент Стьюдента.

Значения коэффициента Стьюдента в зависимости от принятой доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n приведены в приложении к учебному пособию (см. табл. П.1. 2).

Доверительную вероятность $P = 0{,}95$ принимают при проведении технических измерений, $P = 0{,}99$ – при проведении метрологических измерений и измерений, результаты которых имеют значение для здоровья людей.

8. Вычислить неисключенную систематическую погрешность Θ (систематическую составляющую погрешности) результата измерения. В качестве Θ принимают пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, а также методические погрешности и погрешности, вызванные другими источниками.

При 5–10 суммированиях отдельных неисключенных систематических погрешностей каждое слагаемое рассматривается как случайная величина. При

отсутствии данных о виде распределения этих величин (что обычно имеет место на практике) их распределения принимают за равномерное. При равномерном распределении неисключенных систематических погрешностей их значение (без учета знака) можно вычислить по формуле

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_j^2} ,$$

где Θ_j – j-я неисключенная систематическая погрешность (НСП);

m – число суммируемых НСП;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом слагаемых m.

При доверительной вероятности $P = 0{,}95$ коэффициент k принимают равным 1,1 (независимо от числа слагаемых для $m \geq 2$). При $m = 1$ $k = 1$.

При доверительной вероятности $P = 0{,}99$ коэффициент k зависит от числа суммируемых НСП. При $m \leq 4$ коэффициент k определяется по графику зависимости

$$k = f(m, l),$$

где $l = \Theta_1/\Theta_2$;

Θ_1 – составляющая погрешности, наиболее отличная от других;

Θ_2 – составляющая погрешности, наиболее близкая к Θ_1.

График зависимости (7.6) приведен на рис. 7.1

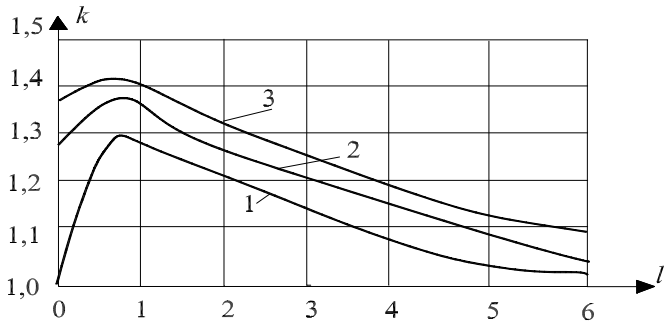


Рис. 7.1. График зависимости $k = f(L, m)$: 1 – $m = 2$; 2 – $m = 3$; 3 – $m = 4$

Для приближенных оценок погрешностей могут быть приняты следующие значения коэффициента k: при $m = 2$ $k = 1{,}2$; при $m = 3$ $k = 1{,}3$; при $m = 4$ $k = 1{,}4$; при $m \geq 5$ $k = 1{,}45$. Отметим, что при $m = 1$ $k = 1$.

9. Вычислить погрешность результата измерения Δ. Значение Δ вычисляется в том случае, если выполняется условие

$$0{,}8 \le \Theta/\sigma(\bar{x}) \le 8{,}0. \qquad (7.7)$$

Если условие (7.7) не выполняется, то при $\Theta/\sigma(\bar{x}) < 0{,}8$ принимается $\Delta = \varepsilon$, а при $\Theta/\sigma(\bar{x}) > 8{,}0$ принимается $\Delta = \Theta$.

Погрешность, возникающая из-за пренебрежения одной из составляющих погрешности результата измерения (при выполнении указанных неравенств), не превышает 15 %.

Если условие (7.7) выполняется, то погрешность результата измерения вычисляется по формуле

$$\Delta = K_\Sigma \sigma_\Sigma,$$

где K_Σ – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешности;

σ_Σ – суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения.

Коэффициент K_Σ вычисляют по эмпирической формуле

$$K_\Sigma = \frac{\varepsilon + \Theta}{\sigma(\bar{x}) + \sigma(\Theta)},$$

где $\sigma(\Theta) = \Theta / k\sqrt{3}$.

Суммарное среднее квадратическое отклонение вычисляют по формуле

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma^2(\bar{x}) + \sigma^2(\Theta)}.$$

Результаты прямых многократных измерений представляют в форме

$$(\bar{x} \pm \Delta); P,$$

где $\bar{x}$ – результат измерения;

$\pm\Delta$ – погрешность результата измерения;

P – принятая доверительная вероятность.

Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ.

При отсутствии данных о виде функций распределений составляющих погрешности результата и необходимости дальнейшей обработки результатов или анализа погрешностей, результаты измерений представляют в форме

$$\bar{x},\ \sigma(\bar{x}),\ n,\ \Theta,\ P,$$

где величины $\sigma(\bar{x})$, n, Θ, P – определены выше.

7.1.2. Пример расчета

Условие задачи

С помощью универсального цифрового вольтметра с известными метрологическими характеристиками проведены многократные измерения напряжения лабораторной сети. Результаты измерений:

$$U_1=218{,}62\ \text{В};\ U_2=219{,}83\ \text{В};\ U_3=218{,}97\ \text{В};\ U_4=220{,}05\ \text{В};$$

$$U_5=218{,}37\ \text{В};\ U_6=219{,}74\ \text{В}.$$

Предел измерения вольтметра $U_K=1000$ В. Класс точности вольтметра 0,5/0,1. Нормальные условия эксплуатации вольтметра: $\tau_0=(20\pm 2)\ ^0\text{C}$; $H_0=0$ А/м, где τ – температура и H_0 – напряжение внешнего магнитного поля в нормальных условиях эксплуатации.

Измерения проведены при температуре $\tau=+24\ ^0C$ и напряженности внешнего магнитного поля $H=20$ А/м.

Найти абсолютную погрешность результата измерения, округлить и записать результат измерения, если наблюдения подчиняются нормальному закону распределения и принята доверительная вероятность $P = 0{,}95$.

В соответствии с технической документацией дополнительные абсолютные систематические погрешности используемого вольтметра определяются соотношениями $\theta_\tau=\dfrac{\tau-\tau_0}{10}\cdot\theta_{\text{ОС}}$; $\theta_{\text{Н}}=\dfrac{H-H_0}{50}\cdot\theta_{\text{ОС}}$,

где θ_τ – дополнительная абсолютная температурная погрешность;

$\theta_{\text{Н}}$ – дополнительная абсолютная погрешность от воздействия магнитного поля;

$\theta_{\text{ОС}}$ – основная абсолютная погрешность вольтметра, определяемая его классом точности.

Решение задачи

1. Среднее арифметическое значение $\overline{U}$, принимаемое за результат измерения, запишется в виде

$$\overline{U} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} U_i = 219{,}2633\ A$$

2. Среднее квадратическое отклонение σ имеет значение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}\left(U_i - \overline{U}\right)}{6-1}} = 0{,}7022 \text{ В}.$$

3. Выявление промахов проводится по методике, изложенной в п. 4.2. Пример выявления промахов уже приведен (см. п. 4.7) и в данном разделе учебного пособия не рассматривается. Отметим только, что в приведенном ряду измерений промахи отсутствуют.

4. Основная относительная систематическая погрешность результата измерения $\delta_{ос}$, обусловленная классом точности использованного вольтметра:

$$\delta_{ос} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{U_k}{U} - 1\right)\right]\%$$

где $U_k = 1000$ В (верхний предел диапазона измерения);

$\overline{U} = 219{,}2633$ В (результат измерения);

$$\delta_{ос} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{1000}{219{,}2633} - 1\right)\right] = 0{,}8561\% .$$

5. Основная абсолютная систематическая погрешность результата измерения $\Theta_{ос}$, обусловленная классом точности используемого вольтметра:

$$\Theta_{ос} = \frac{U}{100}\cdot\delta_{ос} = \frac{219{,}2633}{100}\cdot 0{,}8561 = 1{,}8771 \text{ В}$$

6. Дополнительная абсолютная систематическая погрешность результата измерения Θ_{τ}, обусловленная воздействием температуры окружающей среды:

$$\Theta_{\tau} = \frac{\tau - \tau_0}{10}\cdot\Theta_{ос} = \frac{24-22}{10}\cdot 1{,}8771 = 0{,}3754 \text{ В}$$

7. Дополнительная абсолютная систематическая погрешность результата измерения, обусловленная воздействием на вольтметр переменного магнитного поля:

$$\Theta_{\text{Н}} = \frac{H}{50} \cdot \Theta_{\text{ос}} = \frac{20}{50} \cdot 1,8771 = 0,7508 \text{ В}.$$

8. Суммарная абсолютная неисключенная систематическая погрешность результата измерения Θ, обусловленная используемым вольтметром:

$$\Theta = k\sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_j^2},$$

где $k = 1,1$ для доверительной вероятности $P = 0,95$;

Θ_j – j-я составляющая абсолютной неисключенной систематической погрешности;

$$\Theta = k\sqrt{\Theta_{ос}^2 + \Theta_{\tau}^2 + \Theta_H^2} = 1,1\sqrt{1,8771^2 + 0,3754^2 + 0,7508^2} = 2,261 \text{ В}$$

9. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения

$$\sigma_{\bar{U}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,7022}{\sqrt{6}} = 0,2867 \text{ В}$$

10. Случайная абсолютная погрешность результата измерения

$$\varepsilon = t \cdot \sigma_{\bar{U}},$$

где t – коэффициент Стьюдента ($t = 2,57$ при $n = 6$ и $P = 0,95$).

$$\varepsilon = 2,57 \cdot 0,2867 = 0,7368 \text{ В}.$$

11. Суммарная абсолютная погрешность результата измерения

$$\Delta = k_{\Sigma} \cdot \sigma_{\Sigma}.$$

Приведенная формула для оценки суммарной погрешности Δ правомерна, если выполняется условие

$$0,8 \le \frac{\theta}{\sigma_{\text{U}}} \le 8.$$

В нашем случае $\frac{\theta}{\sigma_U} = 7,89$, т. е. приведенная формула правомерна и ее можно использовать для расчетов.

$$k_\Sigma = \frac{\Theta + \varepsilon}{\sigma_\Theta + \sigma_{\bar{U}}} = \frac{2,2619 + 0,7368}{1,1872 + 0,2867} = 2,0345,$$

где $\sigma_\Theta = \frac{\Theta}{k \cdot \sqrt{3}} = \frac{2,2619}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 1,1872$ В

$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_\Theta^2 + \sigma_{\bar{U}}^2} = 1,2213$ В,

$\Delta = \pm 2,4847$ В.

После округления получаем $\Delta = \pm 2,5$ В.

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде $U' = (219,3 \pm 2,5)$В с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

7.2. Погрешности прямых однократных измерений

7.2.1. Порядок оценки

Порядок оценки погрешностей результатов прямых однократных измерений до 2005 г. регламентировали методические указания МИ 1552–86. С 01.01.2005 г. действуют рекомендации Р 50.2.038–2004 [54], которые устанавливают методы оценки погрешностей при условии, что составляющие погрешности результата измерения известны, случайные составляющие погрешности подчиняются нормальному закону распределения, а неисключенные систематические погрешности распределены равномерно.

Неисключенными систематическими составляющими погрешности результата однократного измерения Θ являются погрешности средств измерений, метода, вызванные другими источниками.

Неисключенные систематические погрешности (НСП) вычисляются по формуле (7.5). Порядок оценки НСП для однократных прямых измерений полностью совпадает с порядком оценки НСП для многократных прямых измерений.

При однократных измерениях невозможно оценить случайную составляющую погрешности результата измерения непосредственно по экспериментальным данным, поэтому требуются априорные предварительные сведения по случайным погрешностям. В противном случае может быть оценена только НСП по формуле (7.5).

Дополнительные предварительные сведения по случайным погрешностям результатов измерений могут представляться в виде средних квадратических отклонений σ_j отдельных составляющих (инструментальных, метода, оператора и т. д.) или в виде случайных погрешностей ε_j отдельных составляющих, соответствующих одной и той же доверительной вероятности P.

Если известны σ_j, то среднее квадратическое отклонение (СКО) результата однократного измерения σ вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \sigma_j^2} \quad .$$

Если известны ε_j, то случайная погрешность результата однократного измерения ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j^2(P)} \quad .$$

При известном значении σ, полученном по формуле (7.11), случайная погрешность результата однократного измерения ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \text{≢}\sigma \quad ,$$

где – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности P и закона распределения.

При нормальном законе распределения результатов измерений коэффициент ≢ = 2 для $P = 0{,}95$ и ≢ = 2,6 для $P = 0{,}99$ [54].

Суммарная погрешность результата измерения Δ определяется в зависимости от наличия (или отсутствия) априорных сведений о случайных погрешностях и от соотношения систематических и случайных составляющих погрешностей.

Если сведения о случайных погрешностях отсутствуют, то суммарная погрешность результата измерения Δ приравнивается к неисключенной систематической погрешности Θ, найденной с доверительной вероятностью *P*.

При наличии сведений о случайных погрешностях суммарная погрешность результата однократного измерения определяется с учетом следующих положений:

1) если $\frac{\Theta}{\sigma} < 0,8$, то неисключенной систематической погрешностью пренебрегают и принимают Δ = ε, где ε – случайная погрешность с доверительной вероятностью *P*;

2) если $\frac{\Theta}{\sigma} > 0,8$, то случайной погрешностью пренебрегают и принимают Δ = Θ;

3) если $0,8 \le \frac{\Theta}{\sigma} \le 8$, то погрешность результата измерения вычисляют по формуле

$$\Delta = \pm K[\,|\Theta| + |\varepsilon|\,],$$

где К – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности *P*.

Для доверительной вероятности *P* = 0,95 коэффициент *K* = 0,76; для доверительной вероятности *P* = 0,99 коэффициент *K* = 0,83.

Погрешности, возникающие из-за пренебрежения одной из составляющих погрешности результата измерения при выполнении указанных неравенств, не превышают 15 %.

При симметричной доверительной погрешности результат однократного измерения представляется в форме *A*; ±Δ; *P* или *A*±Δ; *P*.

Числовые значения результата измерения должны оканчиваться цифрами того же разряда, что и значение погрешности Δ.

7.2.2. Примеры расчета

В качестве примеров рассмотрены три задачи (задача 7.1, задача 7.2 и задача 7.3), отличающиеся друг от друга исходными данными.

Задача 7.1

Условие задачи

С помощью универсального цифрового вольтметра измерено напряжение сети. Результат измерения U = 218,62 В получен на пределе измерения $U_к$ = 1000 В. Класс точности вольтметра 0,5/0,1; нормальные условия эксплуатации: $\tau_0 = (20 \pm 2)\ ^\circ C$; H_0 =0 А/м .

Измерения проведены при τ = +24 ºС и $H = 20$ А/м, где τ – температура окружающей среды; H – напряженность внешнего магнитного поля.

Найти абсолютную погрешность результата измерения и записать результат с учетом найденной погрешности.

Решение задачи

Дополнительные погрешности использованного вольтметра определяются соотношениями

$$\Theta_\tau = \frac{\tau - \tau_0}{10} \cdot \Theta_{ос},$$

$$\Theta_H = \frac{H}{50} \cdot \Theta_{ос},$$

где Θ_τ – абсолютная дополнительная систематическая погрешность, возникающая при температуре окружающей среды, равной τ;

$\Theta_{ос}$ – абсолютная основная систематическая погрешность вольтметра, определяемая его классом точности;

Θ_H – абсолютная дополнительная систематическая погрешность, возникающая от воздействия на вольтметр магнитного поля H.

1. Относительная основная систематическая погрешность вольтметра, обусловленная его классом точности:

$$\delta_{oc} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right] \ \%,$$

$$\delta_{oc} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{1000}{218{,}62} - 1 \right) \right] \ \% \ = 0{,}8574 \ \%.$$

2. Абсолютная основная систематическая погрешность вольтметра, обусловленная его классом точности:

$$\Theta_{oc} = \frac{U}{100 \ \%} \cdot \delta_{oc} \ \%,$$

$$\Theta_{\text{ос}} = \frac{218{,}62}{100\%} \cdot 0{,}8574\% = 1{,}8743 \ \text{В}$$

3. Абсолютная дополнительная погрешность, обусловленная воздействием температуры:

$$\Theta_{\tau} = \frac{24 - 22}{10} \cdot 1{,}8743 = 0{,}3749 \ \text{В}$$

4. Абсолютная дополнительная погрешность, обусловленная воздействием магнитного поля:

$$\Theta_{\text{Н}} = \frac{20}{50} \cdot 1{,}8743 = 0{,}7497 \ \text{В}$$

5. Суммарная абсолютная систематическая погрешность вольтметра Θ определяется соотношением

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_j^2} \ ,$$

где $k = 1{,}1$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$;

Θ_j – j-я составляющая погрешности.

$$\Theta = 1{,}1 \cdot \sqrt{\Theta_{oc}^2 + \Theta_{\tau}^2 + \Theta_{H}^2} \ ,$$

$$\sqrt{\ \Theta = 1{,}1 \ \ 1{,}8743^2 + 0{,}3749^2} + 0{,}7497^2 \ = 2{,}1026 \ \ \text{В}.$$

6. При однократных измерениях и отсутствии сведений о случайных погрешностях за погрешность результата измерения Δ принимают суммарную

систематическую погрешность использованного средства измерения Θ. После округления получаем

$$\Delta = \Theta = \pm 2{,}1 \ B.$$

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде

$$U' = (218{,}6 \pm 2{,}1) \ B, \ P = 0{,}95.$$

Задача 7.2

Исходное условие задачи 7.2 полностью совпадает с условием задачи 7.1. Дополнительно вводятся сведения о случайной погрешности. Предполагается, что с доверительной вероятностью $P = 0{,}95$ случайная погрешность $\varepsilon = 3{,}4248$ В.

Решение задачи

Абсолютная суммарная погрешность результата измерения Δ в этом случае оценивается соотношением

$$\Delta = \pm K\left(|\Theta| + |\varepsilon|\right),$$

где $K \approx 0{,}76$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$;

Θ – суммарная систематическая погрешность (см. задачу 7.1).

ε – случайная погрешность

$$\Delta = \pm 0{,}76(2{,}1026 + 3{,}4248) = \pm 4{,}2008 \ \text{В}.$$

После округления получаем $\Delta = \pm 4$ В.

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде $U' = (219 \pm 4)\,\text{В}, \ P = 0{,}95$.

Задача 7.3

Исходное условие задачи 7.3 в основном совпадает с условием задачи 7.1. Дополнительно вводятся сведения о среднем квадратическом отклонении (СКО) средства измерения $\sigma_1 = 0{,}3782$ В и СКО оператора $\sigma_2 = 0{,}4202$ В.

Значения σ_1 и σ_2 найдены для $n_1 = 10$ и $n_2 = 20$, где n_1 и n_2 – числа измерений при экспериментальной оценке рассматриваемых величин (n_1 при оценке σ_1 и n_2 при оценке σ_2).

Решение задачи

Абсолютная неисключенная систематическая погрешность Θ, найденная в задаче 7.1, остается в силе и для данной задачи ($\Theta = 2{,}1026$ В).

При отсутствии корреляционной связи между величинами σ_1 и σ_2, суммарное среднее квадратическое отклонение σ:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0{,}3782^2 + 0{,}4202^2} = 0{,}5653 \text{ В}$$

$\sigma = 0{,}5653$ В.

Абсолютная случайная погрешность результата измерений ε запишется в виде

$$\varepsilon = \overline{z} \cdot \sigma \ ,$$

где $\overline{z}$ – коэффициент ($\overline{z}$=2,0 для $P = 0{,}95$).

$$\varepsilon = 2{,}0 \cdot 0{,}5653 = 1{,}130 \text{ В},$$

$$\varepsilon = 1{,}130 \text{ В}.$$

Абсолютная суммарная погрешность результата измерений Δ:

$$\Delta = \pm K(|\Theta| + |\varepsilon|) \ ,$$

где $K = 0{,}76$ для $P = 0{,}95$;

Θ – неисключенная систематическая погрешность;

ε – случайная погрешность.

Выражение для оценки «Δ» правомерно, если справедливо соотношение

$$0{,}8 \le \frac{\Theta}{\sigma} \le 8 \ .$$

Отношение $\frac{\Theta}{\sigma}$ имеет значение

$$\frac{\Theta}{\sigma} = \frac{2{,}1026}{0{,}5653} = 3{,}7194$$

т. е. приведенное выражение для оценки «Δ» правомерно.

$$\Delta = \pm 0{,}76(2{,}1026 + 1{,}130) = \pm 2{,}4572 \text{ В},$$

$$\Delta = \pm 2{,}4572 \text{ В}.$$

После округления $\Delta = \pm 2{,}5$ В.

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде

$$U' = (218{,}6 \pm 2{,}5) \text{ В},$$

$$\text{P} = 0{,}95.$$

7.3. Погрешности косвенных измерений

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находится по известной зависимости между этой величиной и величинами , подвергаемыми прямым измерениям. Напомним, что *прямое измерение* – это измерение, при котором искомая величина определяется непосредственно из эксперимента по показаниям средства измерений.

7.3.1. Порядок оценки погрешностей классическим методом

Ниже излагается порядок оценки погрешностей косвенных измерений классическим методом для одного и для нескольких аргументов, по которым определяется результат косвенного измерения.

Рассмотрим зависимость

$$y = f(x),$$

где y – результат косвенного измерения (функция);

x – результат прямого измерения (аргумент).

Предполагается, что погрешность измерения аргумента x известна и составляет величину $\pm\Delta_x$.

Погрешность измерения функции y обозначим через $\pm\Delta_y$ и найдем ее значение по известным значениям величин y, x и $\pm\Delta_x$.

С учетом погрешностей $\pm\Delta_x$ и $\pm\Delta_y$ выражение (7.15) принимает вид

$$y \pm \Delta y = f(x \pm \Delta_x).$$

Разложим правую часть равенства (7.16) в ряд Тейлора и, пренебрегая членами разложения, содержащими Δ_x в степени выше первой, получим

$$y \pm \Delta_y = f(x) + \Delta_x \frac{df(x)}{dx}.$$

Учитывая соотношение (7.15), получим для величин Δ_y выражение

$$\Delta_y = \pm\Delta_x \frac{df(x)}{dx},$$

где Δ_y – абсолютная погрешность результата косвенного измерения величины y;
Δ_x – абсолютная погрешность результата прямого измерения величины x.

Отметим, что выражение (7.18) является линейным приближением и в силу этого дает оценочные, приближенные значения погрешностей косвенных измерений. Допустимость использования соотношения (7.18) нормируется методическими указаниями МИ 2083–90 [48].

Относительная погрешность косвенного измерения δ_y определяется выражением

$$\delta_y = \pm\frac{\Delta_y}{y} = \pm\frac{\Delta_x}{y} \cdot \frac{df(x)}{dx},$$

или

$$\delta_y = \pm\frac{\Delta_y}{y} \cdot 100\% = \pm\frac{\Delta_x}{y} \cdot \frac{df(x)}{dx} \cdot 100\%,$$

т. е. относительная погрешность может выражаться относительными величинами (см. (7.19)) или величинами в процентах (см. (7.20)).

Рассмотрим результат косвенных измерений для случая с несколькими аргументами, т. е.

$$y = f(x, z, ..., t),$$

где x, z, ..., t – результаты прямых измерений (аргументы);
y – результат косвенного измерения (функция).

Значение суммарной абсолютной погрешности косвенного измерения Δ_y в этом случае находится по формуле

$$\Delta_y = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 \Delta_t^2}\ .$$

Значение суммарной относительной погрешности косвенного измерения δ_y для рассматриваемого случая находится по формуле

$$\delta_y = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{\Delta_x}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \left(\frac{\Delta_z}{y}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 \left(\frac{\Delta_t}{y}\right)^2}\ .$$

В (7.22) и (7.23) значения Δ_x, Δ_z, … , Δ_t – суммарные абсолютные погрешности результатов прямых измерений величин x, z, ... ,t. Соотношения (7.22) и (7.23) правомерны при условии, что рассматриваемые погрешности независимы (отсутствует связь между ними) и являются случайными величинами.

Соотношение (7.22) рекомендуется использовать для оценки погрешностей результатов косвенных измерений при определении искомой величины путем алгебраического суммирования аргументов (например, для функций вида $y = x+z+t$).

Ниже приведен пример оценки искомой величины и погрешности ее косвенного измерения по соотношению (7.22).

Соотношение (7.23) рекомендуется использовать для оценки погрешностей результатов косвенных измерений при определении искомой величины путем умножения, деления или возведения в степень аргументов, подвергаемых прямым измерениям (например, для функций вида $y = \frac{x \cdot z^2}{t}$).

Ниже приведен пример оценки искомой величины и погрешности ее косвенного измерения по соотношению (7.23).

Формулы для вычисления суммарных абсолютных и относительных погрешностей результатов косвенных измерений приведены в табл. 7.1.

В таблице приняты те же обозначения, что уже использовались выше, т. е. Δ_x, Δ_z – абсолютные суммарные погрешности результатов прямых измерений величин x и z; δ_x, δ_z – относительные суммарные погрешности результатов

прямых измерений величин x и z; Δ_y и δ_y – абсолютные и относительные суммарные погрешности результата косвенного измерения величины y.

Таблица 7.1

Погрешности косвенных измерений

Функция (y)	**Погрешности**	
	абсолютная (Δ_y)	**относительная (δ_y)**
$x + z$	$\pm\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}$	$\pm\dfrac{\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}}{x+z}$
$x - z$	$\pm\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}$	$\pm\dfrac{\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}}{x-z}$
$x \cdot z$	$\pm\left[x^2\Delta_z^2 + z^2\Delta_x^2\right]^{1/2}$	$\pm\left[\delta_x^2 + \delta_z^2\right]^{1/2}$
x/z	$\pm\dfrac{\left[x^2\Delta_z^2 + z^2\Delta_x^2\right]^{1/2}}{z^2}$	$\pm\left[\delta_x^2 + \delta_z^2\right]^{1/2}$
x^n	$\pm n x^{n-1}\Delta_x$	$\pm n\delta_x$
$\sqrt[n]{x}$	$\pm\dfrac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}\Delta_x$	$\pm\dfrac{1}{n}\delta_x$
$\sin x$	$\pm\Delta_x\cos x$	$\pm\Delta_x\,\mathrm{ctg}x$
$\mathrm{tg}x$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(\cos x)^2}$	$\pm\dfrac{2\cdot\Delta_x}{(\sin 2x)^2}$
$\cos x$	$\pm\Delta_x\sin x$	$\pm\Delta_x\,\mathrm{tg}x$
$\mathrm{ctg}x$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(\sin x)^2}$	$\pm\dfrac{2\cdot\Delta_x}{\sin 2x}$
$\mathrm{arctg}\,x$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(1+x^2)}$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(1+x^2)\mathrm{arctgx}}$

Изложенный порядок оценки значений погрешностей результатов косвенных измерений может быть использован при известных значениях суммарных погрешностей результатов прямых измерений, по которым вычисляются результаты косвенных измерений. В случае же, когда известны составляющие (систематические и случайные) погрешностей результатов прямых измерений,

необходимо воспользоваться рекомендациями, изложенными ниже в п. 7.3.2 учебного пособия.

7.3.2. Порядок оценки погрешностей по МИ 2083–90

Сформулируем основные положения, используемые при оценке погрешностей косвенных измерений по МИ 2083–90 [48].

Искомое значение величины A находится на основании результатов прямых измерений аргументов b, c, ..., s, связанных с искомой величиной уравнением

$$A = F(b, c, ..., s). \qquad (7.24)$$

Для оценивания косвенно измеряемой величины и погрешностей результата измерения принято одно из допущений:

1) зависимость (7.24) линейная и отсутствует корреляция между погрешностями измерений аргументов;

2) зависимость (7.24) нелинейная, отсутствует корреляция между погрешностями измерений аргументов и допустим метод линеаризации рассматриваемой зависимости.

Случай для коррелированных погрешностей измерений аргументов и при недопустимости использования метода линеаризации зависимости (7.24) в данном учебном пособии не рассматривается. При необходимости этот материал может быть изучен самостоятельно (см. [21, 48]).

Предположим, что проведено n прямых измерений аргументов b, c, ..., s. Первому измерению соответствует значение, равное A_1, второму измерению – A_2 и т. д. Среднее арифметическое значение $\overline{A}$ и среднее квадратическое отклонение σ результатов косвенных измерений вычисляются по формулам

$$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_i ,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(A_i - \overline{A}\right)^2}{n-1}} ,$$

где n – число измерений;

A_i – i-е значение результата косвенного измерения.

Дальнейшая обработка данных проводится в нижеследующей последовательности.

1. По значениям $\bar{x}$ и σ выявляются и отбрасываются промахи. При этом предполагается, что результаты косвенных измерений A_i подчиняются нормальному закону распределения, т. е. для выявления промахов могут быть использованы как метод 3σ, так и табличный метод (оба метода описаны в п. 4.2 учебного пособия).

2. Вычисляется СКО среднего арифметического значения по формуле

$$\sigma_{\bar{A}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

3. Оценивается абсолютная случайная составляющая погрешности результата косвенного измерения искомой величины по формуле

$$\varepsilon = t \cdot \sigma_{\bar{A}},$$

где ε – случайная составляющая погрешности;

t – коэффициент Стьюдента.

4. Оценивается абсолютная неисключенная систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения искомой величины по формуле

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\Theta_b^2\left[\frac{\partial F}{\partial b}\right]^2 + \Theta_c^2\left[\frac{\partial F}{\partial c}\right]^2 + \ldots + \Theta_s^2\left[\frac{\partial F}{\partial s}\right]^2},$$

где Θ – абсолютная неисключенная систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения;

k – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и числа слагаемых (подробно см. в п. 7.1 учебного пособия);

Θ_b, Θ_c, ..., Θ_s – абсолютные неисключенные систематические составляющие погрешностей результатов прямых измерений аргументов *b*, *c*, ..., *s*;

$\frac{\partial F}{\partial b}, \frac{\partial F}{\partial c}, \frac{\partial F}{\partial s}$ – частные производные от функции (7.24) по *b*, *c*, ..., *s*.

Отметим, что при задании зависимости (7.24) в виде алгебраической суммы аргументов *b*, *c*, ..., *s* удобнее оценивать абсолютную составляющую погрешности Θ по формуле (7.29).

Если же зависимость (7.24) представляет собой произведение и (или) отношение аргументов *b*, *c*,..., *s*, то удобнее оценивать относительную неисключенную систематическую составляющую результата косвенного измерения величины *A* по формуле

$$\upsilon = k \cdot \sqrt{\left[\frac{\theta_b}{A}\right]^2 \left[\frac{\partial F}{\partial b}\right]^2 + \left[\frac{\theta_c}{A}\right]^2 \left[\frac{\partial F}{\partial c}\right]^2 + \ldots + \left[\frac{\theta_s}{A}\right]^2 \left[\frac{\partial F}{\partial s}\right]^2},$$

где υ – относительная неисключенная систематическая составляющая погрешности (υ может выражаться в процентах или в виде относительной величины).

Величины Θ и υ связаны между собой соотношениями

$$\Theta = \frac{\overline{A}}{100\,\%} \cdot \upsilon\,\%,$$

$$\Theta = \overline{A} \cdot \upsilon\,.$$

Соотношение (7.31) используется при выражении υ в процентах, а соотношение (7.32) – при выражении υ в виде относительной величины.

5. Оценивается абсолютная погрешность результата косвенного измерения искомой величины $\overline{A}$ по формуле

$$\Delta = \pm K(|\Theta| + |\varepsilon|),$$

где Δ – абсолютная погрешность результата косвенного измерения;

K – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и от отношения $\Theta / \sigma_{\overline{A}}$ (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Значения коэффициента К = $f\left(p, \theta / \delta_{\overline{A}}\right)$

$\theta / \sigma_{\overline{A}}$	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
$K_{0,95}$	0,76	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81
$K_{0,99}$	0,84	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Для приближенных расчетов можно принять $K = 0{,}80$ при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ и $K = 0{,}85$ при доверительной вероятности $P = 0{,}99$.

Относительные погрешности результата косвенного измерения определяются по формулам

$$\delta' = \frac{\Delta}{\overline{A}} \cdot 100\ \%,$$

$$\delta = \frac{\Delta}{\overline{A}}.$$

Соотношение (7.34) используется при выражении относительной погрешности в процентах, а соотношение (7.35) – при выражении δ в относительных величинах.

6. Результат косвенного измерения и его погрешность представляют в виде

$$\left(\overline{A} \pm \Delta\right), P,$$

где $\overline{A}$ – результат косвенного измерения;

$\pm\,\Delta$ – значение абсолютной погрешности;

P – принятая доверительная вероятность.

Допускается также представление результатов косвенных измерений в виде

$$\overline{A}\,;\, \sigma_{\overline{A}}\,;\, n;\, \Theta(P),$$

где $\sigma_{\overline{A}}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения (СКО результата косвенного измерения);

n – число измерений;

$\Theta(P)$ – абсолютная неисключенная систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения, полученная с доверительной вероятностью P.

При необходимости кроме абсолютных погрешностей могут быть приведены относительные погрешности в соответствии с соотношением (7.34) или (7.35).

7.3.3. Примеры расчета

В качестве примеров рассмотрены три задачи (задача 7.4, задача 7.5 и задача 7.6) по оценке погрешностей косвенных измерений. Первые две задачи решены классическим методом, а третья – в соответствии с рекомендациями методических указаний МИ 2083–90 [48].

Рассмотрим пример оценки погрешности косвенного измерения по формуле (7.18).

Задача 7.4

Условие задачи

Найти площадь квадрата S и абсолютную суммарную погрешность ее косвенного измерения $\Delta(s)$, если результат прямого измерения стороны квадрата равен «a» и абсолютная суммарная погрешность этого измерения составляет «$\Delta(a)$».

Решение задачи

Площадь квадрата $S = a^2$.

Абсолютная суммарная погрешность косвенного измерения площади квадрата оценивается соотношением

$$\Delta(S) = \Delta(a) \cdot \frac{dS(a)}{da} = \Delta(a) \cdot \frac{d(a^2)}{da} = \Delta(a) \cdot 2a\,;$$

$$\Delta(S) = \Delta(a) \cdot 2a\,.$$

Относительная суммарная погрешность косвенного измерения площади квадрата соответственно:

$$\delta(S) = \frac{\Delta(S)}{S} = \frac{2a \cdot \Delta(a)}{a^2} = 2 \cdot \delta(a)\,,$$

где $\delta(a) = \frac{\Delta(a)}{a}$ – относительная суммарная погрешность прямого измерения стороны квадрата.

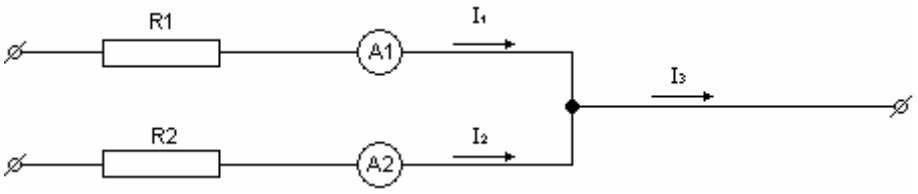
$$\delta(S) = 2 \cdot \delta(a).$$

Отметим, что суммарные относительные погрешности $\delta(S)$ и $\delta(a)$ могут выражаться в относительных величинах, как в примере, или в процентах (см. соотношение (7.20)).

Задача 7.5

Условие задачи

Найти значение тока I_3 и абсолютную суммарную погрешность его косвенного измерения по приведенной схеме.



Значения токов I_1 и I_2 , полученные путем прямого измерения с помощью амперметров $A1$ и $A2$, заданы. Заданы также абсолютные суммарные погрешности измерения этих токов Δ_1 и Δ_2 (соответственно).

Решение задачи

Значение тока I_3 (по первому закону Кирхгофа):

$$I_3 = I_1 + I_2.$$

Абсолютная суммарная погрешность Δ_3 косвенного измерения тока I_3 запишется в виде

$$\Delta_3 = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial I_1}\right)^2 \cdot \Delta_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial I_2}\right)^2 \cdot \Delta_2^2} \ .$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_1} = \frac{\partial (I_1 + I_2)}{\partial I_1}. = \frac{\partial I_1}{\partial I_1} + \frac{\partial I_1}{\partial I_2} = 1 + 0 = 1.$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_2} = \frac{\partial (I_1 + I_2)}{\partial I_2}. = \frac{\partial I_1}{\partial I_2} + \frac{\partial I_2}{\partial I_2} = 0 + 1 = 1.$$

$$\Delta_3 = \pm\sqrt{1^2 \cdot \Delta_1^2 + 1^2 \cdot \Delta_2^2} \ = \pm\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}.$$

$$\Delta_3 = \pm\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}.$$

Относительные суммарные погрешности косвенного измерения тока I_3 соответственно:

$$\delta_3 = \frac{\Delta_3}{I_3}; \ \delta_3' = \frac{\Delta_3}{I_3} \cdot 100\% ,$$

т. е. относительная суммарная погрешность, как уже отмечалось, может выражаться в относительных величинах или в процентах.

Задача 7.6

Условие задачи

Методом вольтметра и амперметра в нормальных условиях эксплуатации проведено измерение электрического сопротивления *R*. Класс точности вольтметра 0,5; предел его измерения U_k = 30 В. Класс точности миллиампермет-ра (1,0). Значения прямых измерений напряжения *U* и тока *I*, а также текущие значения косвенного измерения искомого сопротивления *R* приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты измерений

Параметры	**Номер измерения**			
	1	**2**	**3**	**4**
U, В	18,0	20,5	19,8	21,2
I, мА	530	610	590	630
R, Ом	33,9623	33,6066	33,5593	33,6508

Найти результат и погрешность косвенного измерения сопротивления R и записать результат косвенного измерения с учетом найденной погрешности.

Решение задачи

1. Текущие значения косвенного измерения электрического сопротивления определяются по закону Ома соотношением

$$R = \frac{U}{I},$$

где $U; I$ – значения напряжения и тока, приведенные в табл. 7.3;

R – искомая величина.

2. Среднее арифметическое значение сопротивления $\overline{R}$, принимаемое за результат косвенного измерения искомой величины, запишется в виде

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R = 33,6948 \text{ Ом}$$

где n – число измерений ($n = 4$);

R_i – результат i-го измерения (см. табл. 7.3).

3. Среднее квадратическое отклонение σ имеет следующее значение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^2}{n-1}} = 1{,}1822 \text{ Ом}$$

где R_i, $\overline{R}$, n – определены выше.

4. Выявление промахов детально рассмотрено в параграфе 4.2 и в силу этого при решении данной задачи не проводится. Отметим только, что в приведенном ряду косвенных измерений сопротивления R промахи отсутствуют.

5. Среднее квадратическое отклонение результата измерения $\sigma_{\overline{R}}$ имеет следующее значение:

$$\sigma_{\overline{R}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}1822}{\sqrt{4}} = 0{,}0911 \text{ Ом}$$

6. Случайная абсолютная погрешность результата измерения ε:

$$\varepsilon = t \cdot \sigma_{\overline{R}} = 3{,}18 \cdot 0{,}0911 = 0{,}2898 \text{ Ом}$$

где t – коэффициент Стьюдента ($t = 3{,}18$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$ и числа измерений $n = 4$).

7. Относительная инструментальная погрешность измерения напряжения U (см. табл. 7.3) оценивается соотношением

$$\delta_V = \frac{U_k}{U_{\min}} \cdot \gamma\%,$$

где δ_V – относительная инструментальная погрешность измерения напряжения;

U_k – верхний предел шкалы вольтметра;

$U_{\min}$ – минимальное показание вольтметра;

γ – приведенная погрешность вольтметра, определяемая его классом точности ($\gamma = \pm 0{,}5\%$).

$$\delta_V = \frac{30}{18{,}0} \cdot 0{,}5\% = 0{,}8333\,\%.$$

8. Относительная неисключенная систематическая погрешность (НСП) результата измерений запишется в виде

$$\upsilon = k\sqrt{\delta_V^2 + \delta_A^2}\ ,$$

где υ – относительная НСП результата измерения;

k – коэффициент ($k = 1{,}1$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$ и $m = 2$, где P – доверительная вероятность, m – число слагаемых под корнем);

δ_A – относительная инструментальная погрешность измерения тока, определяемая классом точности миллиамперметра ($\delta_A = 1{,}0\%$),

$$\upsilon = 1{,}1 \cdot \sqrt{0{,}8333^2 + 1{,}0^2} = 1{,}3017\ \%\ .$$

9. Абсолютная неисключенная систематическая погрешность результата измерения Θ запишется в виде

$$\Theta = \frac{\overline{R}}{100\%} \cdot \upsilon\% = \frac{33{,}6948}{100} \cdot 1{,}3017 = 0{,}4386 \text{ Ом}$$

10. Абсолютная суммарная погрешность результата измерений Δ оценивается соотношением

$$\Delta = \pm K\left(|\Theta| + |\varepsilon|\right),$$

где K – коэффициент ($K \approx 0{,}80$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$);

$$\Delta = \pm 0{,}80(|0{,}4386| + |0{,}2898|) = \pm 0{,}5827 \text{ Ом}$$

После округления получаем $\Delta' = \pm 0{,}6$ В.

11. Относительная суммарная погрешность результата измерения δ оценивается соотношением

$$\delta = \pm\frac{\Delta}{\overline{R}} \cdot 100\% = \pm\frac{0{,}5827}{33{,}6978} \cdot 100 = \pm 1{,}7293\%\ .$$

После округления: $\delta' = \pm 1{,}7$ %.

12. С учетом погрешности результат измерения запишется в виде

$$U' = (33{,}7 \pm 0{,}6)\ \text{Ом}.$$

7.4. Неопределенности измерений

По инициативе ряда международных метрологических организаций предложена новая концепция для показателя точности результатов измерений. В основе этой концепции лежит отказ от принятого сейчас понятия «погрешность» и переход на новый показатель точности «неопределенность». Стимулировало такой подход, видимо, несоответствие принятого определения понятия «погрешность» и установившегося порядка практической оценки погрешностей результатов измерений. Терминологические межгосударственные рекомендации РМГ 29–99 [53] дают следующее определение понятия погрешности результата измерения: «*Погрешность результата измерения* – это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины».

Далее в рекомендациях [53] отмечается, что истинное значение величины неизвестно и его применяют только в теоретических исследованиях. На практике используют действительное значение измеряемой величины, за которое принимают номинальное значение эталона или образцового средства измерения (СИ).

Следует отметить, что на практике при измерении искомой величины действительное значение этой величины неизвестно. Более того, возникает законный вопрос: зачем проводить измерение, если действительное значение измеряемой величины уже известно. Ответ очевиден: проводить измерение в этом случае не имеет смысла. Другими словами, реализовать практическую оценку погрешности результата измерения непосредственно из определения [53] невозможно. Практическая оценка погрешностей прямых многократных измерений проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207–76 [46], оценка погрешностей прямых однократных измерений – в соответствии с рекомендациями Р50.2.038–2004 [54] и оценка погрешностей косвенных измерений – в соответствии с рекомендациями МИ 2083–90 [48]. В нормативных документах [46; 48; 54] для оценки погрешностей истинное (действительное) значение измеряемой величины не используется. Оценка погрешностей по [46; 48; 54] никак не увязывается с определением термина «погрешность». Складывается впечатле-

ние, что определение погрешности существует само по себе, а найденные по [46; 48; 54] величины, непосредственно не связанные с погрешностью по [53] и также называемые погрешностями, существуют сами по себе. Напрашивается вывод о необходимости изменить определение понятия «погрешность результата измерения» или изменить порядок оценки погрешности, увязав его с истинным (действительным) значением измеряемой величины.

Авторы замены погрешности на неопределенность пошли по первому пути. Они отказались от показателя точности – «погрешность результата измерения» и предложили новый показатель точности – «неопределенность результата измерений». Рекомендации [53] дают следующее определение понятию неопределенность: «*Неопределенность измерений* – это параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине». Как видно, в этом определении нет понятий «истинного (действительного) значения измеряемой величины». Приведенные выше рассуждения свидетельствуют, что этого понятия в данном случае и не должно быть. Повторим еще раз, что существующие методы оценки погрешностей результатов измерений непосредственно не используют понятие «истинное (действительное) значение измеряемой величины». Не требуют знания этой величины и методы оценки неопределенностей измерений. Последнее послужило поводом утверждать, что авторы «неопределенностей» отвергают понятие истинного (действительного) значения измеряемой величины. Да, отвергают, но только в данном, конкретном случае при оценивании неопределенностей результатов измерений. И с этим можно согласиться. Все меняется коренным образом, если речь идет о погрешностях средств измерений. По определению [53]: «*Погрешность средства измерений* – это разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины». В данном случае «истинное (действительное) значение» вполне уместно. Более того, экспериментальная оценка погрешностей средств измерений невозможна без использования эталонов или образцовых средств. Напомним, что номинальное значение эталона или образ-

цового средства измерения принимают за действительное значение измеряемой величины. Не противоречит сказанному и принятый порядок оценки погрешностей средств измерений в соответствии с требованиями нормативных документов (ГОСТ 8.009–84 [44] и ГОСТ 8.508–84 [47]). Таким образом, заменять понятие «погрешность средства измерения» на понятие «неопределенность средства измерения», со всеми вытекающими отсюда последствиями, не следует.

Порядок оценки неопределенностей изложен в руководстве по выражению неопределенностей результатов измерений [41] и нормативно закреплен в рекомендациях РМГ 43–2001 [42].

В соответствии с [41, 42] неопределенность подразделяют на две составляющие: неопределенность типа А и неопределенность типа В. Неопределенность типа А оценивается статистическими методами и описывает случайные отклонения при повторных измерениях. Неопределенность типа В оценивается в основном другими способами, отличными от статистических, и близка по своей сути к неисключенным систематическим погрешностям.

Говоря о «близости» неопределенностей и погрешностей результатов измерений следует помнить, что термины «неопределенность» и «погрешность» – не синонимы и представляют собой различные понятия; их не следует путать друг с другом или заменять одно понятие другим.

Рассмотрим порядок оценки неопределенностей при проведении прямых многократных измерений. Предполагаем, что получен ряд значений x_1, x_2, x_n при измерении физической величины с помощью прибора, метрологические характеристики которого известны. Считаем также, что известна методическая погрешность измерения, известен закон распределения результатов измерений и задана доверительная вероятность, с которой должны быть найдены рассматриваемые величины.

Неопределенности типа А

Для оценки неопределенностей типа А проводятся следующие расчеты:

1) вычисляется среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad (7.37)$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое, принимаемое за результат измерения;

x_i – результат *i*-го измерения;

n – число измерений;

2) вычисляется стандартная неопределенность результатов однократных измерений:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \qquad (7.38)$$

где u – стандартная неопределенность;

3) вычисляется стандартная неопределенность типа А:

$$u_A = \frac{u}{\sqrt{n}}, \qquad (7.39)$$

где u_A – стандартная неопределенность результата измерений типа А.

Полученное значение u_A характеризует случайную составляющую неопределенности результата измерений. Расчет случайной неопределенности руководством [41] и рекомендациями [42] не предусматривается.

Неопределенности типа В

В качестве исходных данных для вычисления неопределенностей типа В используют:

1) сведения о виде распределения вероятностей;

2) неопределенности констант и справочных данных;

3) сведения изготовителя о средстве измерения;

4) данные поверки и калибровки средства измерения;

5) данные о методе измерения;

6) опытные данные о поведении и свойствах соответствующих приборов и материалов и т. п.

Точностные характеристики исходных данных обычно представляют в виде неисключенных систематических погрешностей. При этом предполагается, что рассматриваемые величины подчиняются равномерному закону распределения.

Для оценки неопределенности типа В проводятся следующие расчеты:

1) вычисляются составляющие неопределенности типа В по формуле

$$u_{B_j} = \frac{\theta_j}{\sqrt{3}} \tag{7.40}$$

где u_{B_j} – j-я составляющая стандартной неопределенности типа В;

θ_j – j-я составляющая неисключенной систематической погрешности результата измерения;

2) вычисляется стандартная неопределенность типа В:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{B_j}^2}, \tag{7.41}$$

где u_B – стандартная неопределенность типа В;

m – число слагаемых;

3) вычисляется суммарная стандартная неопределенность

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \tag{7.42}$$

где u_C – суммарная стандартная неопределенность;

u_A и u_B – определены выше;

4) вычисляется расширенная неопределенность

$$U_P = k_p \cdot u_c, \tag{7.43}$$

где U_P – расширенная неопределенность результата измерений для доверительной вероятности P;

k_p – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и закона распределения результатов измерений;

u_C – определено выше.

Во многих практических случаях при вычислении неопределенностей результатов измерений делают предположение о нормальности закона распределения возможных значений измеряемой величины и полагают:

$k_p = 2$ для $P = 0{,}95$ и $k_p = 3$ для $P = 0{,}99$.

При предположении о равномерности закона распределения полагают:

$k_p = 1{,}65$ для $P = 0{,}95$ и $k_p = 1{,}71$ для $P = 0{,}99$.

Окончательно результат измерения T может быть представлен в виде $(\bar{x} - U_p) \le T \le (\bar{x} + U_p)$ или $(\bar{x} \pm U_p)$ с доверительной вероятностью P.

При описании результатов измерений руководство [41] рекомендует приводить достаточное количество информации для возможности проанализировать или повторить весь процесс получения результата измерений и вычисления неопределенностей результата измерений, а именно:

1) алгоритм получения результата измерений;

2) алгоритм вычисления всех поправок и неопределенностей;

3) неопределенности всех используемых данных и способы их получения;

4) алгоритмы вычисления суммарной и расширенной неопределенностей (включая значение коэффициента k_p).

Отношение отечественных метрологов к предложениям, изложенным в руководстве [41], значительно изменилось за последнее время. Первые отклики на замену погрешностей неопределенностями были резко отрицательными [43]. Главные критические замечания касались предполагаемого отказа от понятия истинного (действительного) значения измеряемой величины, замены понятия «погрешность» на понятие «неопределенность», необходимости переработки многочисленных нормативных документов и применения новой терминологии и методики оценивания неопределенности результатов измерений. Особенно большая критика досталась «неопределенности типа В», призванной заменить неисключенную систематическую погрешность.

В последнее время отношение к руководству [41] несколько изменилось [40]. Многие метрологи склоняются к мнению, что понятие «неопределенность результата измерения» надо постепенно вводить в практику, но пока не вместо понятия «погрешность результата измерения», а наряду с ним. По нашему мнению, понятие «неопределенность» может успешно применяться в качестве показателя точности результата измерений. При этом, правда, потребуется значительная доработка руководства [41], РМГ 43–2001 [42] и разработка новых нормативных документов. Особенно большие изменения, видимо, должны быть сделаны в части применения понятия «неопределенность типа В». Что же касается средств измерений, то здесь пока должна быть сохранена традиционная терминология: «погрешность» и «истинное (действительное) значение измеряемой величины». Распространять понятие «неопределенность» в существующем виде на точностные характеристики средств измерений не представляется возможным.

Таким образом, целесообразно, видимо, использовать в практической работе два показателя точности: неопределенность результатов измерений и погрешность средств измерений[67; 68].

8. ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

8.1. Общие положения

Измерения физических величин осуществляются, как правило, путем преобразования измеряемых величин в целях приведения их к виду, удобному для считывания, обработки и представления получаемой измерительной информации. Измеряемые величины при этом часто преобразуются в величины другой физической природы [1–9].

Например, при измерении температуры ртутным термометром измеряемая температура преобразуется в длину столбика ртути. Больше температура – и больше длина столбика ртути, меньше температура – и столбик ртути меньше. Таким образом, о значении температуры судят по длине столбика ртути. Здесь измеряемая величина одной физической природы («температура») для

определения ее искомого значения преобразуется в физическую величину другой природы («длину» столбика ртути). Можно привести и другие примеры. Так, измерение давления газа с помощью трубчатого манометра осуществляется за счет деформации (скручивания или раскручивания) трубчатой пружины под воздействием измеряемого давления газа. Скручивание (или раскручивание) трубчатой пружины передается указательной стрелке, перемещающейся вдоль оцифрованной шкалы манометра, с которой и производится отсчет показаний. Таким образом, для измерения давления газа проводится целый ряд последовательных преобразований, что и позволяет в итоге оценить значение искомой величины. Измерение расхода жидкости можно провести, например, оценивая перепад давления на специальном сужающем устройстве, т. е. в этом случае расход жидкости преобразуется в перепад давления, измерение которого и дает значение искомой величины.

При проведении технических измерений неэлектрических величин (температуры, давления, расхода и т. д.) эти величины, довольно часто, преобразуют в электрические величины, которые и подвергаются дальнейшим преобразованиям и измерениям (рис. 8.1).

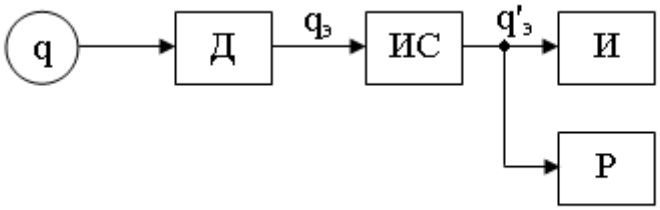


Рис. 8.1. Структура устройства при электрических измерениях неэлектрических величин: q – измеряемая неэлектрическая величина; $q_э$,$q'_э$ – электрические величины; Д – датчик; ИС – измерительная схема; И – измеритель (средство измерения электрической величины); Р – регистратор (регистратор электрической величины)

Датчик Д преобразует измеряемую неэлектрическую величину q в электрическую $q_э$. Эта величина в общем случае может быть преобразована в измерительной цепи (ИС) в другую электрическую величину $q'_э = f(q_э)$. При этом величина $q_э$ может быть усилена или ослаблена, преобразована из аналоговой величины в дискретную или из дискретной в аналоговую и т. д. Полученная величина $q'_э$ подвергается измерению или регистрации с помощью электрических

средств, а также может быть передана по линии связи на значительное расстояние для дальнейшей обработки и использования. Обработка величин $q'_э$ может проводиться с использованием универсальных ЭВМ или специализированных вычислительных устройств.

Измерения неэлектрических величин электрическими методами имеют ряд отличительных достоинств, к которым можно отнести:

1) возможность измерять малые значения искомых величин;

2) использовать электронные усилители, что дает возможность измерять такие сигналы, которые невозможно измерить другими методами;

3) возможность дистанционно измерять параметры искомых величин;

4) возможность дистанционно управлять как производственными, так и другими процессами;

5) возможность использовать высокоточную и малоинерционную электроизмерительную аппаратуру;

6) возможность комплектовать различные измерительные установки однотипными электрическими блоками;

7) возможность широко использовать современную вычислительную технику в измерительных системах.

В последующих параграфах учебного пособия подробно рассмотрены элементы, составляющие измерительное устройство, структура которого приведена на рис. 8.1. Так, отдельные параграфы пособия посвящены датчикам, измерительным схемам, электроизмерительным приборам и методам измерения конкретных физических величин, наиболее часто встречающихся в практике технических измерений.

8.2. Датчики

Основное назначение датчиков, применяемых при измерениях физических величин, заключается в восприятии и преобразовании исследуемых величин в вид, удобный для дальнейшего использования.

Следует отметить, что в настоящее время не существует единого и общепринятого определения термина «датчик».

Одни авторы рассматривают датчик как простейший элемент, осуществляющий преобразование неэлектрической величины в электрическую. Другие авторы, например в [1–3, 32], вообще избегают использовать термин «датчик» и заменяют его термином «первичный измерительный преобразователь». В [32] отмечается, правда, что кроме термина «первичный измерительный преобразователь» используется близкий к нему термин – «датчик». При этом под *датчиком* подразумевается один или несколько измерительных преобразователей, служащих для преобразования измеряемой неэлектрической величины в электрическую и объединенных в единую конструкцию. Аналогичную позицию занимают авторы учебника [1], в котором отмечается, что первичные измерительные преобразователи, размещаемые непосредственно на объекте исследования и удаленные от места обработки, отображения и регистрации измерительной информации, называют иногда датчиками. При изложении материала в [1] термин «датчик» не используется. Вместо него фигурируют термины «измерительный преобразователь» и «преобразователь». В учебном пособии [3] автор применяет термин «измерительный преобразователь», но не отказывается и от термина «датчик», под которым понимает конструктивную совокупность ряда измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта измерения. Есть авторы, которые считают, что датчик должен выполнять ряд преобразований одних величин в другие, усиливать и распределять сигналы и производить некоторые вычислительные операции.

Международный электротехнический словарь дает следующее определение термина «датчик»: «*Датчик* – это измерительный орган, включающий наряду с чувствительным элементом усилитель или преобразователь сигнала, видоизменяющий форму выходного сигнала в соответствии с заданной».

На основании изложенного можно сформулировать основные положения, которые необходимо учесть при определении термина «датчик».

Датчик как функциональный элемент измерительной системы должен воспринимать и преобразовывать измеряемую величину, и его можно рассматривать как устройство, состоящее из воспринимающего (чувствительного) эле-

мента и промежуточных преобразователей. Вопрос заключается в том, какие преобразователи относить к датчикам, а какие – к другим функциональным элементам устройства. Исходя из этого, можно дать следующее определение: датчиком называется конструктивно единый измерительный преобразователь измеряемой неэлектрической величины в электрическую. Такое определение правомерно применительно к задаче электрических измерений неэлектрических величин.

Термин «датчик» обычно применяют в сочетании с физической величиной, для преобразования которой он предназначен: датчик температуры, датчик давления, датчик ускорения и т. д. Датчики могут выполняться как в виде простейших по устройству и схеме функциональных элементов (термопары, проволочные тензодатчики и т. п.), так и в виде более сложных устройств, состоящих из ряда самостоятельных элементов (например, датчик давления, состоящий из упругого элемента, рычажной системы и переменного электрического сопротивления; в этом случае измеряемое давление воздействует на упругий элемент, который через рычажную систему перемещает движок переменного сопротивления, и, таким образом, давление преобразуется в электрическое сопротивление). Необходимость разработки и применения сложных датчиков обусловлена главным образом тем, что они позволяют получить большие, чем простейшие датчики, чувствительность, точность и линейность преобразования.

8.3. Измерительные схемы

Измерительные схемы служат для включения датчиков, что необходимо для их нормальной работы. В простейшем случае роль измерительных схем могут выполнять соединительные провода (например, при подключении термопары к измерительному прибору, когда не используются какие-либо согласующие или усилительные устройства). В более сложных случаях измерительные схемы могут быть достаточно сложными устройствами и содержать в своем составе, например, усилители, генераторы, компенсаторы и т. д. Часто в качестве таких устройств используются равновесные и неравновесные мостовые измерительные схемы, которые могут быть как постоянного, так и переменного тока.

Наибольшее распространение получили следующие схемы включения датчиков: токовые, потенциальные и частотные.

Пример токовой схемы включения датчиков приведен на рис. 8.2, а на рис. 8.3 приведен график статической характеристики для этой схемы.

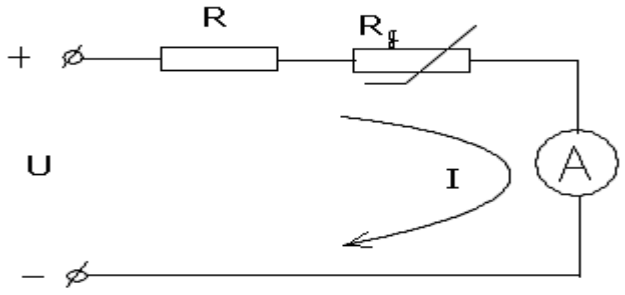


Рис. 8.2. Пример токовой схемы включения датчиков

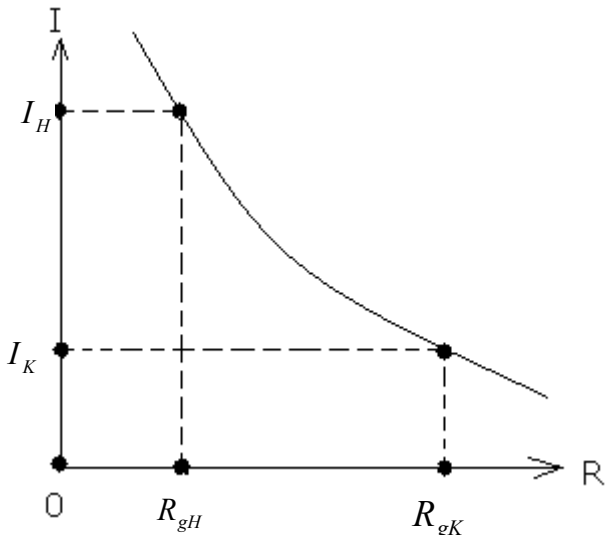


Рис. 8.3. График зависимости $I = f(R_g)$

На рис. 8.2 и рис. 8.3 приняты следующие обозначения: R_g – сопротивление датчика; R – балластное сопротивление; U – напряжение питания; I – измеряемый ток; A – амперметр (измеритель тока); R_{gH} – начальное сопротивление датчика; R_{gK} – конечное сопротивление датчика; $I_н$ и I_K – начальное и конечное значения тока

Мостовые измерительные схемы имеют исключительно большое значение при измерении физических величин (как электрических, так и неэлектрических), в силу чего эти схемы подробно описаны ниже и им посвящены отдельные главы учебного пособия.

8.4. Средства измерения электрических величин

Измерение физических величин с использованием датчиков и измерительных схем требует подключения к выходу измерительных схем электрических средств измерений (СИ) для регистрации и отображения выходных сигналов. С этой целью используются регистрирующие или показывающие СИ электрических величин. Регистраторы электрических сигналов описаны в литературе [1–7; 9; 18; 55].

В данном учебном пособии основное внимание уделено электроизмерительным приборам (аналоговым и цифровым, а также приборам прямого измерения и компенсационным).

На рис. 8.4 приведен один из возможных вариантов классификации электроизмерительных приборов.

Электронно-лучевые приборы находят применение в измерительной практике, хотя и в меньшей степени, чем в прежние годы. Вместе с тем электронно-лучевые приборы входят в учебные программы многих дисциплин (в том числе в школьную программу по физике), что позволило отказаться от рассмотрения этих приборов в данном учебном пособии.

Электромеханические и электронные приборы (аналоговые и цифровые), нашедшие наибольшее распространение, детально рассматриваются ниже в последующих разделах учебного пособия.

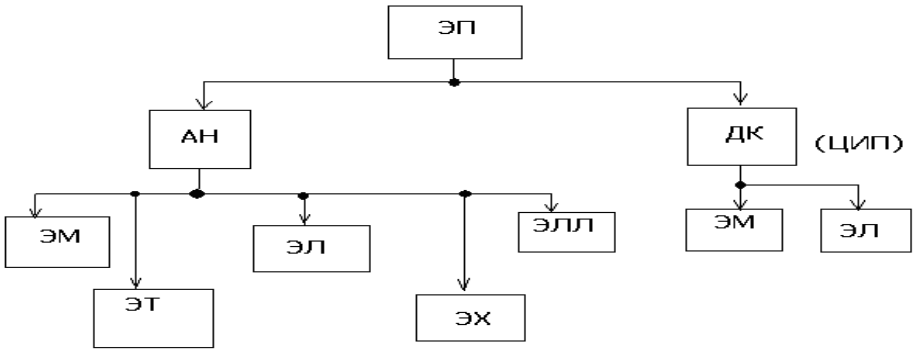


Рис. 8.4. Классификация электроизмерительных приборов:
ЭП – электроизмерительные приборы; АН – аналоговые приборы; ДК – дискретные приборы (цифровые измерительные приборы); ЭМ – электромеханические приборы (аналоговые и цифровые); ЭЛ – электронные приборы (аналоговые и цифровые); ЭЛЛ – электронно-лучевые приборы (электронные осциллографы); ЭТ – электротепловые приборы; ЭХ – электрохимические приборы

Электрохимические приборы используют химическое действие электрического тока.

Электротепловые приборы используют тепловое действие электрического тока.

Электрохимические и электротепловые приборы используются сравнительно редко при решении специфических измерительных задач и в силу этого в данном учебном пособии не рассматриваются.

9. ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ

9.1. Общие положения

Датчики могут быть систематизированы по виду входных (измеряемых) величин, что может быть полезным при выборе датчиков для измерения заданной величины.

По виду входных (измеряемых) величин датчики обычно разделяют на следующие группы:

1) датчики перемещений;
2) датчики усилий;
3) датчики момента вращения;
4) датчики размеров;
5) датчики уровня;
6) датчики скорости;
7) датчики ускорения;
8) датчики параметров вибраций;
9) датчики давления и расхода;
10) датчики температуры;
11) датчики влажности;
12) датчики для анализа состава вещества.

В пределах каждой группы возможно и дальнейшее разделение датчиков. Например, можно различать датчики линейного и углового перемещения, датчики высоких и низких температур и т. д.

Систематизация датчиков по виду их выходного сигнала позволяет определить, какие измерительные устройства наиболее пригодны для работы с данными датчиками или, наоборот, какие типы датчиков следует использовать для заданных измерительных устройств.

По виду выходного сигнала датчики, применяемые для электрических измерений неэлектрических величин, можно разделить на группы в зависимости от преобразования ими измеряемой величины в электрическое сопротивле-

ние, в индуктивность, в емкость, в значение постоянного тока или напряжения, в фазу переменного тока или напряжения, в частоту переменного тока или напряжения.

Кроме того, выходная величина датчика может представлять собой импульсно-модулированный электрический ток или напряжение. Причем возможно применение амплитудно-импульсной, частотно-импульсной, время-импульсной и других видов модуляции. Такие датчики особенно целесообразно использовать в импульсных и цифровых измерительных устройствах.

Большие возможности открываются при использовании датчиков в измерительно-вычислительных комплексах (ИВК) совместно с компьютерами. Такое использование позволяет решить целый круг задач, связанных со сбором, переработкой, передачей, хранением, поиском и выдачей информации, «источником» которой являются датчики. Попутно решаются такие проблемы, как компенсация внешних воздействий на датчики, повышение точности и надежности проводимых измерений, ускорение и упрощение экспериментальных работ и т. п. Более подробно о сопряжении датчиков с компьютерами, о возникающих при этом трудностях и о круге решаемых задач можно узнать из литературы, приведенной в конце учебного пособия (см., например, [33, 34]).

9.2. Классификация датчиков

Большое разнообразие и многочисленность видов датчиков затрудняют задачу изучения, оптимального выбора и использования их при электрических измерениях неэлектрических величин. Для облегчения этой задачи необходимы, очевидно, систематизация и классификация датчиков. Чаще всего классификация датчиков проводится по принципу их действия. Кроме того, датчики иногда целесообразно классифицировать по виду входных или выходных величин, как уже было рассмотрено выше (см. п. 9.1).

В зависимости от принципа действия датчики можно разделить на две большие группы: датчики параметрические и датчики генераторные.

Датчики параметрической группы характеризуются тем, что измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в параметр электрической цепи: со-

противление, индуктивность, взаимную индуктивность, емкость. Для обеспечения нормальной работоспособности таких датчиков необходимы вспомогательные источники электрической энергии.

К параметрическим можно отнести следующие типы датчиков:

1) *реостатные датчики*, основанные на использовании зависимости сопротивления реостата от положения его движка, который перемещается под воздействием измеряемой величины;

2) *датчики контактного сопротивления*, в которых используется зависимость контактного сопротивления между поверхностями твердых тел (например, угольных шайб) от давления тел друг на друга;

3) *тензометрические (тензорезисторные) датчики*, основанные на измерении сопротивления проводников при их растяжении или сжатии;

4) *терморезисторные датчики*, основанные на измерении их сопротивлений в зависимости от температуры;

5) *фоторезисторные датчики*, основанные на изменении их сопротивлений в зависимости от освещенности;

6) *электролитические датчики*, основанные на изменении сопротивления раствора электролита от концентрации раствора;

7) *ионизационные датчики*, основанные на зависимости сопротивления газового разрядного промежутка от степени ионизации газа;

8) *электронные (механотронные) датчики*, основанные на зависимости анодного тока электронных ламп от расстояния между их электродами;

9) *индуктивные датчики*, основанные на зависимости их индуктивности от величины немагнитных зазоров, от длины и площади сечения сердечников, а также от взаимного расположения частей магнитопроводов и обмоток датчиков;

10) *магнитоупругие датчики*, основанные на зависимости их индуктивности от механического напряжения ферромагнитного материала, образующего сердечники этих датчиков;

11) *емкостные датчики*, основанные на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его обкладок, а также от диэлектрической проницаемости его диэлектрика.

Генераторные датчики характеризуются тем, что в них осуществляется преобразование различных видов энергии в электрическую (генерирование электрической энергии под воздействием измеряемой неэлектрической величины).

К генераторным можно отнести следующие типы датчиков:

1) *термоэлектрические датчики (термопары)*, основанные на зависимости термоЭДС термопар от разности температур их рабочих и свободных концов;

2) *индукционные датчики*, основанные на явлении электромагнитной индукции;

3) *пьезоэлектрические датчики*, основанные на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, состоящего в поляризации некоторых материалов (кварца, турмалина, пьезокерамики и др.) при их деформации;

4) *фотоэлектрические датчики*, основанные на зависимости ЭДС фотоэлементов от их освещенности;

5) *гальванические датчики*, основанные на зависимости ЭДС гальванического элемента от состава и концентрации растворов электролитов;

6) *электрокинетические датчики*, основанные на явлении электрокинетического потенциала, возникающего при вынужденном протекании полярной жидкости через пористую стенку.

Приведенный перечень типов датчиков не охватывает, конечно, всех типов и всех возможных модификаций датчиков одного типа. Приведены лишь наиболее распространенные типы датчиков, которые и будут рассмотрены более подробно в последующих разделах учебного пособия.

9.3. Параметрические датчики

9.3.1. Реостатные датчики

Реостатным параметрическим датчиком называют переменное сопротивление, движок которого перемещается в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины. Таким образом, входной величиной реостатных датчиков является перемещение движка, которое может быть линейным или угловым. Выходной величиной реостатных датчиков является активное сопротивление, которое может изменяться линейно или по некоторому закону (в зависимости от перемещения движка).

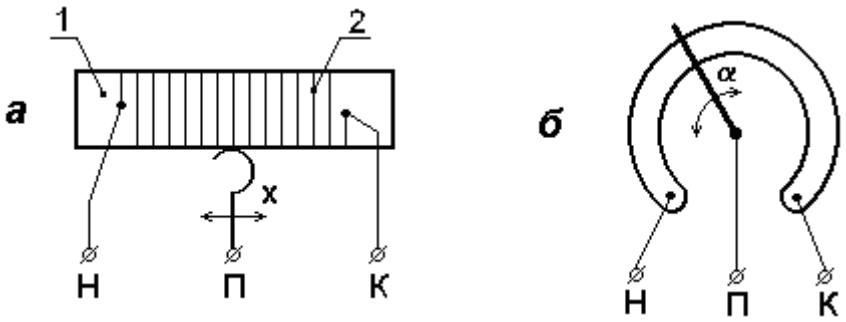


Рис. 9.1. Реостатные преобразователи для линейных *(а)* и угловых *(б)* перемещений:
1 – каркас; 2 – обмотка; Н, К – начало и конец обмотки; П – вывод от подвижного контакта (движка); *x* – линейное перемещение движка; α – угловое перемещение движка датчика

Основными элементами реостатного датчика являются: каркас с обмоткой в виде проволоки (или с нанесенным на каркас полупроводником, пленкой металла или пленкой специального сплава) и подвижные токосъемные щетки (движки), которые скользят непосредственно по поверхности резистивного слоя или по ряду соединенных с ним контактов. Датчики могут быть однооборотные и многооборотные. Например, в [37] описан десятиоборотный датчик с намоткой в виде проволочной проводящей спирали на пластмассовом цилиндре со щетками из благородных металлов. Срок службы такого датчика – 20 млн. оборотов при скорости до 500 об/мин.

Статические характеристики преобразования реостатных датчиков приведены на рис. 9.2.

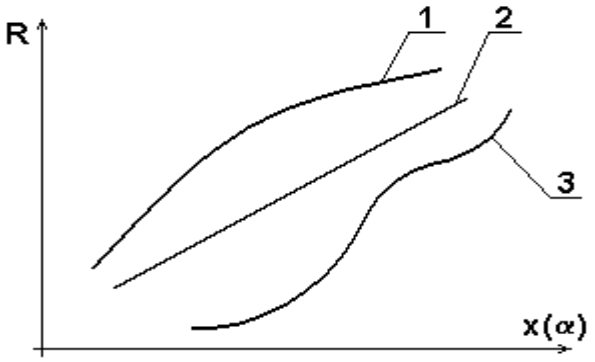


Рис. 9.2. Статические характеристики преобразования реостатных датчиков:
1 – нелинейная; 2 – линейная; 3 – функциональная

На рис. 9.2 в качестве входных величин отложены по оси абсцисс величины x и α (линейное и угловое перемещение движка датчика), а по оси ординат (в качестве выходной величины) отложено значение активного сопротивления R.

Статические характеристики преобразования реостатных датчиков в самом общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$R = f(x), \tag{9.1}$$

$$R = f(\alpha), \tag{9.2}$$

где величины R, x, α определены выше.

Проволочные датчики (по сравнению с непроволочными) обладают рядом преимуществ: большей стабильностью во времени, большей надежностью, линейностью и т. д. Вместе с тем конечное число витков обмотки таких датчиков приводит к тому, что их статические характеристики, строго говоря, становятся ступенчатыми и возникает погрешность разрешающей способности (ступеньки на рис. 9.2 не показаны). Относительную погрешность разрешения δ обычно задают в виде

$$\delta = (1/w)\cdot 100\ \%, \tag{9.3}$$

где w – число витков.

Для удовлетворительной работы реостатного датчика число витков должно быть не менее 100–200.

Конструкция реостатных датчиков: каркас из текстолита или пластмассы; реже применяются каркасы из алюминия, покрытого изоляционным лаком или оксидной пленкой; провода изготавливаются из константана, манганина, фехраля, из сплавов платины с иридием, платины с палладием и др.

К достоинствам реостатных датчиков относятся их простота, дешевизна и высокий уровень выходного сигнала без усиления. С другой стороны, они обладают сравнительно низкой точностью, имеют скользящий контакт и иногда требуют значительных усилий для перемещения движка датчика.

Применяют реостатные датчики для измерения перемещений и других неэлектрических величин (например, усилий, давлений, уровней и т. п.), которые предварительно могут быть преобразованы в перемещения. Справочные данные по реостатным датчикам приведены в [37, 38].

9.3.2. Датчики контактного сопротивления

Действие датчиков контактного сопротивления (рис. 9.3) основано на зависимости переходного сопротивления контактов R_K от усилия их сжатия.

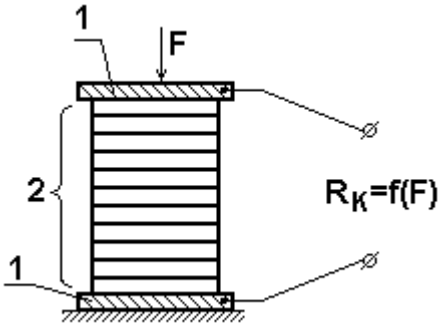


Рис. 9.3. Датчик контактного сопротивления:
1 – металлические пластины; 2 – столбик из шайб (например, угольных)

Зависимость значения контактного сопротивления R_K от усилия сжатия определяется соотношением

$$R_K = \frac{K}{F_0 + F}, \tag{9.4}$$

где K – постоянный коэффициент;

F_0 – усилие сжатия в исходном положении;

F – текущее значение усилия сжатия.

Начальное сжатие контактов осуществляется за счет конструктивных особенностей датчиков, позволяющих осуществить эту операцию.

График статической характеристики преобразования (СХП) в соответствии с соотношением (9.4), являющимся аналитической записью СХП, приведен на рис. 9.4.

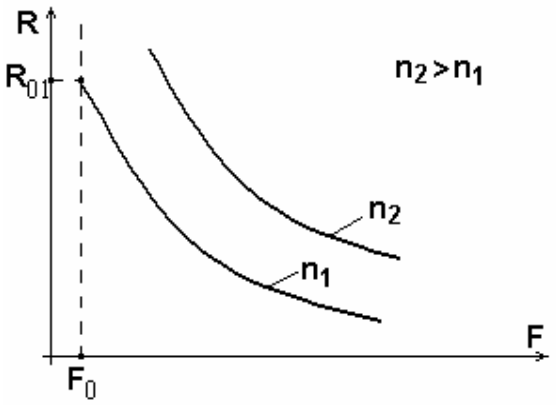


Рис. 9.4. График статической характеристики преобразования датчика контактного сопротивления: n_1, n_2 – число угольных шайб; R_{01} – исходное (начальное) сопротивление датчика при $F = F_0$ и $n = n_1$

Обычно датчики выполняются из угольных шайб или дисков. Материалом служат электродный уголь, графит или керамика с графитовым заполнением. Толщина шайб 0,5–3,5 мм. Размеры шайб выбираются из расчета максимально допускаемого давления до 65 кГс/см^2 и максимально допускаемого тока до 300–400 мА.

Кроме «угольных», известны датчики контактного сопротивления на основе электропроводящей бумаги, уложенной рядами в виде столбика, на основе электропроводящей резины или металлических пластин, на которые путем напыления нанесен высокоомный резистивный слой.

К недостаткам датчиков контактного сопротивления следует отнести большой гистерезис, значительную нелинейность и зависимость их сопротивления от температуры окружающей среды. Суммарная погрешность рассматриваемых датчиков может достигать ±10 %.

К достоинствам этих датчиков относятся их конструктивная простота, высокая надежность и достаточная для целей измерения и автоматизации мощность.

Кроме преобразования неэлектрических величин (усилий, напряжений, малых перемещений и т. д.) в электрические, датчики контактного сопротивления применяются в качестве выходных органов регуляторов напряжения, стабилизаторов, угольных микрофонов и т. п.

Более подробно с датчиками контактного сопротивления можно познакомиться по многим литературным источникам (см., например, [32, 37]).

9.3.3. Тензорезисторные датчики

Принцип действия тензорезисторных датчиков основан на изменении сопротивления материала проводника при его деформации. Отметим, что рассматриваемые датчики могут называться по-разному. Например, могут быть использованы термины: тензометрические датчики, тензочувствительные датчики, омические тензодатчики и просто «тензодатчики». В дальнейшем будем использовать последний из названных терминов («тензодатчик»).

Принцип работы тензодатчиков поясняет рис. 9.5.

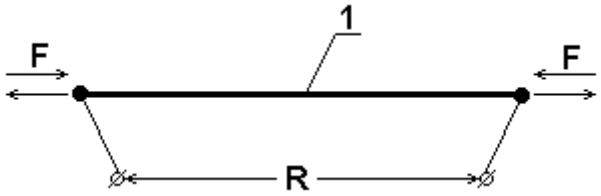


Рис. 9.5. Тензодатчик:
1 – проводник; R – сопротивление проводника;
«F–F» – усилие растяжение (или сжатия) проводника

Сопротивление проводника при неизменной температуре, как известно, рассчитывается по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}. \qquad (9.5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника;

l – длина проводника;

S – площадь поперечного сечения проводника.

При малом растяжении или сжатии проводника его удельное сопротивление остается примерно постоянным. Принимая, что ρ≈const, рассмотрим влияние на R остальных членов выражения (9.5).

При растяжении длина проводника l растет, площадь поперечного сечения S уменьшается и в соответствии с выражением (9.5) сопротивление проводника R возрастает.

При сжатии проводника эффект будет обратным: длина l уменьшается, площадь поперечного сечения S растет и сопротивление R снижается.

В случае значительных деформаций проводников удельное электрическое сопротивление материала этих проводников изменяется (возрастает и при растяжении, и при сжатии), что необходимо учитывать.

Изменение сопротивления проводников характеризуется коэффициентом тензочувствительности:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \tag{9.6}$$

где K – коэффициент тензочувствительности;

ΔR и Δl – изменения сопротивления и длины проводника.

Чувствительные элементы тензодатчиков выполняют из металлической проволоки и фольги, а также из полупроводников круглого и плоского сечения. Конструкции различных типов тензодатчиков представлены на рис. 9.6.

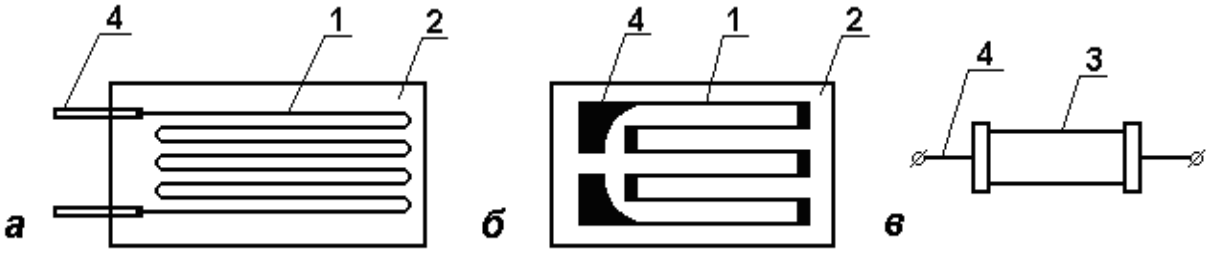


Рис. 9.6. Конструкция тензодатчиков проволочных (*а)*, фольговых (*б)* и полупроводниковых (*в)*:
1 – металлические проводники; 2 – подложка из бумаги или лаковая пленка;
3 – полупроводник; 4 – выводы

Показанные на рис. 9.6 датчики относятся к «наклеиваемым», т. е. вместе с подложкой их наклеивают на исследуемую деталь специальным клеем. Такие датчики просты в работе, но наличие клея ухудшает их характеристики (появляется гистерезис, «ползучесть» и потеря чувствительности со временем). Существуют бесклеивые датчики, проводники которых крепятся к взаимоперемещающимся деталям без клея с помощью механических устройств.

Для проволочных тензодатчиков, приведенных на рис. 9.6, *а* и для фольговых тензодатчиков, приведенных на рис. 9.6, *б* относительные изменения сопротивления не превышают 1 %, что может оказаться сравнимым с температурными изменениями сопротивления этих датчиков. Отсюда требования к материалу тензодатчиков – иметь малый температурный коэффициент и большой коэффициент тензочувствительности. Кроме того, материалы тензодатчиков должны иметь большое удельное сопротивление (для уменьшения габарита датчика при заданном его сопротивлении) и большую механическую прочность. Основные характеристики материалов для тензодатчиков приведены в табл. 9.1. Следует отметить, что приведенные характеристики в значительной степени зависят от состава, технологии изготовления и последующей обработки материала.

Таблица 9.1

Характеристики материалов, используемых для тензодатчиков

Материал	**Коэффициент тензочувствительности К**	**Удельное сопротивление ρ при 20 °С, мкОм·м**	**Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), 10^{-3}/°С**
Константан	1,9÷2,2	0,47÷0,51	–0,04÷+0,02
Манганин	0,47÷0,50	0,4÷2,0	–0,03÷+0,04
Нихром	2,1÷2,3	1,0÷1,2	0,15÷0,17
Изоэластик	2,8÷3,6	–	0,47
Платина	4,1÷6,1	0,09÷1,11	2,57÷3,98
Железохромо-алюминиевый сплав	2,8÷2,9	1,35÷1,55	0,02

Данные табл. 9.1 свидетельствуют, что наибольшей тензочувствительностью (среди приведенных материалов) обладает платина. Несмотря на это, платиновые тензодатчики используются сравнительно редко из-за большого температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Наибольшее распространение для изготовления тензодатчиков получил константан, имеющий приемлемую тензочувствительность (К≈2) и малый ТКС. Полупроводниковые тензорезисторы имеют чувствительность много большую, чем металлические, но усту-

пают последним по стабильности характеристик и по температурному диапазону. Применение современной интегральной микроэлектронной технологии позволяет значительно улучшить все характеристики как металлических (фольговых), так и полупроводниковых тензодатчиков (повышаются стабильность и идентичность, уменьшаются размеры и т. п.).

Номинальные сопротивления тензодатчиков составляют от 50 до 800 Ом. Фольговые и проволочные тензодатчики обычно имеют длину от 5 до 20 мм и ширину от 3 до 10 мм. Полупроводниковые тензодатчики представляют собой пластинку монокристалла кремния или германия (чаще кремния) длиной 5–10 мм и шириной 0,2-0,8 мм. Известны «малобазовые» тензодатчики (металлические и полупроводниковые), имеющие длину от 1 до 3 мм.

Основное назначение тензодатчиков – измерять деформацию деталей машин и механизмов, а также элементов зданий и сооружений (мостов, виадуков и т. д.). Кроме того, они могут использоваться в качестве чувствительного элемента датчиков давления, силы, параметров вибрации. Например, при измерении давления жидкости или газа тензорезисторы наносят на мембрану датчика давления и располагают их так, что при работе два из них подвергаются деформации растяжения, а два других – деформации сжатия.

Использование специальных схем включения (обычно мостовых) и специальных компенсирующих устройств обеспечивают высокие метрологические характеристики измерений. Совмещение в одной конструкции всех функциональных узлов датчика позволяет сократить число проводов в линиях связи, сформировать высокочувствительный выход и повысить помехозащищенность измерительного канала.

Справочные данные по тензодатчикам приведены во многих литературных источниках (см., например, [32, 37, 38]).

9.3.4. Фоторезисторные датчики

Фоторезисторные датчики (устаревшее название «фотосопротивления») представляют собой полупроводниковую пластину, которая при освещении уменьшает свое сопротивление в результате внутреннего фотоэффекта. Схема фоторезистора и его характеристика $R = f(\Phi)$ приведены на рис. 9.7.

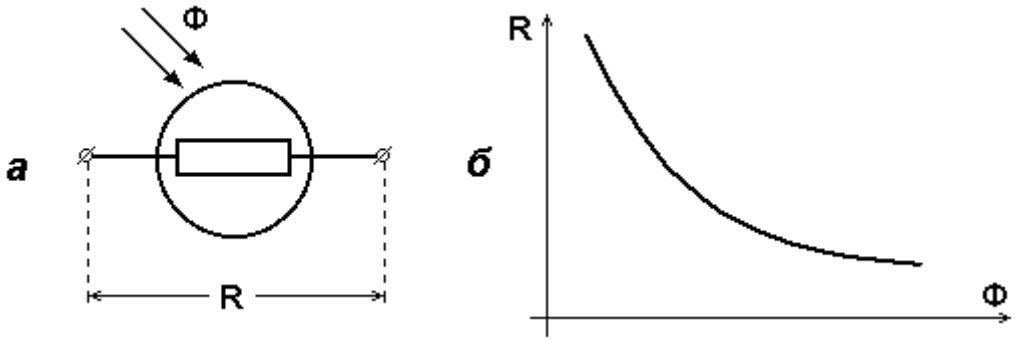


Рис. 9.7. Схема фоторезистора (*а)* и его статическая характеристика преобразования (*б)*: R – сопротивление фоторезистора; Ф – световой поток

В качестве фоточувствительного материала обычно используются: сернистый кадмий (тип ФС-К), сернистый свинец (тип ФС-А), селенид кадмия (тип ФС-Д), монокристаллы сернистого кадмия (тип ФС-КМ). Спектральные характеристики фоторезисторов определяются свойствами используемых полупроводниковых материалов. Полупроводниковые фоторезисторы перекрывают спектр от инфракрасных до ультрафиолетовых излучений. Характеристики полупроводниковых фоторезисторных датчиков нелинейны и температурозависимы, поэтому выбор подходящего типа фоторезистора и схемы его включения во многом зависит от конкретной области его применения.

При небольших освещенностях сопротивление фоторезистора подчиняется закону Ома:

$$R = \frac{U}{I_\Phi}, \tag{9.7}$$

где U – напряжение, приложенное к фоторезистору;

I_Φ – фототок.

При больших освещенностях фоторезистора пропорциональность между U и I_Φ нарушается.

Чувствительность фоторезисторов определяется кратностью изменения их сопротивлений $R_{\text{Т}}$ и $R_{\text{СВ}}$:

$$K = \frac{R_T}{R_{CB}}, \tag{9.8}$$

где $R_{\text{Т}}$ – темновое сопротивление (сопротивление неосвещенного фоторезистора); $R_{\text{СВ}}$ – сопротивление освещенного фоторезистора (обычно принимается освещенность E = 200 лк).

Инерционность фоторезисторов характеризуется постоянной времени T, которая может принимать значения от десятков микросекунд до десятков миллисекунд. Основные характеристики фоторезисторных датчиков приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Основные характеристики фоторезисторных датчиков

Тип фоторезистора	**Размер фоточувствительной площадки, мм^2**	**Рабочее напряжение, В**	**Темновое сопротивление, МОм**	**Фототок, мкА**	$\frac{R_T}{R_{CB}}$	**Постоянная времени, мс**	**Спектральная чувствительность**	
							λ_{max}	$\lambda_{кр}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ФСК-1	28,8	400	3,3	1500	100	80	0,64	0,9
ФСК-5	1,0	100	5,1	500	60	80	0,64	0,9
ФСД-0	28,8	300	2,0	1500	150	3,0	0,72	1,2
ФСА-1	30,0	15–60	0,05	–	1,2	0,04	2,1	2,7
ФСК-П1	12,0	100	100	80-2000	1500	0,04	0,64	0,9
ФСА-6	125	15–30	0,2	–	1,2	0,04	2,1	2,7
СФЗ-1	7,5	15	0,5	1500	3000	0,04	0,72	1,2

Примечания

1. Значение фототока (колонка «5») и отношение темнового сопротивления $R_{\text{Т}}$ к световому сопротивлению $R_{\text{СВ}}$ (колонка «6») указаны при освещенности 200 лк.
2. Значение λ_{max} (колонка «8») соответствует длине волны излучения, при которой спектральная чувствительность достигает максимума.
3. Значение $\lambda_{кр}$ (колонка «9») – длина волны излучения, соответствующая красной границе спектральной чувствительности.

Более подробно с фоторезисторными датчиками можно познакомиться по литературным источникам, приведенным в библиографическом списке (справочные данные см., например, в [32, 37]).

9.3.5. Терморезисторные датчики

Принцип действия терморезисторных датчиков (устаревшее название – «датчики термосопротивления») основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении их температуры. В качестве терморезисторов может использоваться металлический или полупроводниковый резистор.

Датчики температуры с терморезисторами иногда называют термометрами сопротивления.

Наибольшее распространение получили металлические терморезисторы, что объясняется стабильностью их статических характеристик преобразования и возможностью строить на их основе измерители температур со сравнительно малыми погрешностями.

Для изготовления полупроводниковых терморезисторов (термисторов) применяются смеси окислов металлов (Mn_2O_3, Cu_2O_3, Fe_2O_3, NiO и др.), которые прессуются и спекаются при высокой температуре. Термисторы обладают высокой чувствительностью, но широкого распространения не получили из-за нестабильности их статических характеристик преобразования.

Зависимость сопротивления проводника от его температуры выражается формулой

$$R = R_0 \cdot e^{\alpha(\theta-\theta_0)} \tag{9.9}$$

где R – сопротивление проводника при температуре θ;

R_0 – сопротивление проводника при температуре θ_0;

α – температурный коэффициент сопротивления.

График зависимости $R = f(\theta)$ приведен на рис. 9.8.

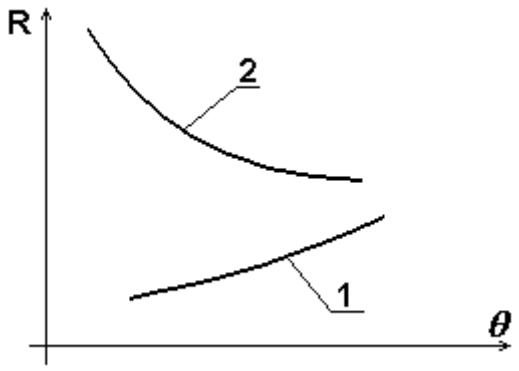


Рис. 9.8. Статические характеристики преобразования терморезисторных датчиков:
1 – металлические терморезисторы; 2 – полупроводниковые терморезисторы

Металлические терморезисторы нормируются государственным стандартом ГОСТ 6651-84 [51]. Отметим, что ГОСТ 6651-84 вводит термин «термопреобразователи сопротивления» (далее – ТС).

В соответствии со стандартом для изготовления металлических ТС могут использоваться медные (ТСМ), платиновые (ТСП) и никелевые (ТСН) терморезисторы. Использование других металлов не рекомендуется. Основные характеристики ТС, нормируемые стандартом [51], приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Основные характеристики термопреобразователей сопротивления

Тип	**Диапазон измеряемых температур, °С**	**Условные обозначения номинальных статических характеристик преобразования (НСХП)**	**Класс допуска**
ТСМ	–200÷+200	10М; 50М; 100М	В; С
ТСП	–260÷+1100	1П; 10П; 50П; 100П; 500П	А; В; С
ТСН	–70÷+180	–	С

Примечания
1. Цифры в условных обозначениях НСХП обозначают значение сопротивления ТС при 0 ^{0}С (R_0).
2. Буквы в условных обозначениях НСХП обозначают: «М» – медные ТС; «П» – платиновые ТС; «Н» – никелевые ТС.

Значения классов допуска (А; В; С) приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Допускаемое отклонение от номинального значения сопротивления R_0 при 0°С для нормируемых классов допуска (± %)

Тип	Класс допуска		
	A	B	C
ТСП	0,05	0,1	0,2
ТСМ	–	0,1	0,2
ТСН	–	–	0,24

Рассмотрим более детально зависимость $R = f(\theta)$ для металлических ТС (см. выражение (9.9)).

Разлагая правую часть (9.9) в степенной ряд и ограничиваясь первыми двумя членами ряда, получаем

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0]], \qquad (9.10)$$

где $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-3}$ $(°C)^{-1}$ – для ТСП и ТСМ.

Выражение (9.10) правомерно для медных ТС при температуре от 0 до +200 °С и в первом приближении для платиновых ТС при тех же температурах.

Для отрицательных температур и для температур больших +200 °С разложение выражения (9.9) в степенной ряд должно содержать уже три члена.

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0) + \beta(\theta - \theta_0^2]], \qquad (9.11)$$

где $\beta \approx -5,8 \cdot 10^{-7} (^0C)^{-2}$ – для ТСП;

$\beta \approx -5,0 \cdot 10^{-7} (^0C)^{-2}$ – для ТСМ.

Таким образом, в небольшом температурном диапазоне зависимость $R = f(\theta)$ близка к линейной. Для больших температурных диапазонов (особенно при отрицательных температурах) эта зависимость становится нелинейной. Большей линейностью отличаются характеристики медных ТС и меньшей – платиновых ТС.

Температура терморезистора, а следовательно, и величина его сопротивления при установившемся тепловом равновесии определяются многими факторами: температурой окружающей среды; электрическим током через датчик;

геометрическими размерами датчика, его конфигурацией, наличием (или отсутствием) защитной арматуры; физическими свойствами окружающей среды; скоростью перемещения газовой или жидкой среды, в которую погружен датчик и т. д.

Зависимость сопротивления датчика от перечисленных выше факторов позволяет использовать терморезисторы для измерения различных неэлектрических величин (температуры, скорости перемещения жидкости или газа и т.д.).

К недостаткам рассматриваемых датчиков следует отнести сравнительно большую инерционность, нелинейность зависимости $R = f(\theta)$, большой разброс параметров у термисторов и т. д.

Более подробно с терморезисторными датчиками можно познакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке (справочные данные, например, см. в [3, 32, 37, 38]).

9.3.6. Индуктивные датчики

Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении их индуктивности под воздействием входной величины (перемещения, усилия).

Различают датчики короткоходовые и длинноходовые, нормального исполнения и дифференциальные, а также магнитоупругие датчики, в основу которых положено свойство ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость при упругих деформациях.

Короткоходовые датчики. Схемы, поясняющие их работу, приведены на рис. 9.9.

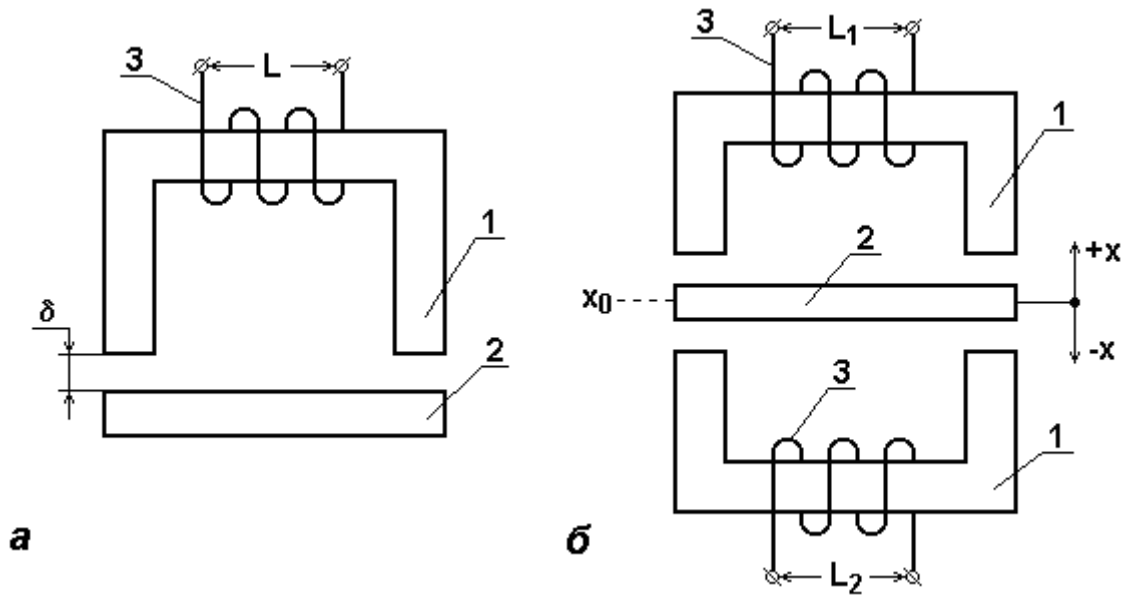


Рис. 9.9. Схемы короткоходовых датчиков нормального (*а)* и дифференциального исполнения (*б)*: 1 – магнитопроводы из магнитомягкого материала; 2 – сердечники из магнитомягкого материала; 3 – обмотки датчиков; L, L_1, L_2 – индуктивности датчиков;δ – воздушный зазор; x_0 – начальное положение сердечника

Индуктивность датчика L с воздушным зазором δ (рис. 9.9, *а*) определяется следующим выражением:

$$L = \frac{w^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{2\delta + l/\mu}, \qquad (9.12)$$

где w – число витков;

μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

S – площадь поперечного сечения магнитопровода;

l – длина магнитопровода;

δ – воздушный зазор;

μ – относительная магнитная проницаемость.

Из соотношения (9.12) следует, что индуктивность датчика зависит от воздушного зазора (обратно пропорциональна значению зазора), а также от значения величин w, S, l и μ. Конструкция датчиков, приведенных на рис. 9.9, *а* и на рис. 9.9, *б*, позволяет реализовать только зависимость $L = f(\delta)$ или $L = f(x)$. При другой конструкции может быть использована зависимость индуктивности датчика от геометрических размеров магнитопровода, магнитной проницаемости материала магнитопровода или числа витков катушки.

Графики статических характеристик преобразования рассматриваемых индуктивных датчиков приведены на рис. 9.10.

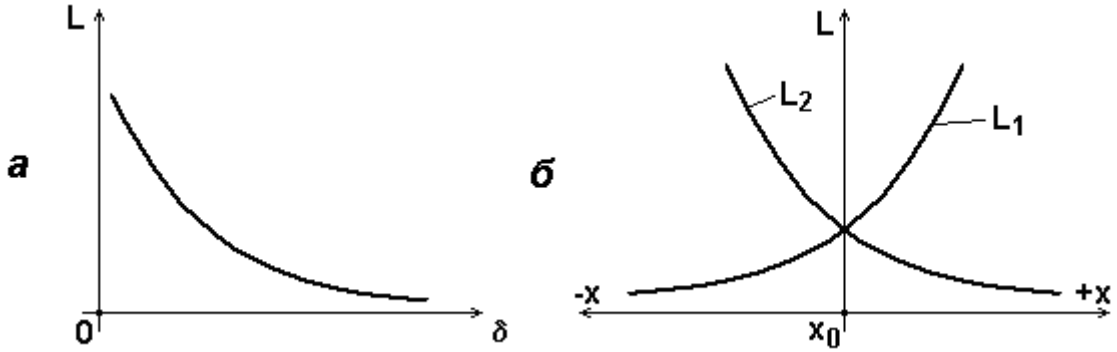


Рис. 9.10. Графики зависимостей $L = f(\delta)$, $L_1 = f_1(x)$ и $L_2 = f_2(x)$ для короткоходовых индуктивных датчиков: *а* – одинарные датчики; *б* – дифференциальные датчики

Короткоходовые индуктивные датчики применяются для измерения малых перемещений (от 0,01 до 5 мм) и других неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение (усилие, давление, вращающий момент и т. п.).

К недостаткам индуктивных датчиков следует отнести нелинейность статических характеристик преобразования, зависимость индуктивного сопротивления датчика от частоты источника питания и от температуры окружающей среды, большое обратное воздействие датчика на объект исследования.

Достоинства индуктивных датчиков: простота, надежность, отсутствие подвижных контактов, относительно большая величина отдаваемой электрической мощности, возможность работы на переменном токе промышленной частоты.

Длинноходовые датчики. Схемы, поясняющие их работу, приведены на рис. 9.11, где рассмотрены датчики нормального исполнения (рис. 9.11, *а*) и датчики дифференциальные (рис. 9.11, *б*).

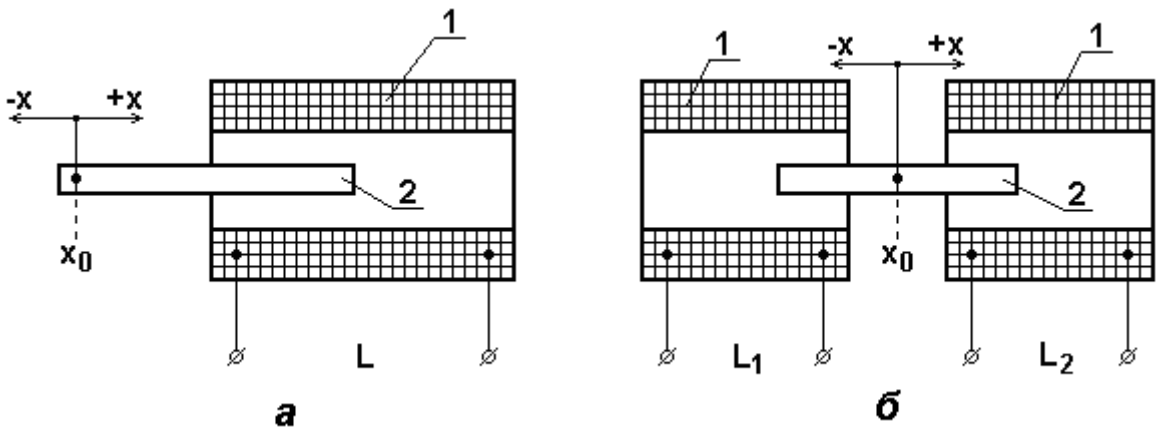


Рис. 9.11. Схемы длинноходовых датчиков нормального (*а)* и дифференциального (*б)* исполнения: 1 – катушки (с числом витков *w*); 2 – сердечник (плунжер)

Сердечники рассматриваемых датчиков часто называют плунжерами. Отсюда и название этих датчиков, встречающееся в литературе, – «плунжерные датчики». Сердечники (плунжеры) могут быть ферромагнитные (из магнитомягкого материала) и диамагнитные (например, из меди).

Известно, что введение ферромагнитного сердечника увеличивает индуктивность катушки, а введение диамагнитного – уменьшает. Это обстоятельство приводит к существенному различию характеристик длинноходовых датчиков с ферромагнитными и диамагнитными сердечниками.

Индуктивность катушки с сердечником (чем по существу являются длинноходовые датчики) определяется выражением

$$L = \mu_0 \cdot \mu \cdot w^2 \cdot S / l \,, \qquad (9.13)$$

где μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника (для ферромагнитных материалов $\mu >> 1$; для диамагнитных материалов $\mu < 1$);

w – число витков;

S, l – площадь и длина катушки.

Из (9.13) следует, что индуктивность длинноходовых датчиков прямо пропорциональна магнитной проницаемости материала сердечников (плунжеров), площади их поперечного сечения, квадрату числа витков и обратно пропорциональна длине катушки датчика.

Графики статических характеристик преобразования рассматриваемых датчиков приведены на рис. 9.12.

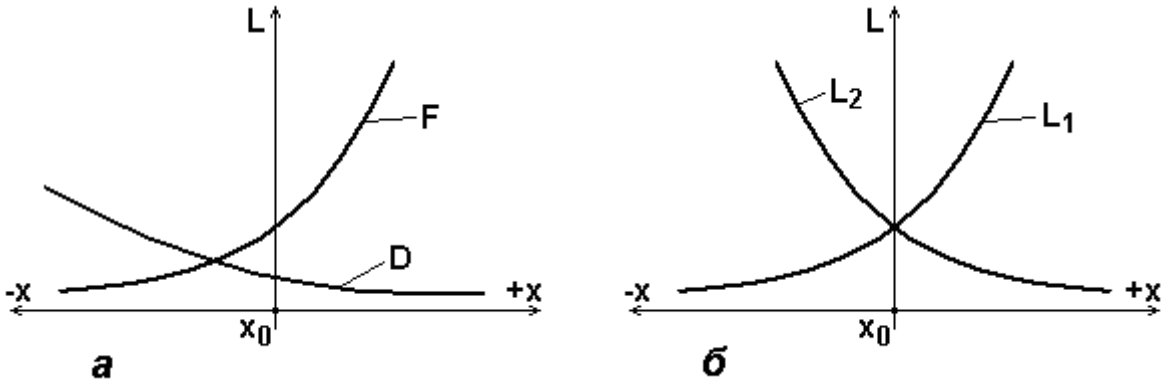


Рис. 9.12. Графики зависимостей $L = f(x)$ для длинноходовых датчиков: *а* – нормальные датчики; *б* – дифференциальные датчики; *F* – ферромагнитные сердечники; *D* – диамагнитные сердечники; L_1, L_2 – индуктивности дифференциальных датчиковпри использовании ферромагнитных сердечников

Применяются длинноходовые индуктивные датчики для измерения больших перемещений. Для датчиков с ферромагнитными сердечниками (плунжерами) перемещения могут составлять до 10-15 см, а для датчиков с диамагнитными сердечниками (плунжерами) – до 20-30 см и даже более.

Датчики с ферромагнитными сердечниками имеют нелинейные статические характеристики преобразования и высокую чувствительность. Чувствительность датчиков с диамагнитными сердечниками много ниже, но зато и их статические характеристики преобразования ближе к линейным.

Остальные достоинства и недостатки длинноходовых датчиков совпадают с достоинствами и недостатками короткоходовых датчиков (см. выше).

Магнитоупругие датчики – это датчики, индуктивность которых изменяется при упругих деформациях ферромагнитных сердечников. Схема, поясняющая работу таких датчиков, приведена на рис. 9.13, *а*.

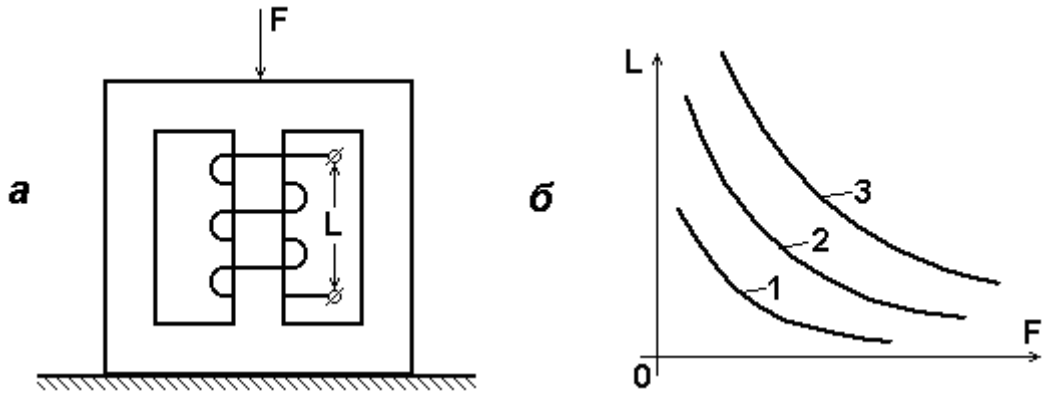


Рис. 9.13. Схема (*а)* и статические характеристики преобразования (*б)* магнитоупругих датчиков: *F* – усилие; *L* – индуктивность (1 – для м = м$_1$, 2 – для м = м$_2$, 3 – для м = м$_3$)

На рис. 9.13, *б* приведены статические характеристики преобразования магнитоупругих датчиков. Характеристики приведены для датчиков из различных ферромагнитных магнитомягких материалов, отличающихся друг от друга магнитной проницаемостью ($\mu_1<\mu_2<\mu_3$).

Магнитоупругие датчики представляют собой катушки индуктивности с замкнутыми магнитопроводами, деформирующимися под влиянием входных величин (усилия или перемещения).

В исходном состоянии (при $F = 0$ или $F = F_{min}$) индуктивность такого датчика максимальна. При $F \neq 0$ или $F>F_{min}$ магнитопровод датчика деформируется, его магнитная проницаемость снижается и, как результат, уменьшается индуктивность. Значение индуктивности датчика L (при F = const) определяется соотношением

$$L = \frac{w^2 \cdot S}{l} \cdot \mu_0 \cdot \mu, \qquad (9.14)$$

где w – число витков;

S, l – площадь поперечного сечения и длина магнитопровода;

μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Магнитоупругие свойства материала датчика характеризуются относительной магнитоупругой чувствительностью K:

$$K = \frac{\Delta\mu / \mu}{\Delta l / l}, \qquad (9.15)$$

где $\Delta\mu$; Δl – изменения магнитной проницаемости и длины магнитопровода датчика.

Материалом для сердечников может быть пермаллой, никель, электротехническая сталь, феррит и др. Относительная магнитоупругая чувствительность для некоторых материалов приведена в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Магнитоупругие свойства материалов

Материал	**Состав**	**Относительная магнитоупругая чувствительность**
Пермаллой	68 % Ni 32 % Fe	250
	78,5 % Ni 21,5 % Fe	200
Никель	100 % Ni	100

Как правило, магнитоупругие датчики питаются от сети с частотой 50 Гц, но известны датчики с питанием от сети с повышенной частотой (от сотен герц до 20 кГц).

Магнитоупругие датчики применяются для измерения больших усилий (нажатия прокатных валков, массы автомобилей и железнодорожных вагонов и т. д.), а также для измерения деформаций в деталях конструкций (с помощью наклеиваемых датчиков).

К достоинствам магнитоупругих датчиков относятся их высокая надежность, сравнительная простота конструкции и большая мощность выходных сигналов.

Недостатком магнитоупругих датчиков является их малая точность, что объясняется наличием гистерезиса, изменением со временем характеристик, влиянием температуры окружающей среды и т. п.

Более подробно с индуктивными датчиками (короткоходовыми, длинноходовыми и магнитоупругими) можно познакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке в конце учебного пособия. Справочные данные по индуктивным датчикам см., например, в [3, 32, 37, 38].

9.3.7. Емкостные датчики

Действие емкостных датчиков основано на преобразовании входной (измеряемой) величины в электрическую емкость.

Для плоского конденсатора, образующего датчик с двумя электродами, можно записать:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{\delta}, \tag{9.16}$$

где C – емкость конденсатора;

ε_0 – электрическая постоянная (в системе СИ ε_0 = 8,85 пФ/м);

ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора;

S – площадь электродов (обкладок) конденсатора;

δ – расстояние между обкладками.

На рис. 9.14 приведены примеры основных типов емкостных датчиков.

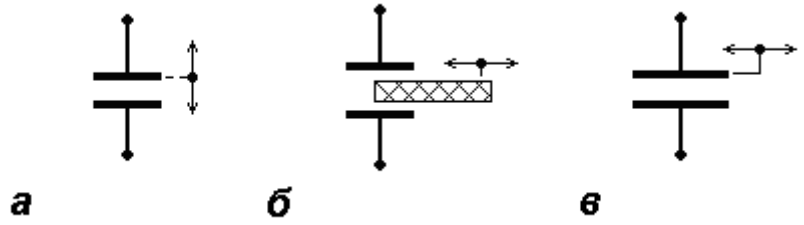


Рис. 9.14. Примеры основных типов емкостных датчиков

Изменение емкости возможно получить, изменяя:

1) расстояние между электродами (обкладками) конденсатора (рис. 9.14, *а*); в этом случае реализуется зависимость $C = f(\delta)$, где C – емкость конденсатора, δ – расстояние между электродами (обкладками) конденсатора;

2) диэлектрическую проницаемость диэлектрика или части его (рис. 9.14, *б*); в этом случае реализуется зависимость $C = f(\varepsilon)$, где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, расположенного между электродами (обкладками) конденсатора;

3) площадь электродов (обкладок), образующих емкостной датчик (рис. 9.14, *в*); в этом случае реализуется зависимость $C = f(S)$, где S – площадь электродов (обкладок) конденсатора.

Графики статических характеристик преобразования емкостных датчиков приведены на рис. 9.15.

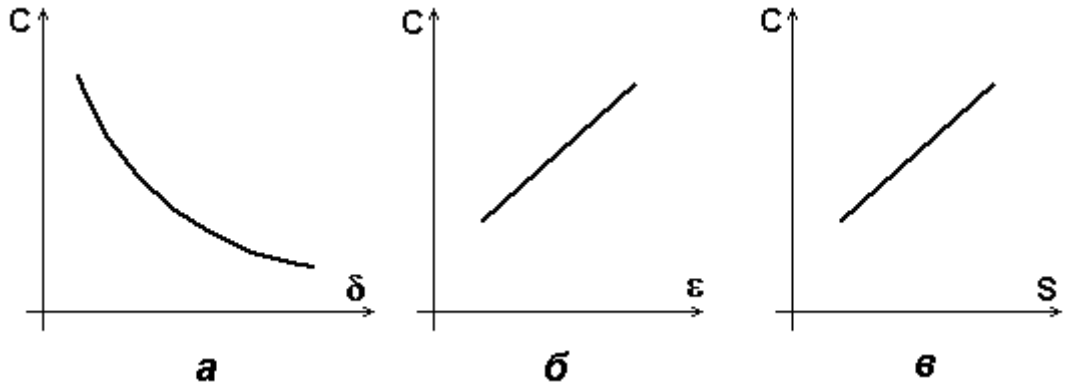


Рис. 9.15. Графики статических характеристик преобразования емкостных датчиков типов *а, б* и *в*

На практике наибольшее распространение получили емкостные датчики, построенные на принципе изменения расстояния между электродами, хотя такие датчики и имеют нелинейную статическую характеристику преобразования. Диэлектриком в этом случае может быть воздух, либо диэлектрическая жидкость, либо эластичный твердый диэлектрик (например, специальная резина).

Случай (*б*) представляет собой частный вариант случая (*а*) для измерения, например, диэлектрической проницаемости изоляционной ленты (или ее толщины), когда последняя проходит между обкладками конденсатора. Роль диэлектрика может выполнять жидкость при измерении, например, ее уровня.

Случай (*в*) представляет лишь одну из возможных конструкций датчиков, работающих на принципе изменения площади. Эта разновидность емкостных датчиков включает устройства такого типа, как поршень, движущийся в трубе, пластины с угловым перемещением относительно друг друга («переменные конденсаторы») и т. д.

Основными достоинствами емкостных датчиков являются: большая чувствительность, сравнительно малые размеры и вес и небольшое обратное действие на объект исследования (в отличие, например, от индуктивных датчиков, имеющих значительное обратное воздействие на объект исследования).

К числу недостатков емкостных датчиков следует отнести сильное влияние на результаты измерений паразитных емкостей и посторонних электрических полей, что требует очень тщательной экранировки этих датчиков; необходимость применения источников питания высокой частоты (от нескольких килогерц до десятков мегагерц). При низких частотах реактивное сопротивление датчика $x_c = 1/\omega C$ весьма велико, так как собственная емкость датчика мала и составляет десятки (в лучшем случае – сотни) пикофарад, а также имеются существенные погрешности от воздействия температуры окружающей среды (температура влияет на геометрические размеры датчика и на диэлектрическую проницаемость жидких и твердых диэлектриков).

Наибольшее применение емкостные датчики получили при измерении малых перемещений, параметров вибраций, размеров изделий (например, толщины ленты из диэлектрика), углов наклона, уровней жидкостей, влажности и т. п.

Более подробно с емкостными датчиками можно познакомиться по литературным источникам, приведенным в библиографическом списке в конце учебного пособия. Справочные данные по этим датчикам см., например, в [37].

9.4. Генераторные датчики

9.4.1. Термоэлектрические датчики

Термоэлектрические датчики состоят из двух разнородных проводников А и В, соединенных между собой в двух точках, как схематически показано на рис. 9.16, *а*.

На практике термоэлектрические датчики принято называть термопарами (ТП).

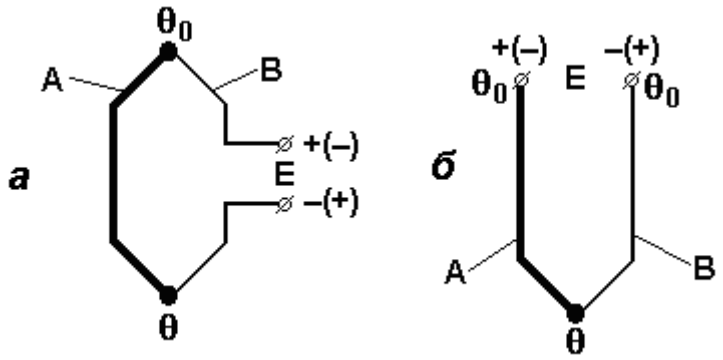


Рис. 9.16. Принципиальные схемы термоэлектрических датчиков (термопар):
A; B – проводники из разнородных материалов; θ; θ_0 – температуры спаев; E – термоЭДС

Рассмотрим схему ТП, приведенную на рис. 9.16, *а,* на которой представлена термопара из двух разнородных проводников А и В с двумя спаями. Один из спаев (рабочий, или «горячий») помещается (в соответствующей арматуре) в место измерения температуры, а другой (свободный, или «холодный») находится во внешней цепи. В нашем случае «горячий» спай ТП имеет температуру θ, а «холодный» спай ТП – θ_0.

ТермоЭДС, генерируемая термопарой, может быть записана в виде

$$E \cong K(\theta - \theta_0) \qquad (9.17)$$

где E – термоЭДС;

K – коэффициент, зависящий от материала электродов А и В.

Соотношение (9.17) соответствует линейной статической характеристике преобразования и правомерно лишь в первом приближении. Реальные характеристики ТП нелинейны и задаются, как правило, в виде таблицы. Другим приближением (9.17) является рассмотрение термоЭДС для «холостого хода». Т. е. подразумевается, что к точкам схемы (±) на рис. 9.16, *а* нет подключения какого-либо прибора. В действительности же такое подключение всегда есть, и в этом случае необходимо учитывать влияние на результирующую термоЭДС соединительных проводов. Для сведения этого влияния к минимуму используются специальные удлинительные провода, получившие название *компенсационных*. Кроме того, применяются схемные решения для компенсации температуры холодных спаев. Таким образом, при использовании ТП необходимо про-

вести подбор удлинительных проводов, выполнить компенсацию температуры холодных спаев и линеаризацию статических характеристик преобразования.

Описанный термоэлектрический эффект открыт в 1823 г. немецким физиком Зеебеком. Отсюда в литературе (особенно иностранной) прямой термоэлектрический эффект часто называют эффектом Зеебека.

В 1834 г. французский физик Пельтье открыл обратный термоэлектрический эффект, называемый также эффектом Пельтье. Суть эффекта Пельтье заключается в следующем. При протекании электрического тока через спай разнородных проводников спай нагревается при одном направлении тока и охлаждается при другом направлении тока. Нагрев или охлаждение спая прямо пропорциональны току и невелики, но все же понижения температуры спая, например, достаточно для построения микрохолодильников, которые могут использоваться при охлаждении транзисторов, интегральных микросхем и т.п. устройств. В измерительных целях обратный термоэлектрический эффект практически не используется, но учитывать его необходимо (он приводит к дополнительным погрешностям). Для сведения погрешностей от этого эффекта к минимуму надо уменьшить измерительный ток через термопару и ее спай. Это достигается использованием измерительных приборов с большим входным сопротивлением или приборов компенсационного типа.

В качестве электродов ТП могут использоваться чистые металлы, сплавы и полупроводники. Чувствительность ТП из чистых металлов составляет единицы микровольт на градус Цельсия, из сплавов – десятки микровольт на градус Цельсия, из полупроводников – сотни и даже тысячи микровольт на градус Цельсия.

Типы термоэлектрических преобразователей (ТП), условные обозначения номинальных статических характеристик (НСХ) преобразования ТП, материалы термоэлектродов и диапазоны измеряемых температур должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.585 – 2001 [50] (табл. 9.6).

Стандарт [50] нормирует номинальные статические характеристики (НСХ) преобразования термопар при температуре холодного спая $\theta_0 = 0I$ °С,

пределы допускаемых отклонений термоЭДС ТП от номинального значения и аппроксимирующие полиномы НСХ преобразования. НСХ преобразования ТП приведены в виде таблиц (интервал температуры рабочего (горячего) спая 1 °С). Значения термоЭДС даны с точностью до 0,001 мВ. В качестве примера ниже приведены НСХ преобразования ТП для стандартных термопар (табл. 9.7).

В соответствии с ГОСТ Р 8.585–2002 [50] могут быть использованы (кроме приведенных в табл. 9.6) следующие термопары:

ТПП (*R*) – платинородий / платиновые с диапазоном измерения от 0 до 1600 ^{0}С;

ТХК$_Н$(*E*) – хромель / константановые с диапазоном измерения от –200 до 900 ^{0}С;

ТМК$_Н$(*T*) – медь / константановые с диапазоном измерения от –200 до 400 ^{0}С;

ТНН(*N*) – нихросил / нисиловые с диапазоном измерения от –250 до 1300 ^{0}С;

ТЖК$_Н$(*J*) – железо / константановые с диапазоном измерения от 0 до 900 ^{0}С.

Таблица 9.6

Характеристики термоэлектрических преобразователей (ТП) по ГОСТ Р 8.585 – 2002 [50]

Обозначение ТП		**Материал термоэлектродов**		**Диапазон измеряемых температур, °С**
		положительного	**отрицательного**	
русское	**международное**			
1	2	3	4	5
ТВР	А–1 А–2 А–3	Сплав вольфрам-рений ВР–5 (95 % W+5 % Re)	Сплав вольфрам-рений ВР–20 (80 % W + 20 % Re)	0...2500 0...1800 0...1800
ТПР	В	Сплав платинородий ПР–30 (70 % Pt+30 % Rh)	Сплав платинородий ПР–6 (94 % Pt+6 % Rh)	600 – 1800
ТПП	S	Сплав платинородий ПР–10 (90 % Pt+10 % Rh)	Платина (Pt)	0 – 1600
ТХА	К	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5 %Ni+9,5 % Cr)	Сплав алюмель НМц АК2-2-1 (94,5 % Ni+5,5 % Al, Si, Mn, Co)	минус 250 – плюс 1300
ТХК	L	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5 % Ni +9,5 % Cr)	Сплав копель МНМЦ 43-0,5 (56 % Cu+44 % Ni)	минус 200 – плюс 800
ТМК	М	Медь М1 (Cu)	Сплав копель МНМЦ 43-0,5 (56 % Cu + +44 % Ni)	минус 200 – плюс 100

Примечание. Химический состав материалов термоэлектродов ориентировочный.

Таблица 9.7

Номинальные статические характеристики преобразования стандартных ТП по ГОСТ Р 8.585-2002 [50]

(температура свободных концов 0 °С). ТермоЭДС всех ТП при 0 °С E_0 = 0,000 мВ

Термоэлектрические преобразователи			**ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С**						
Наименование	**Обозначение**		**–200**	**+100**	**800**	**1300**	**1600**	**1800**	**2500**
	русское	**международное**							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вольфрам-рений / вольфрамрениевые	ТВР	A1	–	1,337	12,934	20,589	24,593	26,998	33,640
Платинородий / платинородиевые	ТПР	B	–	–	3,154	7,848	11,263	13,591	–
Платинородий / платиновые	ТПП	S	–	0,646	7,345	13,159	16,777	–	–
Хромель / алюмелевые	ТХА	K	–5,891	4,096	33,275	52,410	–	–	–
Хромель / копелевые	ТХК	L	–9,488	6,862	66,466	–	–	–	–
Медь / копелевые	ТМК	M	–6,154	4,722	–	–	–	–	–

Конструктивно термопары выполняются в виде трубчатого чехла, содержащего в себе термоэлектроды и клеммовую головку. Материалом для чехлов служат химически стойкие тугоплавкие металлы и металлические соединения. Наиболее часто используются стали 1Х18Н9Т (до 800I °С) и Х27 (до 1300I °С), фарфор, кварц, окись алюминия (до 1600I °С) и др.

Термоэлектрические преобразователи (ТП) выпускаются серийно на многих приборостроительных предприятиях. В частности, Челябинским АПО «Теплоприбор» разработаны и освоены ТП для измерения температур в различных средах [84].

Например, платина-платинародиевые и платинародий-платинородиевые термопары ТПП-0192, ТПР-0192, ТПР-0292 предназначены для измерения температуры в окислительных средах и нейтральных газовых средах. Тепловая инерция – не более 90 с, материал защитной арматуры – корунд.

Бескорпусные термопары ТПП-0392 и ТПР-0392, а также хромель-алюмелевые ТХА-0292 и хромель-копелевые ТХК-0292 предназначены для измерения температуры воздуха, инертных газов и газов без серосодержащих веществ. Тепловая инерция – не более 5 с.

Более подробно с термоэлектрическими датчиками можно познакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке в конце учебного пособия (см., например, [32, 37, 50]).

9.4.2. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики (пьезодатчики) используют свойство некоторых естественных кристаллических веществ и искусственных текстур электролизоваться под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформироваться в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Пьезоэффект обладает «знакочувствительностью», т. е. заряды меняют знак при замене сжатия растяжением и меняется знак деформации при изменении направления электрического поля.

Пьезоэффектом обладают многие кристаллические вещества (кварц, турмалин, сегнетовая соль и др.), а также искусственно создаваемые и специально

поляризуемые пьезокерамики (титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и т. п.).

Описанные эффекты поясняют рис. 9.17, *а* и рис. 9.17, *б*.

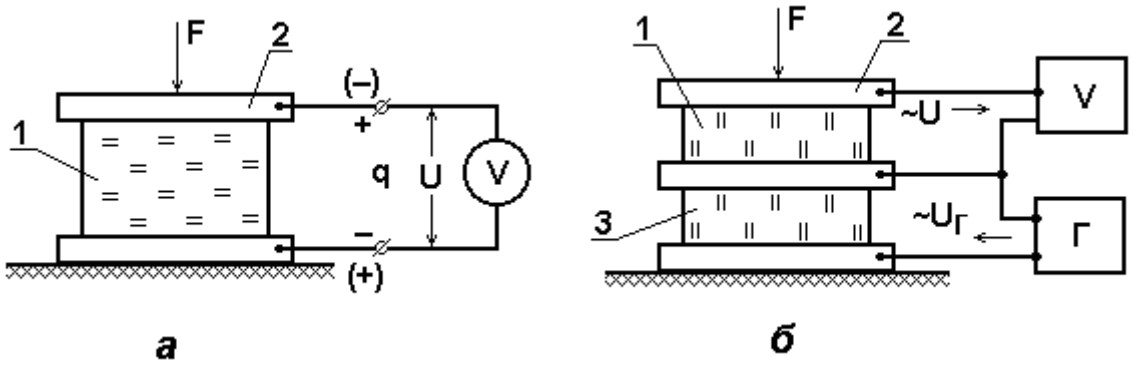


Рис. 9.17. Схемы пьезоэлектрических датчиков с одним (*а*) и двумя (*б*) пьезоэлементами: 1 – измерительные пьезоэлементы; 2 – контактные пластины; 3 – модуляционный пьезоэлемент; V – вольтметры; Г – генератор; F – сила; U – измеряемое напряжение; $U_Г$ – напряжение на выходе генератора; q – электрический заряд

Напряжение на входе вольтметра (см. рис. 9.17, *а*) запишется в виде

$$U = \frac{q}{C_0 + C_1 + C_2}, \tag{9.18}$$

где C_0 – емкость пьезодатчика;

C_1 – емкость соединительных проводов;

C_2 – входная емкость вольтметра.

Значение заряда q, возникающего на пьезоэлементе при его деформации силой F, определяется соотношением

$$q = \delta \cdot F \tag{9.19}$$

где δ – пьезомодуль.

Пьезомодуль δ зависит от материала пьезоэлемента. Например, для кварца $\delta \approx 10^{-12}$ Кл/Н; для пьезокерамики $\delta \approx 10^{-10}$ Кл/Н (табл. 9.8).

Возникающие при разовой деформации заряды стекают через входное сопротивление вольтметра и изоляцию проводников, что приводит лишь к кратковременным отклонениям вольтметра от нулевых показаний. Следовательно, пьезоэлектрические датчики по схеме рис. 9.17, *а* могут быть использованы для измерения только переменных величин (изменяющихся давлений, вибраций, ускорений и т.д.) и не пригодны для измерения статических величин.

Использование обратного пьезоэффекта позволяет строить модуляционные пьезодатчики, пригодные для измерения статических величин. Схема модуляционного пьезодатчика приведена на рис. 9.17, *б*.

Под воздействием переменного напряжения $U_Г$, подаваемого на модуляционный пьезоэлемент, последний начинает деформироваться («вибрировать») с частотой поданного напряжения. Возникшая вибрация передается на измерительный пьезоэлемент и приводит к его деформации. Причем значения деформации и, следовательно, напряжения U зависят и от «вибраций», и от значения силы F, воздействующей на систему из двух пьезоэлементов. В целом получается модуляционный пьезодатчик, пригодный для измерения статических величин.

Возможно включение одного пьезоэлемента – резонатора, в котором используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты. При включении такого пьезоэлемента в резонансный контур генератора частота генерируемых электрических колебаний будет определяться геометрическими размерами пьезоэлемента. При изменении геометрических размеров под воздействием, например, механических сил собственная резонансная частота пьезоэлемента изменится и соответственно изменится частота генерируемых колебаний. Этот принцип используется при измерении с помощью пьезодатчиков статических и динамических усилий, давлений и других величин, с предварительным преобразованием этих величин в частоту электрических сигналов.

Характеристики пьезодатчиков и значения коэффициентов, связывающих электрические и механические параметры, зависят от материала используемого пьезоэлемента, от его размеров и от типа среза. Для характеристики типа среза применяется условное буквенно-цифровое обозначение. От типа среза зависит характер воздействия на пьезоэлемент (продольное, поперечное, кручение, изгиб), на которое он реагирует в наибольшей степени. Характеристики некоторых материалов приведены в табл. 9.8. Пьезомодуль δ, приведенный в табл. 9.8, соответствует деформации пьезоэлемента по толщине (для турмалина – по объему) и срезу материала, обеспечивающему максимальное значение пьезомодуля

(при другом срезе и другом виде деформации рассматриваемый пьезомодуль имеет меньшее значение).

Таблица 9.8

Характеристики некоторых пьезоматериалов

Материал	ε	δ, 10^{-12} Кл/Н	$R_М$, 10^3 Ом·м	$F_Д$, 10^6 Н/м^2	Допускаемая температура, °С
Кварц	4,5	2,3	>1000	98	550
Турмалин	6,6	2,4	>100	–	–
Керамика А	1700	190	>100	80	70
Керамика В	1200	140	>100	80	70
TCL 1	1400	150	>30	–	70

Примечания: ε – относительная диэлектрическая проницаемость (при отсутствии деформации); $R_М$ – удельное объемное сопротивление; $F_Д$ – допустимое напряжение.
Более подробно с пьезоэлектрическими датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [1, 3, 32, 37]).

9.4.3. Индукционные датчики

Действие датчиков этой группы основано на использовании законов электромагнитной индукции.

По принципу действия индукционные датчики можно подразделить на две группы. В датчиках первой группы магнитное сопротивление на пути магнитного потока остается неизменным, а ЭДС наводится в катушке за счет ее перемещения (рис. 9.18, *а*) или за счет перемещения постоянного магнита (рис. 9.18, *б*). В датчиках второй группы как катушка, так и постоянный магнит неподвижны, а индуцированная ЭДС наводится за счет изменения полного магнитного сопротивления магнитной цепи (рис. 9.18, *в*).

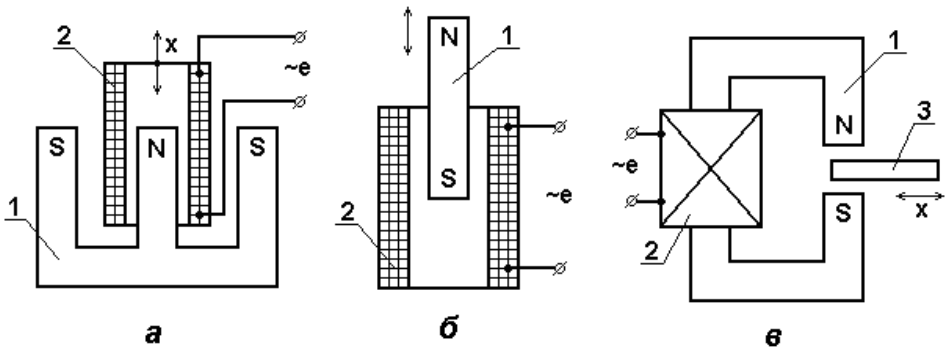


Рис. 9.18. Схемы индукционных датчиков: 1 – постоянный магнит;
2 – катушка с числом витков *w*; 3 – сердечник из магнитомягкого материала

Наводимая в катушке индукционного датчика ЭДС запишется в виде

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt}, \tag{9.20}$$

где e – значение ЭДС;

Ψ – потокосцепление;

t – время;

w – число витков катушки датчика;

Ф – магнитный поток.

Для первой группы датчиков наводимая ЭДС пропорциональна скорости движения катушки (или постоянного магнита) и определяется по формуле

$$e_1 = -Blw \cdot v_1, \tag{9.21}$$

где B – магнитная индукция;

l – средняя длина одного витка катушки;

w – число витков;

v_1 – скорость движения катушки (или постоянного магнита).

Для датчиков второй группы изменение магнитного сопротивления магнитопровода осуществляется изменением воздушного зазора или с помощью подвижных ферромагнитных сердечников различной формы (как показано, например, на рис. 9.18, *в*).

При линейном изменении магнитного потока Ф в зависимости от значения воздушного зазора (или от положения подвижного сердечника) наводимая в катушке ЭДС определяется соотношением

$$e_2 = -k_2 \cdot v_2, \tag{9.22}$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности;

v_2 – скорость изменения воздушного зазора или подвижного сердечника.

В общем случае значение ЭДС (см. выражение (9.20)) в зависимости от величины воздушного зазора (или положения подвижного сердечника) может быть нелинейным (или функциональным). Значение ЭДС в этом случае запишется в виде

$$e_3 = -k_3 \cdot f(x), \tag{9.23}$$

где k_3 – коэффициент пропорциональности;

x – величина воздушного зазора (или координата подвижного сердечника).

Непосредственно индукционные датчики могут применяться при измерении скорости линейного или углового перемещения, а также параметров, которые можно преобразовать в скорость (переменные усилия, переменные давления и т. п.). Совместно с интегрирующими и дифференцирующими элементами индукционные датчики можно использовать для измерения линейных или угловых перемещений и ускорений.

Индукционные датчики могут иметь частотный выход. В качестве частотного датчика индукционный датчик может иметь исполнение, например, в виде тахогенератора переменного тока. Частота напряжения, генерируемого таким генератором, определяется по формуле

$$f = \frac{p \cdot n}{60}, \tag{9.24}$$

где p – число пар полюсов тахогенератора;

n – число оборотов в минуту.

Таким образом, индукционный частотный датчик преобразует угловую скорость вала в частоту переменного тока.

Более подробно с индукционными датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [1, 3, 32, 38]).

9.4.4. Датчики Холла

Датчики этого типа используют эффект Холла, заключающийся в возникновении ЭДС на боковых гранях помещенной в магнитное поле проводящей пластинки, если по ней протекает ток (рис. 9.19).

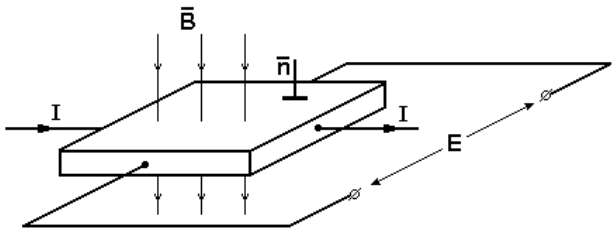


Рис. 9.19. Схема датчика Холла: I – значение тока; $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; E – ЭДС Холла; $\bar{n}$ – нормаль к плоскости датчика

Величина ЭДС Холла определяется выражением

$$E = \frac{1}{h} \cdot R_x \cdot I \cdot B \cdot \cos(\overline{B}\,\overline{n}), \qquad (9.25)$$

где h – толщина пластины;

R_x – постоянная Холла;

$(\widehat{\overline{B}\quad\overline{n}})$ – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости датчика.

Особенно значителен эффект Холла для германия (Ge), кремния (Si) и для некоторых других материалов. Постоянные Холла для полупроводниковых материалов имеют значения $(10^{-2}–10^{-4})$ м^3/(А·с), в то время как для чистых металлов – $(10^{-9}–10^{-12})$ м^3/(А·с). Например, для меди $R_x = 6 \cdot 10^{-11}$ м^3/(А·с).

Чувствительные элементы датчиков Холла имеют вид тонких пластинок (h = 0,01÷0,02 мм), которые вырезают из монокристаллов и шлифовкой доводят до необходимой толщины. Хорошими метрологическими характеристиками отличаются пленочные преобразователи Холла из тонких поликристаллических пленок на стеклянных подложках.

ЭДС Холла, как видно из выражения (9.25), пропорциональна произведению двух входных величин – тока и магнитной индукции. Соответственно датчики Холла можно использовать для измерения тока (I) или магнитной индукции (B). При этом другая («неизмеряемая величина») должна быть известна. При постоянных во времени I и B ЭДС Холла также постоянна. Если же одна из входных величин (B или I) переменная, то ЭДС Холла будет также переменной величиной с той же частотой, что и входная величина.

Данные по некоторым стандартным датчикам Холла приведены в табл. 9.9.

Таблица 9.9

Характеристики датчиков Холла

Тип	Номинальный ток, мА	Чувствительность по магнитной индукции, В/Тл	Входное сопротивление, Ом	Диапазон рабочих температур, °С	Размеры, мм	Материал
Х–111	10	0,20–0,45	30–180	-40…+80	1,5×0,8×0,2	Германий
Х–211	100	0,06–0,15	0,5–5	-60…+90	1,5×0,8×0,2	Арсенид индия
ДХГ–2	13–15	0,45	220–320	-60…+70	6×3×0,15	Германий
ДХК–14	6–9	0,6	500–1000	-150…+200	6×3×0,2	Кремний

Достоинством приборов на основе эффекта Холла является возможность измерения как постоянных, так и переменных токов, как постоянных, так и переменных магнитных индукций. Датчики Холла имеют малые размеры, что обеспечивает им хорошее пространственное разрешение. Недостатком является сравнительно большая зависимость ЭДС Холла от температуры. Основная погрешность обычно составляет от долей до единиц процентов, диапазон измерений – от тысячных долей до единиц тесла.

Более подробно с датчиками Холла можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [32, 37]).

9.4.5. Трансформаторные датчики

Трансформаторные датчики представляют собой трансформаторы, у которых под влиянием входного сигнала изменяются взаимные индуктивности обмоток, что приводит к изменению вторичного выходного напряжения.

Различают два вида трансформаторных датчиков: с подвижным сердечником и с подвижной обмоткой.

Датчики первого вида, в свою очередь, подразделяются на датчики с замкнутой и разомкнутой магнитными системами. По аналогии с индуктивными датчиками рассматриваемые датчики могут быть нормальными и диффе-

ренциальными, короткоходовыми и длинноходовыми. Примеры трансформаторных датчиков различного исполнения приведены на рис. 9.20.

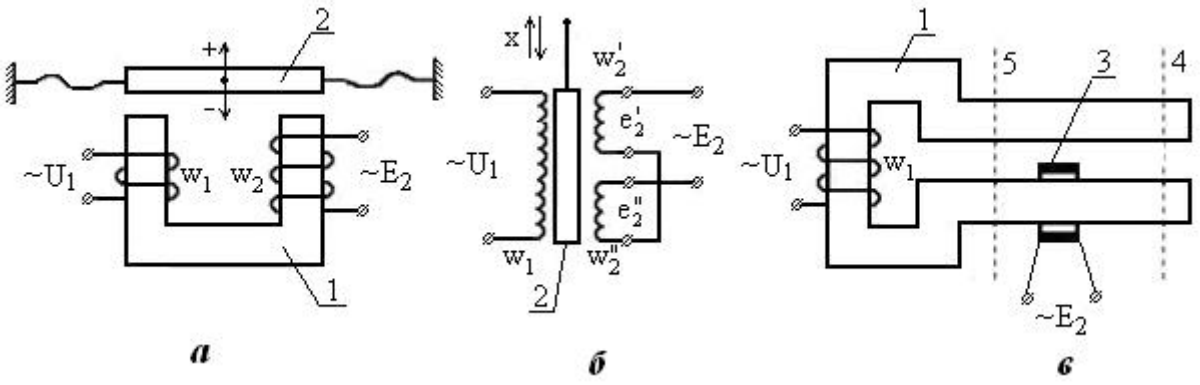


Рис. 9.20. Схемы трансформаторных датчиков: 1 – магнитопроводы из магнитомягкого материала; 2 – сердечники из магнитомягкого материала; 3 – подвижная катушка с числом витков w_2 (перемещается от положения 4 до положения 5)

На рис. 9.20, *а* изображен одинарный короткоходовый трансформаторный датчик нормального исполнения с замкнутым магнитопроводом. На первичную обмотку w_1 этого датчика подается от источника питания переменное напряжение U_1. Наводимая во вторичной обмотке ЭДС E_2 запишется в виде

$$E_2 = \omega \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{F}{Z_м} = f(x) \quad , \tag{9.26}$$

где ω – угловая частота;

w_1 – число витков первичной обмотки;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

F – магнитодвижущая сила;

$Z_М$ – магнитное сопротивление;

x – координата сердечника.

Таким образом, выходная ЭДС E_2 рассматриваемого датчика зависит от положения его сердечника, т. е. датчик преобразует перемещение сердечника в ЭДС E_2 (чем ближе сердечник к магнитопроводу, тем E_2 больше; чем дальше сердечник от магнитопровода, тем E_2 меньше). График зависимости $E_2 = f(x)$ приведен на рис. 9.21, *а*.

На рис. 9.20, *б* изображен дифференциальный длинноходовый датчик с разомкнутым магнитопроводом.

На первичную обмотку w_1 этого датчика подается переменное напряжение U_1. Во вторичной обмотке w'_2 наводится ЭДС e'_2, а во вторичной обмотке w''_2 наводится ЭДС e''_2. Благодаря встречному включению вторичных обмоток выходная ЭДС E_2 запишется в виде

$$E_2 = e'_2 - e''_2 = f(x), \tag{9.27}$$

где x – координата сердечника датчика.

Очевидно, что при некотором среднем положении сердечника $e'_2 = e''_2$ и $E_2 = 0$. При перемещении сердечника «вверх» (в сторону «+x») ЭДС e'_2 становится больше ЭДС e''_2 и $E_2 \neq 0$. При перемещении сердечника «вниз» (в сторону «–x») ЭДС e''_2 становится больше ЭДС e'_2 и $E_2 \neq 0$. График зависимости $E_2 = f(x)$ приведен на рис. 9.21, *б*.

На рис. 9.20, *в* изображен трансформаторный датчик с подвижной катушкой, которая может перемещаться от положения 4 до положения 5 вдоль магнитопровода. Наводимая в подвижной катушке ЭДС E_2 зависит от взаимной индуктивности между обмоткой этой катушки (являющейся вторичной) и обмоткой первичной катушки, на которую подается питающее переменное напряжение U_1. Датчик (рис. 9.20, *в*) предназначен для измерения больших линейных перемещений и, кроме катушек, содержит магнитопровод с рабочей частью в виде двух параллельных полос. При перемещении обмотки 3 от положения 4 до положения 5 индуцированная в обмотке 3 ЭДС возрастает. Зависимость ЭДС E_2 от координаты подвижной катушки «x» близка к линейной, если магнитное сопротивление участка магнитопровода 4–5 мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора. График зависимости $E_2 = f(x)$ для рассматриваемого датчика приведен на рис. 9.21, *в*.

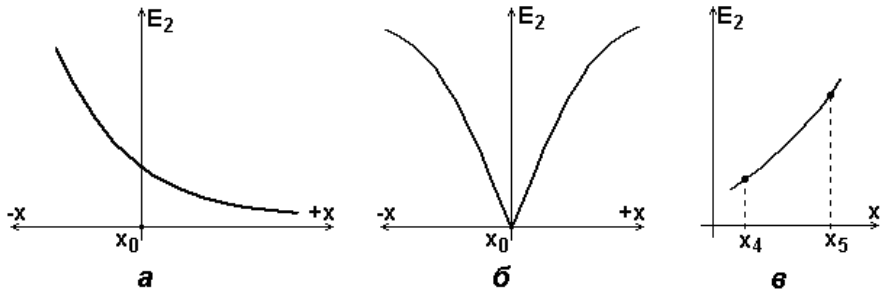


Рис. 9.21. Графики статических характеристик преобразования трансформаторных датчиков: *а* – для датчика нормального исполнения (рис. 9.20, *а*); *б* – для датчика дифференциального исполнения (рис. 9.20, *б*); *в* – для датчика с подвижной катушкой (рис. 9.20, *в*)

Трансформаторные датчики применяют для измерения линейных и угловых перемещений, а также для измерения физических величин, которые могут быть преобразованы в линейное или угловое перемещение (например, для измерения давления, расхода, силы и т. п.).

Трансформаторные датчики имеют много общего с датчиками индуктивными (область применения, достоинства, недостатки, конструкция и т. д.), но имеют и ряд преимуществ перед индуктивными датчиками. Их преимущества перед последними: отсутствие необходимости в использовании измерительных схем и отсутствие гальванической связи между цепями выхода и питания. К недостаткам трансформаторных датчиков следует отнести наличие температурных погрешностей, а также погрешностей от воздействия внешних электромагнитных полей и ферромагнитных тел. Существует даже ряд исполнений трансформаторных датчиков, реагирующих на приближение ферромагнитных тел и снабженных схемой с релейным выходом (реле близости).

Более детально с трансформаторными датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [1, 3, 32, 37]).

В настоящем учебном пособии рассмотрены наиболее распространенные типы датчиков, но далеко не все из известных датчиков и их разновидностей. Не рассмотрены в учебном пособии: ионизационные датчики, электромашинные, механотронные, струнные, электролитические, оптоэлектронные, магниторезистивные, электрохимические и некоторые другие. Часть из этих датчиков (например, ионизационные) рассматриваются в других учебных курсах, часть

из них (например, оптоэлектронные) являются разновидностью рассмотренных датчиков, часть носит узко специальный характер, а часть – сравнительно редко используется на практике. При необходимости со всеми перечисленными датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [3, 37, 38]).

9.5. Тенденции развития датчикостроения

Тенденции в развитии построения датчиков подчинены основным требованиям, которые предъявляются к современным средствам измерений: высокая точность и надежность, взаимозаменяемость отдельных узлов и элементов, самонастройка, устойчивость к внешним воздействиям, малые габариты и т. п.

Для реализации перечисленных требований постоянно совершенствуется технология изготовления датчиков и используются новые принципы их построения. Все шире в датчикостроении применяется интегральная микросхемная технология, все чаще датчики изготавливаются с использованием «*p*-*n*»-переходов, монокристаллов, тонких пленок. Применение, например, полупроводниковых материалов позволяет в ряде случаев значительно увеличить чувствительность и быстродействие датчиков, а также уменьшить их габариты и вес. Усовершенствование технологии и получение новых полупроводников на основе, например, кремния и арсенида галлия позволит в дальнейшем улучшить и другие характеристики датчиков (стабильность, повторяемость характеристик, устойчивость, взаимозаменяемость и т. п.).

Большие возможности имеет использование принципиально новых (по своим свойствам) материалов. К таким материалам, кроме уже упомянутых, можно отнести классические сверхпроводники и высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). Отметим, что классическая сверхпроводимость открыта голландским физиком Камерлинг-Оннесом в 1911 г. и проявляется при температурах, близких к температуре абсолютного нуля (например, при температуре жидкого гелия). В силу этого практическое использование данных материалов затруднено. Более перспективны ВТСП. Высокотемпературная сверхпроводимость, открытая в 1986 г., проявляется при температурах близких к температуре

жидкого азота. Например, материал $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ переходит в сверхпроводящее состояние при температуре около 90 К (–183 ^{0}C). Графики зависимостей $R = f(T)$ для этого материала приведены на рис. 9.22.

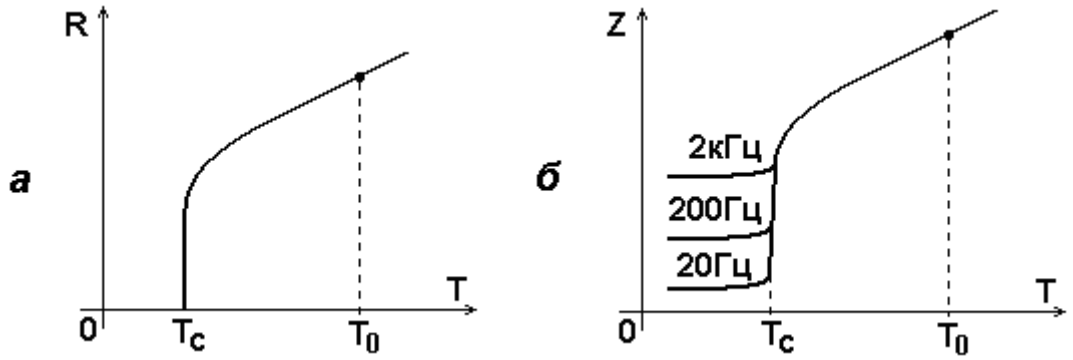


Рис. 9.22. Графики зависимостей $R = f(T)$ и $Z = f(T)$ для материала $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: *а* – измерения на постоянном токе; *б* – измерения на переменном токе

На рис. 9.22 приняты следующие обозначения: R – электрическое сопротивление; T – абсолютная температура в кельвинах (К); T_0 – исходная (комнатная) температура (T_0 = 373 К); T_C – критическая температура, при которой исследуемый материал переходит в сверхпроводящее состояние.

Отметим, что характер рассматриваемых зависимостей существенно изменяется при переходе от постоянного тока (рис. 9.22, *а*) к переменному (рис. 9.22, *б*). Если на постоянном токе при температуре T_C рассматриваемый материал переходит в сверхпроводящее состояние, то на переменном токе этого не происходит. На переменном токе следует рассматривать полное сопротивление $Z = R+jX$, где R – активная составляющая, а X – реактивная составляющая полного сопротивления. На переменном токе тоже есть «сверхпроводящий переход» при температуре материала T_C, но сверхпроводимость не наступает. За счет реактивной составляющей при T_C (и более низких температур) всегда имеется «остаточное сопротивление». Причем значение остаточного сопротивления растет с ростом частоты переменного тока, протекающего по исследуемому материалу (см. рис. 9.22, *б*). Описанные ВТСП благодаря их уникальным свойствам вполне могут послужить основой для построения датчиков нового поколения с новыми, присущими только им, характеристиками.

10. ДИНАМИКА ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

10.1. Исходные данные

В данной главе учебного пособия рассмотрена динамика термочувствительных датчиков при измерении с их помощью температуры окружающей среды. Представлено два случая: при изменении измеряемой температуры скачком и при ее изменении по линейному закону. Схема размещения датчика и принятые обозначения приведены на рис. 10.1.

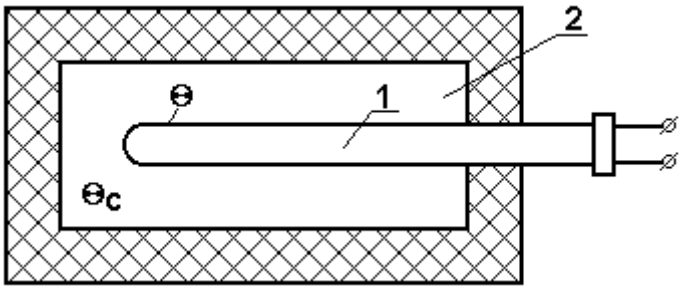


Рис. 10.1. Схема размещения датчика: 1 – датчик; 2 – среда (жидкость, газ), температура которой измеряется; θ – температура датчика; θ_C – температура среды

Датчики температуры (например, терморезисторы или термопары) обычно имеют защитные чехлы, предохраняющие их от различных механических и химических воздействий. Наличие защитных чехлов значительно повышает инерционность датчиков, что приводит к росту «отставания» его температуры от температуры окружающей среды. Это обстоятельство еще раз подчеркивает большое значение анализа динамических свойств датчиков температуры.

Для облегчения анализа примем ряд допущений. Будем полагать, что присутствие датчика не изменяет температуру окружающей среды и что рассматривается некоторая усредненная тепловая инерция датчика без разделения ее на тепловую инерцию чувствительного элемента, защитного чехла (одного или нескольких) и наполнителя, находящегося между защитным чехлом и чувствительным элементом, т. е. будем полагать, что рассматривается некоторый идеальный датчик, для которого правомерны допущения:

1) датчик монолитный и однородный;
2) термочувствительный элемент занимает весь объем датчика.

Конструкция стандартных датчиков с защитной арматурой не соответствует принятым допущениям (нет монолитности, однородности, и термочувствительный элемент занимает часть объема датчика).

Принятым допущениям соответствуют датчики, схемы которых приведены на рис. 10.2.

Рис. 10.2 Схемы идеальных термочувствительных датчиков:
а – терморезистор; *б* – термопара; θ – температура датчика; θ_C – температура среды

Для вывода дифференциального уравнения, описывающего изменение температуры датчика, предполагаем, что датчик с температурой θ помещается в среду с температурой θ_C. При этом на нагрев датчика будет расходоваться тепло dQ_1, связанное с параметрами датчика и его температурой соотношением

$$dQ = m \cdot c \cdot d\theta, \tag{10.1}$$

где m – масса датчика;

c – удельная теплоемкость материала датчика.

Тепло dQ_2, передаваемое датчиком среде, определяется соотношением

$$dQ_2 = S \cdot \beta \cdot (\theta_c - \theta) dt \tag{10.2}$$

где S – площадь поверхности датчика;

β – коэффициент теплопередачи;

t – время.

Условие теплового равновесия $dQ_1 = dQ_2$ запишется в виде

$$m \cdot c \cdot d\theta = S \cdot \beta \cdot (\theta_c - \theta) dt \tag{10.3}$$

Выражение (10.3) может быть приведено к виду

$$T \cdot \dot{\theta} + \theta = \theta_c, \tag{10.4}$$

где $T = \dfrac{m \cdot c}{S \cdot \beta}$ – постоянная времени;

$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ – первая производная от θ по времени.

Отметим, что T имеет размерность времени, а соотношение (10.4) является дифференциальным уравнением, описывающим поведение датчика температуры в динамическом режиме.

Выражение (10.4) правомерно для «идеальных» датчиков (см. рис. 10.2) и для принятых допущений. При наличии, например, защитного чехла появляется время чистого запаздывания, а при использовании многослойной изоляции кроме чистого запаздывания усложняется и зависимость $\theta = f(t)$ (в дальнейшем $\theta(t)$); соответствующее дифференциальное уравнение имеет более сложный вид, чем соотношение (10.4). Более детально данный вопрос освещен в литературе [3, 27, 32].

10.2. Скачкообразное изменение температуры

Начальные условия

При скачкообразном изменении температуры среды, окружающей датчик (от 0 до θ_0, рис. 10.3), исследуемое дифференциальное уравнение (10.4) принимает вид

$$T \cdot \dot{\theta}(t) + \theta(t) = \theta_0 \qquad (10.5)$$

где θ_0 – постоянная величина.

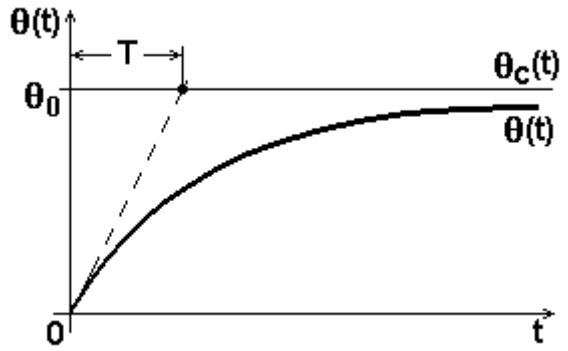


Рис. 10.3. Графики зависимостей θ_c (t) и θ (t) при скачкообразном изменении температуры окружающей датчик среды: $\theta_C(t)$ – температура окружающей среды; $\theta(t)$ – температура датчика

Начальные условия в рассматриваемом случае запишутся

для $t = 0$ $\theta(t) = 0$, $\theta_c = \theta_0$

Классический метод анализа

При классическом методе анализа дифференциального уравнения (10.5) решение имеет вид

$$\theta(t) = \theta_n(t)+\theta_y(t) \tag{10.6}$$

где $\theta_n(t)$ – характеризует переходный режим (общее решение);

$\theta_y(t)$ – характеризует установившийся режим (частное решение).

Общее решение исследуемого дифференциального уравнения (10.5) находится из однородного уравнения (10.7), на основе которого составляется характеристическое уравнение (10.8), имеющее корень λ (10.9).

$$T\cdot\lambda+1 = 0 \tag{10.8}$$

$$\lambda = -\frac{1}{T} \tag{10.9}$$

В данном случае характеристическое уравнение имеет один вещественный корень, и соответственно $\theta_n(t)$ имеет вид

$$\theta_n(t) = B\cdot e^{\lambda t} = B\cdot e^{-t/T} \tag{10.10}$$

где B – постоянная интегрирования.

Значение $\theta_y(t)$ определяется видом правой части исходного уравнения (10.5). При постоянной правой части (что имеет место в рассматриваемом случае) $\theta_y(t)$ – тоже постоянная величина:

$$\theta_y(t) = C \tag{10.11}$$

Таким образом, $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ запишутся в виде

$$\theta(t) = B\cdot e^{-t/T} + C \tag{10.12}$$

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{1}{T}\cdot B\cdot e^{-t/T} + 0 \tag{10.13}$$

Подставляя значения $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ в (10.7), получим

$$T\left(-\frac{1}{T}\cdot B\cdot e^{-t/T}\right) + B\cdot e^{-t/T} + C = \theta_0$$

или

$$-B\cdot e^{-t/T} + B\cdot e^{-t/T} + C = \theta_0$$

После приведения подобных (в последнем соотношении) определяется значение $C = \theta_0$.

Подставляя значение $C = \theta_0$ в (10.12), получим

$$\theta(t) = B \cdot e^{-t/T} + \theta_0 .$$

Для нахождения постоянной интегрирования «В» воспользуемся начальными условиями (при $t = 0$ $\theta(t) = 0$).

$$0 = B \cdot e^{0} + \theta_0 .$$

Учитывая, что $e^0 = 1$, находим, что постоянная интегрирования $B = -\theta_0$.

Итак, окончательно решение дифференциального уравнения (10.5) запишется в виде

$$\theta(t) = -\theta_0 \cdot e^{-t/T} + \theta_0 = \theta_0 (1 - e^{-t/T}) . \qquad (10.14)$$

Таким образом, при скачкообразном изменении температуры окружающей среды температура датчика изменяется по экспоненциальному закону. График зависимости $\theta = f(t)$ в соответствии с выражением (10.14) приведен на рис. 10.3.

Отметим, что с погрешностью ±5 % переходный процесс заканчивается за время, равное трем постоянным времени датчика T, т. е. через $t = 3T$ можно считать, что с указанной погрешностью температура датчика становится равной температуре окружающей среды.

За время $t = 5T$ переходный процесс заканчивается с погрешностью ±1 %.

Другими словами, за время $3T$ проходит 95 % переходного процесса, а за время $5T$ проходит 99 % переходного процесса.

Таким образом, постоянная времени T характеризует тепловую инерционность датчика. При больших T датчик медленно реагирует на изменения температуры окружающей среды, а при малых T датчик быстро «отрабатывает» изменения температуры.

В паспортных данных датчиков обычно приводятся значения не постоянной времени T, а значения близкой к ней величины, называемой «показатель тепловой инерции (ПТИ)». *ПТИ* по определению – это время, необходимое для

того, чтобы при внесении датчика в среду с постоянной температурой разность температур среды и любой точки внесенного в нее датчика стала равной 0,37 того значения, которое она имела бы в момент наступления регулярного теплового режима [51].

Различают датчики малоинерционные (ПТИ<10 секунд), датчики средней инерционности (ПТИ от 10 до 60 секунд) и датчики большой инерционности (ПТИ>60 секунд).

Метод определения показателя тепловой инерции изложен в литературе (см., например, [27]) и в настоящем учебном пособии не рассматривается. Значения показателя тепловой инерции для различных типов датчиков приведены, например, в справочнике [37].

Операторный метод анализа

При операторном методе решения дифференциального уравнения (10.5) необходимо его представить в виде операторного изображения, используя для этого преобразование Лапласа (подробней см. в литературе [29–32]):

$$T\cdot[p\cdot\theta(p)-\theta(0)]+\theta(p)=\theta_0/p \qquad (10.15)$$

где $\theta(p)$ – изображение по Лапласу оригинала $\theta(t)$;

$\theta(0)$ – значение $\theta(t)$ при $t = 0$.

Начальные условия для рассматриваемого уравнения сформулированы выше (отметим, что при $t = 0$ $\theta(0) = 0$; $\theta_c(0) = \theta_0$.

Решая уравнение (10.15) относительно $\theta(p)$ с учетом начальных условий, получим

$$\theta(p)=\frac{\theta_0}{p(Tp+1)} \qquad (10.16)$$

Для перехода от изображения $\theta(p)$ к оригиналу $\theta(t)$ воспользуемся данными табл. 10.1.

Таблица 10.1

Значения оригиналов и их изображений по Лапласу

№ п/п	Оригинал	Изображение
1	2	3
1	A	$\frac{A}{p}$
2	t	$1/p^2$
3	$f(t)$	$F(p)$
4	$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{p+\alpha}$
6	$t \cdot e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{(p+\alpha)^2}$
7	$\frac{t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} + \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha^2}$	$\frac{1}{p^2(p+\alpha)}$
5	$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{\alpha}{p(p+\alpha)}$

Для приведения выражения (10.16) к табличному виду разделим числитель и знаменатель этого выражения на величину T. При этом равенство (10.16) принимает вид

$$\theta(p) = \theta_0 \frac{1/T}{p(p+1/T)} \qquad (10.17)$$

Выражение (10.17) соответствует табличному значению изображения, приведенного в таблице под номером «5» (при $a = 1/T$).

Тогда в соответствии с таблицей оригинал изображения (10.17) запишется в виде

$$\theta(t) = \theta_0(1 - e^{-t/T}). \qquad (10.18)$$

Выражение (10.18) полностью совпадает с выражением (10.14), которое получено классическим методом. Соответственно полностью правомерны выводы по результатам решения дифференциального уравнения (10.5), сделанные выше.

10.3. Линейное изменение температуры

Начальные условия

При линейном изменении температуры окружающей среды, окружающей датчик (рис. 10.4), исследуемое дифференциальное уравнение (10.4) принимает следуюший вид:

$$T \cdot \dot{\theta}(t) + \theta(t) = \theta_0 + b \cdot t \qquad (10.19)$$

где b – коэффициент, характеризующий скорость линейного изменения температуры окружающей среды.

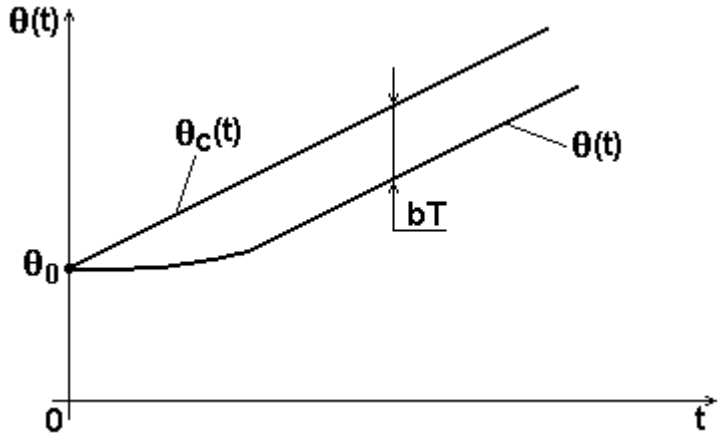


Рис. 10.4. Графики зависимостей $\theta_c(t)$ и $\theta(t)$ при линейном изменении температуры окружающей среды: $\theta_c(t)$ – температура окружающей среды; $\theta(t)$ – температура датчика

Начальные условия в рассматриваемом случае запишутся

для $t = 0$ $\theta(t) = 0$, $\theta_c = \theta_0$

Классический метод анализа

При классическом методе анализа дифференциального уравнения (10.19) остаются в силе положения, изложенные выше.

Величины $\theta_n(t)$ и $\theta_y(t)$ при этом принимают вид

$$\theta_n(t) = B \cdot e^{-t/T}, \qquad (10/20)$$

$$\theta_y(t) = C + D \cdot t, \qquad (10.21)$$

где B – постоянная интегрирования;

C и D – постоянные коэффициенты.

Соответственно $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ и запишутся в виде

$$\theta(t) = B \cdot e^{-t/T} + C + D \cdot t\,, \tag{10.22}$$

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{1}{T} B \cdot e^{-t/T} + D\,. \tag{10.23}$$

Подставляя значения $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ в исходное дифференциальное уравнение (10.19), получим

$$T\left[-\frac{1}{T} \cdot B \cdot e^{-\frac{t}{T}} + D\right] + B \cdot e^{-\frac{t}{T}} + C + D \cdot t = \theta_0 + b \cdot t\,. \tag{10.24}$$

Раскрыв скобки и выполнив приведение подобных, приводим выражение (10.24) к виду

$$T \cdot D + C + D \cdot t = \theta_0 + b \cdot t\,. \tag{10.25}$$

Уравнение (10.25) правомерно, если равны коэффициенты при переменной величине t, имеющей равные степени.

Отсюда получим:

для t^0 $$T \cdot D + C = \theta_0, \tag{10.26}$$

для t^1 $$D = b\,. \tag{10.27}$$

Совместное решение уравнений (10.26) и (10.27) дает значение коэффициента C:

$$C = \theta_0 - b \cdot T \tag{10.28}$$

Подставляя значения коэффициентов D и C в уравнение (10.28), получим

$$\theta(t) = B \cdot e^{-t/T} + \theta_0 - b \cdot T + b \cdot t\,. \tag{10.29}$$

Для определения постоянной интегрирования B воспользуемся начальными условиями (при $t = 0$ $\theta(0) = \theta_0$):

$$\theta_0 = B \cdot e^0 + \theta_0 - b \cdot T + b \cdot 0\,, \tag{10.30}$$

откуда получаем

$$B = b \cdot T\,. \tag{10.31}$$

В окончательном виде температура датчика запишется в виде

$$\theta(t) = \theta_0 + b \cdot t - b \cdot T(1 - e^{-t/T}). \qquad (10.32)$$

График зависимости $\theta = f(t)$ для рассматриваемого случая приведен на рис. 10.4.

Приведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1) при линейном изменении температуры окружающей среды температура датчика не равна этой температуре даже после окончания переходного процесса (при $t \to \infty$);

2) температура датчика меньше температуры окружающей среды на величину $b \cdot T$, где b – коэффициент, характеризующий скорость изменения температуры среды, а T – постоянная времени датчика, характеризующая его тепловую инерцию;

3) динамическая погрешность при измерении линейно изменяющейся температуры окружающей среды датчиком с постоянной времени T растет с ростом величин «b» и «T» и уменьшается при уменьшении величин «b» и «T».

Операторный метод анализа

В операторной форме уравнение (10.19) принимает вид

$$T\left[p \cdot \theta(p) - \theta(0)\right] + \theta(p) = \theta_0 / p + b / p^2, \qquad (10.33)$$

где $\theta(p)$ – изображение по Лапласу оригинала $\theta(t)$;

$\theta(0)$ – значение $\theta(t)$ при $t = 0$.

Начальные условия в рассматриваемом случае сформулированы выше (отметим, что при $t = 0$ $\theta(t) = \theta_0$; т. е. $\theta(0) = \theta_0$).

Решая уравнение (10.33) относительно $\theta(p)$ с учетом начальных условий, получим

$$\theta(p) = \frac{b + p \cdot \theta_0 + p^2 \cdot \theta_0 \cdot T}{p^2(Tp + 1)} \qquad (10.34)$$

или

$$\theta(p) = \frac{b}{p^2(Tp + 1)} + \frac{\theta_0}{Tp + 1} + \frac{\theta_0 \cdot T}{Tp + 1} \qquad (10.35)$$

Для приведения выражения (10.35) к табличному виду (см. табл. 10.1) разделим числитель и знаменатель этого выражения на величину T.

После деления на величину T и проведения необходимых преобразований выражение (10.35) примет вид

$$\theta(p) = \frac{b}{T} \cdot \frac{1}{p^2(p+1/T)} + \theta_0 \cdot \frac{1/T}{p(p+1/T)} + \theta_0 \cdot \frac{1}{p+1/T} \qquad (10.36)$$

Первый член выражения (10.36) соответствует изображению, приведенному в табл. 10.1 под номером 7, второй – под номером 5 и третий – под номером 4 (при $a = 1/T$).

Оригинал изображения (10.36) имеет вид

$$\theta(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{1/T} - \frac{1}{1/T^2} + \frac{e^{-t/T}}{1/T^2} \right) + \theta_0(1 - e^{-t/T}) + \theta_0 \cdot e^{-t/T} \qquad (10.37)$$

Раскрыв скобки и выполнив приведение подобных, окончательно получим

$$\theta(t) = \theta_0 + b \cdot t - bT(1 - e^{-t/T}) \qquad (10.38)$$

Выражение (10.38) целиком совпадает с выражением (10.32), полученным при анализе исследуемого дифференциального уравнения классическим методом. Соответственно полностью правомерны выводы, сделанные выше и для рассматриваемого случая при анализе дифференциального уравнения (10.19) операторным методом.

11. МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

11.1. Общие положения

В данной главе рассмотрены основные соотношения и терминология, используемые при анализе четырехплечих мостовых измерительных схем постоянного тока (рис. 11.1).

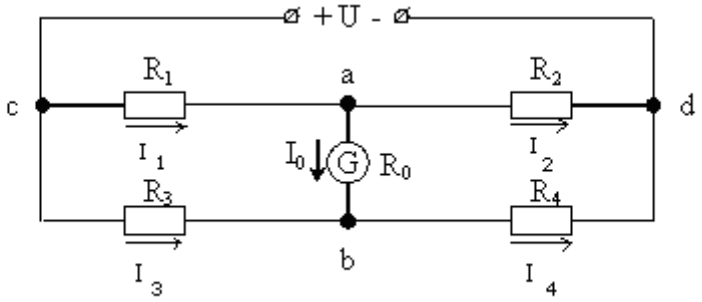


Рис. 11.1. Принципиальная электрическая схема четырехплечего измерительного моста: *U* – напряжение источника питания; *G* – измерительный прибор (например, микроамперметр магнитоэлектрической системы); *a–b* – измерительная диагональ; *c–d* – питающая диагональ; *c–a* – первое, *a–d* – второе, *c–b* – третье, *b–d* – четвертое плечи мостовой схемы; R_0 – внутренне сопротивление прибора в измерительной диагонали; I_0 – ток в измерительной диагонали

В рассматриваемом случае сопротивления плеч мостовой измерительной схемы равны R_1, R_2, R_3, R_4.

Ток в измерительной диагонали I_0 связан с остальными параметрами мостовой схемы соотношением

$$I_0 = U \cdot \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_0 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_4)}. \qquad (11.1)$$

Соотношение (11.1) может быть получено путем анализа мостовой измерительной схемы, приведенной на рис. 11.1, одним из методов электротехники (например, с использованием первого и второго законов Кирхгофа). Выражение (11.1) обычно именуют основным соотношением для таковой мостовой измерительной схемы.

При равновесии мостовой схемы ток в измерительной диагонали I_0 тождественно равен нулю. Отметим также, что если в момент считывания показа-

ний ток $I_0 = 0$, то мостовая схема называется равновесной, а если в момент считывания показаний ток $I_0 \neq 0$, то мостовая схема называется неравновесной.

Если значение R_0 (см. рис. 11.1) во много раз превосходит каждое из сопротивлений плеч моста, то мостовая схема называется потенциальной. Для потенциальных мостовых измерительных схем обычно принимают $R_0 \to \infty$, что позволяет считать ток $I_0 = 0$ и в качестве выходной величины рассматривать напряжение на измерительной диагонали U_0.

В этом случае падение напряжения на измерительной диагонали $U_0 = U_{ab}$ запишется в виде

$$U_0 = U_{ab} = U_a - U_b, \tag{11.2}$$

где U_a – потенциал точки a;

U_b – потенциал точки b.

$$U_a = I_1 \cdot R_1 = R_1 \cdot \frac{U}{R_1 + R_2}, \tag{11.3}$$

$$U_b = I_3 \cdot R_3 = R_3 \cdot \frac{U}{R_3 + R_4}, \tag{11.4}$$

где U , R_1, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

Подставляя значения U_a и U_b в (11.2), получим

$$U_0 = U \frac{R_1(R_3 + R_4) - R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \tag{11.5}$$

После раскрытия скобок и приведения подобных выражение (11.5) принимает вид

$$U_0 = U \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \tag{11.6}$$

Выражение (11.6) обычно именуют основным соотношением для потенциальной мостовой схемы.

При равновесии потенциальной мостовой схемы напряжение в измерительной диагонали U_0 тождественно равно нулю. Отметим также, что если в момент считывания показаний напряжение $U_0 = 0$, то любая мостовая схема на-

зывается равновесной, а если в момент считывания показаний напряжение $U_0 \neq 0$, то мостовая схема называется неравновесной.

Выражения (11.1) и (11.6) свидетельствуют, что как для токовой, так и для потенциальной мостовых измерительных схем равновесие наступает при выполнении условия

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{11.7}$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше.

Подробный анализ равновесных и неравновесных мостовых измерительных схем с выходом по току («токовые схемы») и с выходом по напряжению («потенциальные схемы») приводится ниже, в последующих главах учебного пособия.

Мостовые схемы с токовым выходом («токовые схемы») используются в том случае, когда внутреннее сопротивление измерительного прибора R_0 примерно равно каждому из сопротивлений плеч моста R_1, R_2, R_3, R_4 или отличается от них не более чем в 15–20 раз.

11.2. Основные соотношения при исследовании чувствительности

Для мостовых измерительных схем могут быть определены их чувствительности по мощности $S(P_0)$, по напряжению $S(U_0)$ и по току $S(I_0)$.

$$S(P_0) = \lim_{\Delta R \to 0} \frac{\Delta P_0}{\Delta R}, \tag{11.8}$$

$$S(U_0) = \lim_{\Delta R \to 0} \frac{\Delta U_0}{\Delta R}, \tag{11.9}$$

$$S(I_0) = \lim_{\Delta R \to 0} \frac{\Delta I_0}{\Delta R}, \tag{11.10}$$

где P_0, U_0, I_0 – соответственно мощность, напряжение и ток в измерительной диагонали;

ΔP_0, ΔU_0, ΔI_0 – изменения мощности, напряжения и тока в измерительной диагонали;

ΔR – изменение сопротивления датчика (вызвавшее изменение мощности, напряжения или тока в измерительной диагонали мостовой схемы).

При размещении датчика в 1–м плече мостовой схемы $\Delta R = \Delta R_1$, при размещении во 2–м плече $\Delta R = \Delta R_2$ и т. д. При размещении нескольких датчиков в одном, двух или нескольких плечах мостовой схемы ΔR имеет некоторое эквивалентное значение, зависящее от числа датчиков и от их размещения. Порядок определения эквивалентных значений ΔR рассмотрен ниже, в последующих главах учебного пособия.

Чувствительность по мощности, напряжению и току может быть оценена по приближенным формулам:

$$S(P_0) \approx \frac{\Delta P_0}{\Delta R}, \tag{11.11}$$

$$S(U_0) \approx \frac{\Delta U_0}{\Delta R}, \tag{11.12}$$

$$S(I_0) \approx \frac{\Delta I_0}{\Delta R}. \tag{11.13}$$

Чувствительность по мощности рассматривается в том случае, когда в измерительной диагонали включен прибор, внутреннее сопротивление которого соизмеримо с сопротивлениями плеч мостовой схемы. Например, при использовании приборов магнитоэлектрической системы, что обычно имеет место на практике, справедливо соотношение

$$\alpha = k \cdot \sqrt{\frac{P_0}{R_0}} \tag{11.14}$$

где α – показание прибора; k – постоянный коэффициент; P_0 – мощность, потребляемая прибором; R_0 – внутреннее сопротивление прибора.

Таким образом, при R_0 = const показания выходного прибора пропорциональны корню квадратному из мощности, потребляемой прибором.

Чувствительность по напряжению рассматривается в том случае, когда в измерительную диагональ включен прибор, внутреннее сопротивление которого значительно больше сопротивлений плеч мостовой схемы ($R_0 \to \infty$). На практике этот случай имеет место, когда в качестве измерителей используются, например, электронные вольтметры.

11.3. Основные соотношения при исследовании линейности

В данном параграфе учебного пособия приводятся основные соотношения при исследовании линейности четырехплечих мостовых измерительных схем (см. рис. 11.1) постоянного тока с выходом по току и по напряжению.

О линейности (или нелинейности) токовых мостовых измерительных схем можно судить по характеру зависимости (11.15), получаемой из (11.1) при изменении сопротивления датчика (или датчиков).

$$I_0 = f(\Delta R), \qquad (11.15)$$

где I_0 – ток в измерительной диагонали;

ΔR – изменение сопротивления датчика.

Линейность (или нелинейность) потенциальных мостовых измерительных схем характеризуется видом зависимости (11.16), получаемой из (11.16) при $\Delta R \neq 0$.

$$U_0 = f(\Delta R), \qquad (11.16)$$

где U_0 – напряжение на измерительной диагонали.

При анализе соотношений (11.15) и (11.14) обычно рассматривают несколько вариантов мостовых схем:

1) с одним датчиком ($\Delta R \neq 0$ в одном плече схемы);
2) с двумя датчиками ($\Delta R \neq 0$ в двух плечах схемы);
3) с тремя датчиками ($\Delta R \neq 0$ в трех плечах схемы);
4) с четырьмя датчиками ($\Delta R \neq 0$ в четырех плечах схемы).

Для анализа линейности неравновесных мостовых измерительных схем удобно принять следующие обозначения:

1) текущее сопротивление датчика в первом плече схемы $R_{g1} = R_1 + \Delta R_1$,
2) во втором плече $R_{g2} = R_2 + \Delta R_2$,
3) в третьем плече $R_{g3} = R_3 + \Delta R_3$,
4) в четвертом плече $R_{g4} = R_4 + \Delta R_4$,
5) где R_1, R_2, R_3, R_4 – начальные (исходные) сопротивления датчиков;
6) ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4 –изменение сопротивления соответствующих датчиков.

12. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ТОКОВЫЕ МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

12.1. Чувствительность токовых мостовых схем

12.1.1. Общие положения

Исследование чувствительности неравновесных токовых мостовых измерительных схем проводится при допущении, что используется один датчик, включенный в первое плечо мостовой схемы (рис. 12.1).

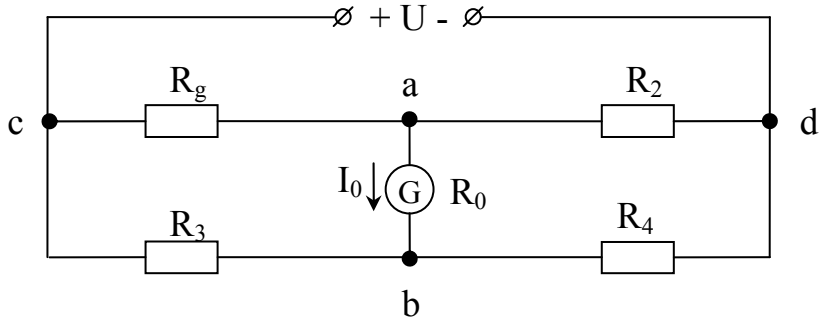


Рис. 12.1. Принципиальная схема неравновесного токового моста с одним датчиком

Для схемы, приведенной на рис. 12.1, ток в измерительной диагонали мостовой схемы I_0 имеет значение:

$$I_0 = U \frac{R_g R_4 - R_2 R_3}{R_0 (R_g + R_2)(R_3 + R_4) + R_g R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_g + R_2)}, \qquad (12.1)$$

где U – напряжение питания;

R_0 – сопротивление прибора в измерительной диагонали мостовой схемы;

R_g – сопротивление датчика;

R_2, R_3, R_4 – сопротивление плеч моста.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

1) сопротивление датчика R_g определяется соотношением

$$R_g = R_1 + \Delta R_1, \qquad (12.2)$$

где R_1 – начальное (исходное) сопротивление датчика;

ΔR_1 – изменение сопротивления датчика;

2) изменение сопротивления датчика много меньше сопротивления самого датчика, т. е.

$$\Delta R_1 << R_1, \tag{12.3}$$

где ΔR_1 и R_1 – определены выше;

3) в исходном состоянии мостовая схема уравновешена, т.е. справедливо равенство

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{12.4}$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше.

С учетом условий (12.2), (12.3) и (12.4) выражение (12.1) для тока I_0 в измерительной диагонали мостовой схемы принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{R_0(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_2(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + \Delta R_1 + R_4)}, \tag{12.5}$$

где I_0, U, R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, ΔR_1 – определены выше.

В зависимости от соотношения параметров различают следующие виды мостовых схем:

1) первой симметрии ($R_1 = R_2$; $R_3 = R_4$);

2) второй симметрии ($R_1 = R_3$; $R_2 = R_4$);

3) равноплечие ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$);

4) асимметричные ($R_1 \neq R_2$; $R_3 \neq R_4$).

Используя выражение (12.5), можно получить значения тока I_0 для каждого вида мостовых схем (для схем первой симметрии, второй симметрии, равноплечих и асимметричных).

Для схемы первой симметрии

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1}{2R_0(2R_1 + \Delta R_1) + 2R_1(R_1 + \Delta R_1) + R_4(2R_1 + \Delta R_1)} \tag{12.6}$$

Для схемы второй симметрии

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1}{R_0(R_1 + R_4 + \Delta R_1)(R_1 + R_4) + R_4(R_1 + \Delta R_1)(R_1 + R_4) + R_1 R_4 (R_1 + R_{4+}\Delta R_1)}. \tag{12.7}$$

Для равноплечей схемы

$$I_0 = U\frac{\Delta R_1}{2R_0\left(2R_1+\Delta R_1\right)+2R_1\left(R_1+\Delta R_1\right)+R_1\left(2R_1+\Delta R_1\right)}. \qquad (12.8)$$

Для асимметричной схемы

$$I_0 = U\frac{\Delta R_1}{R_0\left(R_1+R_2+\Delta R_1\right)\left(R_3+R_4\right)+R_2\left(R_1+\Delta R_1\right)\left(R_3+R_4\right)+R_3R_4\left(R_1+R_{2+}\Delta R_1\right)}. \qquad (12.9)$$

Считая, что $R_1 >> \Delta R_1$ и пренебрегая в силу этого значением ΔR_1 в знаменателе соотношений (11.4), (11.5), (11.6), (11.7), получим следующие уравнения:

для схемы первой симметрии

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1}{4R_0R_1+2R_1^2+2R_1R_4}; \qquad (12.10)$$

для схемы второй симметрии

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1R_4}{R_0\left(R_1+R_4\right)^2+2R_1R_4\left(R_1+R_4\right)}; \qquad (12.11)$$

для равноплечей схемы

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1}{4R_0R_1+4R_1^2}; \qquad (12.12)$$

для асимметричной схемы

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1R_4}{R_0\left(R_1+R_2\right)+\left(R_3+R_4\right)+R_2R_1\left(R_3+R_4\right)+R_3R_4\left(R_1+R_2\right)}. \qquad (12.13)$$

где I_0, U, ΔR_1, R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

Полученные соотношения (12.10), (12.11), (12.12) и (12.13) позволяют проанализировать рассматриваемые мостовые измерительные схемы с точки зрения их чувствительности и линейности. Соответствующие исследования приведены ниже, в последующей главе учебного пособия.

12.1.2. Основные соотношения

В главе 11 (пп. 11.1 и 11.2) показано, что чувствительность токовых мостовых схем при использовании электромеханических приборов для измерения тока I_0 тем выше, чем большая мощность выделяется в измерительной диагонали моста. Отсюда следует, что для токовых мостовых схем необходимо рас-

сматривать чувствительность по мощности (см. выражения (11.8) и (11.11), приведенные в п. 11.2 учебного пособия).

Тогда для рассмотренных схем (первой и второй симметрий, равноплечей и асимметричной) правомерны нижеследующие соотношения.

Схемы первой симметрии

Мощность, выделяемая в измерительной диагонали мостовой схемы, определяется соотношением

$$P_0 = I_0^2 \cdot R_0, \tag{12.14}$$

где I_0 – ток в измерительной диагонали;

R_0 – внутреннее сопротивление прибора, включенного в измерительную диагональ.

Значение тока I_0 для схемы первой симметрии оценивается по выражению (12.10), приведенному выше. Для дальнейшего анализа выражение (12.10) удобно преобразовать, разделив числитель и знаменатель на R_1 и введя обозначение $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$. Тогда выражение (12.10) примет вид

$$I_0 = U \frac{\varepsilon}{4R_0 + 2R_1 + 2R_4}, \tag{12.15}$$

где ε – относительное измерение сопротивления датчика.

Подставляя в (12.14) значение тока I_0, получим

$$P_0 = U^2 \varepsilon^2 \frac{R_0}{(4R_0 + 2R_1 + 2R_4)^2} \tag{12.16}$$

Как показано выше, чувствительность мостовой схемы по мощности $S(P_0)$ может быть оценена (при принятых допущениях) соотношением (12.17).

$$S(P_0) = \frac{P_0}{\Delta R_1}. \tag{12.17}$$

Таким образом, при ε = const чувствительность мостовой схемы прямо пропорциональна мощности, потребляемой в ее измерительной диагонали. Очевидно, что при ε = const $P_0 \rightarrow \max$ (см. (12.16), приведенное выше), если

$U \to \max$, а $R_4 \to 0$. Примем, что U =const и максимально возможно для рассматриваемой мостовой схемы, а $R_4 = 0$. Тогда выражение (12.16) принимает вид

$$P_0 = U^2 \varepsilon^2 \frac{R_0}{(4R_0 + 2R_1)^2}, \tag{12.18}$$

где U = const, ε = const, R_1 = const.

Для оценки значения R_0 необходимо исследовать соотношение (12.18) на максимум. Для этого, как известно, надо найти производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравнять ее нулю.

$$\frac{dP_0}{dR_0} = U^2 \varepsilon^2 \frac{1 \cdot (4R_0 + 2R_1)^2 - R_0 \cdot 2 \cdot (4R_0 + 2R_1) \cdot 4}{(4R_0 + 2R_1)^2} = 0. \tag{12.19}$$

Дробь равна нулю, если ноль – ее числитель. В числителе $U \neq 0$, $\varepsilon \neq 0$ (по условию). Приравниваем нулю оставшийся сомножитель числителя.

$$(4R_0 + 2R_1)^2 - 8R_0(4R_0 + 2R_1) = 0. \tag{12.20}$$

$$(4R_0 + 2R_1)(4R_0 + 2R_1 - 8R_0) = 0. \tag{12.21}$$

Если произведение двух сомножителей равно нулю, то ноль – один из сомножителей или равны нулю оба сомножителя.

Приравнивая к нулю первый сомножитель соотношения (12.21), получим $R_0 = -\frac{1}{2}R_1$ и, приравнивая к нулю второй сомножитель, получим $R_0 = \frac{1}{2}R_1$. Отрицательное значение сопротивления физического смысла не имеет, и отрицательный корень уравнения (12.21) отбрасывается.

Таким образом, при заданном исходном (начальном) сопротивлении датчика R, заданном и постоянном его абсолютном приращении ΔR (или заданном и постоянном относительном приращении ε) мостовая схема первой симметрии имеет максимальную чувствительность, если выполняются следующие условия:

$$U \to \max, R_2 = R_1, R_3 = R_4 \to 0, R_0 = \frac{1}{2}R_1.$$

Схемы второй симметрии

Мощность, выделяемая в измерительной диагонали мостовой схемы (независимо от вида симметрии), определяется соотношением (12.14), а ток в этой же диагонали для схемы второй симметрии – соотношением (12.11).

Для дальнейшего анализа выражение (12.11) удобно преобразовать, разделив числитель и знаменатель на $R_1 \cdot R_4$ и введя обозначение $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$.

В этом случае выражение (12.11) принимает вид

$$I_0 = U \frac{\varepsilon}{\frac{R_0}{R_1 \cdot R_4} \cdot \left(R_1 + R_4\right)^2 + 2\left(R_1 + R_4\right)}, \qquad (12.22)$$

где ε – относительное изменение сопротивления датчика.

Преобразуем принципиальную электрическую схему четырехплечего измерительного моста, представленную на рис. 12.1, и представим ее в виде схемы, приведенной на рис. 12.2.

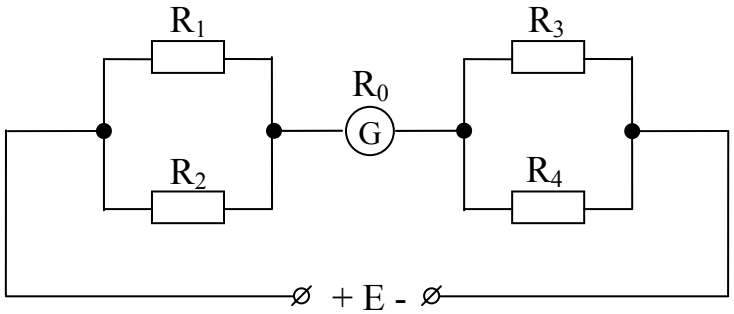


Рис. 12.2. Эквивалентная принципиальная схема четырехплечего моста постоянного тока

На схеме (см. рис. 12.2) величина E является некоторой эквивалентной ЭДС, зависящей от напряжения питания U и параметров мостовой схемы.

Рис. 12.2 позволяет заключить, что измеритель «G» питается через некоторое эквивалентное сопротивление $R_Э$, определяемое соотношением (12.3).

$$R_Э = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}. \qquad (12.23)$$

Учитывая, что для мостовой схемы второй симметрии $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$, получим

$$R_Э{}' = 2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4}. \qquad (12.24)$$

Для оптимального согласования нагрузки с сопротивлением источника сигнала необходимо, как известно, чтобы сопротивление нагрузки равнялось сопротивлению источника сигнала. В нашем случае необходимо, чтобы внутреннее сопротивление R_0 прибора G, являющегося нагрузкой для мостовой схемы, равнялось сопротивлению $R'_э$, являющемуся сопротивлением эквивалентного источника питания с ЭДС (Е).

$$R_0 = R'_Э = 2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4}. \qquad (12.25)$$

Подставляя найденное значение R_0 в (12.22), получим

$$I_0 = U \frac{\varepsilon}{4(R_1 + R_4)}. \qquad (12.26)$$

Подставляя найденное значение тока I_0 в (12.14), получим для мощности в измерительной диагонали:

$$P_0 = I_0^2 \cdot R_0 = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4}{8\left(R_1 + R_4\right)^3} = 0. \qquad (12.27)$$

Для оценки значения R_4 необходимо исследовать соотношение (12.27) на максимум. Для этого, как известно, надо найти первую производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравнять ее нулю.

$$\frac{dP_0}{dR_4} = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_1 \cdot 8\left(R_1 + R_4\right)^3 - R_1 R_4 \cdot 24\left(R_1 + R_4\right)^2 \cdot 1}{64 \cdot \left(R_1 + R_4\right)^6} = 0. \qquad (12.28)$$

Решая уравнение (12.28) относительно R_4, получим

$$R_4 = \frac{2}{3} R_1. \qquad (12.29)$$

Подставляя найденное значение R_4 в (12.22), получим

$$R_0 = \frac{2}{3} R_1. \qquad (12.30)$$

Таким образом, при заданном начальном сопротивлении датчика R и принятых допущениях мостовая схема второй симметрии имеет максимальную чувствительность по мощности при $U \rightarrow \max$:

$$R_3 = R_1 R_4 = \frac{1}{2} R_1 R_0 = \frac{2}{3} R_1 .$$

Равноплечие мостовые схемы

Независимо от вида симметрии мощность P_0, выделяемая в измерительной диагонали мостовой схемы, определяется соотношением (12.14).

Ток I_0 в измерительной диагонали равноплечей мостовой схемы определяется соотношением (12.12).

Для дальнейшего анализа чувствительности рассматриваемой мостовой схемы по мощности удобно разделить числитель и знаменатель соотношения (12.12) на R_1 и ввести обозначение $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$. В этом случае выражение для тока I_0 принимает вид

$$I_0 = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_0}{\left(4R_0 + 4R_1\right)}. \qquad (12.31)$$

Подставляя в (12.12) полученное значение тока I_0 (см. выражение (12.31), и приведенное выше), получим

$$P_0 = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_0}{\left(4R_0 + 4R_1\right)^2}. \qquad (12.32)$$

Для оценки значения R_0 необходимо исследовать на максимум полученное соотношение (12.32). Для этого найдем первую производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравняем ее нулю

$$\frac{dP_0}{dR_4} = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{1\left(4R_0 + 4R_1\right)^2 - 2 \cdot \left(4R_0 + R_1\right) \cdot 4R_0}{\left(4R_0 + 4R_1\right)^4} = 0 . \qquad (12.33)$$

Решая уравнение (12.33) относительно R_0, получим

$$R_0 = R_1. \qquad (12.34)$$

Таким образом, при заданном сопротивлении датчика и принятых допущениях равноплечевая мостовая схема имеет максимальную чувствительность по мощности при $U \rightarrow \max$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$.

Асимметричные мостовые схемы

Независимо от вида симметрии мощность в измерительной диагонали мостовой схемы определяется соотношением (12.14), а ток в этой диагонали для асимметричной схемы – соотношением (12.13).

Для анализа чувствительности асимметричной мостовой схемы по мощности преобразуем принципиальную электрическую схему моста (см. рис. 12.1) и представим ее в виде схемы, приведенной на рис. 12.3.

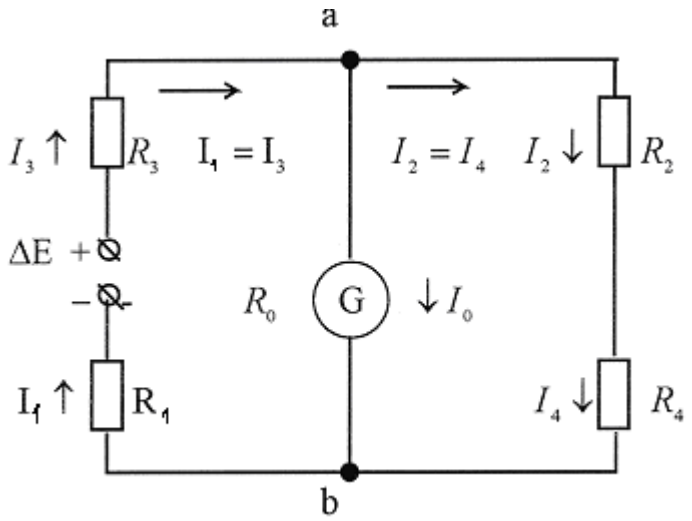


Рис. 12.3. Эквивалентная принципиальная схема четырехплечего моста постоянного тока: ΔE – эквивалентная ЭДС, зависящая от напряжения питания U и параметров мостовой схемы; R_1 – сопротивление датчика (начальное)

ΔE оценивается соотношением

$$\Delta E = \Delta R_1 \cdot I_1, \qquad (12.35)$$

где ΔR_1 – изменение сопротивления датчика;

I_1 – ток через датчик.

Отметим, что $I_1 = I_3$. По принятому условию $\Delta R_1 =$ const и много меньше сопротивления датчика в исходном (начальном) состоянии системы. Тогда справедливо положение, что $I_1 \cong$ const и $\Delta E \cong$ const.

При постоянстве значений ΔE и R_0 максимальное значение мощности в измерительной диагонали моста будет соответствовать максимальному значе-

нию тока I_0. Ток I_0 (при принятых допущениях) принимает максимальное значение при $R_0 \to 0$, а $(R_2 + R_4) \to \infty$. Считая, что $\Delta E = \text{const}$, R_1 = const, R_3 = 0, $(R_2 + R_4) \to \infty$, получим

$$I_0 = \frac{\Delta E}{R_1 + R_0}, \tag{12.36}$$

$$P_0 = I_0 \cdot R_0 = \Delta E^2 \cdot \frac{R_0}{(R_1 + R_0)^2}. \tag{12.37}$$

Для оценки значения R_0 необходимо исследовать на максимум полученное соотношение (12.37).

С этой целью найдем первую производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравняем ее нулю.

$$\frac{dP_0}{dR_0} = \Delta E^2 \cdot \frac{1 \cdot (R_1 + R_0) - 2 \cdot (R_1 + R_0) \cdot R_0}{(R_1 + R_0)^4} = 0. \tag{12.38}$$

Решая уравнение (12.38) относительно R_0, получим, что $R_0 = R$. Таким образом, при заданном сопротивлении датчика и принятых допущениях асимметричная мостовая схема имеет максимальную чувствительность по мощности при $U \to \max$, $R_2 + R_4 \to \infty$, $R_3 \to 0$, $R_0 = R_1$.

12.1.3. Выводы и рекомендации

Проведен анализ чувствительности неравновесных измерительных схем по мощности $S(P_0)$. Анализ проведен из предположений, что датчик с сопротивлением $R_g = R_1 + \Delta R_1$ включен в первое плечо моста, изменение сопротивления датчика $\Delta R_1 << R_1$, а мостовая схема в исходном (начальном) положении при $R_g = R_1$ уравновешена, где R_1 – исходное (начальное) сопротивление датчика.

Результаты анализа сведены в таблицу (табл. 12.1). В таблице приведены сведения по чувствительности токовых мостовых измерительных схем (асимметричных, 1-й симметрии, 2-й симметрии, равноплечих или симметричных). Вид рассматриваемой схемы приведен в 1-м столбце таблицы. Во 2-м столбце приведены характеристики мостовых схем, в 3-м – рассматриваемая чувствительность, в 4-м и 5-м – оптимальные соотношения.

Таблица 12.1

Сводная таблица по результатам анализа чувствительности неравновесных мостовых измерительных схем постоянного тока

Вид схемы	**Характеристика**	**Рассматриваемая чувствительность**	**Оптимальные соотношения**		$\left(\frac{P_0}{P_1}\right)_{\max}$
			теоретические	**практические**	
1	2	3	4	5	6
Асимметричная	$R_1 \neq R_2 \neq \neq R_3 \neq R_4$	$S(P_0)$	$R_2 + R_4 \to \infty,$ $R_3 \to 0,$ $R_0 \neq R_1$	$R_3 \approx 0{,}1R_1,$ $R_2 \approx 10R_1,$ $R_4 \approx R_1,$ $R_0 \approx R_1 + R_3$	$\frac{1}{4}\varepsilon^2$
1–й симметрии	$R_1 = R_2,$ $R_3 = R_4$	$S(P_0)$	$R_2 = R_1,$ $R_3 = R_4 \to 0,$ $R_0 \neq \frac{1}{2}R_1$	$R_1 = R_2,$ $R_3 = R_4 \approx 0{,}1R_1$ $R_0 \neq \frac{1}{2}(R_1 + R_4)$	$\frac{1}{8}\varepsilon^2$
Равноплечая	$R_1 = R_2 = = R_3 = R_4$	$S(P_0)$	$R_0 = R_2 = R_3 = = R_4 = R$	Совпадают с теоретическими	$\frac{1}{16}\varepsilon^2$
2–й симметрии	$R_2 = R_4$	$S(P_0)$	$R_2 = R_4 = \frac{1}{2}R_1,$ $R_3 = R_1,$ $R_0 = \frac{2}{3}R_1$	Совпадают с теоретическими	$\frac{1}{24}\varepsilon^2$

Табл. 12.1 содержит сведения по оптимальным параметрам различных типов неравновесных мостовых схем. Приведены как теоретические соотношения, так и практические рекомендации. Последний 6-й столбец таблицы, обозначенный $\left(\frac{P_0}{P_1}\right)_{\max}$, позволяет сравнить чувствительность различных типов неравновесных схем между собой. Из этого сравнения следует, что при прочих равных условиях наибольшей чувствительностью среди токовых схем облада-

ют асимметричные схемы, на втором месте по чувствительности – схемы 1-й симметрии, на третьем – равноплечие схемы и на последнем (четвертом) месте по чувствительности находятся мостовые схемы 2-й симметрии.

12.2. Линейность токовых мостовых схем

12.2.1. Общие положения

Линейность неравновесных токовых мостовых измерительных схем исследуется при допущении, что используются четыре датчика, включенные в первое, второе, третье и четвертое плечо мостовой схемы (рис. 12.4).

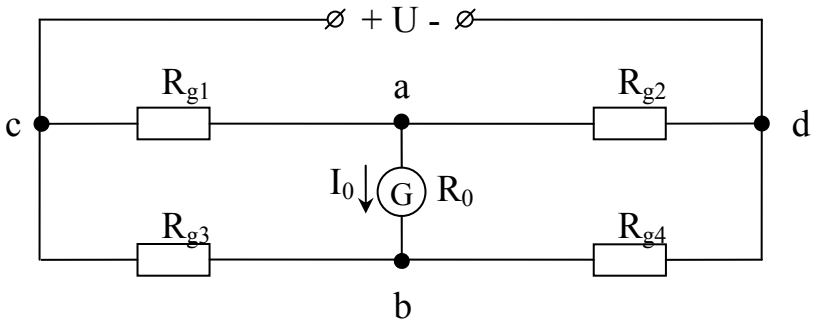


Рис. 12.4. Схема токового моста с четырьмя датчиками

Для схемы, приведенной на рис. 12.4, ток в измерительной диагонали мостовой схемы I_0 запишется в виде

$$I_0 = U\frac{R_{g1}\cdot R_{g4} - R_{g2}\cdot R_{g3}}{R_0\left(R_{g1}+R_{g2}\right)\left(R_{g3}+R_{g4}\right)+R_{g1}\cdot R_{g2}\left(R_{g3}+R_{g4}\right)+R_{g3}\cdot R_{g4}\left(R_{g1}+R_{g2}\right)}, \quad (12.39)$$

где U – напряжение питания;

R_0 – сопротивление прибора в измерительной диагонали мостовой схемы;

R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4} – сопротивления датчиков.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

1) сопротивления датчиков определяются соотношениями

$$R_{g1} = R_1 + \Delta R_1, \quad (12.40)$$

$$R_{g2} = R_2 + \Delta R_2, \quad (12.41)$$

$$R_{g3} = R_3 + \Delta R_3, \quad (12.42)$$

$$R_{g4} = R_4 + \Delta R_4, \quad (12.43)$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – начальные (исходные) сопротивления датчиков;

ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3 и ΔR_4 – измерения сопротивлений датчиков.

2) изменения сопротивлений датчиков много меньше сопротивлений самих датчиков, т. е.

$$\Delta R_1 << R_1, \tag{12.44}$$

$$\Delta R_2 << R_2, \tag{12.45}$$

$$\Delta R_3 << R_3, \tag{12.46}$$

$$\Delta R_4 << R_4, \tag{12.47}$$

где ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4, R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше;

3) в исходном состоянии мостовая схема уравновешена, т. е.

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{12.48}$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше.

4) квадраты и кубы приращений датчиков малы и ими можно пренебречь, т. е. $\Delta R_1^2 \approx 0$, $\Delta R_1^3 \approx 0$, $\Delta R_2^2 \approx 0$, $\Delta R_2^3 \approx 0$ и т. д.

Принятые допущения позволяют значительно упростить соотношение (12.39), которое при подстановке значений сопротивлений датчиков и при выполнении принятых допущений принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4 - \Delta R_2 \cdot R_3 - \Delta R_3 \cdot R_2 + \Delta R_4 \cdot R_1}{A + B \cdot \Delta R_1 + C \cdot \Delta R_2 + D \cdot \Delta R_3 + F \cdot \Delta R_4}, \tag{12.49}$$

где $A = R_0\left(R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4\right) + R_1 \cdot R_2 \cdot \left(R_3 + R_4\right) +$

$+ R_3 \cdot R_4 \cdot \left(R_1 + R_2\right)$;

$B = R_0 \cdot R_3 + R_0 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4$;

$C = R_0 \cdot R_3 + R_0 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4$;

$D = R_0 \cdot R_1 + R_0 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4$;

$F = R_0 \cdot R_1 + R_0 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3$.

Отметим, что R_1, R_2, R_3, R_4 – постоянные сопротивления, соответствующие исходным сопротивлениям датчиков; ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4 – приращения (положительные или отрицательные) сопротивлений датчиков; A, B, C,

D, F – постоянные коэффициенты, зависящие от значений исходных сопротивлений датчиков и не зависящие от их приращений.

12.2.2. Основные соотношения

Схемы с одним датчиком

Предполагается, что датчик с начальным (исходным) сопротивлением R_1 расположен в первом плече мостовой схемы. В трех других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2, R_3 и R_4 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивления датчика удовлетворяют условию $\Delta R_1 \neq 0$. Все другие приращения тождественно равны нулю. В этом случае выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{A + B \cdot \Delta R}. \qquad (12.50)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R_1)$ приведен на рис. 12.5.

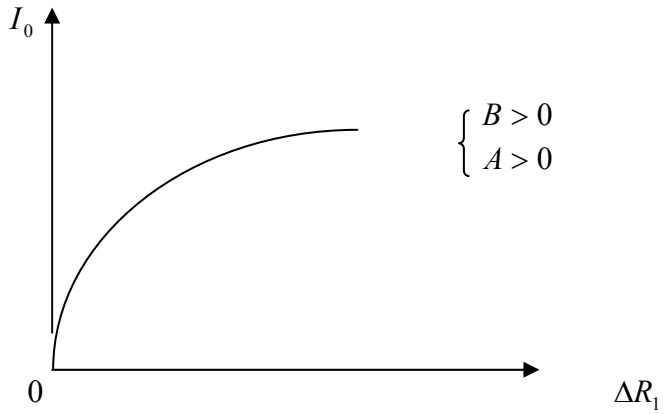


Рис. 12.5. Зависимость $I_0 = f(\Delta R_1)$ для неравновесной мостовой схемы с одним датчиком (датчик в первом плече)

Соотношение (12.50) и график свидетельствуют о том, что неравновесные мостовые измерительные схемы с одним датчиком, расположенным в первом плече, нелинейны. Этот вывод также справедлив при расположении одного датчика в любом другом плече неравновесной схемы. Последнее утверждение дается без доказательств, но оно может быть легко получено студентами самостоятельно при анализе соотношения (12.49).

Схемы с двумя датчиками

Датчики в первом и втором плечах моста

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_2 расположены соответственно в первом и втором плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_3 и R_4. Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |\Delta R|$. Приращения ΔR_3 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом допущений, изложенных в п. 12.2.1 и в данном параграфе учебного пособия, выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_3 + R_4)}{A + (B - C) \cdot \Delta R}. \qquad (12.51)$$

График зависимости тока в измерительной диагонали мостовой схемы I_0 от приращения сопротивлений датчика ΔR при различных соотношениях между B и C приведен на рис. 12.6.

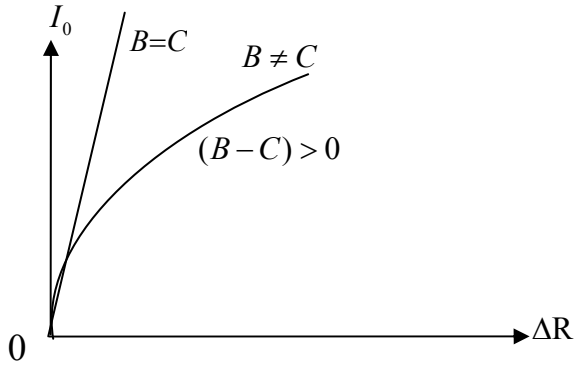


Рис. 12.6. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в первом и втором плечах схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $B \neq C$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $B = C$) рассматриваемая мостовая схема линейна. Сравнение выражений для коэффициентов B и C, приведенных в п. 12.2.1, показывает, что $B = C$ при $R_1 = R_2$.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в первом и втором плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления датчиков R_1 и R_2 в исходном состоянии должны быть равны;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_1 и ΔR_2 должны быть равны между собой по абсолютной величине и противоположны по знаку.

Отметим, что положительные приращения сопротивлений датчиков соответствуют увеличению их сопротивлений, а отрицательные приращения соответствуют уменьшению сопротивлений датчиков. Для выполнения второго условия линейности необходимо, чтобы при увеличении сопротивления датчика в первом плече на ΔR_1 сопротивление датчика во втором плече уменьшилось бы на это же значение.

Датчики в первом и четвертом плечах моста

Предполагается, что датчики с начальными сопротивлениями R_1 и R_4 расположены соответственно в первом и четвертом плечах мостовой схемы. Во втором и третьем плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_3. Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. С учетом допущений, изложенных в п. 12.2.1 и данном параграфе, выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_4)}{A + (B + F) \cdot \Delta R}. \qquad (12.52)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.7.

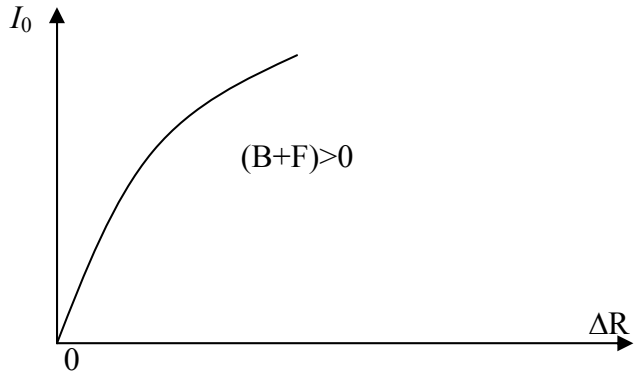


Рис. 12.7. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в первом и четвертом плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод, что мостовая измерительная схема с двумя датчиками в первом и четвертом плечах схемы нелинейна при любом соотношении параметров.

Датчики в первом и третьем плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_3 расположены соответственно в первом и третьем плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_4. Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. Приращения сопротивлений ΔR_2 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_4)}{A + (B - D) \cdot \Delta R}. \qquad (12.53)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.8.

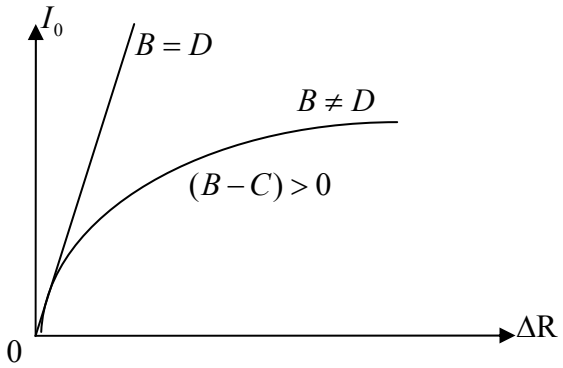


Рис. 12.8. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в первом и третьем плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $B \neq D$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $B = D$) рассматриваемая мостовая схема линейна. Для удовлетворения условия $B = D$ (см. п. 12.2.1) необходимо, чтобы $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$, $R_3 = R_4$, $R_1 = R_2$, т. е. сопротивления всех плеч мостовой схемы (в исходном положении при $\Delta R = 0$) должны быть равны между собой.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в первом и третьем плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления плеч мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 при $\Delta R = 0$ должны быть равны между собой;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_1 и ΔR_3 должны быть равны между собой и противоположны по знаку.

Отметим, что анализ проведен для случая, когда приращение ΔR_1 положительное, а приращение ΔR_3 – отрицательное.

Датчики во втором и четвертом плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_2 и R_4 расположены соответственно во втором и четвертом плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_3 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивлений датчиков R_2 и R_4 удовлетворяют условию $\left|-\Delta R_2\right| = \left|\Delta R_4\right| = \left|\Delta R\right|$. Приращения сопротивлений ΔR_1 и ΔR_3 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U\frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_4)}{A + (B + F)\cdot \Delta R} \qquad (12.54)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.9.

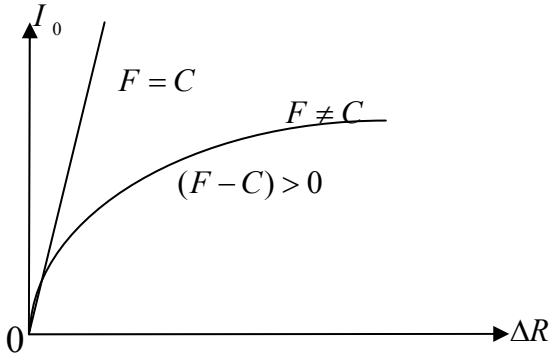


Рис. 12.9. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики во втором и четвертом плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $F \neq C$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $F = C$) рассматриваемая мостовая схема линейна (см. рис. 12.9). Сравнение выражений F и C показывает, что $F = C$, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, т. е. сопротивления всех плеч мостовой схемы (в исходном положении при $\Delta R = 0$) должны быть равны между собой.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными во втором и четвертом плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления плеч мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 при $\Delta R = 0$ должны быть равны между собой;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_2 и ΔR_4 должны быть равны между собой и противоположны по знаку.

Датчики в третьем и четвертом плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_3 и R_4 расположены соответственно в третьем и четвертом плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_2 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивлений датчиков R_3 и R_4 удовлетворяют условию $|-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. Приращения сопротивлений ΔR_1 и ΔR_2 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_4)}{A + (B - D) \cdot \Delta R}. \qquad (12.55)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.10.

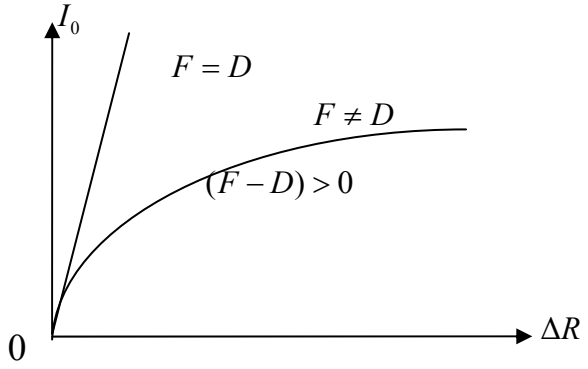


Рис. 12.10. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в третьем и четвертом плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $F \neq D$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $F = D$) рассматриваемая мостовая схема линейна. Сравнение выражений F и D показывает, что $F = D$, если $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$, т. е. для линейности схемы в рассматриваемом случае необходимо использовать мостовую схему 1-й симметрии.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в третьем и четвертом плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления плеч мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 при $\Delta R = 0$ должны удовлетворять условию 1-й симметрии;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_2 и ΔR_4 должны быть равны между собой и противоположны по знаку.

Датчики во втором и третьем плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_2 и R_3 расположены соответственно во втором и третьем плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_4 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивлений датчиков R_2 и R_3 удовлетворяют условию $|-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. Приращения сопротивлений ΔR_1 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot \left(R_3 + R_2 \right)}{A + \left(C + D \right) \cdot \Delta R} . \qquad (12.56)$$

График зависимости $I_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 12.11.

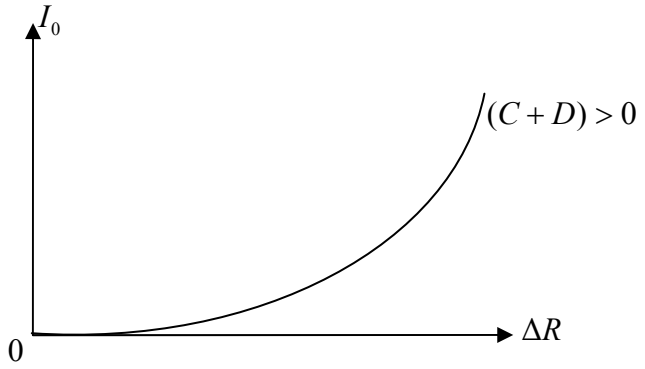


Рис. 12.11. Зависимость $I_0 = f\left(\Delta R\right)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики во втором и третьем плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f\left(\Delta R\right)$ позволяет сделать вывод о том, что мостовая измерительная схема с двумя датчиками во втором и третьем плечах схемы нелинейна при любом соотношении параметров.

Схемы с тремя датчиками

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1, R_2, R_3 расположены соответственно в первом, во втором и в третьем плечах мостовой схемы. В четвертом плече мостовой схемы установлено постоянное сопротивление R_4 (см. рис. 12.4). Приращения датчиков R_1, R_2, R_3 удовлетворяют условию $\left|\Delta R_1\right| = \left|-\Delta R_2\right| = \left|-\Delta R_3\right| = \left|\Delta R\right|$. Приращение сопротивления R_4 тождественно равно нулю (т.е. $\Delta R_4 = 0$). С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot \left(R_3 + R_2 + R_4 \right)}{A + \left(B - C - D \right) \cdot \Delta R} . \qquad (12.57)$$

График зависимости (12.57) приведен на рис. 12.12.

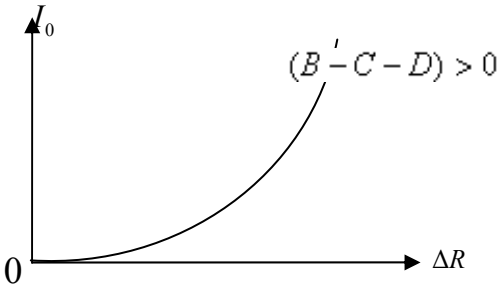


Рис. 12.12. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой измерительной схемы с тремя датчиками (датчики в первом, втором и третьем плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что мостовая измерительная схема с тремя датчиками в первом, втором и третьем плечах схемы нелинейна при любом соотношении параметров.

Схемы с четырьмя датчиками

При анализе схемы с четырьмя датчиками будем полагать, что датчики включены во все плечи мостовой измерительной схемы и имеют в исходном состоянии сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 (датчик с сопротивлением R_1 включен в первое плечо моста, R_2 – во второе, R_3 – в третье, R_4 – в четвертое). Приращения сопротивлений датчиков должны удовлетворять условию: $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. С учетом принятых допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_3 + R_2 + R_4)}{A + (B - C - D + F) \cdot \Delta R}.$$

График зависимости (12.58) для различных соотношений между *B*, *C*, *F*, *D* имеет вид, приведенный на рис. 12.13

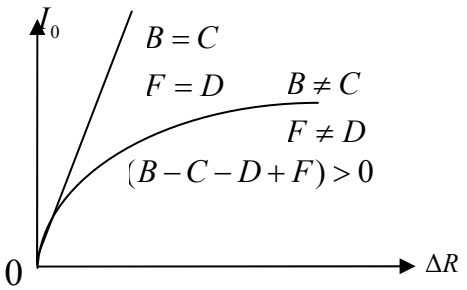


Рис. 12.13. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой измерительной схемы с четырьмя датчиками (датчики во всех плечах мостовой схемы)

Нетрудно видеть, что в общем случае (при $B \neq C$ и $F \neq D$) неравновесная мостовая схема нелинейна. Равенства $F = D$ и $B = C$ возможны при $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$, и в этом случае рассматриваемая схема линейна.

Таким образом, для линейности неравновесной мостовой измерительной схемы с четырьмя датчиками необходимо, чтобы сопротивления датчиков в первом и втором, третьем и четвертом плечах мостовой измерительной схемы были в исходном состоянии равны, а их приращения были равны и попарно разнозначны.

12.2.3. Выводы и рекомендации

Проведенные исследования линейности неравновесных токовых мостовых измерительных схем позволяют сделать вполне определенные выводы и дать практические рекомендации по включению датчиков в то или иное плечо мостовой схемы.

Ниже приводятся выводы и даются рекомендации при использовании одного, двух, трех и четырех датчиков.

1. Неравновесная токовая мостовая схема с одним датчиком нелинейна при любом включении датчика (в первое, второе, третье или четвертое плечо мостовой схемы). Схема с одним датчиком может быть рекомендована лишь при малых изменениях сопротивления датчика и при малых диапазонах измерений.

2. Мостовая схема с двумя датчиками может быть линейна, если датчики включены в первое и второе или третье и четвертое плечо мостовой схемы. При этом начальные (исходные) сопротивления датчиков должны быть равны, а их приращения равны и разнозначны (т. е. при росте сопротивления одного датчика сопротивление второго датчика должно на это же значение уменьшаться). При несоблюдении этих условий линейность мостовой схемы нарушается.

3. Мостовая схема с тремя датчиками нелинейна при любом их включении. Использовать схему с тремя датчиками не рекомендуется.

4. Мостовая схема с четырьмя датчиками может быть линейной при соблюдении ряда условий: используемые датчики должны иметь равные началь-

ные (исходные) сопротивления, а их приращения должны быть равными и попарно разнозначными, т. е. датчики в первом и четвертом плечах мостовой схемы должны иметь положительные приращения, а во втором и третьем – отрицательные. При несоблюдении этих условий линейность мостовой схемы нарушается.

13. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

13.1. Чувствительность потенциальных мостовых схем

13.1.1. Общие положения

Исследование чувствительности неравновесных потенциальных мостовых измерительных схем проводится при допущении, что используется один датчик, включенный в первое плечо мостовой схемы (рис. 13.1).

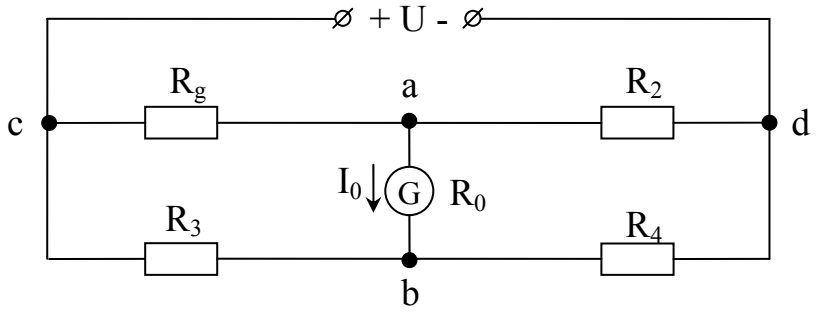


Рис. 13.1. Потенциальная мостовая измерительная схема с одним датчиком

В п. 11.1 учебного пособия было отмечено, что мостовая схема считается потенциальной, если сопротивление прибора *G*, включенного в измерительную диагональ моста, много больше сопротивлений плеч мостовой схемы. В этом же пункте сделан вывод основного соотношения потенциальной мостовой схемы (см. выражение (11.6)).

Для мостовой схемы, приведенной на рис. 13.1, выражение (11.6) принимает вид

$$U_0 = U\frac{R_g \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{\left(R_g + R_2\right)\left(R_3 + R_4\right)}, \qquad (13.1)$$

где U_0 – напряжение на измерительной диагонали мостовой схемы;

U – напряжение питания;

R_g – сопротивление датчика;

R_2, R_3, R_4 – сопротивление плеч моста.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

$$R_g = R_1 + \Delta R_1, \tag{13.2}$$

$$\Delta R_1 << R_1, \tag{13.3}$$

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{13.4}$$

где R_1 – начальное (исходное) сопротивление датчика;

ΔR_1 – измерение сопротивления датчика;

R_g, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

С учетом принятых допущений (13.2), (13.3) и (13.4) выражение (13.1) преобразуется в соотношение

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}, \tag{13.5}$$

где $U_0, U, \Delta R_1, R_1, R_2, R_3, R_4$ – определены выше.

13.1.2. Основные соотношения

В п. 11.2 учебного пособия даны точное и приближенное определения чувствительности неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы. В данном пункте учебного пособия используется приближенное значение чувствительности по напряжению, приведенное ниже.

$$S(U_0) \approx \frac{\Delta U_0}{\Delta R_1}, \tag{13.6}$$

где $S(U_0)$ – чувствительность по напряжению;

ΔR_1 – изменение сопротивления датчика;

ΔU_0 – изменение напряжения в измерительной диагонали мостовой схемы при изменении сопротивления датчика на ΔR_1.

Дальнейший анализ проводится для оценки оптимальных параметров потенциальных мостовых измерительных схем, позволяющих получить максимальную чувствительность при заданных допущениях, т. е. при заданных условиях (13.2)–(13.4) и при заданном значении ΔR_1 можно найти значения U, R_2, R_3 и R_4, при которых чувствительность $S(U_0)$ максимальна. Из (13.6) следует,

что при $\Delta R_1 = \text{const}$ чувствительность максимальна при максимальном значении приращения ΔU_0, которое определяется соотношением

$$\Delta U_0 = U_0 - U_{0H}, \tag{13.7}$$

где U_{0H} – напряжение на измерительной диагонали в исходном состоянии мостовой схемы (при $\Delta R_1 = 0$);

ΔU_0, U_0 – определены выше.

Поскольку в исходном состоянии рассматриваемая мостовая схема уравновешена, то $U_{0H} = 0$ и $\Delta U_0 = U_0$ (см. выражение (13.7)).

Другими словами, для принятых допущений чувствительность $S(U_0) \to \max$, если напряжение U_0, определяемое соотношением (13.5), также стремится к максимальному значению.

Для дальнейшего анализа чувствительности рассматриваемой мостовой схемы по напряжению удобно разделить числитель и знаменатель выражения (13.5) на $R_1 \cdot R_4$ и ввести обозначение $\varepsilon = \dfrac{\Delta R_1}{R_1}$.

$$U_0 = U \frac{\varepsilon}{\left(1 + \dfrac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \dfrac{R_3}{R_4}\right)} \tag{13.8}$$

Обозначим отношение $\dfrac{R_2}{R_1}$ через K.

$$\frac{R_2}{R_1} = K. \tag{13.9}$$

Тогда, в силу равновесия моста в исходном состоянии, справедливы соотношения

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{13.10}$$

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{1}{K}. \tag{13.11}$$

Подставляя (13.9) и (13.11) в уравнение (13.8), получим

$$U_0 = U\frac{\varepsilon \cdot K}{(1+K)^2}. \qquad (13.12)$$

Для оценки значения K необходимо исследовать полученное соотношение (13.12) на максимум. Для этого найдем первую производную $\frac{dU_0}{dK}$ и приравняем ее нулю.

$$\frac{dU_0}{dK} = U \cdot \varepsilon \cdot \frac{1\cdot(1+K)^2 - K\cdot 2\cdot(1+K)\cdot 1}{(1+K)^4} = 0. \qquad (13.13)$$

Произведение нескольких сомножителей равно нулю, если ноль – один из сомножителей. Соотношение (13.13) состоит из трех сомножителей. Первые два сомножителя (U и ε) не равны нулю, т. е. нулю равен третий сомножитель, представляющий собой дробь. Дробь, в свою очередь, равна нулю, если ноль – ее числитель. Приравнивая нулю числитель рассматриваемой дроби, получим

$$(1+K)^2 - 2K(1+K) = 0.$$

Полученное выражение, после приведения подобных, принимает вид

$$1 - K = 0.$$

Решая полученное уравнение относительно K, находим

$$K = 1. \qquad (13.14)$$

Из (13.14) следует, что $R_2 = R_1$ и $R_3 = R_4$.

Таким образом, при заданном сопротивлении датчика и принятых допущениях потенциальная мостовая измерительная схема имеет максимальную чувствительность по напряжению при $U \to \infty$, $R_2 = R_1$ и $R_3 = R_4$.

13.2. Линейность потенциальных мостовых схем

13.2.1. Общие положения

Исследование линейности неравновесных потенциальных мостовых измерительных схем проводится при допущении, что датчики включены во все четыре плеча мостовой схемы (рис. 13.2).

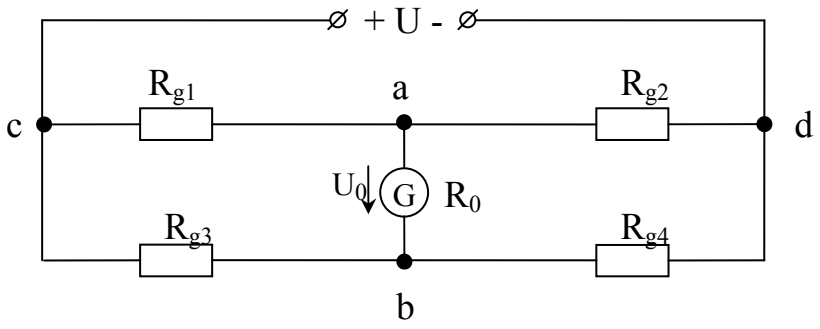


Рис. 13.2. Принципиальная схема неравновесного потенциального моста с четырьмя датчиками

Выведенное выше основное соотношение потенциальной мостовой схемы (11.6) для схемы, приведенной на рис. 13.2, принимает вид

$$U_0 = U \frac{R_{g1} \cdot R_{g4} - R_{g2} \cdot R_{g3}}{\left(R_{g1} + R_{g2}\right)\left(R_{g3} + R_{g4}\right)}, \qquad (13.15)$$

где U_0 – напряжение на измерительной диагонали мостовой схемы;

U – напряжение питания;

R_0 – сопротивление прибора G (принято, что $R_0 \to \infty$);

R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4} – сопротивление датчиков.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

$$R_{g1} = R_1 + \Delta R_1, \qquad (13.16)$$

$$R_{g2} = R_2 + \Delta R_2, \qquad (13.17)$$

$$R_{g3} = R_3 + \Delta R_3, \qquad (13.18)$$

$$R_{g4} = R_4 + \Delta R_4, \qquad (13.19)$$

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \qquad (13.20)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 – начальные сопротивления датчиков;

$\Delta R_1, \Delta R_2$, ΔR_3, ΔR_4 – приращения сопротивлений датчиков.

Изменения сопротивлений датчиков ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4 много меньше сопротивлений самих датчиков, т. е.

$$\Delta R_1 << R_1, \qquad (13.21)$$

$$\Delta R_2 << R_2, \qquad (13.22)$$

$$\Delta R_3 << R_3, \tag{13.23}$$

$$\Delta R_4 << R_4, \tag{13.24}$$

где $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ – определены выше.

Квадраты и кубы приращений датчиков малы и ими можно пренебречь, т. е. $\Delta R_1^2 \approx 0$, $\Delta R_1^3 \approx 0$, $\Delta R_2^2 \approx 0$, $\Delta R_2^3 \approx 0$ и т. д.

С учетом принятых допущений (13.16) – (13.24) и равенства нулю квадратов и кубов приращений датчиков выражение (13.15) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4 + \Delta R_2 \cdot R_3 + \Delta R_3 \cdot R_2 + \Delta R_4 \cdot R_1}{A + \Delta R_1 \cdot B + \Delta R_2 \cdot C + \Delta R_3 \cdot D + \Delta R_4 \cdot F}, \tag{13.25}$$

где U, U_0, R_1, R_2, R_3, R_4, $\Delta R_1, \Delta R_2$, ΔR_3, ΔR_4 определены выше;

$A = R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4$;

$B = C = R_3 + R_4$;

$D = F = R_3 + R_2$.

Полученное выражение (13.25) позволяет проанализировать линейность неравновесных потенциальных мостовых схем.

13.2.2. Основные соотношения

Полученное в п. 13.2.1 выражение (13.25) позволяет проанализировать линейность неравновесных потенциальных мостовых измерительных схем (см. рис. 13.2) при использовании одного, двух, трех и четырех датчиков.

Схемы с одним датчиком

При анализе мостовой схемы с одним датчиком предполагается, что датчик с начальным (исходным) сопротивлением R_1 расположен в первом плече мостовой схемы. В трех других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2, R_3, R_4. Приращение сопротивления датчика $\Delta R_1 \neq 0$. Все другие приращения (ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4) тождественно равны нулю. В этом случае выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{A + \Delta R_1 \cdot B}, \tag{13.26}$$

где U_0, U, A, B, ΔR_1, R_4 – определены выше.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R_1)$ приведен на рис. 13.3.

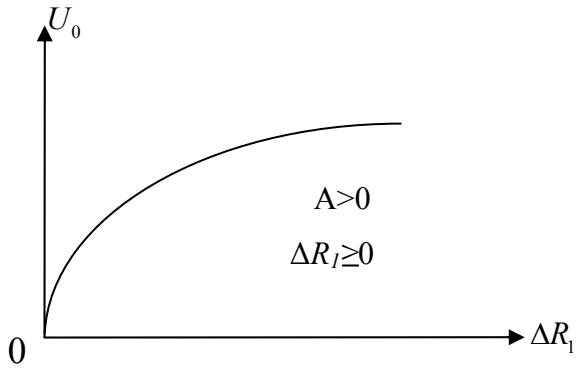


Рис. 13.3. Зависимость $U_0 = f(\Delta R_1)$ для потенциальной мостовой измерительной схемы с одним датчиком (датчик в первом плече схемы)

Соотношение (13.26) и график, приведенный на рис. 13.3, свидетельствуют о том, что неравновесная потенциальная мостовая измерительная схема с одним датчиком, расположенным в первом плече схемы, нелинейна. Этот вывод также справедлив при расположении одного датчика в любом другом плече схемы. Последнее утверждение дается без доказательств, но оно может быть легко получено студентами самостоятельно при анализе соотношения (13.25).

Схемы с двумя датчиками

Датчики в первом и втором плечах схемы

При анализе схемы с двумя датчиками принимаются следующие допущения (см. рис. 13.2): начальные (исходные) сопротивления датчиков R_1 и R_2; в исходном положении мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$); приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |\Delta R|$; приращения ΔR_3 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_3 + R_4)}{A} \qquad (13.27)$$

где A – постоянный коэффициент (определен выше).

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.4.

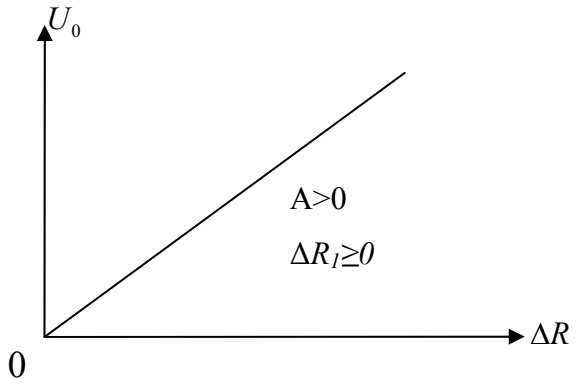


Рис. 13.4. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в первом и втором плечах схемы)

Соотношение (13.27) и график, приведенный на рис. 13.4, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с двумя датчиками (в первом и втором плечах) линейны, если выполняется условие $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |\Delta R|$.

Таким образом, для линейности неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в первом и втором плечах схемы, необходимо, чтобы приращения сопротивлений датчиков ΔR_1 и ΔR_2 были равны между собой по модулю и противоположны по знаку.

Отметим, что положительные приращения сопротивлений датчиков соответствуют увеличению их сопротивлений, а отрицательные приращения соответствуют уменьшению сопротивлений датчиков. Для выполнения условия линейности схемы необходимо, чтобы при увеличении сопротивления датчика в первом плече на ΔR сопротивление датчика во втором плече уменьшалось бы на эту же величину.

Датчики в первом и третьем плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_3 расположены в первом и третьем плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_4 (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. Приращения ΔR_2 и ΔR_4 тождественно равны нулю. Мостовая схема в исходном состоянии уравновеше-

на (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A + \Delta R \cdot \left(B - D\right)}, \tag{13.28}$$

где A, B, D – постоянные коэффициенты (определены выше).

Выражение (13.28) получено из предположения, что приращения сопротивлений датчиков равны и разнозначны. Очевидно, что это предположение может быть выполнено, если использованы одинаковые датчики с равными начальными сопротивлениями. Кроме того, для обеспечения равновесия мостовой схемы необходимо, чтобы были равны сопротивления, установленные во втором и четвертом плечах схемы. Таким образом, должны быть правомерны следующие равенства:

$$R_1 = R_3, \tag{13.29}$$

$$R_2 = R_4. \tag{13.30}$$

С учетом (13.29) и (13.30) выражение (13.28) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A - \Delta R}. \tag{13.31}$$

Учитывая, что $A >> \Delta R^2$, окончательно получим

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A} \tag{13.32}$$

График зависимости $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 13.5.

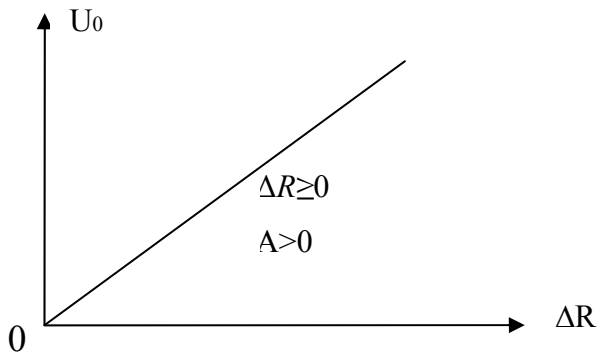


Рис. 13.5. Зависимость $U = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в первом и третьем плечах схемы)

Соотношение (13.31) и график, приведенный на рис. 13.5, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с двумя датчиками (в первом и третьем плечах) при выполнении принятых допущений линейны.

Датчики в первом и четвертом плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_4 расположены в первом и четвертом плечах мостовой схемы (см. рис. 13.2). В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_3 (приращения ΔR_2 и ΔR_3 соответственно равны нулю). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию: $|\Delta R_1| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. Предполагается также, что в исходном состоянии мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_4)}{A + \Delta R \cdot (B + F)}$$

где A, B, F – постоянные величины.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.6.

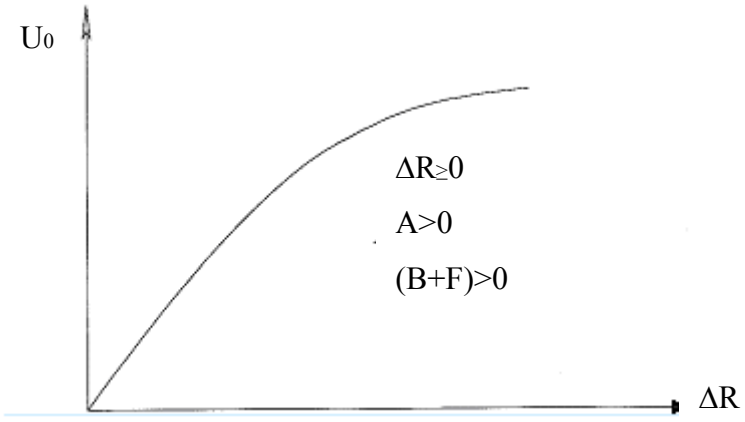


Рис. 13.6. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в первом и четвертом плечах схемы)

Соотношение (13.33) и график, приведенный на рис. 13.6, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками в первом и четвертом плечах нелинейны.

Датчики во втором и третьем плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_2 и R_3 расположены во втором и третьем плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию: $\left|-\Delta R_2\right| = \left|-\Delta R_3\right| = \left|\Delta R\right|$. В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_4, и их приращения соответственно равны нулю. Предполагается также, что в исходном состоянии мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_3\right)}{A - \Delta R \cdot \left(B + D\right)}, \qquad (13.34)$$

где A, B, D – постоянные коэффициенты.

График зависимости $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 13.7.

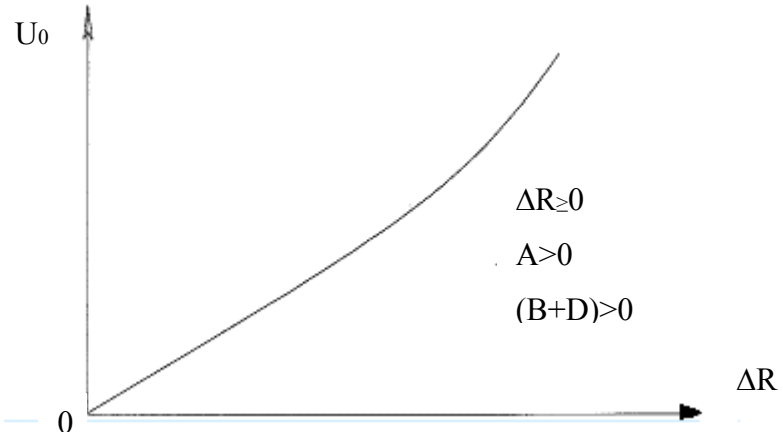


Рис. 13.7. Зависимость $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики во втором и третьем плечах схемы)

Соотношение (13.34) и график, приведенный на рис. 13.7, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками во втором и третьем плечах нелинейны.

Датчики во втором и четвертом плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_4 расположены во втором и четвертом плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $\left|-\Delta R_2\right| = \left|\Delta R_4\right| = \left|\Delta R\right|$. В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_4, и их приращения соответственно равны нулю. Предполагается также, что в исходном состоянии мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_1 + R_3\right)}{A + \Delta R \cdot \left(F - B\right)}, \tag{13.35}$$

где A, B, F – постоянные коэффициенты.

Принимая, что $R_1 = R_4$, $R_2 = R_3$ окончательно получим

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A} \tag{13.36}$$

График зависимости $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 13.8.

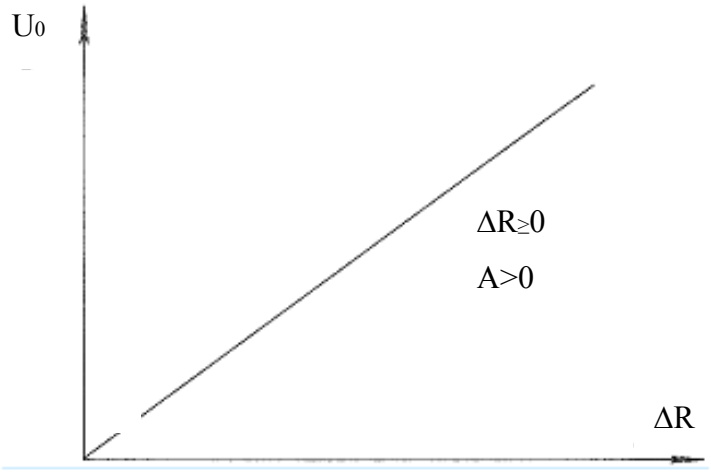


Рис. 13.8. Зависимость $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики во втором и четвертом плечах схемы)

Соотношение (13.36) и график, приведенный на рис. 13.8, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с

датчиками во втором и четвертом плечах при выполнении принятых допущений линейны.

Датчики в третьем и четвертом плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_3 и R_4 расположены в третьем и четвертом плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления, и их приращения соответственно равны нулю. Предполагается также, что в исходном положении мостовая схема уравновешена и выполняется условие $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. С учетом принятых допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_2)}{A} \tag{13.37}$$

где A – постоянный коэффициент.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.9.

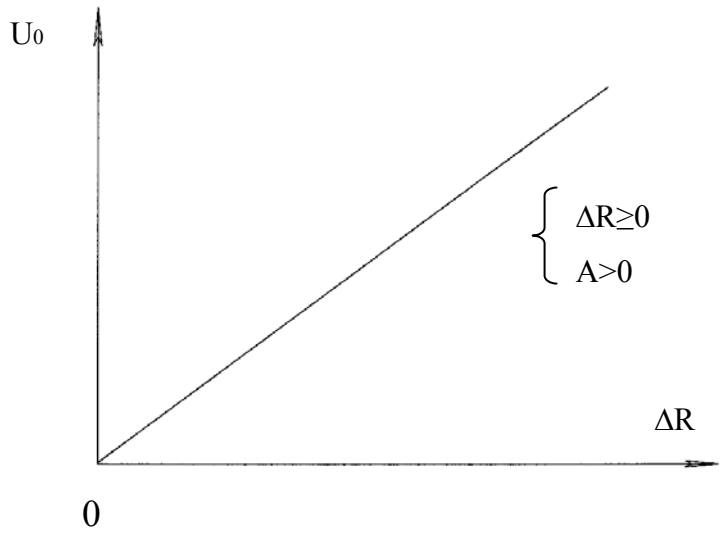


Рис. 13.9. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в третьем и четвертом плечах схемы)

Соотношение (13.37) и график, приведенный на рис. 13.9, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками в третьем и четвертом плечах схемы при выполнении принятых допущений линейны.

Схемы с тремя датчиками

Датчики в первом, втором и третьем плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1, R_2, R_3 расположены в первом, втором и третьем плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. В четвертом плече схемы установлено постоянное сопротивление R_4. Предполагается также, что в исходном положении мостовая схема уравновешена и соответственно выполняется условие $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. С учетом принятых допущений, выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_3 + R_4)}{A - \Delta R \cdot (C + D - B)}, \qquad (13.38)$$

где A, C, D – постоянные коэффициенты.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.10.

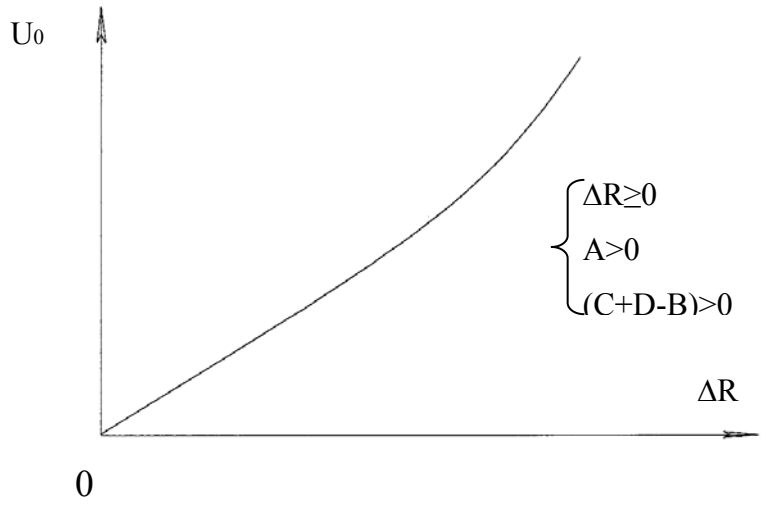


Рис. 13.10. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с тремя датчиками (датчики в первом, втором и третьем плечах схемы)

Соотношение (13.38) и график, приведенный на рис. 13.10, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками в первом, втором и третьем плечах схемы нелинейны. Нелинейность схемы сохраняется при размещении трех датчиков в любых других плечах мостовых измерительных схем.

Схемы с четырьмя датчиками

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_4 размещены в первом, втором, третьем и четвертом плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков должны удовлетворять условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. Предполагается также, что в исходном положении мостовая схема уравновешена и соответственно выполняется условие $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. С учетом принятых допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{A} \qquad (13.39)$$

где A – постоянный коэффициент.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.11.

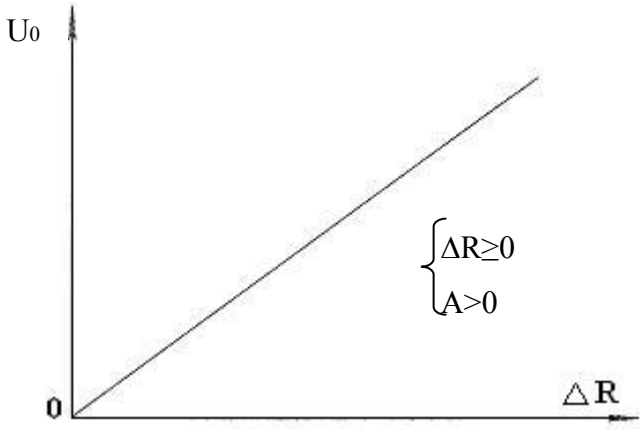


Рис. 13.11. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с четырьмя датчиками

Соотношение (13.39) и график, приведенный на рис. 13.11, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с четырьмя датчиками (во всех плечах измерительной схемы) при выполнении принятых допущений линейны.

13.2.3. Выводы и рекомендации

Анализ линейности мостовых измерительных схем (как токовых, так и потенциальных) свидетельствует о том, что при нечетном числе датчиков схе-

мы нелинейны, а при четном (два или четыре датчика) могут быть линейны при выполнении ряда условий. Эти условия сводятся к следующему: мостовые схемы должны быть симметричными, исходные (начальные) сопротивления датчиков должны быть одинаковы, а их приращения равными и попарно разнозначными. Подробно условия линейности неравновесных мостовых измерительных схем приведены в пп. 13.2.1 и 13.2.2 настоящего учебного пособия.

Рассмотрим, насколько реализуемы условия линейности неравновесных мостовых измерительных схем, приведенные выше. Оценим возможность практического выполнения этих условий при построении измерительных устройств различного назначения.

Предположим, что требуется включить в мостовую измерительную схему четыре тензодатчика, наклеенных на балку (рис. 13.12).

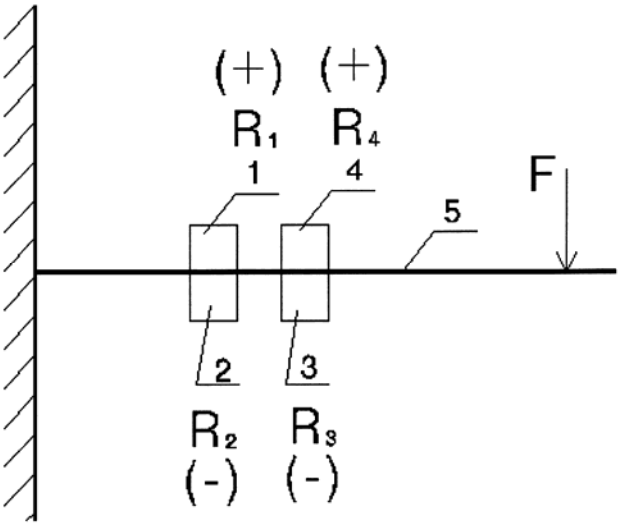


Рис. 13.12. Схема размещения тензодатчиков:
1, 2, 3, 4 – тензодатчики; 5 – балка; R_1, R_2, R_3, R_4 – сопротивления тензодатчиков; F – сила, изгибающая балку

Два тензодатчика наклеены сверху и при деформации балки имеют положительные приращения сопротивлений, а два других тензодатчика наклеены снизу и при деформации балки имеют отрицательные приращения сопротивлений.

Другими словами, при деформации балки 5 силой F сопротивления R_1 и R_4 будут возрастать, сопротивления R_3, R_4 – уменьшаться.

Для реализации условия линейности необходимо, чтобы сопротивления тензодатчиков в исходном состоянии (до деформации) были попарно равны ($R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$), а их приращения были попарно равны и разнозначны ($|\Delta R_1| = |-\Delta R_2|$, $|\Delta R_4| = |-\Delta R_3|$). Очевидно, что эти условия практически вполне выполнимы. Для этого необходимо использовать однотипные тензодатчики с одинаковыми характеристиками. При этом первый тензодатчик с сопротивлением R_1 необходимо включить в первое плечо, второй с сопротивлением R_2 – во второе плечо, третий – в третье и четвертый – в четвертое плечо неравновесной мостовой измерительной схемы, соединив их так, как это показано на рис. 13.2. В этом случае мостовая схема при принятых допущениях будет иметь линейную характеристику.

14. РАВНОВЕСНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

14.1. Общие положения

В данной главе учебного пособия проведен анализ равновесных мостовых измерительных схем постоянного тока. Рассмотрены различные варианты включения датчиков в равновесные мостовые схемы, примеры расчета схем, а также сделаны выводы по результатам исследований и даны рекомендации по практическому использованию рассматриваемых устройств.

Принципиальная электрическая схема равновесной мостовой схемы приведена на рис. 14.1.

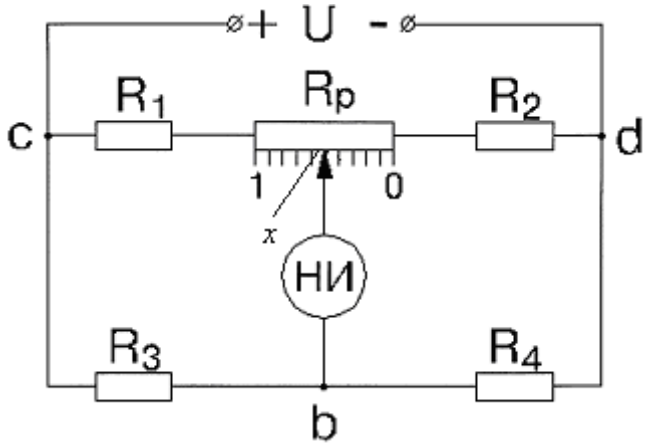


Рис. 14.1. Принципиальная электрическая схема равновесной мостовой измерительной схемы постоянного тока: $R_{\text{Р}}$ – сопротивление реохорда; x – координаты движка реохорда; НИ – нуль-индикатор; R_1, R_2, R_3, R_4 – электрические сопротивления; U – напряжение питания

Ниже рассматриваются четыре возможных варианта включения датчиков: датчик в первом плече; датчик во втором плече; датчик в третьем плече; датчик в четвертом плече мостовой схемы. Для каждого случая проведен анализ чувствительности и линейности мостовой схемы, сделаны соответствующие выводы.

14.2. Датчик в первом плече

Предполагается, что датчик с начальным (исходным) сопротивлением $R_{\text{Н}}$ включен в первое плечо равновесной мостовой измерительной схемы постоянного тока (см. рис. 14.1). Предполагая, что приращение сопротивления датчика

составляет ΔR_1, координата $x = 0$ при положении движка реохорда в крайнем правом положении и координата $x = 1$ при положении движка реохорда в крайнем левом положении, запишем условие равновесия для рассматриваемой схемы.

$$\left(R_H + \Delta R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot R_4 = \left(R_2 + R_p \cdot x\right) \cdot R_3 . \qquad (14.1)$$

Раскрыв скобки в уравнении (14.1), сделав приведение подобных (по принятому допущению $R_H \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$) и решив рассматриваемое уравнение относительно x, получим:

$$x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \Delta R_1 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} . \qquad (14.2)$$

Введем обозначение:

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} = A . \qquad (14.3)$$

С учетом (14.3) выражение (14.2) принимает вид

$$x = A + \Delta R_1 \cdot A \cdot \frac{1}{R_p} = A\left(1 + \Delta R_1 \cdot \frac{1}{R_p}\right). \qquad (14.4)$$

График полученной зависимости приведен на рис. 14.2.

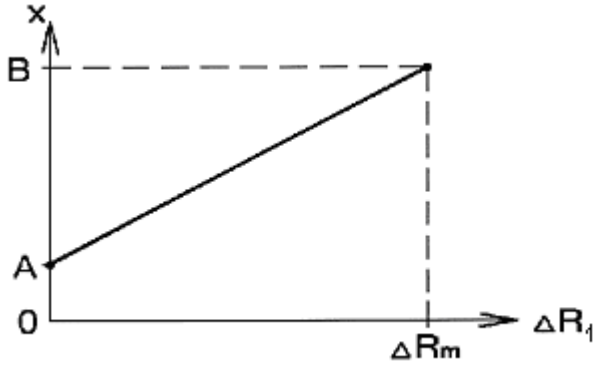


Рис. 14.2. Зависимость $x = f\left(\Delta R_1\right)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в первом плече

Отметим, что при ΔR_1=0 координата $x = A$, а при $\Delta R_1 = \Delta R_m$ (где ΔR_m – максимальное приращение сопротивления датчика) координата $x = B$, где B определяется соотношением

$$B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_m}{R_\text{Р}}\right). \qquad (14.5)$$

Анализ зависимости $x = f(\Delta R_1)$ показывает, что при размещении датчика в первом плече равновесная мостовая измерительная схема линейна.

Чувствительность равновесной схемы S определяется выражением

$$S = \lim_{\Delta R_1 \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta R_1'}, \qquad (14.6)$$

где Δx – приращение выходной величины (изменение координаты движка реохорда);

ΔR_1 – приращение входной величины (изменение сопротивления датчика).

При $\Delta R_1 = \text{const}$ чувствительность S растет при росте приращения Δx. Приращение Δx растет в соответствии с (14.4) при уменьшении сопротивления $R_\text{Р}$. Таким образом, при прочих равных и неизменных условиях чувствительность равновесной схемы растет при уменьшении сопротивления реохорда. Отметим, что рост чувствительности в этом случае сопровождается уменьшением диапазона возможных изменений сопротивления датчика.

Рассмотрим зависимость $x = f(\Delta R_1)$ с датчиком в первом плече в общем случае, т. е. не накладывая какие-либо ограничения на значения параметров мостовой схемы (в том числе считаем, что $R_H \cdot R_4 \neq R_2 \cdot R_3$). Тогда, решая уравнение (14.1) относительно x, получим

$$x = \frac{R_H \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3 + R_p \cdot R_4 + \Delta R_1 \cdot R_4}{R_p \cdot (R_3 + R_4)}. \qquad (14.7)$$

Разделим числитель и знаменатель соотношения (14.7) на R_4 и введем обозначение:

$$a = \frac{R_3}{R_4}. \qquad (14.8)$$

С учетом (14.8) соотношение (14.7) принимает вид

$$x = \frac{R_H - a \cdot R_2 + R_p}{R_p \cdot (1 + a)} + \Delta R_1 \cdot \frac{1}{R_p \cdot (1 + a)}. \qquad (14.9)$$

Сравнивая выражения (14.4) и (14.9) легко убедиться, что усложнение зависимости $x = f(\Delta R_1)$ за счет отказа от равенства $R_H \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ не дает каких–либо существенных преимуществ. Более того, при этом не меняются основные свойства мостовой схемы: $x = f(\Delta R_1)$ по-прежнему имеет линейный характер, а чувствительность мостовой схемы зависит от значения сопротивления реохорда $R_\text{Р}$ (чувствительность растет при уменьшении $R_\text{Р}$ и падает при росте этого сопротивления). Исходя из результатов анализов, можно заключить, что отказ от упрощения рассматриваемого соотношения не дает принципиально новых результатов. В силу этого все дальнейшие исследования проведены из предположения, что в исходном состоянии схемы справедливо равенство $R_H \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$.

14.3. Датчик во втором плече

Рассматривается случай включения датчика с начальным (исходным) сопротивлением R_{2H} во второе плечо равновесной мостовой измерительной схемы постоянного тока (см. рис. 14.1). Проведем исследование схемы при следующих допущениях: приращение (изменение) сопротивления датчика равно ΔR; координата $x = 0$ при крайнем правом положении движка реохорда; координата $x = 1$ при крайнем левом положении движка реохорда, кроме того, считаем справедливым соотношение

$$R_1 \cdot R_4 = R_{2H} \cdot R_3, \qquad (14.10)$$

где R_{2H} – начальное (исходное) сопротивление датчика ($R_2 = R_{2H} + \Delta R_2$).

Условие равновесия для исследуемой мостовой схемы запишется в виде

$$\left(R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot R_4 = \left(R_{2H} + \Delta R_2 + R_p \cdot x\right) \cdot R_3. \qquad (14.11)$$

Раскрывая скобки в уравнении (14.11), сокращая подобные члены и решая рассматриваемое уравнение относительно x, получим

$$x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \Delta R_2 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \qquad (14.12)$$

где $\dfrac{R_4}{R_3 + R_4} = A$; $\dfrac{R_3}{R_3 + R_4} = C$.

Учитывая принятые обозначения, окончательно запишем зависимость $x = f(\Delta R_2)$:

$$x = A - \Delta R_2 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot C \,. \qquad (14.13)$$

График полученной зависимости приведен на рис. 14.3.

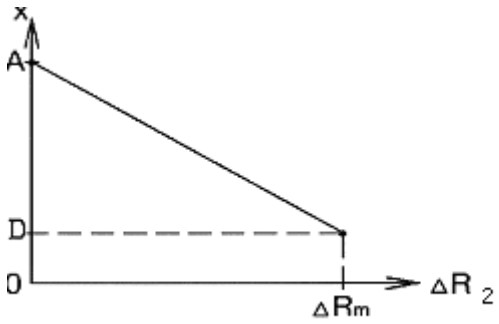


Рис. 14.3. Зависимость $x = f(\Delta R_2)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком во втором плече

Отметим, что при ΔR_2=0 координата $x = A$ и при $\Delta R_2 = \Delta R_m$ координата $x = D$ (где ΔR_m – максимальное приращение сопротивления датчика; D – величина, определяемая соотношением (14.13) при $\Delta R_2 = \Delta R_m$).

$$D = A - \frac{\Delta R_m}{R_P} C \qquad (14.14)$$

Характер зависимости $x = f(\Delta R_2)$ свидетельствует о том, что при размещении датчика во втором плече равновесная мостовая измерительная схема линейна.

Чувствительность рассматриваемой равновесной мостовой измерительной схемы (в соответствии с соотношением (14.6), приведенным выше) зависит от значения сопротивления реохорда $R_\text{Р}$. При росте сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы уменьшается, а при снижении сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы возрастает. Отметим, что при росте чувствительности мостовой схемы одновременно уменьшается диапазон возможных изменений сопротивления датчика.

14.4. Датчик в третьем плече

Предполагается, что датчик включен в третье плечо равновесной мостовой измерительной схемы (см. рис. 14.1) и имеет в исходном (начальном) состоянии сопротивление R_{3H}.

Исследование мостовой схемы проводится при следующих допущениях: приращение (изменение) сопротивления датчика равно ΔR_3; координата движка реохорда $x = 0$ при крайнем правом его положении; координата движка реохорда $x = 1$ при крайнем левом его положении; справедливо соотношение $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_{3H}$ $(R_3 = R_{3H} + \Delta R_3)$.

Условие равновесия для исследуемой мостовой схемы запишется в виде

$$\left(R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot R_4 = \left(R_2 + R_p \cdot x\right) \cdot (R_{3H} + \Delta R_3) . \qquad (14.15)$$

Раскрыв скобки в уравнении (14.15), сократив подобные члены и решив рассматриваемое соотношение относительно x, получим

$$x = \frac{R_4}{R_3 + R + \Delta R_3} - \Delta R_3 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_2}{R_4 + R + R_3} . \qquad (14.16)$$

График полученной зависимости $x = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 14.4.

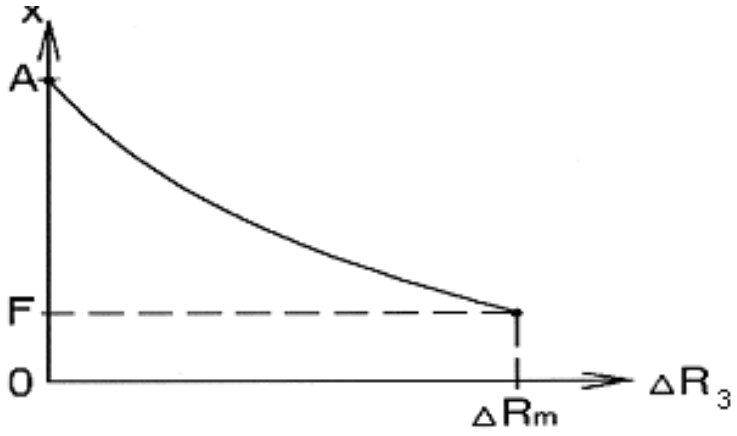


Рис. 14.4. Зависимость $x = f\left(\Delta R_3\right)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в третьем плече

Отметим, что при $\Delta R_3 = 0$ координата $x = A$ и при $\Delta R_3 = \Delta R_m$ координата $x = F$, где ΔR_m – максимальное приращение (изменение) сопротивления датчика; величина A – определяется соотношением (14.17), а величина F – соотношением (14.18).

$$A = \frac{R_4}{R_2 + R_{3H}}; \qquad (14.17)$$

$$F = \frac{R_4}{R_4 + R_{3H} + \Delta R_m} - \Delta R_m \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_2}{R_4 + R_{3H} + \Delta R_m}, \qquad (14.18)$$

где R_{3H} – начальное (исходное) сопротивление датчика.

Характер зависимости $x = f(\Delta R_3)$ свидетельствует о том, что при размещении датчика в третьем плече равновесная мостовая измерительная схема нелинейна.

Чувствительность рассматриваемой равновесной мостовой измерительной схемы (см. соотношение (14.6), приведенное выше) зависит от значения сопротивления реохорда $R_{\text{Р}}$. При росте сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы снижается, а при уменьшении сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы возрастает. Отметим, что при росте чувствительности мостовой схемы (за счет уменьшения $R_{\text{Р}}$) одновременно уменьшается диапазон возможных изменений сопротивления датчика.

14.5. Датчик в четвертом плече

Предполагается, что датчик включен в четвертое плечо равновесной мостовой измерительной схемы (см. рис. 14.1) и имеет в исходном (начальном) состоянии сопротивление R_{4H} ($R_4 = R_{4H} + \Delta R_4$).

Исследование мостовой схемы проводится при следующих допущениях: приращение (изменение) сопротивления датчика равно ΔR_4; координата движка реохорда $x = 0$ при крайнем правом его положении; координата движка реохорда $x = 1$ при крайнем левом его положении; справедливо соотношение

$$R_1 \cdot R_{4H} = R_2 \cdot R_3.$$

Условие равновесия для исследуемой мостовой схемы запишется в виде

$$\left(R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot \left(R_{4H} + \Delta R\right) = (R_2 + R_p \cdot x) \cdot R_3. \qquad (14.19)$$

Раскрыв скобки в уравнении (14.19), сократив подобные члены и решив рассматриваемое соотношение относительно x, получим

$$x = \frac{R_{4H}}{R_{4H} + \Delta R_4 + R_3} + \Delta R_4 \cdot \frac{R_1 + R_p}{R_p \cdot (R_{4H} + \Delta R_4 + R_3}. \qquad (14.20)$$

График полученной зависимости $x = f(\Delta R_4)$ приведен на рис. 14.5.

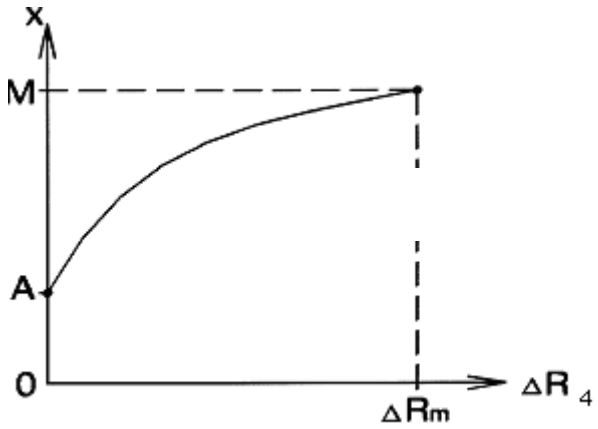


Рис. 14.5. Зависимость $x = f(\Delta R_4)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в четвертом плече

Проанализируем полученную зависимость $x = f(\Delta R_4)$. При отсутствии приращения (изменения) сопротивления датчика (при $\Delta R_4 = 0$) координата движка реохорда $x = A$, где величина A – определяется соотношением (14.21). При максимальном приращении (изменении) сопротивления датчика (при $\Delta R_4 = \Delta R_m$) координата движка реохорда $x = M$ определяется соотношением (14.22).

$$A = \frac{R_{4H}}{R_{4H} + R_3}; \qquad (14.21)$$

$$M = \frac{R_{4H}}{R_{4H} + \Delta R_m + R_3} - \Delta R_m \cdot \frac{R_1 + R_p}{R_p \cdot (R_{4H} + \Delta R_m + R_3}, \qquad (14.22)$$

где R_{4H} – начальное (исходное) сопротивление датчика R_{4H} ($R_4 = R_{4H} + \Delta R_4$).

Зависимость $x = f(\Delta R_4)$ в рассматриваемом случае нелинейна, что свидетельствует о нелинейности равновесной мостовой измерительной схемы при размещении датчика в четвертом плече (см. рис. 14.1).

Чувствительность равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в четвертом плече зависит от значения сопротивления реохорда (см. соотношения (14.6) и (14.20), приведенные выше), но в рассматриваемом случае эта

зависимость менее выражена и носит более сложный характер, чем в случаях размещения датчиков в других плечах мостовой схемы. Вместе с тем и при размещении датчика в четвертом плече с ростом сопротивления реохорда уменьшается чувствительность мостовой схемы, а при уменьшении сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы возрастает.

Влияние сопротивления реохорда на чувствительность мостовой схемы рассмотрено при условии неизменности всех других параметров схемы (сопротивлений плеч, сопротивления датчика и его приращения, напряжения питания, чувствительности нуль-индикатора). Необходимо также отметить, что при росте чувствительности мостовой схемы (за счет $R_{\text{Р}}$) уменьшается диапазон возможных изменений сопротивления датчика, а при уменьшении чувствительности (за счет увеличения $R_{\text{Р}}$) диапазон возможных изменений сопротивления датчика возрастает.

14.6. Примеры расчета равновесных схем

Пример 1

Считаются заданными следующие величины (см. рис. 14.1): начальное сопротивление датчика $R_{\text{н}}$; конечное сопротивление датчика $R_{\text{к}}$, значения сопротивлений R_3 и R_4. Датчик включен в 1-е плечо (R_1 – текущее сопротивление датчика).

Требуется найти значение сопротивления реохорда $R_{\text{Р}}$ и значение сопротивления R_2.

Предполагаем, что сопротивление датчика равно $R_{\text{н}}$ и движок реохорда при этом находится в крайнем левом положении (т. е. $x = 0$). Тогда условие равновесия (для схемы, изображенной на рис. 14. 1) запишется в виде

$$\left(R_{\text{н}} + R_{\text{Р}}\right) \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \qquad (14.23)$$

Разделим правую и левую части равенства (14.23) на R_4 и введем обозначение $a = \dfrac{R_3}{R_4}$, которое уже использовалось в п. 14.1 настоящего учебного посо-

бия (см. выражение (14.8), приведенное выше). В этом случае выражение (14.23) принимает вид

$$R_{\text{н}} + R_{\text{Р}} = R_2 \cdot a\,. \qquad (14.24)$$

Предполагая, что сопротивление датчика равно $R_{\text{к}}$ и движок реохорда при этом находится в крайнем правом положении (т. е. $x = 1$), запишем условие равновесия (для схемы на рис. 14.1):

$$R_{\text{к}}+R_4 = (R_2+R_{\text{Р}})\cdot R_3 \qquad (14.25)$$

Используя принятое обозначение $a = \dfrac{R_3}{R_4}$, запишем уравнение (14.25) в виде

$$R_{\text{к}} = (R_2+R_{\text{Р}})\cdot a \qquad (14.26)$$

Решая совместно уравнения (14.24) и (14.26) относительно $R_{\text{Р}}$ и R_2, получим

$$R_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}}{1+a}, \qquad (14.27)$$

$$R_2 = \frac{R_{\text{к}} + a \cdot R_{\text{н}}}{a \cdot (1+a)}. \qquad (14.28)$$

Полученные соотношения (14.27) и (14.28) позволяют рассчитать значения искомых величин R_P и R_2 по значениям заданных величин $R_{\text{Н}}$, $R_к$ и $a = R_3/R_4$.

Пример 2

Рассчитать мостовую схему, приведенную на рис. 14.6.

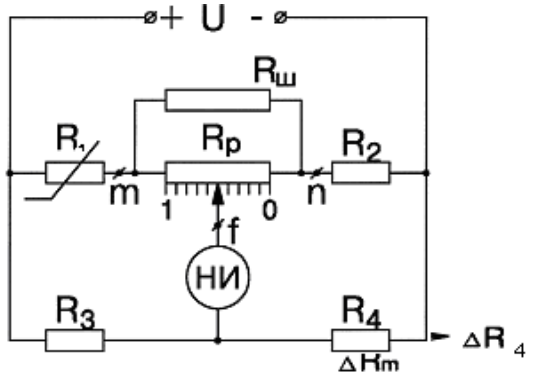


Рис. 14.6. Расчетная принципиальная схема равновесного моста постоянного тока с шунтом: $R_{\text{Ш}}$ – сопротивление шунта; R_{l} – сопротивление датчика (текущее)

Считаются заданными следующие величины: начальное сопротивление датчика $R_{\text{н}}$; конечное сопротивление датчика $R_{\text{к}}$; сопротивление реохорда $R_{\text{Р}}$; значение сопротивлений R_3 и R_4.

Требуется найти: значение сопротивления шунта $R_{\text{Ш}}$ и значение сопротивления R_2.

Рассмотрим параллельное соединение сопротивлений $R_{\text{Ш}}$ и $R_{\text{Р}}$.

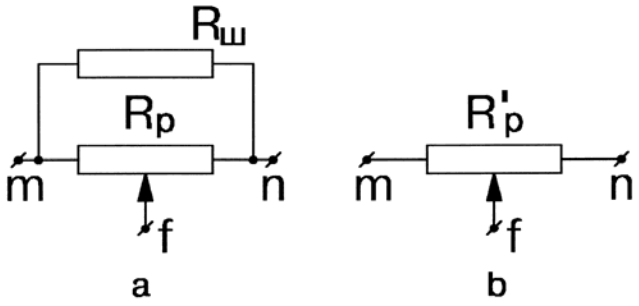


Рис. 14.7. Эквивалентные электрические схемы

Электрическая схема, приведенная на рис. 14.7, *a*, эквивалентна схеме, приведенной на рис. 14.7, *b*, если удовлетворяется условие

$$R'_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{Р}} \cdot R_{\text{Ш}}}{R_{\text{Р}} + R_{\text{Ш}}} \tag{14.29}$$

Таким образом, схема рис. 14.6 сводится к схеме, приведенной на рис. 11.1 (если принять $R_{\text{Р}} = R'_{\text{Р}}$), а пример 2 сводится к примеру 1, уже рассмотренному выше. Исходя из сказанного, можно записать для рассматриваемого случая:

$$R'_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}}{1 + a}, \tag{14.30}$$

$$R_2 = \frac{R_{\text{к}} + a \cdot R_{\text{н}}}{a \cdot (1 + a)}. \tag{14.31}$$

Решая уравнение (14.29) относительно $R_{\text{Ш}}$, получим

$$R_{\text{Ш}} = \frac{R_{\text{Р}} \cdot R'_{\text{Р}}}{R_{\text{Р}} - R'_{\text{Р}}}. \tag{14.32}$$

Подставляя в (14.32) значение $R'_{\text{Р}}$ в соответствии с выражением (14.30), найдем соотношение, связывающее значение сопротивления шунта $R_{\text{Ш}}$ с заданными по условию величинами:

$$R_{\text{Ш}} = \frac{R_{\text{Р}} \cdot \left(R_{\text{к}} - R_{\text{н}}\right)}{R_{\text{Р}} \cdot \left(1 + a\right) - R_{\text{к}} + R_{\text{н}}} \qquad (14.33)$$

Полученные соотношения (14.31) и (14.33) позволяют рассчитать значения величин R_2 и $R_{\text{Ш}}$ (по значениям заданных величин). Отметим, что шунтирование реохорда повышает чувствительность схемы и изменяет диапазон возможных изменений сопротивления датчика (диапазон при этом сокращается по сравнению со случаем без шунтирования реохорда).

15. МОСТОВЫЕ СХЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

15.1. Общие положения

В данном разделе рассмотрены основные положения и соотношения, используемые при анализе четырехплечих мостовых измерительных схем переменного тока (рис. 15.1).

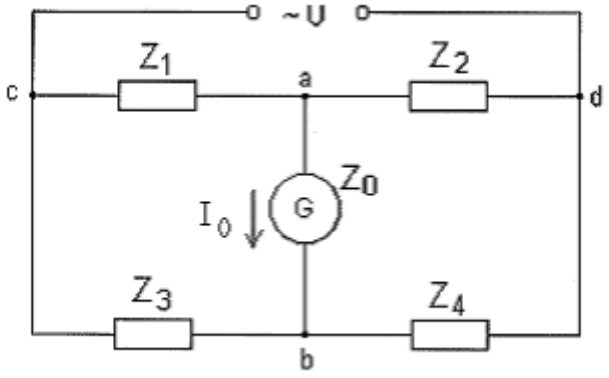


Рис. 15.1. Принципиальная электрическая схема
четырехплечего измерительного моста переменного тока

В главах 11, 12, 13 и 14 учебного пособия рассмотрены основные соотношения и характеристики применительно к мостовым измерительным схемам постоянного тока. Мостовая схема постоянного тока является частным случаем мостовой схемы переменного тока (когда $Z = R$ и $f = 0$, где f – частота питающего схему тока) и все соотношения для мостов постоянного тока в основном сохраняют правомерность и для мостов переменного тока, если в них активные сопротивления R заменить комплексными сопротивлениями Z, а напряжения и токи – комплексами соответствующих величин. При этом у мостов переменного тока появляются новые свойства, которыми не обладают мостовые схемы постоянного тока и которые будут рассмотрены ниже, в последующих параграфах учебного пособия. В данном разделе исследуем рассматриваемый вопрос чисто формально, путем замены величин R, I и U на комплексные величины.

Прежде чем проводить замены, рассмотрим принятый порядок обозначения комплексных величин.

Государственный стандарт ГОСТ 1494–77 [56] устанавливает следующие буквенные обозначения комплексных величин (табл. 15.1).

Таблица 15.1

Обозначение комплексных величин

Наименование величины	**Обозначение**	
	основное	**резервное**
Действительная часть	A'	$\mathrm{Re}\,\underline{A}$
Мнимая часть	A''	$\mathrm{Im}\,\underline{A}$
Комплексная величина	$\underline{A} = A' + jA''$ $\underline{A} = A \cdot e^{j\varphi}$ $\underline{A} = A \angle \varphi$	$\underline{A} = \mathrm{Re}\,\underline{A} + \mathrm{j}\,\mathrm{Im}\,\underline{A}$ $\underline{A} = \lvert\underline{A}\rvert \cdot e^{j\varphi}$ $\underline{A} = \lvert\underline{A}\rvert \angle \varphi$

Для комплексных величин следует применять обозначения типа $\underline{C} = \mathrm{Re}\,\underline{C} + j\mathrm{Im}\,\underline{C}$ или $\underline{C} = B + jD$, где под C, B, D понимаются любые величины. Кроме рассмотренной алгебраической формы записи комплексного числа, может быть использована показательная форма записи: $\underline{C} = C \cdot e^{j\varphi}$, где C – модуль комплексного числа; φ – аргумент комплексного числа.

Для электрических величин используемые буквенные обозначения приведены в 15.2.

Отметим, что по государственному стандарту [56] допускается модули комплексных величин, не являющихся изображениями функции времени, обозначать строчными буквами.

Допускается для обозначения комплексных действующих и амплитудных значений величин, являющихся синусоидальными функциями времени, взамен способов, указанных в табл. 15.1 и 15.2, над основным обозначением величины ставить точку.

Таблица 15.2

Обозначение электрических комплексных величин

Наименование величины	**Обозначение**	
	основное	**резервное**
Действительная часть (активное сопротивление)	R	$\mathrm{Re}\,\underline{Z}$
Мнимая часть (реактивное сопротивление)	X	$\mathrm{Im}\,\underline{Z}$
Комплексная величина (комплексное (полное) сопротивление)	$\underline{Z}=R+\mathrm{j}X$ $\underline{Z}=Z\cdot e^{j\varphi}$ $\underline{Z}=Z\angle\varphi$ $\dot{I}$; $\dot{I}_m$ $\dot{U}$; $\dot{U}_m$	$\underline{Z}=\mathrm{Re}\,\underline{Z}+\mathrm{j}\,\mathrm{Im}\,\underline{Z}$ $\underline{Z}=\lvert\underline{Z}\rvert\cdot e^{j\varphi}$ $\underline{Z}=\lvert Z\rvert\angle\varphi$

В табл. 15.2 приняты следующие обозначения: $\underline{Z}$ – комплексное сопротивление; Z – модуль комплексного сопротивления; R – активное сопротивление; X – реактивное сопротивление; φ – аргумент комплексного сопротивления (сдвиг по фазе между током и напряжением); $\dot{I}$ и $\dot{U}$ – комплексы действующих значений тока и напряжения; $\dot{I}_m$ и $\dot{U}_m$ – комплексы амплитудных значений тока и напряжения. Отметим, что в электротехнической литературе принято обозначать комплексное сопротивление через Z большое (печатное), а модуль комплексного сопротивления – через z малое (прописное). Представим ток в измерительной диагонали мостовой схемы с учетом приведенных обозначений:

$$\dot{I}_0=\dot{U}\cdot\frac{\underline{Z}_1\cdot\underline{Z}_4-\underline{Z}_2\cdot\underline{Z}_3}{\underline{Z}_0\cdot(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2)\cdot(\underline{Z}_3+\underline{Z}_4)+\underline{Z}_1\cdot\underline{Z}_2\cdot(\underline{Z}_3+\underline{Z}_4)+\underline{Z}_3\cdot\underline{Z}_4\cdot(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2)} \quad (15.1)$$

где $\dot{I}_0$ – комплекс тока в измерительной диагонали;

$\dot{U}$ – комплекс напряжения питания;

$\underline{Z}_0$ – комплексное сопротивление прибора G, установленного в измерительной диагонали мостовой схемы;

$\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, $\underline{Z}_4$ – комплексные сопротивления плеч мостовой схемы.

Равновесие мостовой схемы наступает при таком подборе параметров моста, при котором $\dot{I}_0 = 0$, что имеет место при выполнении условия

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 . \qquad (15.2)$$

В развернутом виде выражения комплексных (полных) сопротивлений могут быть представлены в алгебраической или показательной форме. В алгебраической форме эти выражения принимают вид

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 , \qquad (15.3)$$

где R_1 и X_1 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления первого плеча мостовой схемы;

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 , \qquad (15.4)$$

где R_2 и X_2 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления второго плеча мостовой схемы;

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 , \qquad (15.5)$$

где R_3 и X_3 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления третьего плеча мостовой схемы;

$$\underline{Z}_4 = R_4 + jX_4 , \qquad (15.6)$$

где R_4 и X_4 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления четвертого плеча мостовой схемы.

В показательной форме рассматриваемые выражения принимают вид

$$\underline{Z}_1 = Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} , \qquad (15.7)$$

где $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления первого плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \dfrac{X_1}{R_1}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения в первом плече мостовой схемы;

$$\underline{Z}_2 = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} , \qquad (15.8)$$

где $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления второго плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \text{arctg}\dfrac{X_2}{R_2}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения во втором плече мостовой схемы;

$$\underline{Z}_3 = Z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \tag{15.9}$$

где $Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления третьего плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \text{arctg}\dfrac{X_3}{R_3}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения в третьем плече мостовой схемы;

$$\underline{Z}_4 = Z_4 \cdot e^{j\varphi_4}, \tag{15.10}$$

где $Z_4 = \sqrt{R_4^2 + X_4^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления четвертого плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \text{arctg}\dfrac{X_4}{R_4}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения в четвертом плече мостовой схемы.

Подставляя в (15.2) значения $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$ в показательной форме (15.7), (15.8), (15.9) и (15.10), получим

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot Z_4 \cdot e^{j\varphi_4} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} \cdot Z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \tag{15.11}$$

$$Z_1 \cdot Z_4 \cdot e^{j(\varphi_1+\varphi_4)} = Z_2 \cdot Z_3 \cdot e^{j(\varphi_2+\varphi_3)}. \tag{15.12}$$

Выражение (15.12) правомерно, если выполняются условия:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3, \tag{15.13}$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \tag{15.14}$$

Таким образом, для уравновешивания мостовой схемы переменного тока необходимо выполнить два условия: (15.13) и (15.14). Другими словами, для уравновешивания рассматриваемой схемы необходимо две регулировки («по модулям» и «по фазам»), в то время как для уравновешивания мостовой схемы постоянного тока достаточно одной регулировки.

Условие (15.14) показывает, при каком расположении сопротивлений, в зависимости от их характера, можно уравновесить мостовую схему. Если смежные плечи моста, например третье и четвертое, имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 (то есть $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$), то сопротивление двух других плеч должно иметь или индуктивный, или емкостной характер. Если противоположные плечи имеют чисто активные сопротивления, то одно из двух других должно иметь индуктивный характер, а второе – емкостной.

В мостах переменного тока (как и в мостах постоянного тока) в качестве измерительных и нуль-индикаторов могут использоваться электронные приборы с большим внутренним сопротивлением ($R_0 \to \infty$). Такие мосты, как уже отмечалось, называются *потенциальными мостовыми измерительными схемами*. Для этих схем напряжение между точками a и b (рис. 15.1) можно определить по соотношению

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_0 = \dot{U} \cdot \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_4) \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)}, \qquad (15.15)$$

где $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_0$, $\dot{U}$ – комплексы соответствующих напряжений;

$\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, $\underline{Z}_4$ – комплексные (полные) сопротивления, включенные соответственно в первое, второе, третье и четвертое плечи мостовой схемы.

Отметим, что если в момент считывая показаний мостовая схема уравновешена (соотношение (15.2) выполняется), то такая мостовая схема называется *равновесной*. Если же в момент считывания показаний мостовая схема не уравновешена (соотношение (15.2) не выполняется), то такая мостовая схема называется *неравновесной*. В дальнейшем основное внимание будет уделено равновесным мостовым схемам, а неравновесные схемы (как менее распространенные) будут рассмотрены сравнительно кратко в виде обзора возможных вариантов схем переменного тока.

15.2. Измерения параметров катушек индуктивности

Для измерения индуктивностей и для включения индуктивных датчиков широко используются равновесные мостовые схемы переменного тока. При

этом электрическая схема замещения катушек индуктивностей может быть последовательной (рис. 15.2) или параллельной (рис. 15.3).

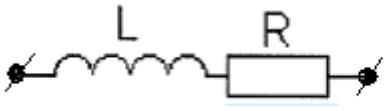


Рис. 15.2. Последовательная схема замещения реальной катушки индуктивностей:
L – идеальная индуктивность; R – активное сопротивление

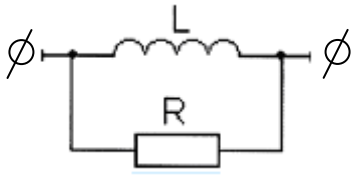


Рис. 15.3. Параллельная схема замещения реальной катушки индуктивностей:
L – идеальная индуктивность; R – активное сопротивление

Последовательная схема замещения используется при большой добротности исследуемой катушки индуктивности ($Q > 1$), а параллельная схема замещения используется при малой добротности исследуемой катушки индуктивности ($Q < 1$).

Добротность Q для обеих схем замещения определяется соотношением

$$Q = \frac{X_э}{R_э}, \tag{15.16}$$

где $X_э$ – эквивалентное реактивное сопротивление исследуемой катушки индуктивности;

$R_э$ – эквивалентное активное сопротивление исследуемой катушки индуктивности.

Для последовательной схемы замещения справедливы неравенства:

$$X_э = X = \omega L, \tag{15.17}$$

$$R_э = R, \tag{15.18}$$

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \tag{15.19}$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – частота тока, протекающего по плечам мостовой схемы.

Для параллельной схемы замещения можно записать (см. рис. 15.3):

$$\underline{Z}_э = \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L}, \tag{15.20}$$

$$\underline{Z}_э = \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j\frac{\omega L R^2}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{15.21}$$

$$\underline{Z}_э = R_э + jX_э, \tag{15.22}$$

$$R_э = \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{15.23}$$

$$x_э = \frac{\omega L R^2}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{15.24}$$

$$Q = \frac{X_э}{R_э} = \frac{R}{\omega L}. \tag{15.25}$$

Полученные выражения (15.19) и (15.25) позволяют рассчитать добротность катушек индуктивностей при использовании соответственно последовательной и параллельной схем замещения.

Необходимо отметить, что четырехплечие мосты обладают плохой сходимостью (трудно уравновешиваются) при малых значениях коэффициентов добротности (в том числе и при параллельной схеме замещения) и, в силу этого, используются редко. Чаще применяются (при измерениях малых значений коэффициентов добротности) шестиплечие мосты, описываемые ниже, в последующих пунктах учебного пособия.

В данном параграфе учебного пособия рассматривается измерение индуктивностей при использовании последовательной схемы замещения (рис. 15.4).

Условие равновесия для мостовой схемы рис. 15.4 запишется в виде

$$\left(R + j\omega L\right) \cdot R_4 = \left(R_2 + j\omega L_2\right) \cdot R_3, \tag{15.26}$$

$$R \cdot R_4 + j\omega L R_4 = R_2 \cdot R_3 + j\omega L_2 R_3. \tag{15.27}$$

Два комплексных числа равны между собой, если равны их вещественные и мнимые части. Приравнивая левые и правые вещественные и мнимые части уравнения (15.27) и решая полученные равенства относительно искомых величин R, L и Q, получим

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \qquad (15.28)$$

$$L = L_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}. \qquad (15.29)$$

Поскольку в данном случае использована последовательная схема замещения, добротность катушки индуктивностей оценивается соотношением (15.19).

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазинов сопротивлений R_2 и индуктивностей L_2, можно по выражениям (15.28), (15.29) и (15.19) определить измеряемые величины R, L и Q.

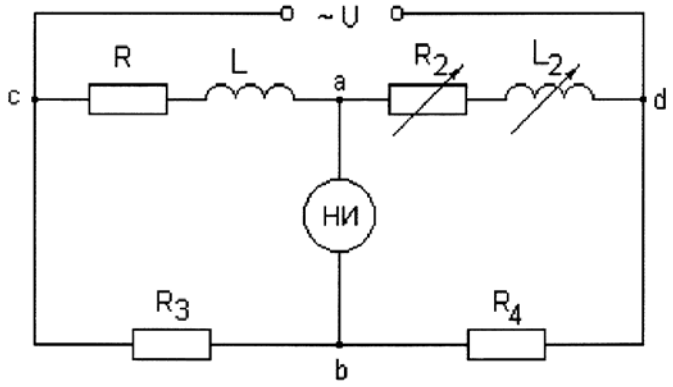


Рис. 15.4. Принципиальная электрическая схема четырехплечего моста для измерения параметров катушек индуктивностей (первый вариант): R, L – измеряемые величины; R_2 – магазин сопротивлений; L_2 – магазин индуктивностей; R_3, R_4 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

Для измерения искомых величин R и L, кроме описанной схемы рис. 15.4, может быть использована мостовая схема с магазином емкостей (рис. 15.5).

Комплексные сопротивления плеч моста следующие значения (см. рис. 15.5):

первое плечо $\underline{Z}_1 = R + j\omega L$;

второе плечо $\underline{Z}_2 = R_2$;

третье плечо $\underline{Z}_3 = R_3$;

четвертое плечо $\underline{Z}_4 = \dfrac{R_4 \cdot (j\omega C_4)^{-1}}{R_4 + (j\omega C_4)^{-1}} = \dfrac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$.

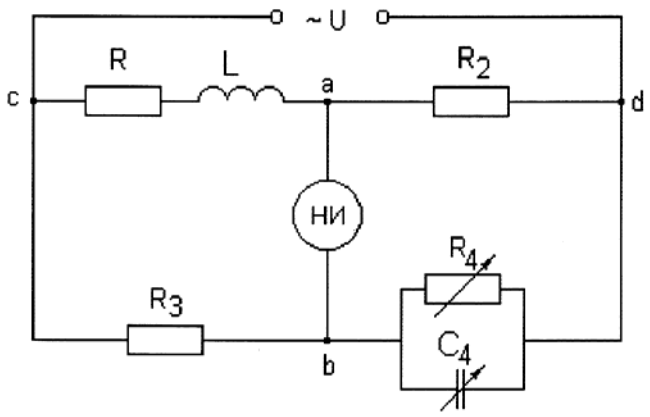


Рис. 15.5. Принципиальная электрическая схема четырехплечего моста для измерения параметров катушки индуктивностей (второй вариант): R, L – измеряемые величины; R_4 – магазин сопротивлений; C_4 – магазин емкостей; R_2, R_3 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

При равновесии мостовой схемы имеет место следующее соотношение:

$$(R + j\omega L) \cdot \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} = R_2 \cdot R_3, \qquad (15.30)$$

$$R \cdot R_4 + j\omega L R_4 = R_2 \cdot R_3 + j\omega C_4 R_2 R_3 R_4. \qquad (15.31)$$

Приравнивая левые и правые вещественные и мнимые части уравнения (15.31) друг другу и решая эти равенства относительно искомых величин R и L, получим

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \qquad (15.32)$$

$$L = C_4 R_2 R_3. \qquad (15.33)$$

Добротность исследуемой катушки индуктивностей записывается в виде

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \omega C_4 R_4. \qquad (15.34)$$

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазина сопротивлений R_4 и магазина емкостей C_4, можно по выражениям (15.32)–(15.34) определить измеряемые величины R, L и Q.

15.3. Измерение параметров конденсаторов

Реальный конденсатор представляется эквивалентной электрической схемой в виде идеальной емкости, последовательно или параллельно соединенной с активным сопротивлением, обусловленным потерями в исследуемом конденсаторе.

На рис. 15.6 приведены эквивалентные электрические схемы реального конденсатора с потерями.

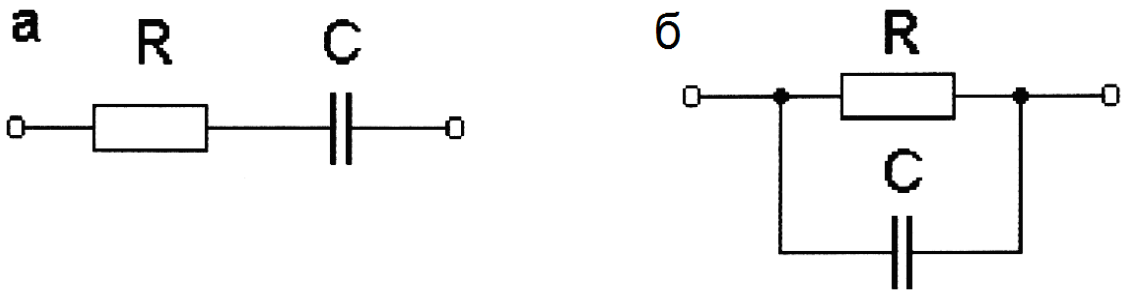


Рис. 15.6. Последовательная (*а*) и параллельная (*б*) электрические эквивалентные схемы реального конденсатора с потерями

Потери в реальном конденсаторе принято оценивать величиной тангенса угла потерь ($\mathrm{tg}\,\delta$), определяемого соотношением

$$tg\delta = \frac{R_э}{X_э}, \qquad (15.35)$$

где $R_э$ – активная составляющая эквивалентной схемы замещения конденсатора;

$X_э$ – реактивная составляющая эквивалентной схемы замещения конденсатора.

Для последовательной схемы замещения (рис. 15.6, *а*) справедливы равенства:

$$X_э = X_c = \frac{1}{\omega C}, \qquad (15.36)$$

$$R_э = R, \qquad (15.37)$$

$$\mathrm{tg}\,\delta = \omega \cdot C \cdot R, \qquad (15.38)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Для параллельной схемы замещения (рис. 15.6, *б*) справедливы равенства:

$$\underline{Z}_э = \frac{R \cdot (j\omega \cdot C)^{-1}}{R + (j\omega \cdot C)^{-1}}, \tag{15.39}$$

$$\underline{Z}_э = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} - j\frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \tag{15.40}$$

$$\underline{Z}_э = R_э - jx_э, \tag{15.41}$$

$$R_э = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \tag{15.42}$$

$$X_э = \frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \tag{15.43}$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C R}. \tag{15.44}$$

Полученные выражения (15.38) и (15.44) позволяют рассчитать $\operatorname{tg}\delta$ при использовании соответственно последовательной и параллельной схем замещения реальных конденсаторов.

Для измерения параметров конденсаторов с малыми потерями используются последовательные схемы замещения (рис. 15.7).

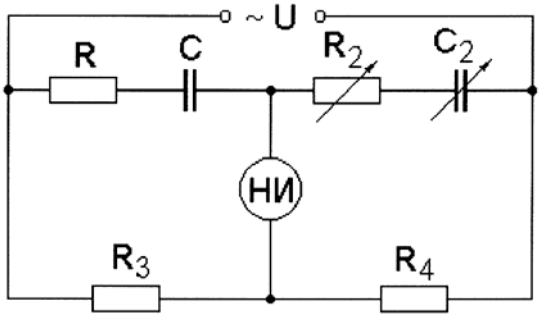


Рис. 15.7. Принципиальная электрическая схема моста переменного тока для измерения параметров реального конденсатора с использованием последовательной схемы замещения: R, C – измеряемые величины; R_2 – магазин сопротивлений; C_2 – магазин емкостей; R_3, R_4 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

Полные (комплексные) сопротивления плеч мостовой схемы, приведенной на рис. 15.7, имеют следующие значения:

первое плечо $\underline{Z}_1 = R - j\frac{1}{\omega C}$;

второе плечо $\underline{Z}_2 = R_2 - j\dfrac{1}{\omega C_2}$;

третье плечо $\underline{Z}_3 = R_3$;

четвертое плечо $\underline{Z}_4 = R_4$.

При равновесии рассматриваемой мостовой схемы должно выполняться условие (15.2), которое в нашем случае имеет вид

$$\left(R - j\frac{1}{\omega C}\right)\cdot R_4 = \left(R_2 - j\frac{1}{\omega C_2}\right)\cdot R_3, \tag{15.45}$$

$$R\cdot R_4 - j\frac{R_4}{\omega C} = R_2\cdot R_3 - j\frac{R_3}{\omega C_2}. \tag{15.46}$$

Два комплексных числа равны между собой, если равны их вещественные и мнимые части. Приравнивая вещественные и мнимые части уравнения (15.46) и решая полученные равенства относительно искомых величин R и C, получим

$$R = R_2\cdot\frac{R_3}{R_4}, \tag{15.47}$$

$$C = C_2\cdot\frac{R_4}{R_3}. \tag{15.48}$$

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы, приведенной на рис. 15.7, с помощью магазина сопротивлений R_2 и магазина емкостей C_2, можно по выражениям (15.47), (15.48) и (15.38) определить параметры реального конденсатора: R (эквивалентное активное сопротивление), C (идеальную емкость) и $\operatorname{tg}\delta$ (тангенс угла потерь).

Для измерения параметров конденсаторов с большими потерями используются параллельные схемы замещения (рис. 15.8).

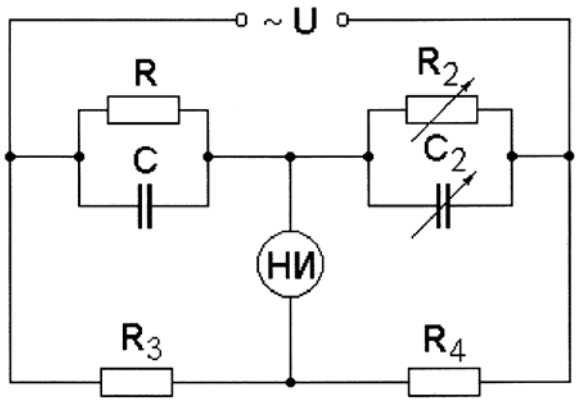


Рис. 15.8. Принципиальная электрическая схема моста переменного тока для измерения параметров реального конденсатора с использованием параллельной схемы замещения: R, C – измеряемые величины; R_2 – магазин сопротивлений; C_2 – магазин емкостей; R_3, R_4 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

Полные (комплексные) сопротивления плеч рассматриваемой мостовой схемы имеют следующие значения:

первое плечо $\underline{Z}_1 = \dfrac{R \cdot (j\omega C)^{-1}}{R + (j\omega C)^{-1}}$;

второе плечо $\underline{Z}_2 = \dfrac{R_2 \cdot (j\omega C)^{-1}}{R_2 + (j\omega C)^{-1}}$;

третье плечо $\underline{Z}_3 = R_3$;

четвертое плечо $\underline{Z}_4 = R_4$.

При равновесии исследуемой мостовой схемы должно выполняться условие (15.2), которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$\frac{R \cdot (j\omega C)^{-1}}{R + (j\omega C)^{-1}} \cdot R_4 = \frac{R_2 \cdot (j\omega C)^{-1}}{R_2 + (j\omega C)^{-1}} \cdot R_2 . \qquad (15.49)$$

$$R \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot \omega C_2 - jR \cdot R_4 = R \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \omega C - jR_2 \cdot R_3 . \qquad (15.50)$$

Приравнивая вещественные и мнимые части уравнения (15.50), находящиеся в левой и правой частях этого уравнения, и решая полученные равенства относительно искомых величин, получим

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \qquad (15.51)$$

$$C = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}. \qquad (15.52)$$

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазина сопротивлений R_2 и магазина емкостей C_2, можно по выражениям (15.51), (15.52) и (15.44) определить параметры исследуемого конденсатора: R (эквивалентное активное сопротивление), C (идеальную емкость) и $\mathrm{tg}\,\delta$ (тангенс угла потерь).

15.4. Шестиплечие мостовые схемы

Шестиплечие мостовые схемы нашли широкое применение для измерения параметров катушек индуктивностей (R, L и Q) при малых значениях коэффициентов добротности. Использование четырехплечих мостов в этом случае затруднительно, т. к. для них при коэффициенте добротности $Q = 1$ процесс уравновешивания схемы становится затруднительным, а при $Q < 0{,}5$ приведение моста в состояние равновесия практически невыполнимо. Хорошую сходимость при малых коэффициентах добротности имеют шестиплечие мосты. Принципиальная электрическая схема шестиплечего моста приведена на рис. 15.9.

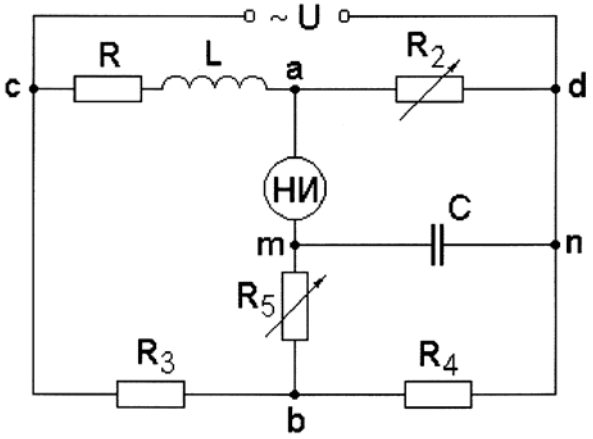


Рис. 15.9. Принципиальная электрическая схема шестиплечего моста для измерения параметров катушек индуктивностей с малой добротностью:
R, L – измеряемые величины; R_2, R_5 – магазины сопротивлений;
R_3, R_4 – постоянные сопротивления; C – постоянная емкость;
НИ – нуль-индикатор

Условия равновесия шестиплечего моста, приведенного на рис. 15.9, можно найти путем трансформации треугольника $m-n-b$, образованного элементами C, R_4 и R_5, в звезду. После такой трансформации шестиплечий мост преобразуется в четырехплечий, уравнение равновесия которого хорошо известно и уже многократно приводилось и использовалось.

После указанных преобразований находим два условия равновесия мостовой схемы:

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \tag{15.53}$$

$$L = C \cdot \frac{R_2}{R_4}\left(R_3 \cdot R_4 + R_5\left(R_2 + R_3\right)\right). \tag{15.54}$$

Мост уравновешивается регулировкой переменных сопротивлений R_2 и R_5. Первоначально изменением сопротивления R_2 выполняется первое условие равновесия моста (см. выражение (15.53)), затем изменением сопротивления R_5 выполняется второе условие равновесия моста (см. выражение (15.54)). Значение R_5 не входит в первое условие равновесия. Благодаря такому свойству шестиплечий мост обладает хорошей сходимостью, которая сохраняется и при малых значениях коэффициента добротности исследуемой катушки индуктивностей.

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазинов сопротивлений R_2 и R_5, можно по выражениям (15.53), (15.54) и (15.19) определить параметры исследуемой катушки: активное сопротивление R, индуктивность L и добротность Q.

15.5. Трансформаторные мостовые схемы

Четырехплечие трансформаторные измерительные мосты отличаются от мостов, рассмотренных выше, наличием индуктивно связанных плеч в диагонали источника питания (рис. 15.10) или в цепи нуль-индикатора (рис. 15.11).

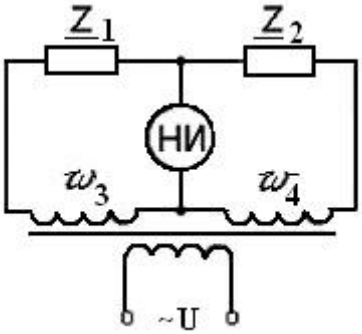


Рис. 15.10. Принципиальная электрическая схема трансформаторного измерительного моста с индуктивно связанными плечами (первый вариант): $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ – комплексные сопротивления; *w3*, *w4* – обмотки трансформатора, образующие третье и четвертое плечи мостовой схемы

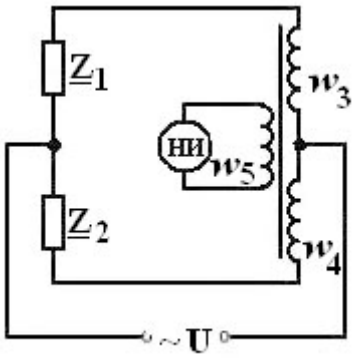


Рис. 15.11. Принципиальная электрическая схема трансформаторного измерительного моста с индуктивно связанными плечами (второй вариант): $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ – комплексные сопротивления; *w3*, *w4* – обмотки трансформатора, образующие третье и четвертое плечи мостовой схемы; *w5* – обмотка трансформатора в цепи нуль–индикатора

В мостах переменного тока, рассмотренных в пп. 15.1, 15.2, 15.3, 15.4 учебного пособия, третье и четвертое плечи содержат резисторы. Между тем на повышенных частотах начинают проявляться не только их активные сопротивления R_3 и R_4 (что использовано во всех рассмотренных случаях), но и реактивные параметры этих резисторов (индуктивность, емкость), что приводит к появлению дополнительных погрешностей при проведении измерений. Указанные погрешности можно уменьшить, если вместо резисторов использовать обмотки трансформатора с тесной индуктивной связью (см. рис. 15.10 и 15.11). Тесная индуктивная связь обмоток достигается тем, что проводники обмоток свиваются в жгут, который наматывается на сердечник трансформатора, образуя секции обмоток *w3*, *w4* и *w5*. При равновесии моста справедливо соотношение

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 \cdot \frac{w_3}{w_4}. \qquad (15.55)$$

Если $\underline{Z}_1$ – измеряемое комплексное сопротивление, то мост уравновешивается регулировкой известного комплексного сопротивления $\underline{Z}_2$ и переключением секций обмоток *w3* и *w4*. Условие равновесия трансформаторного измерительного моста, выражаемое формулой (15.55), обычно называется идеальным условием равновесия, т. к. в этом случае не учитываются потоки рассеяния обмоток и принимаются допущения об идеальной связи между ними и о пропорциональности потерь в проводах числу витков обмоток. На практике при реализации мостов этого типа всегда принимаются меры, позволяющие считать принятые допущения правомерными, а идеальное условие равновесия (15.55) справедливым.

Достоинством трансформаторных измерительных мостов является их практически постоянная чувствительность в широком диапазоне частот и сравнительно малая погрешность при проведении измерений.

Следует отметить широкие возможности при использовании трансформаторных мостовых схем для измерения неэлектрических величин электрическими методами (уровнемеры, влагомеры, измерительные преобразователи перемещений и т. п.).

Кроме рассмотренных четырехплечих мостов, известны также двойные и многоплечие трансформаторные мостовые измерительные схемы.

15.6. Выводы и рекомендации

Рассмотренные в данном параграфе учебного пособия мостовые измерительные схемы переменного тока позволяют решить самые разнообразные вопросы измерительной техники. Вместе с тем эти мостовые схемы требуют выполнения ряда обязательных условий при их использовании. В противном случае устройства начинают работать с большими погрешностями или становятся вообще неработоспособными. Сказанное в равной степени относится и к равновесным, и к неравновесным схемам. Последние используются сравнительно

редко, поэтому в учебном пособии основное внимание уделено равновесным мостовым схемам. Равновесие мостов переменного тока, как уже отмечалось в п. 15.1 пособия, возможно лишь при строгом соблюдении определенного характера сопротивлений в плечах мостовой схемы. Нарушение этих требований приводит к тому, что равновесие схем становится невозможным. Большое значение имеет влияние на равновесие схемы частоты питания. По влиянию частоты все мостовые схемы переменного тока делятся на схемы, равновесие которых не зависит от частоты питающего тока (частотно-независимые схемы), и схемы, равновесие которых зависит от частоты (частотно-зависимые схемы).

При измерении параметров электрических цепей частотная зависимость мостовой схемы приводит к дополнительным трудностям и дополнительным погрешностям. Поэтому все приведенные в учебном пособии мостовые схемы являются частотно-независимыми. Причем переход от одной схемы к другой (от частотно-независимой к частотно-зависимой) может произойти от переключения всего одного элемента одного из плеч схемы. Например, на рис. 15.5 приведена частотно-независимая схема. Однако стоит резистор R_4 (в четвертом плече схемы) подключить последовательно с конденсатором C_4 (а не параллельно конденсатору, как на рис. 15.5), и мостовая схема становится частотно-зависимой. Частотно-зависимые схемы тоже находят применение (например, для измерения частоты), но применения эти носят ограниченный характер и в данном учебном пособии не рассматриваются.

Таким образом, рассмотренные мостовые измерительные схемы могут проявить все свои возможности и достоинства лишь при соблюдении целого ряда условий, значительная часть которых изложена в настоящем учебном пособии и которые могут быть использованы как при изучении этого вопроса, так и при практическом использовании мостовых схем для измерения электрических и неэлектрических величин.

Дополнительные сведения по мостовым измерительным схемам можно найти в литературных источниках [1–3].

16. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАВНОВЕСНЫХ МОСТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

16.1. Двух- и трехпроводные схемы включения датчиков

Двухпроводная схема подключения резистивного датчика к равновесной мостовой измерительной схеме постоянного тока приведена на рис. 16.1.

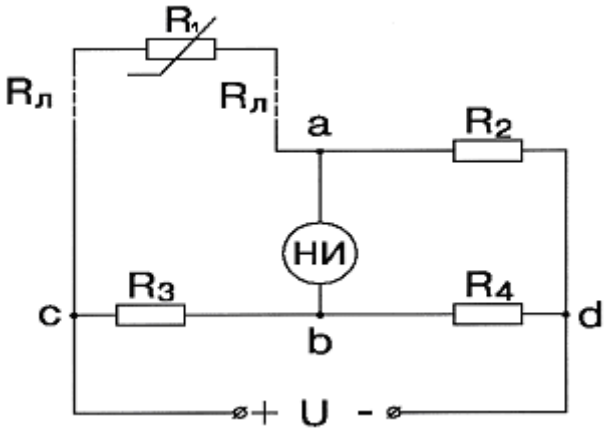


Рис. 16.1. Двухпроводная схема подключения датчиков:
R_1 – сопротивление датчика; $R_Л$ – сопротивление проводов,
составляющих двухпроводную линию связи датчика с мостовой схемой

Условие равновесия для рассматриваемого случая запишется в виде

$$\left(R_л + R_1 + R_л\right) \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 , \qquad (16.1)$$

где $(R_л + R_1 + R_л)$ – сопротивление первого плеча мостовой схемы (от точки c схемы, к которой подключено питание, до точки a схемы, к которой подключен нуль-индикатор НИ).

Легко заметить: изменение сопротивлений проводов соединительной линии $R_Л$ (за счет, например, повышения или понижения температуры окружающей среды) приведет к нарушению равенства (16.1), что является причиной возникновения дополнительной погрешности при проведении измерений с использованием двухпроводных схем подключения датчиков.

Трехпроводная схема подключения резистивного датчика к равновесной мостовой измерительной схеме постоянного тока приведена на рис. 16.2.

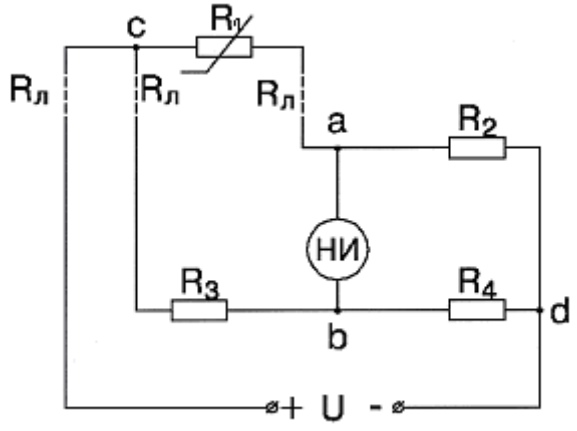


Рис. 16.2. Трехпроводная схема подключения датчиков (обозначения на рис. 16.2 аналогичны соответствующим обозначениям, принятым на рис. 16.1)

Условие равновесия для рассматриваемого случая запишется в виде

$$(R_1 + R_л)\cdot R_4 = R_2 \cdot (R_3 + R_л), \qquad (16.2)$$

где $(R_1 + R_л)$– сопротивление первого плеча мостовой схемы (от точки подключения питания (точка c) до точки подключения нуль-индикатора (точка a));

$R_1 + R_л$ – сопротивление третьего плеча мостовой схемы (от точки подключения питания (точка c) до точки подключения нуль-индикатора (точка b схемы)).

Сопротивления проводов соединительной линии $R_Л$ входят в левую и в правую части равенства (16.2). В результате изменение этих сопротивлений на одну и ту же величину (за счет, например, повышения или понижения температуры окружающей среды) не нарушает рассматриваемого равенства. Этот вывод правомерен при определенных соотношениях между сопротивлениями, образующими мостовую схему (например, при $R_2 = R_4$, $R_1 = R_3$, $R_л << R_1$, $R_л << R_3$). Таким образом, при использовании трехпроводной линии связи для подключения датчиков к равновесным мостовым схемам удается избежать дополнительных погрешностей при изменении сопротивлений подводящих проводов.

16.2. Автоматические мостовые схемы

На основе равновесных мостовых измерительных схем часто строятся автоматические устройства, используемые для измерения различных физических величин (например, температуры).

Упрощенная схема автоматического моста приведена на рис. 16.3.

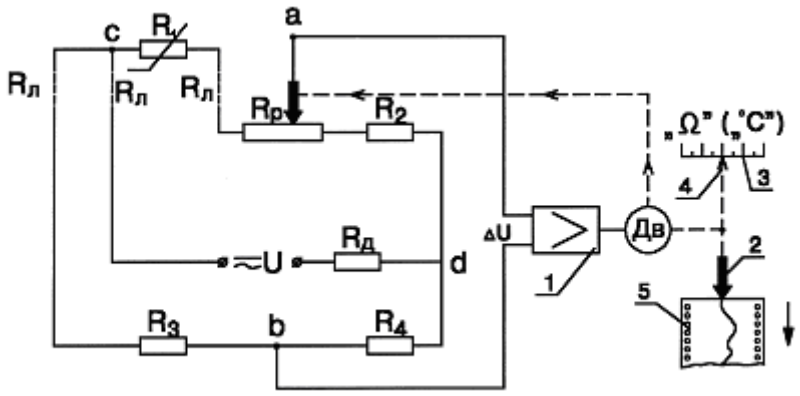


Рис. 16.3. Упрощенная принципиальная схема автоматического моста: R_1 – сопротивление датчика (например, реостатный датчик или терморезисторный датчик («термометр сопротивления»)); $R_Л$ – сопротивление проводов соединительной линии (использована трехпроводная схема подключения датчика); $R_Д$ – ограничительное сопротивление в цепи питания; $R_Р$ – сопротивление реохорда; R_2, R_3, R_4 – постоянные сопротивления; Дв – двигатель; 1 – усилитель; 2 – перо самописца; 3 – шкала; 4 – указатель (стрелка); 5 – диаграммная лента. Электрические цепи на схеме показаны сплошными линиями, а механические связи – пунктирными линиями

При использовании реостатного датчика прибор градуируется, как правило, в единицах сопротивления (Ом), а при использовании терморезисторного датчика – в единицах температуры ($°C$).

Питание мостовой схемы может осуществляться как постоянным током, так и переменным. Использование переменного тока не вызывает в данном случае каких–либо затруднений при уравновешивании схемы, т. к. в схеме нет реактивных элементов и все сопротивления чисто активные.

Если мост уравновешен, то напряжение между точками a и b (на измерительной диагонали моста) равно нулю и соответственно напряжение на входе усилителя 1 $\Delta U = U_{ab} = 0$. При изменении сопротивления датчика R_1 мостовая схема выходит из равновесия и на измерительной диагонали (между точками a и b) появляется напряжение ($\Delta U = U_{ab} \neq 0$). Это напряжение усиливается усилителем и подается на реверсивный двигатель Дв, который перемещает движок реохорда $R_Р$ в сторону достижения равновесия моста. Одновременно двигатель перемещает перо самописца 2 и указатель (стрелку) 3. Ротор двигателя вращается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие рассматриваемой мосто-

вой схемы. Если автоматический мост предназначен для регулирования, то тем же двигателем приводятся в действие регулирующие устройства.

Промышленность выпускает различные типы автоматических мостов, различающихся габаритами, числом измеряемых величин и другими характеристиками. Так, например, запись измеряемых величин может производиться на диаграммную линейку в прямоугольной системе координат (как показано на рис. 16.3) или на дисковую диаграмму в полярной системе координат. Отметим, что в том и другом случае диаграммная бумага перемещается равномерно специальным синхронным двигателем (линейно или по кругу). Соответственно шкала 3 может быть линейной или круговой. Прямоугольно-координатные автоматические мосты имеют обозначения: ЭМП (старое обозначение), КСМ2, КСМ4 (новое обозначение) и т. д. Автоматические мосты с дисковыми диаграммами и круговыми шкалами обозначаются: ЭМД (старое обозначение) и КСМ3. Указанные обозначения получили наибольшее распространение, но есть автоматические мосты с другими обозначениями их типов.

Основная приведенная относительная погрешность автоматических мостов от ±0,25 до ±1 %.Наиболее часто встречаются автоматические мосты с относительной погрешностью ±0,5 %. Быстродействие автоматических мостов изменяется в широких пределах и зависит от исполнения и типа прибора. Время прохождения указателем шкалы составляет от 1 с до 10–20 с. В широких пределах изменяется также скорость перемещения диаграммной бумаги (как ленточной, так и дисковой), что позволяет фиксировать и быстро, и медленно изменяющиеся величины.

17. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

17.1. Общие положения

Аналоговые электромеханические измерительные приборы непосредственной оценки (в дальнейшем – «измерительные приборы») состоят из измерительной цепи (ИЦ), измерительного механизма (ИМ) и отсчетного устройства (ОУ) (рис. 17.1).

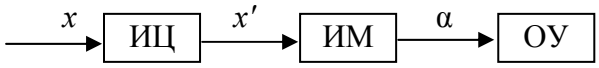


Рис. 17.1. Структурная схема аналоговых электромеханических измерительных приборов непосредственной оценки

Измерительная цепь (ИЦ) служит для преобразования измеряемой электрической величины x в электрическую же величину x', удобную для измерения и непосредственного воздействия на измерительный механизм.

Измерительный механизм (ИМ) преобразует электрическую величину x' в механическое перемещение α (угловое или линейное).

Отсчетное устройство (ОУ) служит для визуального отсчитывания значений измеряемой величины.

ИЦ содержит обычно резисторы (или другие элементы), необходимые для требуемого преобразования измеряемой величины.

ИМ состоит из подвижной и неподвижной частей. В зависимости от принципа построения различают измерительные механизмы магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, электростатические, индукционные, ферродинамические, вибрационные.

ОУ состоит из указателя (стрелочного или светового), связанного с подвижной частью измерительного механизма, и неподвижной шкалы. На шкалу наносятся деления в единицах измеряемой величины. Кроме того, на шкалу наносятся условные обозначения класса точности прибора, рода измеряемого тока, знака системы, рабочего положения прибора (например, вертикального или горизонтального), испытательного напряжения и т. д.

Условные обозначения, наносимые на шкалы и корпуса приборов, приведены в приложениях.

Ниже рассмотрены приборы наиболее распространенных систем. При рассмотрении приборов основное внимание уделено измерительным механизмам и несколько меньшее внимание – другим составным частям приборов (измерительным цепям и отсчетным устройствам).

Более детально затронутые вопросы рассмотрены в литературных источниках [1; 2; 5; 8; 35; 36].

17.2. Магнитоэлектрические приборы

Приборы магнитоэлектрической системы основаны на использовании взаимодействия поля постоянного магнита и катушки (рамки), обтекаемой электрическим током. Конструктивно магнитоэлектрические приборы могут быть выполнены с подвижной рамкой и с подвижным магнитом. Наибольшее распространение получили приборы с подвижной рамкой и внешним постоянным магнитом. Устройство такого прибора схематически показано на рис. 17.2.

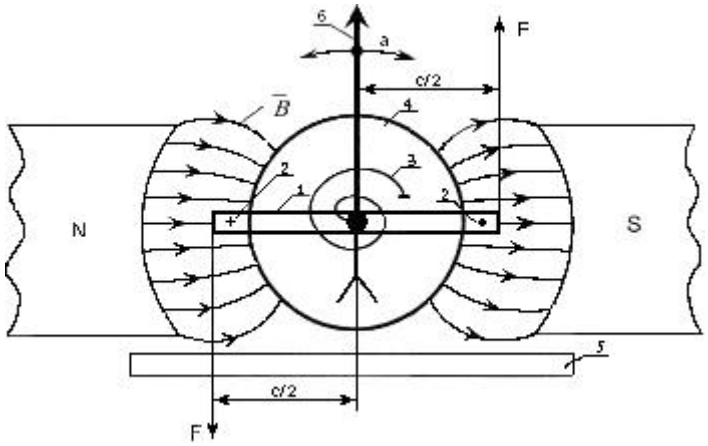


Рис. 17.2. Схема магнитоэлектрического прибора с подвижной рамкой:

1– рамка;	(+•) – направление тока в обмотках рамки;
2 – обмотка рамки;	(*F*–*F*) – пара сил, действующих на рамку;
3 – спиральная пружина;	(*N*–*S*) – полюсные наконечники постоянного магнита;
4 – ферромагнитный сердечник;	α – угол поворота подвижной части;
5 – магнитный шунт;	$\overline{B}$ – магнитная индукция;
6 – стрелка;	c/2 – половина ширины рамки

Постоянный магнит с магнитопроводом и полюсными наконечниками (на рис. 17.2 изображены только полюсные наконечники *N*–*S*) создает в воздушном зазоре магнитное поле с индукцией $\overline{B}$. Благодаря цилиндрическому сердечнику 4 индукция в воздушном зазоре радиальная и равномерная за исключением поля на краях полюсных наконечников («краевой эффект»). На рис. 17.2 краевой эффект (для наглядности) несколько преувеличен. В достоверности искажение магнитного поля на краях полюсных наконечников меньше показанного на

схеме. Магнитный шунт 5 служит для регулировки значения магнитной индукции в некоторых пределах (от 5 до 10 %), что позволяет изменять пределы измерения прибора. Магнитопровод, полюсные наконечники и магнитный шунт изготовляются из магнитомягкого материала.

Стрелка 6 жестко связана с рамкой 1. Спиральная пружина 3 служит для создания момента, противодействующего повороту рамки и стрелки. На рис. 17.2 показана одна спиральная пружина. В реальных приборах спиральных пружин две (или несколько), и они служат не только для создания противодействующего момента, но и для токоподвода к обмотке рамки. Рамка имеет прямоугольную форму. Ширина рамки – «*c*», ее длина – «*b*». При протекании по обмотке рамки постоянного тока *I* происходит его взаимодействие с магнитным полем и возникает пара сил «*F*–*F*», стремящихся повернуть рамку. Направление действия сил определяется правилом левой руки. Оно зависит от направления индукции магнитного поля и направления тока (направление индукции показано на рис. 17.2 стрелками, направление тока «от нас» показано знаком «+», направление тока «к нам» показано знаком «•». Значение каждой из сил *F* определяется соотношением

$$F = B \cdot I \cdot w \tag{17.1}$$

где *w* – число витков обмотки рамки.

Каждая из сил *F* действует на плече «c/2». Вместе силы «*F*–*F*» создают вращающий момент:

$$-M_{\text{вр.}} = F\frac{c}{2} + F\frac{c}{2} = F \cdot c \tag{17.2}$$

где *c* – ширина рамки.

Вращающий момент уравновешивается противодействующим моментом $M_{\text{пр}}$:

$$-M_{\text{пр.}} = D \cdot \alpha \tag{17.3}$$

где *D* – удельный противодействующий момент;

α – угол поворота подвижной части прибора.

В момент считывания показаний $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, т. е. можно записать:

$$F \cdot c = D \cdot \alpha \tag{17.4}$$

$$B \cdot w \cdot b \cdot c \cdot I = D \cdot \alpha \qquad (17.5)$$

Решая уравнение (17.5) относительно α, получаем

$$\alpha = \frac{1}{D} \cdot B \cdot w \cdot b \cdot c \cdot I , \qquad (17.6)$$

$$k_1 = \frac{B \cdot w \cdot b \cdot c}{D} , \qquad (17.7)$$

$$\alpha = k \cdot I \qquad (17.8)$$

Полученное выражение (17.8) носит название *«уравнение шкалы»*. Согласно уравнению шкалы угол отклонения подвижной части приборов магнитоэлектрической системы пропорционален току, протекающему по обмотке рамки. Коэффициент пропорциональности k_1 (см. (17.7)) называется *чувствительностью по току*.

Значение k_1 является величиной постоянной, зависящей от конструктивных параметров измерительного механизма и не зависящей от измеряемого тока I. Поэтому шкалы магнитоэлектрических приборов равномерны. Изменение направления тока ведет к изменению направления угла отклонения подвижной части прибора.

Приборы магнитоэлектрической системы могут использоваться как для измерения постоянных токов, так и для измерения постоянных напряжений. При измерении постоянного напряжения уравнение шкалы (см. (17.8)) принимает вид

$$\alpha = k_2 \cdot U , \qquad (17.8а)$$

где k_2 – постоянный коэффициент, характеризующий чувствительность по напряжению;

U – измеряемое напряжение.

При измерении постоянных токов и напряжений рассматриваемые магнитоэлектрические приборы являются самыми чувствительными и точными среди электромеханических приборов. Температура окружающей среды и внешние магнитные поля мало влияют на их работу. Равномерный характер шкалы и

малое потребление энергии также являются достоинствами этих приборов. Магнитоэлектрические приборы реагируют только на постоянную составляющую измеряемого тока или напряжения. Для измерений в цепях переменного тока требуется предварительное преобразование переменных величин в постоянные. К недостаткам этих приборов следует отнести их малую перегрузочную способность (сгорают токоподводы). Знак приборов магнитоэлектрической системы, наносимой на шкалу, приведен в прил. 4.

На основе магнитоэлектрических механизмов строятся приборы для измерения постоянных токов (амперметры), постоянных напряжений (вольтметры), электрических сопротивлений (омметры), малых токов и напряжений (гальванометры), количества электричества (баллистические гальванометры) и т. п.

Дополнительные сведения по затронутым вопросам приведены в литературе [1; 2; 5; 8; 35].

17.3. Электромагнитные приборы

Приборы электромагнитной системы основаны на взаимодействии магнитного поля, создаваемого током в неподвижной катушке, с подвижным ферромагнитным сердечником. В настоящее время находят применение электромагнитные механизмы с плоской катушкой и механизмы с круглой катушкой.

Схема, поясняющая принцип работы приборов электромагнитной системы, приведена на рис. 17.3.

При протекании тока I по катушке 1 создается магнитное поле, под действием которого сердечник 2 втягивается внутрь катушки. Благодаря тому, что сердечник выполнен из магнитомягкого материала, он втягивается в катушку независимо от направления тока (и соответственно независимо от полярности приложенного к катушке напряжения U). С сердечником 2 жестко связаны пружина 3 и стрелка (указатель) 4.

Пружина создает противодействующий момент, а стрелка позволяет проводить отсчет показаний по шкале 5.

Для быстрейшего «успокоения» подвижной части прибора используются специальные успокоители (обычно воздушные). Успокоители на рис. 17.3 не

показаны. Возможные конструкции успокоителей приведены, например, в [1; 2]. Рассмотренные ранее магнитоэлектрические приборы в специальных успокоителях не нуждались. Необходимое «успокоение» подвижной части этих приборов достигалось за счет взаимодействия вихревых токов, наводимых в рамке устройства, с магнитным полем.

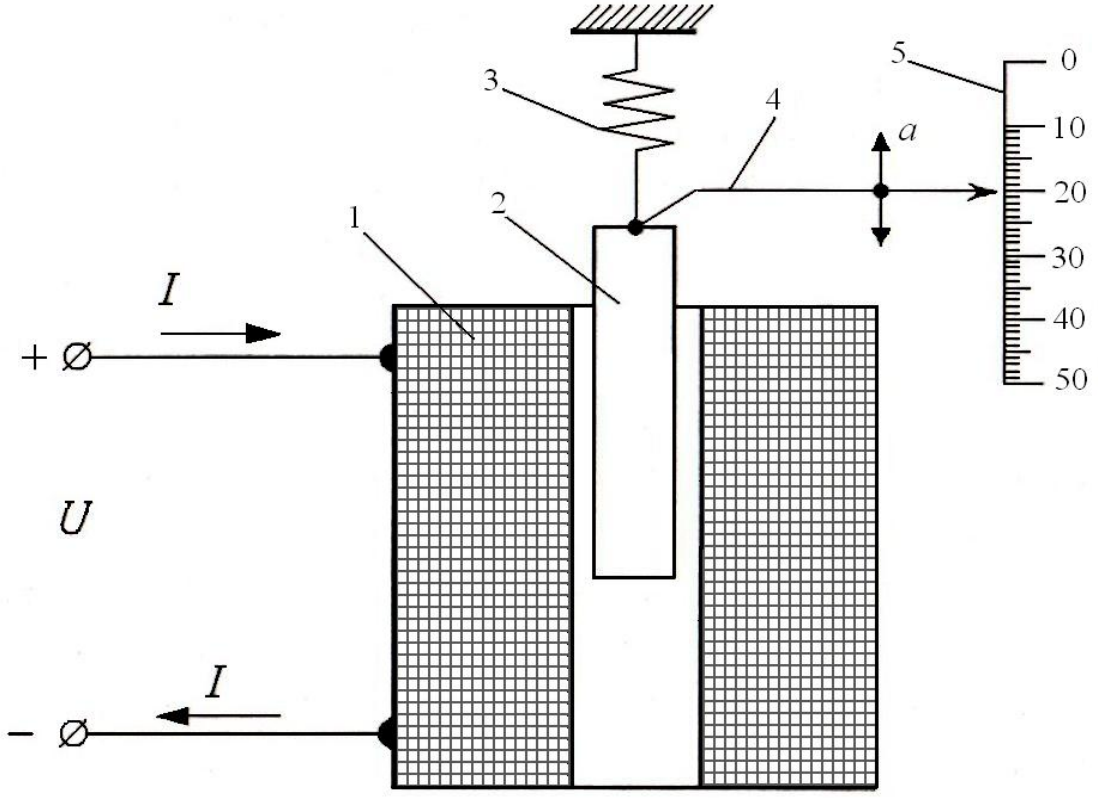


Рис. 17.3 Схема прибора электромагнитной системы:
1 – катушка с числом витков w и индуктивностью L; 2 – ферромагнитный сердечник (из магнитомягкого материала); 3 – пружина (с удельным противодействующим моментом D); 4 – стрелка; 5 – шкала

Положение подвижной части прибора электромагнитной системы в установившемся режиме можно определить из условия равенства вращающего и противодействующего моментов.

Согласно законам механики выражение для «вращающего» момента имеет вид

$$M = \frac{dW}{dx}, \qquad (17.9)$$

где M – «вращающий» момент, перемещающий подвижную часть устройства;

W – электрокинетическая энергия;

x – координата подвижной части устройства.

Для приборов электромагнитной системы:

$$W = W_{\text{М}} = \frac{1}{2} I^2 \cdot L, \tag{17.10}$$

где $W_{\text{М}}$ – энергия магнитного поля катушки

I – ток через катушку;

L – индуктивность катушки.

$$M = \frac{dW_{\text{М}}}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \tag{17.11}$$

где α – перемещение подвижной части прибора.

$$M_{\text{пр}} = D \cdot \alpha, \tag{17.12}$$

где $M_{\text{пр}}$ – противодействующий момент (создается пружиной);

D – удельный противодействующий момент.

При установившемся положении механизма $M = M_{\text{пр}}$, т. е.:

$$\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} = D \cdot \alpha, \tag{17.13}$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot I^2 \frac{dL}{d\alpha} \tag{17.14}$$

Выражение (17.14) носит название *«уравнение шкалы»* (или *«уравнение преобразования»*) приборов электромагнитной системы на постоянном токе.

Рассмотрим работу приборов на переменном токе.

$$i(t) = I_{\text{m}} \cdot \sin \omega t, \tag{17.15}$$

$$\text{I} = \sqrt{\frac{1}{\text{T}} \int_0^T [i(t)]^2 dt}, \tag{17.16}$$

где $i(t)$ – мгновенное значение переменного тока;

I_{m} – амплитудное значение переменного тока;

I – действующее значение переменного тока;

T– период переменного тока, протекающего по катушке прибора.

Мгновенное $m(t)$ и среднее $M_{\text{ср}}$ значения вращающего момента запишутся в виде

$$m(t) = \frac{1}{2}[i(t)]^2 \frac{dL}{d\alpha}, \qquad (17.17)$$

$$M = \frac{1}{T}\int_T^1 m(t)dx. \qquad (17.18)$$

Подставляя в (17.18) значение $m(t)$, получаем

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{1}{2}[i(t)]^2 \frac{dL}{d\alpha} dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T}\int_0^T [i(t)]^2 dt \quad . \qquad (17.19)$$

Среднее значение вращающего момента (на которое реагирует прибор) с учетом (17.16) принимает вид

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \frac{dL}{d\alpha} \quad . \qquad (17.20)$$

Учитывая, что в установившемся режиме $M_{\text{ср}} = M_{\text{пр}}$, можно записать:

$$\frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha} = D \cdot \alpha \quad . \qquad (17.21)$$

Решая (17.21) относительно α, окончательно получим

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}, \qquad (17.22)$$

где I – действующее значение переменного тока.

Выражение (17.22) носит название *«уравнение шкалы»* (или *«уравнение преобразования»*) приборов электромагнитной системы на переменном токе.

Полученные соотношения (17.14) и (17.22) позволяют сделать вывод о нелинейности шкалы рассматриваемых приборов. Начало и конец шкалы сжаты (особенно начало). В результате до 10 % шкалы в ее начале вообще не используется. Середина шкалы имеет благоприятный равномерный характер.

На основе электромагнитных механизмов строятся приборы для измерения постоянных и переменных токов (амперметры), постоянных и переменных напряжений (вольтметры) и резонансные (вибрационные) частотомеры.

К достоинствам приборов электромагнитной системы относят: простоту конструкции, низкую стоимость, надежность, способность выдерживать боль-

шие перегрузки и универсальность (возможность использования в цепях постоянного и переменного тока).

К недостаткам этих приборов следует отнести: большое собственное потребление энергии, сравнительно малые чувствительность и точность, сильное влияние внешних магнитных полей. Последнее обстоятельство вынуждает применять специальные методы защиты (магнитные экраны и астазирование).

Приборы электромагнитной системы применяют обычно как щитовые амперметры и вольтметры переменного тока промышленной частоты (с классами точности 1,5 и 2,5). В отдельных случаях они используются на повышенных частотах (до нескольких сотен и даже тысяч герц). Эти приборы могут также использоваться как лабораторные переносные приборы классов точности 0,5 и 1,0.

Знак приборов электромагнитной системы, наносимый на шкалу, приведен в прил. 4. Приборы описаны в литературе [1; 2; 5; 8; 35].

17.4. Электродинамические приборы

Приборы электродинамической системы основаны на взаимодействии магнитных полей двух неподвижных и одной подвижной катушек, по которым протекает ток.

Схема, поясняющая принцип работы приборов электродинамической системы, приведена на рис. 17.4.

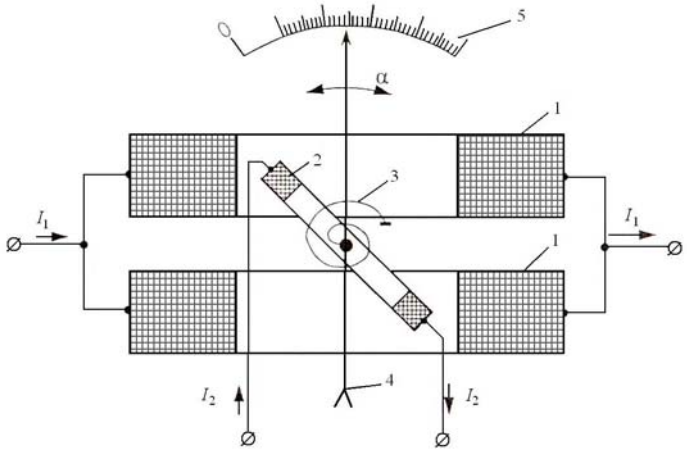


Рис. 17.4. Схема приборов электродинамической системы:
1 – неподвижные катушки; 2 – подвижная катушка; 3 – спиральная пружина;
4 – стрелка; 5– шкала; α – угол поворота подвижной части прибора

По неподвижным катушкам 1 протекает ток I_1. По подвижной катушке 2 протекает ток I_2. Стрелка 4 жестко связана с подвижной катушкой 2. Спиральная пружина 3 (с удельным противодействующим моментом D) создает противодействующий момент. На рис. 17.3 показана одна спиральная пружина. В реальных устройствах используются обычно две пружины (известны также конструкции, в которых используется несколько спиральных пружин). Пружины 3 одновременно могут быть токоподводами к подвижной катушке 2. Чаще подключение подвижной катушки к внешней цепи осуществляется с использованием специальных безмоментных токоподводов. Неподвижные катушки 1 имеют суммарную индуктивность L_1. Индуктивность подвижной катушки – L_2. Взаимная индуктивность между неподвижными и подвижной катушками – M. Для сокращения времени колебаний подвижной катушки используются специальные, обычно воздушные, успокоители (на рис. 17.4 они не показаны).

Энергия магнитного поля катушек с токами I_1 и I_2 запишется следующим образом:

$$W_M = \frac{1}{2} I_1^2 \cdot L_1 + \frac{1}{2} I_2^2 \cdot L_2 + I_1 I_2 M \,, \qquad (17.23)$$

где I_1, I_2, L_1, L_2, M – определены выше.

Поскольку индуктивности L_1 и L_2 не зависят от угла поворота подвижной части прибора α, то вращающий момент $M_{вр}$ запишется в виде

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \,. \qquad (17.24)$$

Противодействующий момент, создаваемый спиральной пружиной с удельным противодействующим моментом D, определяется соотношением

$$M_{пр} = D \cdot \alpha \,, \qquad (17.25)$$

где $M_{пр}$ – противодействующий момент;

α – угол поворота подвижной части прибора.

В установившемся режиме $M_{вр} = M_{пр}$, т. е.

$$I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} = D \cdot \alpha \,, \qquad (17.26)$$

$$\alpha = \frac{1}{D} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha} \quad . \tag{17.27}$$

Полученное выражение (17.27) носит название *«уравнение шкалы»* (или *«уравнение преобразования»*) приборов электродинамической системы на постоянном токе.

Рассмотрим работу приборов на переменном токе:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad , \tag{17.28}$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi) \quad , \tag{17.29}$$

где i_1, i_2 – мгновенные значения токов;

I_{1m}, I_{2m} – амплитудные значения токов;

φ – фазовый сдвиг между токами i_1 и i_2.

Мгновенное значение вращающего момента:

$$m(t) = i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot \frac{dM}{d\alpha} \quad . \tag{17.30}$$

Среднее значение вращающего момента, на которое реагирует прибор:

$$M_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T m(t) dt \quad . \tag{17.31}$$

Подставляя в (17.31) значение величины $m(t)$, определяемое соотношением (17.30), получим

$$M_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} \sin \omega t \cdot I_{2m} \sin(\omega t - \varphi) \frac{dM}{d\alpha} \quad , \tag{17.32}$$

$$M_{ср} = I_1 \cdot I_2 \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha} \quad , \tag{17.33}$$

где I_1, I_2 – действующие значения токов.

Приравняв значение $M_{ср}$ значению противодействующего момента $M_{пр}$, определяемого соотношением (17.25), и решив полученное равенство относительно угла поворота α, получим

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha} \quad . \tag{17.34}$$

Полученное выражение (17.34) свидетельствует, что перемещение подвижной части рассматриваемого измерительного механизма зависит не только от токов в его катушках, но и от разности фаз между этими токами. Последнее позволяет использовать приборы электродинамической системы в качестве ваттметров (кроме использования в качестве амперметров и вольтметров).

Выражение (17.34) обычно называют *уравнением шкалы* (или *уравнением преобразования*) приборов электродинамической системы на переменном токе.

К достоинствам приборов электродинамической системы следует отнести их универсальность (т. е. возможность использовать их в цепях как постоянного, так и переменного тока) и высокую точность (эти приборы самые точные на переменном токе среди электромеханических приборов).

Недостатки приборов электродинамической системы: нелинейность шкалы (шкала сжата в начале, растянута в середине и в конце; из-за нелинейности до 5–8 % шкалы в начале не градуируется и вообще не используется); малая надежность (при перегрузках сгорают токоподводы к подвижной катушке); значительное влияние на показания приборов магнитных полей (для защиты используются магнитные экраны и астазирование); частотные погрешности при измерениях на переменном токе, а также некоторые другие.

Знак приборов электродинамической системы, наносимый на шкалу, приведен в прил. 4.

Более детально с приборами электродинамической системы можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 5; 8; 35].

17.5. Электростатические приборы

Приборы электростатической системы основаны на взаимодействии электрически заряженных проводников.

Схема, поясняющая принцип работы приборов электростатической системы, приведена на рис. 17.5.

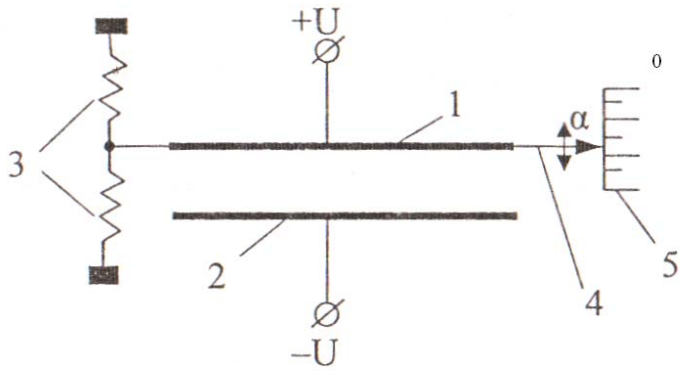


Рис. 17.5. Схема приборов электростатической системы:
1 – подвижная пластина; 2 – неподвижная пластина; 3 – пружины; 4 – стрелка; 5 – шкала

Подвижная пластина 1 жестко связана со стрелкой 4 и пружинами 3, создающими противодействующий момент. К пластинам 1 и 2 подводится измеряемое напряжение. Под действием электростатических сил подвижная пластина перемещается на величину α. Движение прекращается, когда противодействующий момент пружин становится равным вращающему моменту.

Энергия электростатического поля имеет следующее значение:

$$W_э = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2, \qquad (17.35)$$

где C – емкость между подвижной и неподвижной пластинами;

U – измеряемое напряжение.

«Вращающий» момент, перемещающий подвижную часть устройства:

$$M = \frac{dW_э}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \qquad (17.36)$$

Противодействующий момент:

$$M_{пр} = D \cdot \alpha, \qquad (17.37)$$

где D – удельный противодействующий момент;

α – перемещение подвижной пластины.

При равновесии $M = M_{пр}$, т. е.

$$D \cdot \alpha = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \qquad (17.38)$$

Решая (17.38) относительно α, получаем

$$\alpha = \frac{1}{2D} U^2 \frac{dC}{d\alpha} . \qquad (17.39)$$

В случае переменного напряжения следует произвести усреднение показаний во времени:

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2D} \cdot u^2(t) \cdot \frac{dC}{d\alpha} dt ,$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \int_0^T u^2(t) dt ,$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 , \qquad (17.40)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение измеряемого переменного напряжения;

U – действующее значение измеряемого переменного напряжения;

T – период времени, за который производится усреднение.

Выражение (17.39) является уравнением шкалы при измерении постоянного напряжения, а выражение (17.40) – при измерении переменного напряжения. Приборы электростатической системы пригодны для измерения только электрических напряжений.

К достоинствам приборов электростатической системы относятся: их универсальность (т. е. способность измерять постоянные и переменные напряжения), широкий частотный диапазон, малое потребление энергии, высокая надежность, независимость показаний от внешних магнитных полей.

К недостаткам следует отнести нелинейность шкалы (из-за нелинейности около 5 % шкалы в ее начале вообще не используется), низкую чувствительность, сравнительно невысокую точность, зависимость показаний от внешних электрических полей.

Знак приборов электростатической системы, наносимый на шкалу, приведен в прил. 4.

Более подробно с приборами электростатической системы можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 5; 8; 35].

17.6. Индукционные приборы

Индукционные приборы состоят из индукционного измерительного механизма, отсчетного устройства и элементов измерительной схемы.

Индукционный измерительный механизм основан на взаимодействии магнитных потоков электромагнитов и вихревых токов, наведенных магнитными потоками в подвижной части, выполненной в виде алюминиевого диска.

Индукционные измерительные механизмы по устройству делятся на несколько типов, основные из которых – однопоточные и многопоточные.

Однопоточные измерительные механизмы имеют один электромагнит и подвижную часть в виде диска, асимметрично расположенного на оси. Такие механизмы просты по устройству, но в настоящее время не применяются из-за малой величины вращающего момента.

В многопоточных механизмах на подвижную часть действуют два или более переменных потоков, не совпадающих по фазе и в пространстве. Эти потоки образуют вращающееся или бегущее магнитное поле, пересекающее подвижную часть механизма. От взаимодействия индуктируемых при этом в подвижной части вихревых токов с магнитным полем возникает вращающий момент, перемещающий подвижную часть механизма.

Индукционные приборы используются только на переменном токе. Они могут применяться как амперметры, вольтметры, ваттметры и счетчики электрической энергии. В настоящее время нашли широкое применение именно счетчики электроэнергии.

Устройство и схема включения индукционного счетчика показаны на рис. 17.6.

Для индукционного счетчика вращающий момент $M_{\text{вр}}$ пропорционален мощности переменного тока, т. е.

$$M_{\text{вр}} = kUI\cos(\varphi), \qquad (17.41)$$

где k – постоянный коэффициент;

U – напряжение;

φ – сдвиг по фазе между напряжением и током.

На подвижную часть счетчика (алюминиевый диск) действует противодействующий момент $M_{\text{пр}}$, пропорциональный скорости (частоте) вращения диска. Этот момент создается за счет взаимодействия магнитного поля постоянного магнита 4 и вихревых токов, наводимых в диске 3.

$$M_{\text{ПР}} = k_1 \cdot \frac{d\alpha}{dt} = k_1 \cdot v \,, \tag{17.42}$$

где k_1 – постоянный коэффициент;

$\frac{d\alpha}{dt} = v$ – скорость (частота) вращения диска.

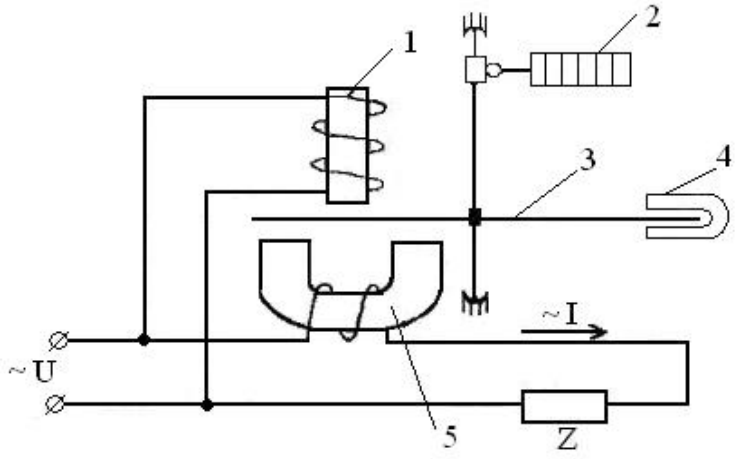


Рис. 17.6. Устройство и схема включения индукционного счетчика:
1 – трехстержневой магнитопровод с обмоткой напряжения; 2 – счетный механизм;
3 – алюминиевый диск, укрепленный на оси; 4 – постоянный магнит для создания тормозного момента; 5 – П-образный магнитопровод с токовой обмоткой; Z – полное сопротивление нагрузки

Если допустить, что момент трения отсутствует, то для установившейся скорости (частоты) вращения момент $M_{\text{вр}}$ равен тормозному моменту $M_{\text{ПР}}$:

$$k \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = k_1 \cdot v \,. \tag{17.43}$$

Интегрируя правую и левую части равенства (17.43) в пределах изменения времени от t_1 до t_2, получим

$$W = C \cdot N \,, \tag{17.44}$$

где W – энергия, «прошедшая» через нагрузку Z за время $\Delta = t_2 - t_1$,

$W = \int_{t_1}^{t_2} UI \cdot \cos\varphi \cdot dt$;

C – постоянный коэффициент ($C = \frac{k_1}{k \cdot k_2}$);

N – число оборотов диска за время $\Delta t = t_2 - t_1 (N = k_2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} v \cdot dt)$.

Отсчет энергии производится по показаниям счетного механизма – счетчика оборотов, проградуированного в единицах энергии. Единице электрической энергии (обычно 1 кВт/ч), регистрируемой счетным механизмом, соответствует определенное число оборотов подвижной части счетчика. Это соотношение указывается на приборе. Выпускаемые счетчики активной энергии имеют следующие классы точности: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; счетчики реактивной энергии – 1,5; 2,0; 4,0. Выпускаются однофазные и трехфазные счетчики активной и реактивной энергии. Дополнительные погрешности счетчиков возникают из-за искажения формы кривой тока и напряжения, колебаний напряжения и частоты, резкого перепада мощности и некоторых других факторов. К достоинству счетчиков следует отнести малое влияние на их показания температуры и внешних магнитных полей.

Знак приборов индукционной системы приведен в прил. 4.

Более подробно с приборами индукционной системы можно ознакомиться по литературным источникам [1; 8].

17.7. Логометры

К логометрам относятся электроизмерительные приборы с электрическим противодействующим моментом. Показания таких приборов пропорциональны отношению электрических величин (обычно – отношению электрических токов). Используются логометры следующих систем: магнитоэлектрические с подвижными рамками, магнитоэлектрические с подвижными магнитами, элек-

тромагнитные, электродинамические, ферродинамические, индукционные. Условные обозначения логометров приведены в приложении в табл. П. 4.1.

В настоящем учебном пособии рассматриваются магнитоэлектрические логометры с подвижными рамками (рис. 17.7).

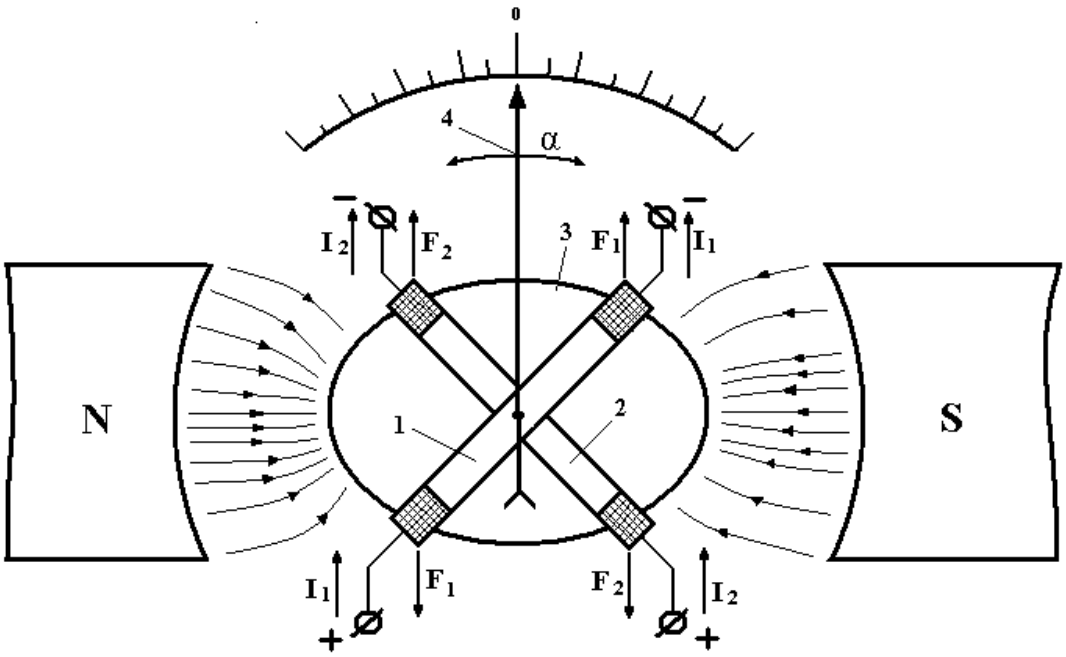


Рис. 17.7. Схема логометра магнитоэлектрической системы с подвижными рамками:
1 – первая рамка; 2 – вторая рамка; 3 – эллиптический ферромагнитный сердечник;
4 – стрелка (указатель); α – угол поворота; *N*–*S* – полюсные наконечники постоянного магнита

Рамки 1 и 2 жестко скреплены друг с другом и со стрелкой, которая перемещается вдоль проградуированной шкалы. По обмотке первой рамки протекает ток l_1. По обмотке второй рамки протекает ток l_2. К внешним цепям обмотки рамок подключаются с помощью безмоментных токоподводов (на схеме токоподводы не показаны). Создаваемое постоянным магнитом магнитное поле в воздушном зазоре прибора неравномерно благодаря эллиптическому ферромагнитному сердечнику: в центральной части системы индукция магнитного поля больше, а на периферии – меньше.

При взаимодействии тока l_1, протекающего по обмотке первой рамки, и магнитного поля возникает пара сил F_1–F_1. Пара сил F_1–F_1 создает вращающий момент M_1, который стремится повернуть рамки и указатель против часовой стрелки.

$$\mathrm{M}_1 = I_1 \cdot f_1(\alpha)\,, \qquad (17.45)$$

где l_1 – ток в обмотке первой рамки;

α – угол поворота подвижной части прибора.

При взаимодействии тока l_2, протекающего по второй обмотке, и магнитного поля возникает пара сил F_2–F_2, создающих вращающий момент M_2. Вращающий момент M_2 стремится повернуть рамки и указатель по часовой стрелке.

$$M_2 = I_2 \cdot f_2(\alpha), \tag{17.46}$$

где I_2 – ток в обмотке второй рамки.

Отметим, что из-за неравномерности магнитного поля вращающие моменты M_1 и M_2 возрастают при перемещении рамок с обмотками к центру и, наоборот, уменьшаются при перемещении рамок с обмотками к периферии.

При равенстве вращающих моментов M_1 и M_2 движение рамок и стрелки (указателя) прекращается. В этом случае:

$$I_1 \cdot f_1(\alpha) = I_2 \cdot f_2(\alpha), \tag{17.47}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f_3(\alpha). \tag{17.48}$$

Решая уравнение (17.48) относительно угла поворота α, получаем

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \tag{17.49}$$

Полученное выражение (17.49) носит название уравнения шкалы логометров магнитоэлектрической системы с подвижными рамками.

Уравнение шкалы свидетельствует, что показания магнитоэлектрических логометров пропорциональны отношению токов, протекающих по обмоткам рамок прибора.

Более детально логометры описаны в литературных источниках [1; 2; 8].

18. ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

18.1. Общие положения

Приборами сравнения (а также компенсаторами или потенциометрами) называют приборы для измерения методом сравнения напряжения, ЭДС или величин, связанных с ними определенной зависимостью. Существуют компенсаторы постоянного и переменного тока. Те и другие компенсаторы могут быть автоматическими и с ручным управлением.

Как известно, напряжение и ЭДС могут быть измерены с помощью электромеханических приборов непосредственной оценки. Такой способ измерения имеет существенный недостаток, так как электромеханические приборы непосредственной оценки обладают заметным собственным потреблением энергии. Например, электромеханические вольтметры непосредственной оценки шунтируют тот участок цепи, к которому подключаются. Это искажает режим цепи и меняет распределение потенциалов. С другой стороны, эти приборы имеют ограниченную точность. Их погрешность, в лучшем случае, составляет (0,1–0,2) %, а обычно – значительно больше.

Применение компенсаторов устраняет указанные недостатки. Общие сведения о компенсаторах приведены в литературе [1; 2; 8].

18.2. Компенсаторы постоянного тока с ручным управлением

Схема компенсатора приведена на рис. 18.1.

Нормальный элемент $E_{\text{о}}$ представляет собой гальванический элемент со стабильной ЭДС. Каждый нормальный элемент проходит индивидуальную аттестацию, и его ЭДС, определяемая при аттестации, заносится в паспорт. Допускаемое отклонение ЭДС за 1 год нормируется. В зависимости от класса точности (кл. т.) оно не должно превышать определенных значений. Например, для нормальных элементов Э–303 класса точности 0,02 допускаемое отклонение ЭДС за 1 год должно быть не более 190 мкВ; для нормальных элемен-

тов Х–480 класса точности 0,005 – не более 50 мкВ; для элементов Х–482 класса точности 0,002 – не более 10 мкВ.

Приведем значения ЭДС для некоторых конкретных нормальных элементов (ЭДС даны при температуре +20 ^{0}С):

ненасыщенный нормальный элемент Э–303 № 66901 кл. т. 0,02, E_0 = 1,01923 В;

Э–303 № 66902 кл. т. 0,02, E_0 = 1,01930 В;

Х–480 № 1525 кл. т. 0,005, E_0 = 1,018622 В.

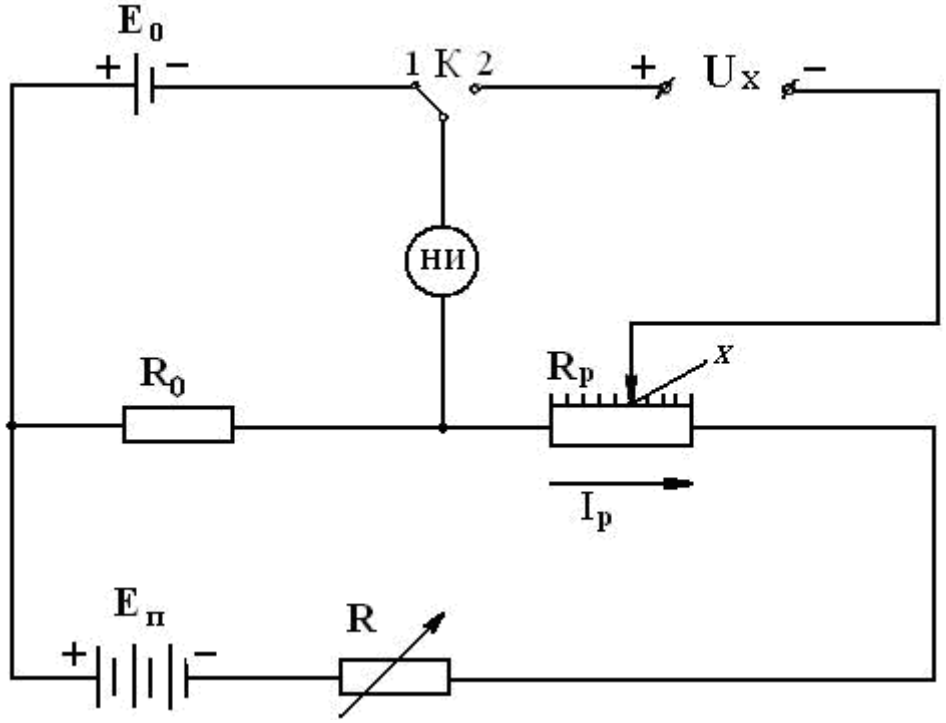


Рис. 18.1. Схема компенсатора с ручным управлением:

E_0 – нормальный элемент;
U_x – измеряемое напряжение;
R_0 – образцовое сопротивление;
$E_п$ – источник питания;
R – переменное сопротивление;
$R_р$ – реохорд;
НИ – нуль-индикатор;
К – ключ

К недостаткам нормальных элементов следует отнести значительную зависимость их ЭДС от температуры. Например, при поверке нормальных элементов температура окружающей среды должна быть +20 ^{0}С с точностью ±0,1 ^{0}С. При работе нормальные элементы высокого класса помещаются в специальные термостаты и без них эксплуатироваться не могут. Другим их недостатком является «боязнь» тряски, вибраций, ускорений и т. д.

Нормальные элементы должны соответствовать требованиям государственного стандарта ГОСТ 1954–84 [114].

Из-за эксплутационных недостатков нормальные элементы в последнее время частично заменяются источниками стабильных ЭДС на основе параметрических и электронных стабилизаторов.

Другим важным элементом компенсатора, обеспечивающим его малую погрешность, является образцовое сопротивление высокого класса R_0.

Работа компенсаторов постоянного тока протекает в следующей последовательности.

1-й этап. На первом этапе проводится установка рабочего тока $I_р$. Для этого переключатель К устанавливается в положение 1. В этом случае к нуль-индикатору НИ прикладывается разность ΔU_0 между ЭДС нормального элемента E_0 и падением напряжения U_0 на сопротивлении R_0.

$$U_0 = I_p \cdot R_0, \tag{18.1}$$

где $I_р$ – рабочий ток;

R_0 – образцовое сопротивление.

$$\Delta U_0 = U_0 - E_0, \tag{18.2}$$

где E_0 – ЭДС нормального элемента;

U_0 – падение напряжения на образцовом сопротивлении.

При $\Delta U_0 \neq 0$ показания НИ отличны от нуля. Изменяя переменное сопротивление R (и тем самым изменяя рабочий ток $I_р$), добиваются нулевых показаний нуль-индикатора НИ. При этом $\Delta U = 0$ и $E_0 = U_0$. Тогда, учитывая соотношение (18.1), можно записать

$$I_p = \frac{E_0}{R_0}. \tag{18.3}$$

2-й этап. На втором этапе проводится измерение искомого напряжения $U_х$. Для этого переключатель К переводится в положение 2. В этом случае к нуль-индикатору НИ прикладывается разность ΔU между измеряемым напряжением $U_х$ и падением напряжения на реохорде $U_р$.

$$U_p = I_p \cdot R_p \cdot x, \tag{18.4}$$

где $R_р$ – сопротивление реохорда;

x – координата движка реохорда.

$$\Delta U = U_X - U_p . \qquad (18.5)$$

Если $\Delta U \neq 0$, то показания НИ отличны от нуля. Перемещая движок реохорда, добиваются нулевых показаний нуль-индикатора НИ. При этом $\Delta U = 0$ и $U_х = U_р$.

Учитывая соотношения (18.4) и (18.3), можно записать

$$U_X = I_p \cdot R_p \cdot x = \frac{E_0}{R_0} \cdot R_p \cdot x . \qquad (18.6)$$

Полученное выражение (18.6) является «уравнением шкалы» компенсаторов постоянного тока с ручным управлением. Входящие в (18.6) величины E_0, R_0, $R_р$, x известны с высокой точностью, что позволяет со столь же высокой точностью измерять искомые напряжения и ЭДС. Классы точности компенсаторов обычно имеют значения: 0,5; 0,1; 0,05; 0,02 и выше. Другим достоинством компенсаторов является их большое внутреннее сопротивление в момент компенсации (и соответственно в момент считывания показаний).

К недостаткам компенсаторов относятся их громоздкость, которая растет с ростом класса точности, и малое быстродействие.

Компенсаторы постоянного тока с ручным управлением описаны также в литературных источниках [1; 2; 8].

18.3. Автоматические компенсаторы постоянного тока

Электрические цепи на схеме показаны сплошными линиями, а механические связи – пунктирами. Автоматические компенсаторы имеют много общего с компенсаторами ручного управления (см. п. 18.1). В автоматических компенсаторах также используются нормальные элементы (или заменяющие их электронные стабилизаторы), реохорды, источники питания и другие общие элементы схемы. Работа автоматических компенсаторов протекает в следующей последовательности.

Схема автоматического компенсатора приведена на рис. 18.2.

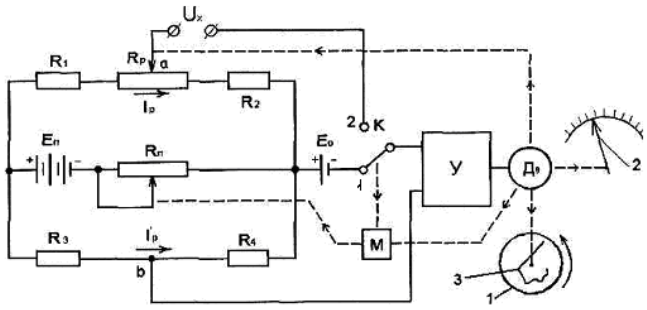


Рис. 18.2. Схема автоматического компенсатора постоянного тока:

1 – дисковая диаграмма;
2 – указатель;
3 – перо самописца;
У – усилитель;
Дв –двигатель;
М – электромеханическая муфта;
U_x – измеряемое напряжение;
$R_р$ – реохорд;
$E_п$ – источник питания;
$R_п$ – переменный резистор;
К – ключ;
E_0 – нормальный элемент;
R_1, R_2, R_3 и R_4 – постоянные резисторы

1-й этап. Установка рабочего тока

Для установки рабочего тока $I_р$ через реохорд и рабочего тока $I'_р$ в цепи сопротивлений R_3–R_4 необходимо перевести ключ К в положение 1. При этом включается электромеханическая муфта М. Через муфту М двигатель Дв соединяется с движком переменного резистора $R_п$. Одновременно образуется электрическая цепь: ключ К – нормальный элемент E_0 – образцовое сопротивление R_4 – точка «*b*» схемы. Напряжение ΔU_0, снимаемое с этой цепи, подается через вход усилителя.

$$\Delta U_0 = U_4 - E_0, \tag{18.7}$$

$$U_4 = I'_p \cdot R_4, \tag{18.8}$$

$$I'_p = \frac{E_{\ddot{I}}}{R_{\ddot{I}} + R_3 + R_4}, \tag{18.9}$$

где U_4 – падение напряжения на образцовом сопротивлении;

E_0 – ЭДС нормального элемента;

R_4 – образцовое сопротивление.

При $\Delta U_0 = 0$ усилитель У усиливает это напряжение. С выхода усилителя напряжение подается на двигатель Дв, который начинает работать и через муфту М перемещает движок резистора $R_П$. Перемещение движка приводит к изменению значения сопротивления $R_П$ и, в соответствии с (18.9), – к изменению значения тока $I'_р$. Ток $I'_р$ изменяется до тех пор, пока не выполняются условия:

$U_4 = E_0$ и $\Delta U_0 = 0$. При этом двигатель останавливается, и работа по установке рабочего тока прекращается.

2-й этап. Измерение

Для проведения измерения ключ К переводится в положение 2. При этом муфта М отключает двигатель Дв от движка переменного резистора $R_П$. Одновременно образуется электрическая цепь: ключ К – измеряемое напряжение U_x – точка схемы *«a»* – точка схемы *«b»*. Напряжение ΔU, снимаемое с этой цепи, подается на вход усилителя.

$$\Delta U_0 = U_X - U_{AB}, \qquad (18.10)$$

где U_X – измеряемое напряжение;

U_{AB} – разность потенциалов между точками схемы *«a»* и *«в»*.

Если $\Delta U \neq 0$, то это напряжение усиливается и подается на двигатель, который начинает работать и перемещать движок реохорда R_p, стрелку (указатель) 2 и перо самописца 3. Перемещение движка реохорда R_p приводит к изменению значения напряжения U_{AB}. Напряжение U_{AB} изменяется до тех пор, пока не станет равно измеряемому напряжению U_x. При этом в соответствии с (18.10) $\Delta U = 0$, двигатель останавливается. Результат измерения считывается со шкалы (в зависимости от положения указателя 2) и с дисковой диаграммы по кривой, нанесенной пером самописца. Шкалы могут быть круговыми (как на рис. 18.2) и прямолинейными. Диаграммы могут быть дисковыми (как на рис. 18.2) и ленточными. Компенсаторы градуируются в вольтах (или в милливольтах). Иногда компенсаторы (особенно часто автоматические) используются в комплекте с термопарами для измерения температуры. В этом случае приборы градуируются в градусах Цельсия. Погрешность таких приборов составляет, как правило, 0,5 %. Погрешность записи результатов измерений – около 1 %.

Дополнительные сведения по автоматическим компенсаторам постоянного тока можно почерпнуть в литературных источниках [1; 2; 8].

18.4. Полярно-координатные компенсаторы переменного тока

Для уравновешивания двух электрических величин на переменном токе необходимо выполнение следующих условий: равенство величин по модулю; противоположность их фаз; равенство частот; идентичность формы измеряемой и компенсирующей величин.

Возможность осуществления перечисленных условий обеспечивается конструкцией компенсаторов (потенциометров) и порядком их использования.

Полярно-координатные компенсаторы содержат фазорегулятор и делитель напряжения (реохорд), с помощью которых регулируется компенсирующее напряжение по фазе и по модулю (рис. 18.3).

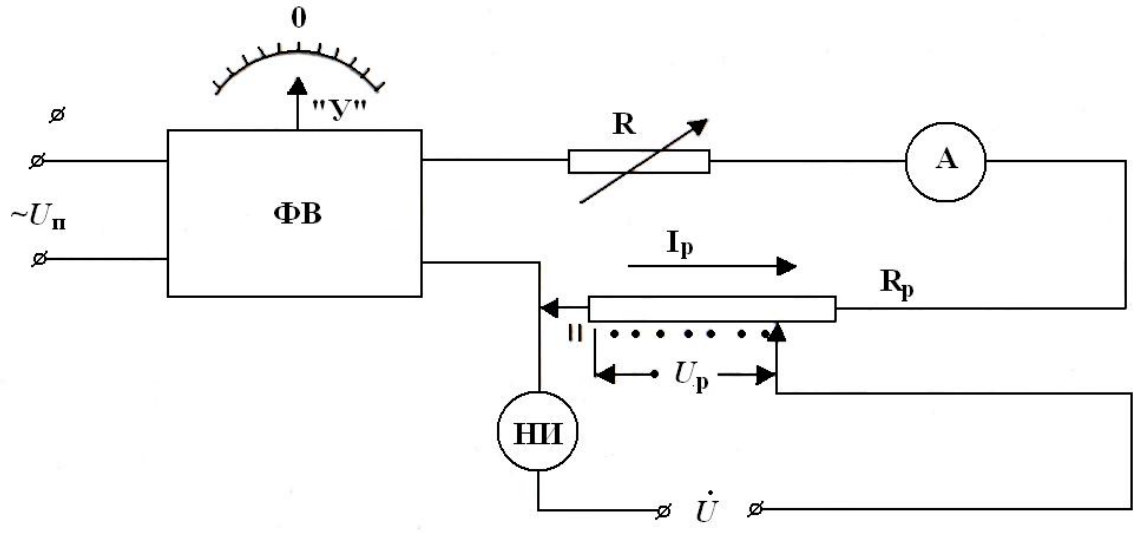


Рис. 18.3. Схема полярно-координатного компенсатора переменного тока:

ФВ – фазовращатель;
НИ – нуль-индикатор;
R – переменный резистор;
$R_р$ – реохорд;
$I_р$ – рабочий ток;
$U_П$ – напряжение питания;
$\dot{U}$ – измеряемое напряжение(комплексная величина)

Рабочий ток $I_р$ устанавливается с помощью переменного резистора R (изменением его сопротивления) по амперметру (или миллиамперметру). Класс точности используемых амперметров электродинамической системы не выше 0,1 или 0,2. Использование амперметров для установки $I_р$ снижает точность компенсаторов переменного тока (по сравнению с компенсаторами постоянного тока) и объясняется отсутствием меры ЭДС переменного тока, аналогичной нормальному элементу. В качестве нуль-индикатора обычно используется вибрационный галь-

ванометр. При измерении компенсация искомого напряжения $\overset{0}{U}$ проводится по модулю и по фазе. Перемещением движка реохорда $R_{\text{р}}$ и регулятора фазовращателя ФВ добиваются нулевых показаний нуль-индикатора НИ. При этом фазы измеряемого и компенсирующего напряжений противоположны, а модули равны:

$$\dot{U} = U_p \cdot e^{j\varphi}, \tag{18.11}$$

$$U_k = I_p \cdot R'_p, \tag{18.12}$$

где U_{k} – модуль компенсирующего напряжения;

φ – угол между компенсирующим напряжением и опорным (за опорное обычно принимается напряжение питания $U_{\text{П}}$);

$R'_{\text{р}}$ – сопротивление использованной части реохорда (от 0 до движка).

При заданном рабочем токе $I_{\text{р}}$ реохорд $R_{\text{р}}$ может быть проградуирован в вольтах (или милливольтах), что дает возможность непосредственного отсчета модуля действующего (или амплитудного) значения измеряемого напряжения. Отсчет угла φ осуществляется по шкале, которой снабжен фазовращатель ФВ.

Существенным недостатком этого типа компенсаторов является большая погрешность измерения фазы искомого напряжения (до 1^0). Причина – в трудности изготовления фазовращателей высокой точности. По этой причине полярно-координатные компенсаторы переменного тока не нашли широкого применения.

Дополнительные сведения по рассмотренным компенсаторам приведены в литературе [1; 2; 8].

18.5. Прямоугольно-координатные компенсаторы переменного тока

Принцип действия рассматриваемых компенсаторов переменного тока основан на раздельной компенсации активной и реактивной составляющих измеряемого напряжения соответствующими составляющими компенсирующего напряжения (рис. 18.4).

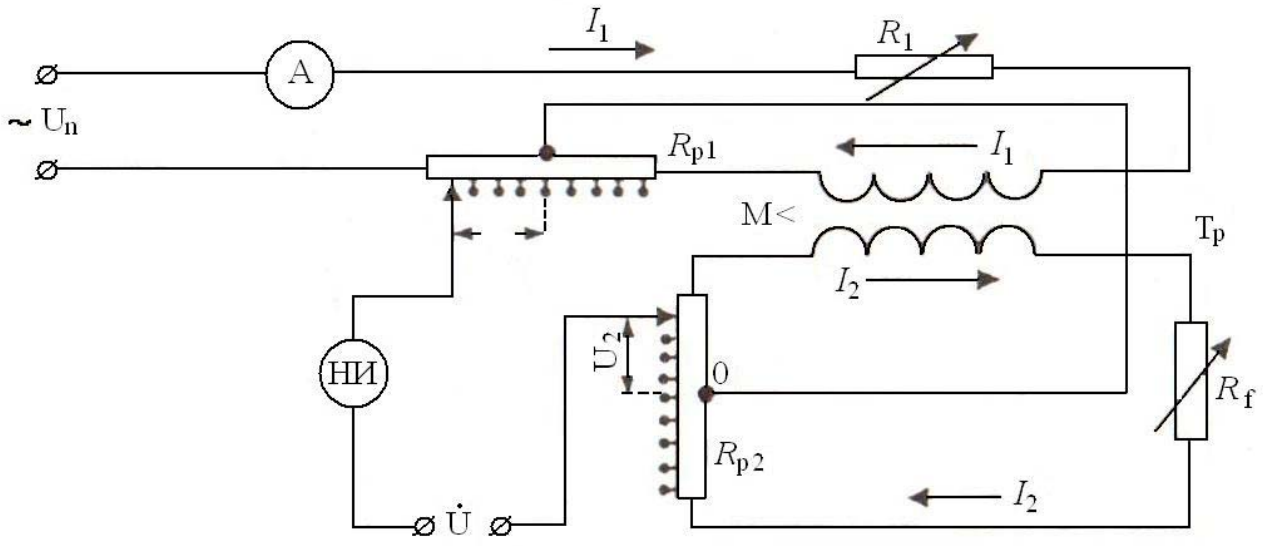


Рис. 18.4. Схема прямоугольно-координатного компенсатора переменного тока:
$R_{р1}$, $R_{р2}$ – реохорды;
$T_р$ – воздушный трансформатор;
R_f – переменный резистор;
$U_П$ – напряжение питания;
$\dot{U}$ – измеряемое напряжение (комплексная величина);
НИ – нуль-индикатор;
I_1 – рабочий ток первого контура;
I_2 – рабочий ток второго контура;
R_1 – переменное сопротивление;
M – взаимная индуктивность между обмотками трансформатора $T_р$

Прямоугольно-координатные компенсаторы имеют две рабочих цепи. Первая рабочая цепь состоит из реохорда $R_{р1}$, первичной обмотки воздушного трансформатора $T_р$, переменного сопротивления R_1 и амперметра. К этой цепи прикладывается питание (с напряжением $U_П$). Вторая рабочая цепь состоит из реохорда $R_{р2}$, вторичной обмотки воздушного трансформатора $T_Р$ и переменного сопротивления R_f. Рабочие цепи связаны между собой индуктивно (взаимная индуктивность между обмотками трансформатора M). Ток I_1 устанавливается по амперметру с помощью переменного сопротивления R_1. Значение тока I_2 зависит от взаимной индуктивности M и значений сопротивлений $R_{р2}$ и R_f. Сопротивление резистора R_f служит для поддержания требуемого значения I_2 при изменении частоты. Токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90^0. Падения напряжений от этих токов на сопротивлениях реохордов $R_{р1}$ и $R_{р2}$ также сдвинуты по фазе на 90^0. Середины реохордов соединены между собой перемычкой. В силу этого потенциалы средних точек реохордов могут быть приняты за ноль. Меняя путем перемещения движков реохордов величину падений напряжений U_1 и U_2 между движками и начальной точкой «0», можно

получить компенсацию измеряемого напряжения $\dot{U}$ в любом из четырех квадрантов координатной плоскости.

О компенсации измеряемого напряжения судят по показаниям нуль-индикатора НИ (в момент компенсации НИ показывает ноль). В этом случае измеряемое комплексное напряжение $\dot{U}$ уравновешивается геометрической суммой напряжений U_1 и U_2:

$$U = U_1 + jU_2 \,. \tag{18.13}$$

Модуль и фаза измеряемого напряжения равны:

$$|U| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \,, \tag{18.14}$$

$$\varphi = \text{arctg}\frac{U_2}{U_1}. \tag{18.15}$$

При синфазности рабочего тока первого контура I_1 и напряжения питания $U_\text{П}$ угол φ представляет собой фазовый сдвиг измеряемого напряжения относительно напряжения питания (как и в полярно-координатных компенсаторах).

Компенсаторы переменного тока значительно уступают по точности компенсаторам постоянного тока. Это связано с тем, что рабочий ток приходится устанавливать по электродинамическим амперметрам, классы точности которых, в лучшем случае, – 0,1 или 0,2. Поэтому, обладая большим входным сопротивлением (как и аналогичные приборы постоянного тока), прямоугольно-координатные компенсаторы переменного тока имеют относительные погрешности на уровне 0,2–0,5 %.

Дополнительные сведения по рассмотренным компенсаторам переменного тока приведены в литературных источниках [1; 2; 8].

19. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

19.1. Общие положения

Аналоговые электронные приборы представляют собой средства измерений, в которых преобразование измеряемой величины осуществляется с помощью аналоговых электронных устройств (рис. 19.1). Аналоговые электронные приборы применяются при измерении практически всех электрических величин: напряжения, тока, мощности, частоты и т. д.

Применение электронных устройств значительно расширяет возможности средств измерений: повышается чувствительность приборов; расширяется диапазон измерений; уменьшается мощность, потребляемая от измерительных цепей, и т. п.

В настоящее время получили распространение такие приборы, как электронные вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока, омметры, измерители индуктивностей и емкостей, частотомеры, анализаторы спектров и др. Вместе с тем следует отметить, что аналоговые электронные приборы частично вытесняются соответствующими цифровыми приборами.

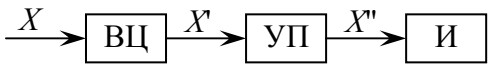


Рис. 19.1. Структурная схема аналоговых электронных приборов:
ВЦ – входная цепь; УП – усилитель–преобразователь; И – измеритель

В состав входной цепи (ВЦ) входят делители, фильтры, защитные устройства от перегрузки, переключатели пределов измерения и т. п. На вход ВЦ подается измеряемая электрическая величина X, а с выхода снимается электрическая величина X'.

Усилитель-преобразователь (УП) представляет собой блок, обеспечивающий усиление и преобразование электрической величины X'. Усилительно-преобразовательный блок строится на основе различных электронных устройств: полупроводниковых диодов, транзисторов, электронных ламп, микросхем и т. д. В общем случае УП и усиливает, и преобразует подавае-

мые на его вход электрические величины, но в частном случае это может быть только усилитель или только преобразователь. С выхода УП снимается электрическая величина X''.

Электрическая величина X'' подается на измеритель (И). В качестве измерителя обычно используются электромеханические приборы магнитоэлектрической системы. Могут также применяться электромеханические приборы электростатической системы и газоразрядные устройства.

Примеры обозначений аналоговых электронных приборов приведены в приложении (см. прил. 4).

Описание рассматриваемых приборов приведено в литературных источниках [1; 2; 36].

19.2. Вольтметры средних значений

Упрощенная схема вольтметра средних значений выпрямительной системы приведена на рис. 19.2.

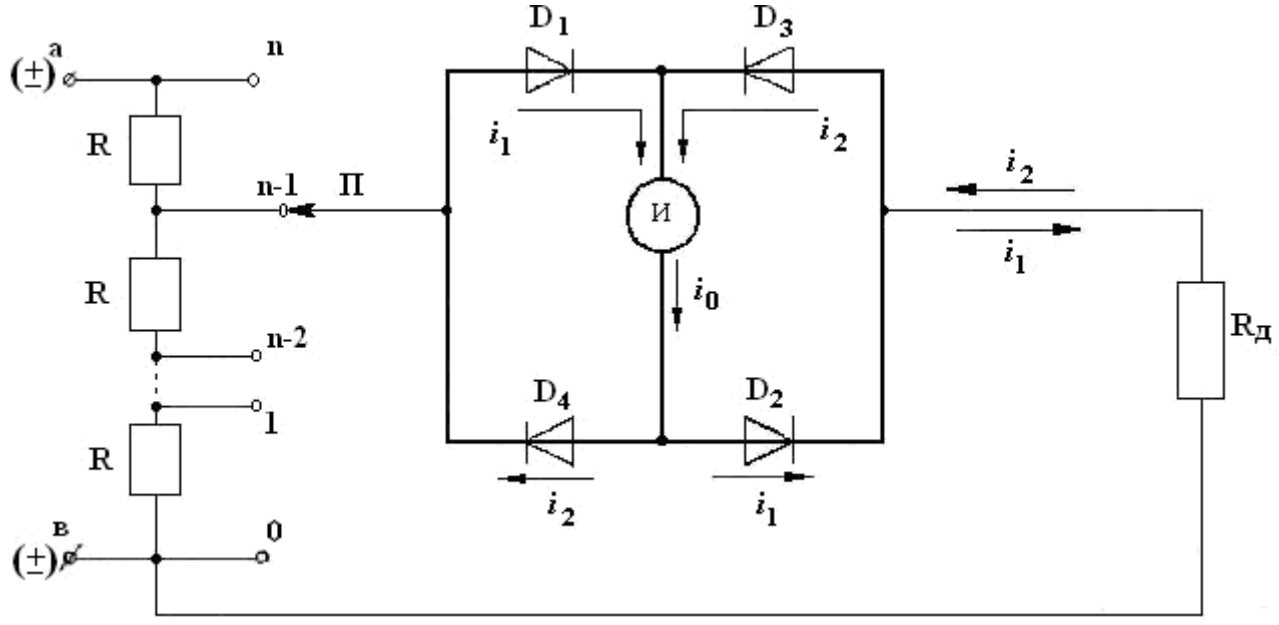


Рис. 19.2. Схема вольтметра средних значений: R – постоянные сопротивления; П – переключатель; 0-1-...-n – неподвижные контакты переключателя; ~U – измеряемое переменное напряжение; D_1; D_2; D_3; D_4 – полупроводниковые диоды; И – измеритель (электромеханический прибор магнитоэлектрической системы); $R_Д$ –постоянное сопротивление; +(–) – полярность точки «а» при положительных и отрицательных полупериодах измеряемого напряжения; –(+) – полярность точки «в» при отрицательных и положительных полупериодах измеряемого напряжения

Входная цепь (ВЦ) приведенного на рис. 19.2 вольтметра средних значений представляет собой делитель из n резисторов R. С помощью переключателя, перемещающегося по неподвижным контактам делителя, выбирают необходимое значение измеряемого напряжения. Выбранное напряжение подается на выпрямительный мост, собранный на диодах D_1, D_2, D_3, D_4, и далее (после выпрямления) – на измеритель И магнитоэлектрической системы. Графики напряжений и токов, действующих в рассматриваемой схеме, приведены на рис. 19.3.

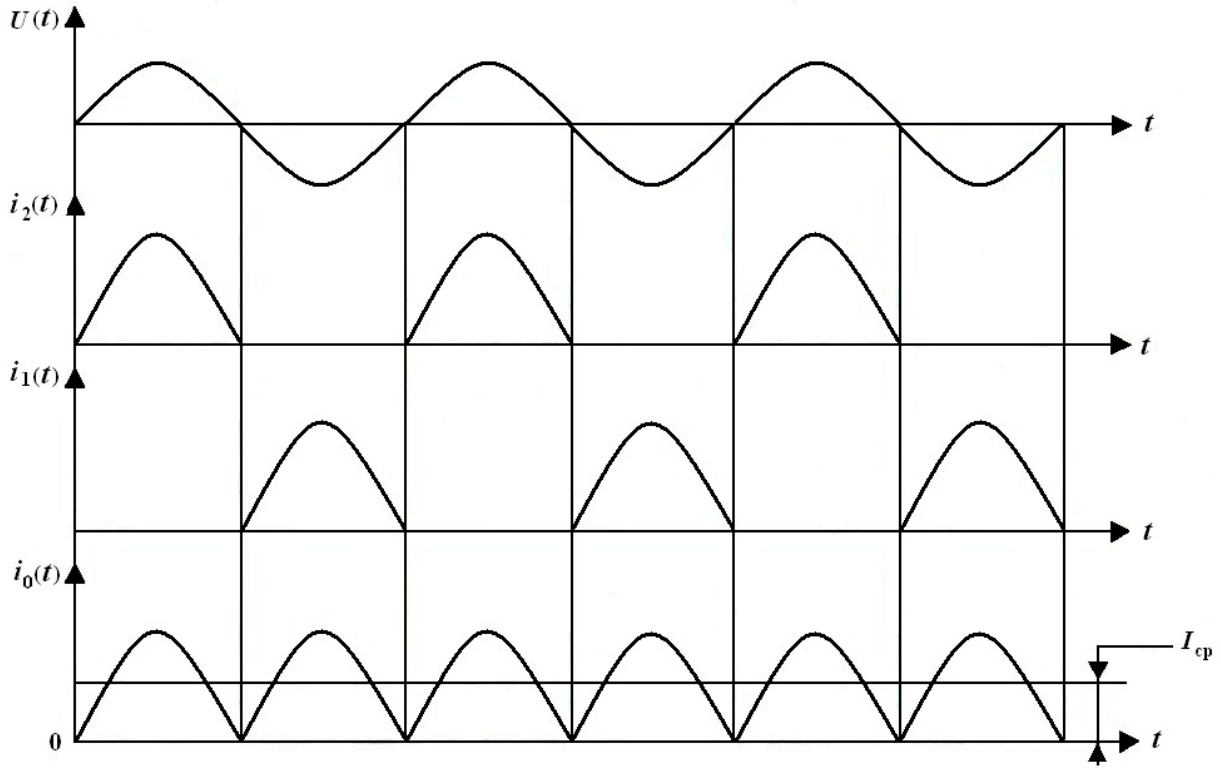


Рис. 19.3. Графики напряжений и токов: $\mathcal{U}(t)$ – мгновенное значение измеряемого напряжения; $i_1(t)$ – мгновенное значение тока в положительные полупериоды измеряемого напряжения; $i_2(t)$ – мгновенное значение тока в отрицательные полупериоды измеряемого напряжения; $i_0(t)$ – мгновенное значение тока, протекающего через измеритель; $I_{ср}$ – среднее значение тока; t – время

Работа вольтметра средних значений протекает в следующей последовательности. При положительном полупериоде измеряемого напряжения (в этом случае «+» приложен к точке *«а»* схемы и «–» приложен к точке *«в»* (см. рис. 19.2)) ток i_1 протекает по цепи: точка *«а»* – сопротивление R – диод D_1 – измеритель И – диод D_2 – сопротивление $R_Д$ – точка *«в»*. При отрицательном полупериоде измеряемого напряжения («+» в точке *«в»*, «–» в точке *«а»*) ток i_2

протекает по цепи: точка *«в»* – сопротивление $R_Д$ – диод D_3 – измеритель И – диод D_4 – переключатель П – резистор R – точка *«а»*.

Через измеритель И в оба полупериода протекает суммарный ток i_0, являющийся током двухполупериодного выпрямления.

Измеритель И магнитоэлектрической системы реагирует на средний ток $I_{ср}$. Показания измерителя:

$$\alpha = K_I \cdot I_{ср}, \tag{19.1}$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i_0(t)dt, \tag{19.2}$$

где α – показание прибора (измерителя);

K_I – коэффициент пропорциональности по току;

$I_{ср}$ – среднее значение тока;

T – период измеряемого напряжения.

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_\Sigma}, \tag{19.3}$$

где $U_{ср}$ – среднее значение измеряемого напряжения;

R_Σ – суммарное сопротивление в цепи измерителя.

Подставляя в (19.1) значение $I_{ср}$ по (19.3), получаем

$$\alpha = \frac{K_I}{R_\Sigma} \cdot U_{ср}, \tag{19.4}$$

$$\alpha = K_2 \cdot U_{ср}, \tag{19.5}$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности по среднему значению напряжения.

Полученное выражение (19.5) свидетельствует, что показания рассматриваемого вольтметра (см. рис. 19.2) прямо пропорциональны среднему значению измеряемого переменного напряжения.

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [U(t)]^2 dt}, \tag{19.6}$$

$$U_{ср} = \frac{U}{k_ф}, \qquad (19.7)$$

где U – действующее (эффективное) значение измеряемого напряжения;

$k_ф$ – коэффициент формы.

Подставляя (19.7) в (19.5), получаем

$$\alpha = \frac{K_2}{k_ф} \cdot U = K \cdot U, \qquad (19.8)$$

где K – коэффициент пропорциональности по действующему значению синусоидального напряжения;

$k_ф = 1{,}11$ – для синусоидального напряжения.

Описываемый вольтметр является вольтметром средних значениий и, согласно (19.5), может быть проградуирован в средних значениях ($U_{ср}$) независимо от формы измеряемого напряжения.

При градуировке прибора в действующих значениях измеряемого напряжения его показания, согласно (19.8), зависят от формы этого напряжения. Для синусоидального напряжения будут одни показания прибора, для прямоугольного напряжения – другие показания, для треугольного – третьи и т. д.

Если вольтметр проградуирован в действующих значениях, то в обязательном порядке указывается форма измеряемого напряжения. Как правило, такие вольтметры предназначены для измерения действующих значений синусоидальных напряжений. Измерение напряжений, отличных от синусоидальных, приводит в этом случае к появлению дополнительных погрешностей, которые тем больше, чем больше измеряемое напряжение отлично от синусоидального.

Отметим, что рассматриваемые вольтметры называют также приборами выпрямительной системы. Обозначения этих приборов приведены в приложении (см. прил. 4).

Дополнительные сведения по вольтметрам средних значений приведены в литературных источниках [1; 2; 5; 36].

19.3. Вольтметры амплитудных значений

В зависимости от принципа построения различают вольтметры амплитудных значений (или «пиковые вольтметры») с открытым входом (рис. 19.4) и вольтметры с закрытым входом (рис. 19.6). На рис. 19.5 приведены временные диаграммы сигналов вольтметров амплитудных значений с открытым входом.

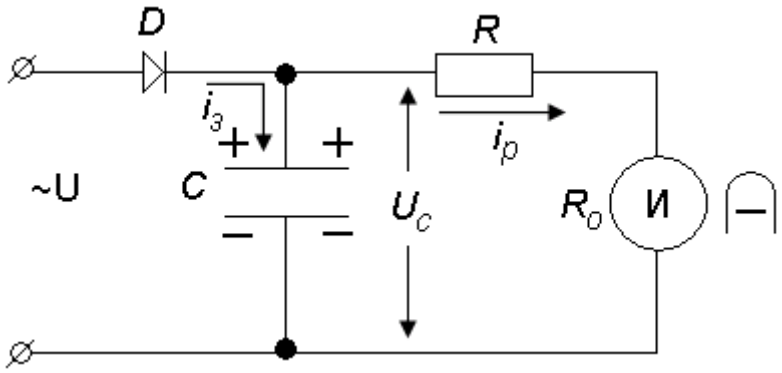


Рис. 19.4. Схема амплитудного вольтметра с открытым входом:

$\sim U$ – измеряемое (входное) напряжение;

D – полупроводниковый диод;

C – емкость конденсатора;

R – постоянное сопротивление;

И – измеритель магнитоэлектрической системы;

R_o – внутреннее сопротивление измерителя

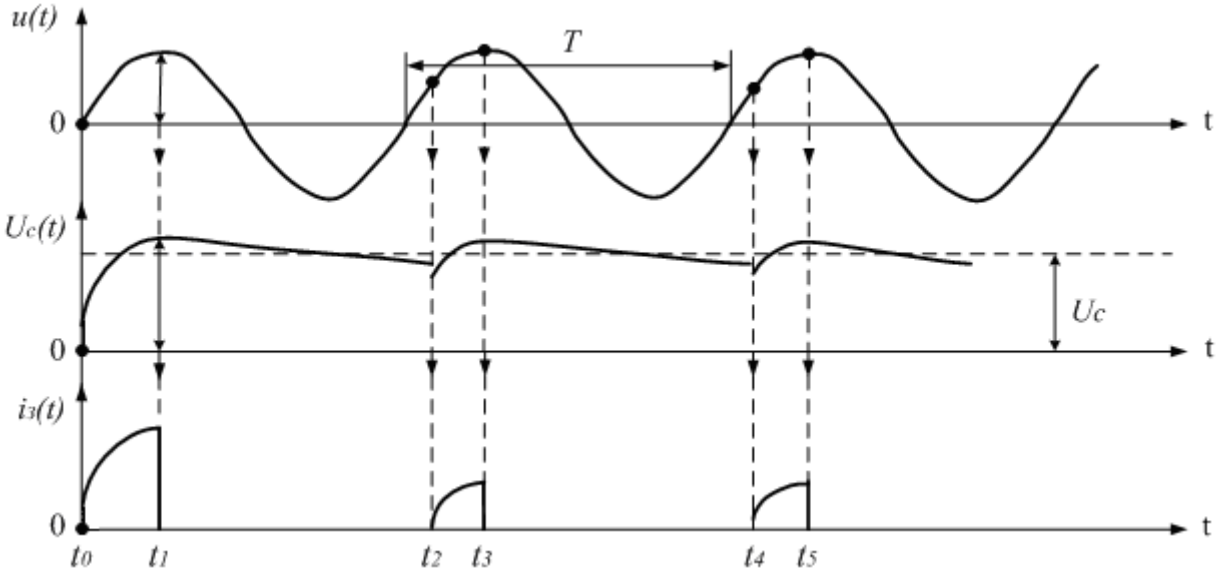


Рис. 19.5. Временные диаграммы сигналов амплитудных вольтметров с открытым входом: *u(t)* – мгновенное значение измеряемого (входного) напряжения; u_c *(t)* – мгновенное значение напряжения на конденсаторе; i_3 – мгновенное значение тока заряда

Рассмотрим работу амплитудных вольтметров с открытым входом при подаче на вход синусоидального напряжения. Пусть в некоторый момент времени t_0 на вход рассматриваемого вольтметра (см. рис. 19.4) прикладывается

синусоидальное напряжение $U = U_m \sin(wt)$, которое через открытый диод D начинает заряжать конденсатор C.

Постоянная времени заряда T_3:

$$T_3 = (R_c + R_д) \cdot C \qquad (19.9)$$

где R_c – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$R_д$ – сопротивление открытого диода;

C – емкость конденсатора.

Конденсатор C заряжается до амплитудного значения измеряемого напряжения U_m (см. рис. 19.5) при выполнении условия

$$T_3 < 0{,}5T, \qquad (19.10)$$

где T – период измеряемого напряжения.

На этом же рисунке показан зарядный ток i_3 в первую четверть периода (от t_0 до t_1). С момента времени t_1 входное напряжение уменьшается, диод закрывается. Конденсатор будет разряжаться через сопротивления R и R_0 (ток разряда $i_р$) до момента времени t_2, когда входное (измеряемое) напряжение становится равным напряжению на конденсаторе, после чего диод открывается и конденсатор подзаряжается до U_m (момент времени t_2–t_3). Ток подзаряда в моменты времени от t_2 до t_3 показан на рис. 19.5. Аналогично происходит подзаряд конденсатора в моменты времени t_4–t_5 и t_6–t_7.

Постоянная времени разряда конденсатора C:

$$T_р = (R + R_0), \qquad (19.11)$$

где $T_р$ – постоянная времени разряда;

R – сопротивление цепи;

R_0 – внутреннее сопротивление измерителя магнитоэлектрической системы.

Для медленного разряда конденсатора необходимо выполнить условие:

$$T_р >> T. \qquad (19.12)$$

При выполнении условия (19.12) среднее значение напряжения на конденсаторе $U_{ср}$ близко к U_m (см. рис. 19.5), т. е.

$$U_m = U_{ср}. \qquad (19.13)$$

Показания измерителей магнитоэлектрической системы пропорциональны средним значениям электрических величин. С учетом (19.13) можно записать:

$$\alpha = k \cdot U_m, \qquad (19.14)$$

где α – показание амплитудного вольтметра;

k – коэффициент пропорциональности;

U_m – амплитуда входного (измеряемого) напряжения.

При наличии постоянной составляющей во входном сигнале $\pm U_0$ выходное напряжение (и соответственно показание) амплитудного вольтметра с открытым входом пропорционально величине $U_m \pm U_0$, т. е.

$$\alpha = k(U_m \pm U_0). \qquad (19.15)$$

Приведенная на рис. 19.4 схема предназначена для измерения амплитуды входного сигнала положительной полярности. Для измерения амплитуды отрицательной полярности необходимо изменить полярность включения диода.

На рис. 19.6 приведена схема амплитудного вольтметра с закрытым входом.

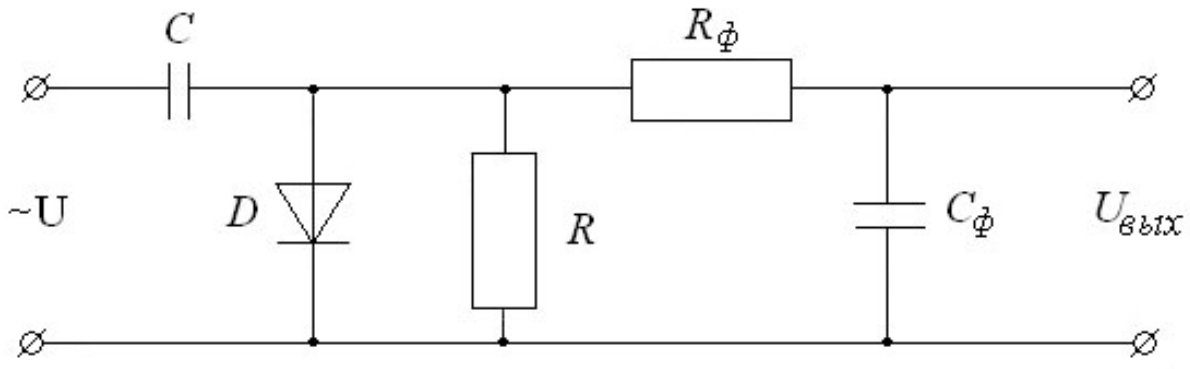


Рис. 19.6. Схема амплитудного вольтметра с закрытым входом: U – действующее значение измеряемого (входного) напряжения; $R_ф$, $C_ф$ – сопротивление и емкость фильтра; $U_{вых}$ – выходное напряжение; R – постоянное сопротивление

В этой схеме процесс заряда конденсатора аналогичен процессу, рассмотренному в схеме амплитудного вольтметра с открытым входом. Напряжение на конденсаторе устанавливается и остается близким к значению U_m. С помощью фильтра $R_ф C_ф$ напряжение усредняется. Выходное напряжение $U_{вых}$ постоянно и

близко к U_m. Амплитудные вольтметры с закрытым входом не реагируют на постоянную составляющую входного (измеряемого) напряжения.

Напряжение $U_{вых}$ может быть измерено с помощью, например, измерителя магнитоэлектрической системы так же, как для амплитудных вольтметров с открытым входом. В этом случае уравнение шкалы для вольтметров с закрытым входом аналогично уравнению шкалы для вольтметров с открытым входом (см. соотношение (19.14)).

Следует отметить, что лучшие результаты обеспечивает подключение магнитоэлектрических измерителей к амплитудным вольтметрам через электронные усилители. Использование электронных усилителей позволяет легче выполнить условие (19.12) и получить более благоприятные метрологические характеристики приборов.

Рассмотренные вольтметры обычно градуируются в амплитудных значениях измеряемого напряжения. В этом случае показания вольтметров не зависят от формы входного (измеряемого) напряжения. Если же приборы проградуированы в действующих значениях синусоидального напряжения, то при измерении напряжений другой формы необходимо делать соответствующий пересчет с учетом коэффициента амплитуды измеряемого напряжения.

Более детально с амплитудными вольтметрами можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 36].

19.4. Конденсаторные частотомеры

Электронные конденсаторные частотомеры используются для измерения частоты периодических напряжений в диапазоне от 20 Гц до 500 кГц. Приведенная погрешность таких приборов обычно находится в пределах 1,0–2,5 %.

Принцип действия электронного конденсаторного частотомера поясняется схемой, приведенной на рис. 19.7, и временными диаграммами, приведенными на рис. 19.8.

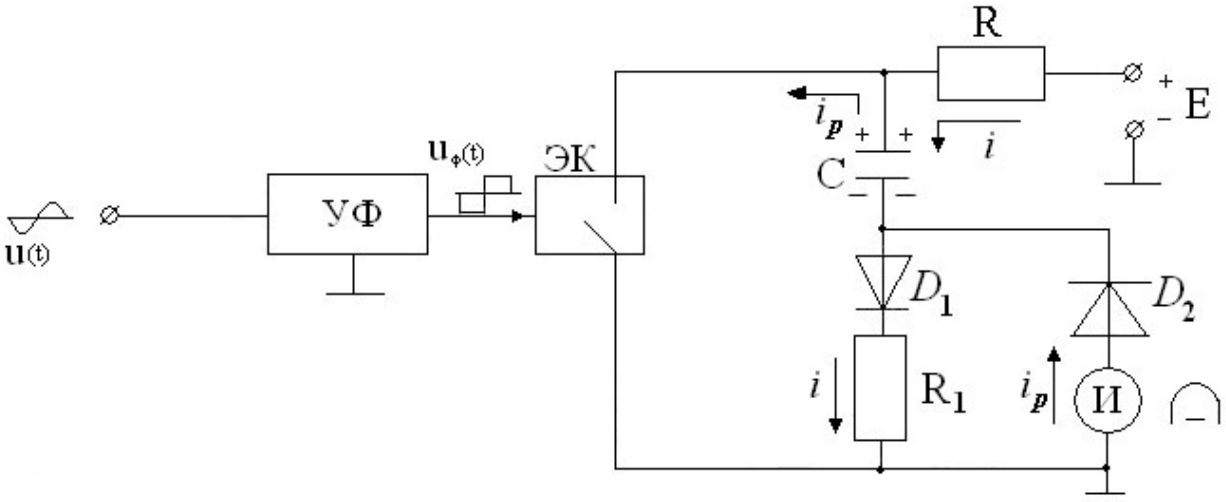


Рис. 19.7. Схема электронного конденсаторного частотомера:
УФ – усилитель-формирователь; ЭК – электронный ключ; D_1, D_2 – полупроводниковые диоды; И – измеритель магнитоэлектрической системы; R, $R1$ – постоянные сопротивления

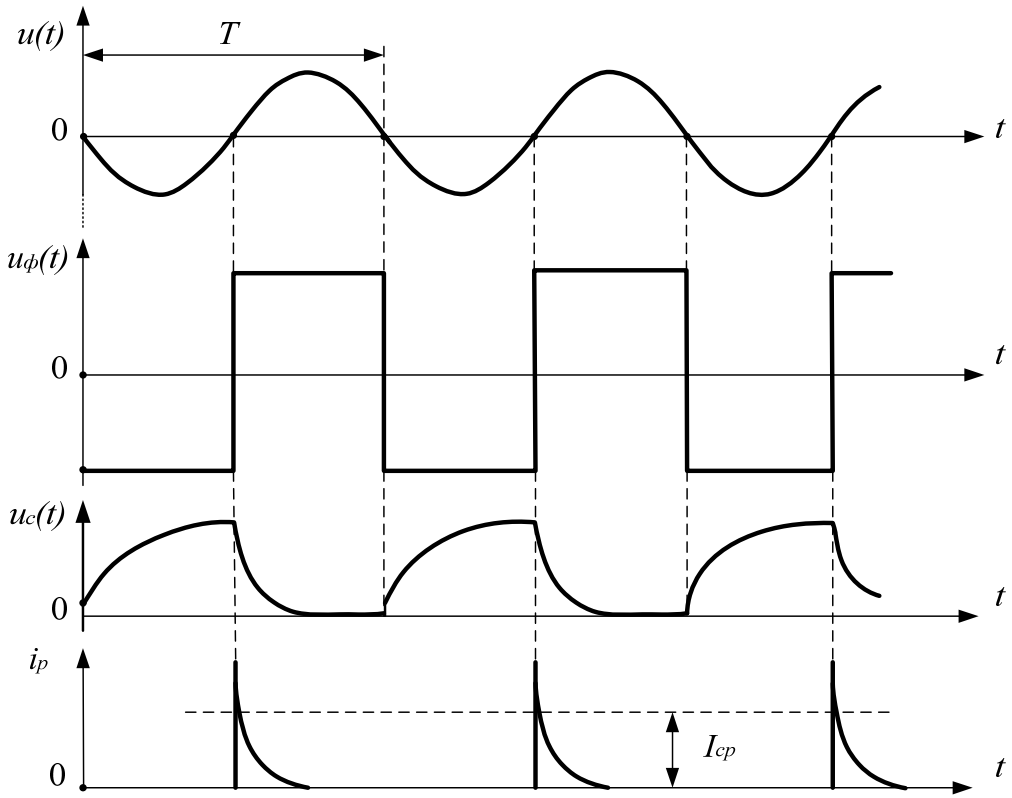


Рис. 19.8. Временная диаграмма сигналов электронного конденсаторного частотомера:
$u(t)$ – входной сигнал;
$u_ф(t)$ – напряжение на выходе усилителя – формирователя;
$u_c(t)$ – напряжение на конденсаторе C;
i_p – ток разряда

Напряжение, частота которого изменяется $u(t)$ (рис. 19.7, 19.8), подается на вход усилителя-формирователя УФ, усиливающего входное напряжение и

формирующего из него прямоугольное напряжение. Этим напряжением управляется схема электронного ключа ЭК. Предполагается, что при отрицательных сигналах ЭК разомкнут, а при положительных замкнут. При разомкнутом состоянии ключа в течение половины периода конденсатор C через R_A заряжается до значения E. Ток заряда i_3 протекает через диод D_1. При замыкании ЭК конденсатор C разряжается через замкнутый ключ, измеритель И и диод D_2.

Заряд конденсатора C до напряжения питания произойдет при выполнении условия

$$t_3 < 0{,}5T\,, \tag{19.16}$$

где t_3 – время заряда;

T – период входного напряжения.

Полный разряд конденсатора C произойдет при выполнении условия

$$t_p < 0{,}5T\,, \tag{19.17}$$

где $t_р$ – время разряда.

При выполнении условий (19.16) и (19.17) конденсатор C за первую половину периода запасает заряд q. За вторую половину периода это количество электричества проходит через измеритель И.

$$q = E \cdot C\,, \tag{19.18}$$

где E – ЭДС источника питания.

Показания измерителя магнитоэлектрической системы пропорциональны среднему току, проходящему через него.

$$\alpha = K_П \cdot I_{ср}\,, \tag{19.19}$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^t i_p(t)dt\,, \tag{19.20}$$

$$q = \int_0^t i_p(t)dt\,, \tag{19.21}$$

$$f = \frac{1}{T}, \tag{19.22}$$

где α – показания прибора;

$K_П$ – коэффициент пропорциональности;

$I_{ср}$ – среднее значение разрядного тока;

$i_р$ – мгновенное значение тока разряда конденсатора;

t – текущее время;

f – частота входного напряжения.

На основании соотношений (19.18)–(19.22) можно записать:

$$\alpha = K_П \cdot \frac{1}{T} \cdot q = K_П \cdot f \cdot E \cdot C, \tag{19.23}$$

$$K = K_П \cdot E \cdot C, \tag{19.24}$$

$$\alpha = K \cdot f, \tag{19.25}$$

где K – коэффициент пропорциональности по частоте.

Выражение (19.25) свидетельствует, что показания рассматриваемого прибора прямо пропорциональны частоте входного сигнала.

Дополнительные сведения по электронным конденсаторным частотомерам приведены в литературных источниках [1; 2].

19.5. Омметры

Электронные омметры широко используются для измерения активных сопротивлений резисторов, контактов, изоляции, поверхностных и объемных сопротивлений и в других случаях.

Погрешность таких омметров составляет от 1–2 до 10–15 %. Особенно велики погрешности при измерении особо больших сопротивлений (при $R > (10^{10}–10^{12})$ Ом). В зависимости от диапазона измерений рассматриваемые приборы называют миллиомметрами, омметрами, мегаомметрами, тераоммметрами.

Работа электронных омметров основана, как правило, на преобразовании измеряемого сопротивления в постоянное напряжение, которое подается на магнитоэлектрический измеритель со шкалой, проградуированной в единицах сопротивления.

Наибольшее распространение получили схемы омметров, приведенные на рис. 19.9; 19.10; 19.11.

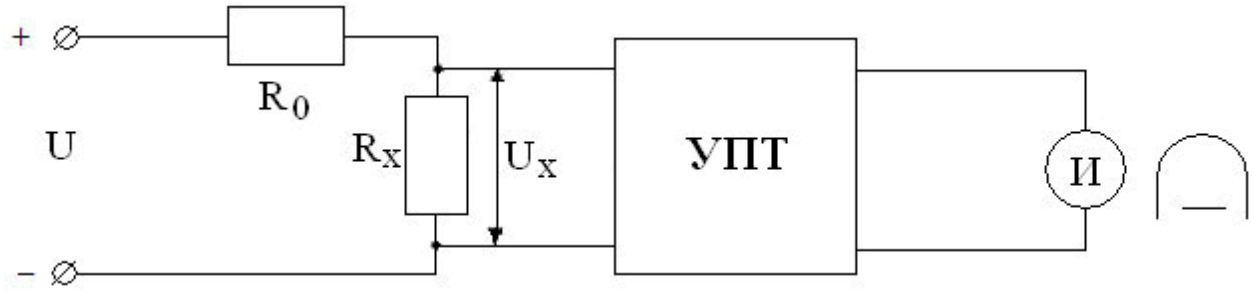


Рис. 19.9. Первый вариант омметра с усилителем постоянного тока

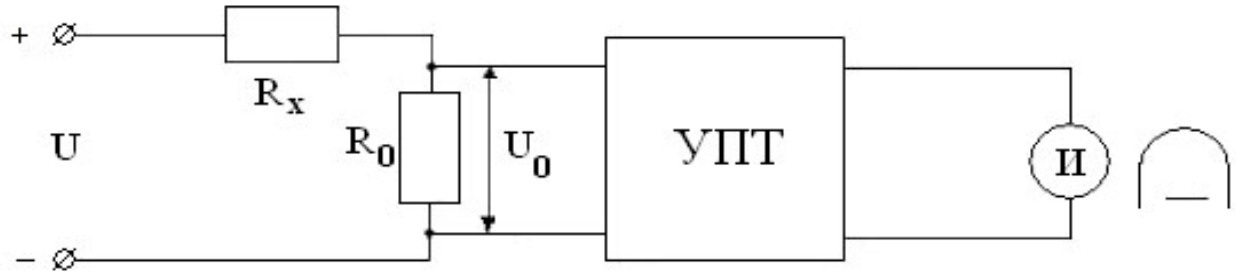


Рис. 19.10. Второй вариант омметра с усилителем постоянного тока:
U – напряжение стабильного источника питания; УПТ – усилитель постоянного тока;
R_0 – образцовое известное сопротивление; R_x – измеряемое сопротивление;
И – измеритель магнитоэлектрической системы

Для схемы, приведенной на рис. 19.9, можно записать:

$$U_x = U\frac{R_x}{R_x + R_0}. \qquad (19.26)$$

Считая, что $R_x << R_0$, получаем

$$U_x = U\frac{R_x}{R_0}, \qquad (19.27)$$

$$\alpha = k \cdot U_x = k \cdot U \cdot \frac{R_x}{R_0}, \qquad (19.28)$$

где α – показание измерителя магнитоэлектрической системы (совпадает с показаниями омметра);

k – коэффициент преобразования УПТ и измерителя.

Соотношение (19.28) свидетельствует, что показания омметра, построенного по схеме рис. 19.9, прямо пропорциональны измеряемому сопротивлению.

Для схемы, приведенной на рис. 19.10, можно записать:

$$U_0 = U \cdot \frac{R_0}{R_x + R_0}. \qquad (19.29)$$

Считая, что $R_x >> R_0$, получаем

$$U_0 = U \cdot \frac{R_0}{R_x}, \qquad (19.30)$$

$$\alpha = k \cdot U_0 = k \cdot U \cdot \frac{R_0}{R_x}. \qquad (19.31)$$

Соотношение (19.31) свидетельствует, что показания омметра, построенного по схеме рис. 19.10, обратно пропорциональны измеряемому сопротивлению.

Очевидно, что омметры по первой схеме (см. рис. 19.9) целесообразно использовать при измерении малых сопротивлений, а омметры по второй схеме (см. рис. 19.10*)* – для измерения больших сопротивлений.

В омметрах, построенных по схеме рис. 19.11, использован операционный усилитель, в цепь отрицательной обратной связи которого включен резистор R_x.

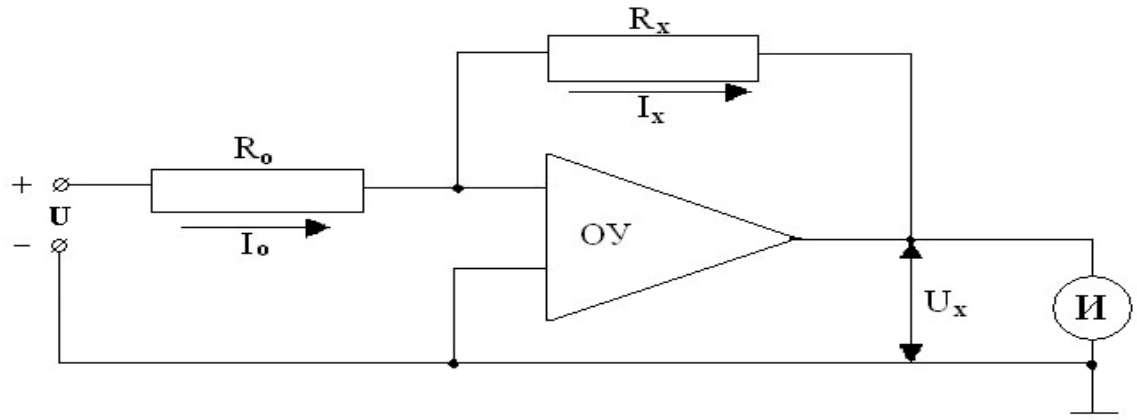


Рис. 19.11. Схема электронного омметра с операционным усилителем:
ОУ – операционный усилитель; R_x – измеряемое сопротивление; R_o – образцовое известное сопротивление; U – напряжение стабильного источника питания; И – измеритель магнитоэлектрической системы

Операционный усилитель (ОУ) имеет большой коэффициент усиления K, большое входное сопротивление и очень малые входные токи, которыми можно пренебречь. Тогда потенциал точки *«а»* близок к нулю и падение напряжения на R_x можно принять равным напряжению на измерителе (см. рис. 19.11). Следовательно, токи I_0 и I_x равны и справедливы соотношения

$$I_0 = I_x = \frac{U_0}{R_0} = \frac{U_x}{R_x}, \tag{19.32}$$

$$U_0 = U, \tag{19.33}$$

$$U_x = U \cdot \frac{R_x}{R_0}, \tag{19.34}$$

$$\alpha = S_U \cdot U \cdot \frac{R_x}{R_0}, \tag{19.35}$$

где α – показание измерителя магнитоэлектрической системы, являющееся одновременно показанием рассматриваемого омметра;

S_U – чувствительность измерителя И по напряжению.

Таким образом, согласно (19.35), показания электронного омметра, построенного по схеме рис. 19.11, прямо пропорциональны измеряемому сопротивлению.

Рассмотренные схемы нашли применение в приборах, выпускаемых серийно. Омметры типов Е6-12; Е6-15 имеют структуру, близкую к схемам рис. 19.9 и 19.10. Омметры типов Е6-10; Е6-13 построены по схеме, приведенной на рис. 19.11.

Сведения по электронным омметрам приведены в литературных источниках [1; 67; 73; 101; 108; 109].

Мостовые методы измерения сопротивлений, широко используемые на практике, в настоящем учебном пособии не рассматриваются. Сведения по этим методам измерений приведены во многих других учебных пособиях (см., например, [1; 2]).

20. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

20.1. Общие положения

Работа большинства цифровых измерительных приборов основана на преобразовании непрерывной (аналоговой) измеряемой величины в дискретную (цифровую). Исключение составляют некоторые приборы, предназначенные для измерения дискретных величин (счетчики ядерных частиц, счетчики числа импульсов и т. д.). Процесс цифрового кодирования непрерывной величины является совокупностью квантования (дискретизации) этой величины по уровню и по времени.

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) происходит автоматическое преобразование входной измеряемой величины в цифровой код. Автоматизм преобразования измеряемой величины в цифровой код является определяющим признаком ЦИП. На этом основании приборы, в которых результат измерения хотя и выводится на цифровое отсчетное устройство, но образуется за счет ручных операций, к цифровым не относятся. Так, компенсаторы напряжения постоянного тока и мосты с декадными магазинами сопротивлений, в которых уравновешивание выполняется вручную, цифровыми приборами считать не принято.

ЦИП включают в себя два обязательных функциональных узла: аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифровые отсчетные устройства (ЦОУ). Кроме АЦП и ЦОУ, цифровые приборы могут содержать цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). АЦП и ЦАП применяют не только как узлы ЦИП, но и как автономные устройства.

В результате квантования измеряемой величины по уровню возникает погрешность дискретности, обусловленная тем, что бесконечное множество значений измеряемой величины отражается лишь ограниченным количеством показаний ЦИП.

Погрешность дискретности присуща ЦИП и отсутствует у аналоговых приборов. Однако эта погрешность не является препятствием для увеличения

точности приборов, так как соответствующим выбором числа уровней квантования погрешность дискретности можно сделать сколь угодно малой. Практика показывает, что ЦИП, как правило, имеют значительно меньшие погрешности, чем аналоговые приборы, предназначенные для измерения тех же самых физических величин.

Дискретизация непрерывной величины $x(t)$ по времени проводится в целях преобразования $x(t)$ в дискретную (прерывную) во времени величину, которая совпадает с соответствующими значениями $x(t)$ только в определенные моменты времени. Промежуток времени между двумя соседними моментами времени дискретизации называется шагом дискретизации, который может быть постоянным или переменным.

Дискретизация по времени (так же, как и квантование по уровню) непрерывной измеряемой величины является принципиальным источником погрешности ЦИП. Однако выбором соответствующего шага дискретизации (как и уровня квантования) рассматриваемая погрешность может быть сведена к минимуму.

В конструктивном отношении ЦИП можно разделить на электромеханические и электронные. В первых используются контактные элементы (шаговые двигатели, реле), во вторых – бесконтактные элементы (электронные или полупроводниковые). Развитие ЦИП идет по пути замены контактных устройств бесконтактными.

В зависимости от преобразования измеряемой величины в код различают ЦИП последовательного преобразования, ЦИП пространственного преобразования, ЦИП поразрядного уравновешивания (кодоимпульсные) и др.

По роду измеряемой величины ЦИП подразделяют на вольтметры, частотомеры, омметры, фазометры и т. д. Часто ЦИП являются универсальными, что позволяет одним прибором измерять разные электрические величины. Например, универсальный цифровой прибор может быть предназначен для измерения постоянных и переменных напряжений, постоянных и переменных токов, электрических сопротивлений и т. д.

Дополнительные сведения по ЦИП приведены в литературных источниках [1; 2; 5; 35].

20.2. Электромеханические цифровые приборы

Электромеханические («контактные») цифровые приборы имеют в своем составе шаговые двигатели, реле, переключатели и т. д. В силу того, что они имеют большое время измерения и небольшой срок службы, они не нашли широкого применения. К достоинствам этих приборов следует отнести их малую погрешность. В качестве примера ниже рассматривается электромеханический цифровой вольтметр, предназначенный для измерения постоянных напряжений (рис. 20.1).

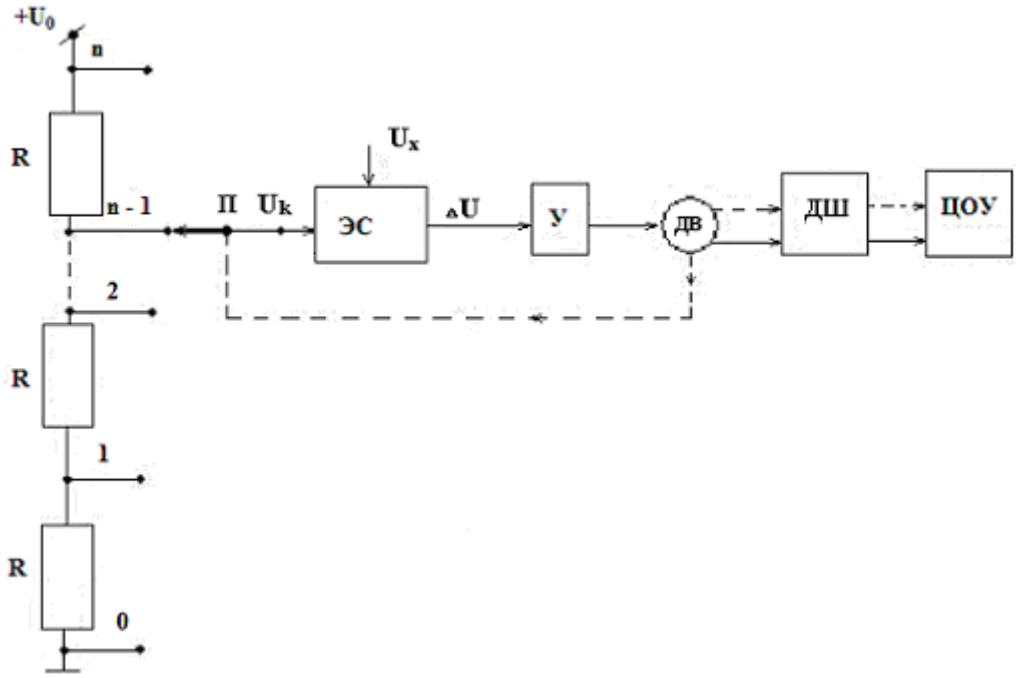


Рис. 20.1. Упрощенная схема электромеханического цифрового вольтметра:

U_x – измеряемое напряжение;
U_o – опорное напряжение;
ЭС – элемент сравнения;
У – усилитель;
ДВ – шаговый двигатель;
ДШ – дешифратор;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
П – переключатель

Сплошными линиями на рис. 20.1 показаны электрические цепи, а пунктиром – механические связи. Шаговый двигатель ДВ может быть связан с ДШ и ЦОУ электрически или механически, в зависимости от конструктивного исполнения конкретного типа прибора, что отмечено на рисунке двумя линиями (сплошной и пунктирной).

Компенсирующее напряжение U_k, подаваемое на ЭС для сравнения с измеряемым напряжением U_x, определяется соотношением

$$U_k = \frac{U_0}{n} \cdot n_i, \tag{20.1}$$

где n – число сопротивлений R (общее число ступеней делителя напряжения);
n_i – число включенных ступеней делителя напряжения.

Отметим, что U_k изменяется ступенями с дискретностью $\Delta U_k = U_0/n$. Значение ΔU_k определяет погрешность дискретности прибора. Теоретически погрешность дискретности может быть сколь угодно малой (ограничения имеют конструктивный и технический характер). Она зависит от числа сопротивлений, образующих делитель напряжения. Значение ΔU на выходе элемента сравнения напряжения равно разности напряжений U_x и U_k:

$$\Delta U = U_x - U_k. \tag{20.2}$$

Если $U_x \neq U_k$, то $\Delta U \neq 0$ подается на вход усилителя y и после усиления воздействует на шаговый двигатель ДВ, который начинает перемещать подвижный контакт переключателя П. При этом изменяется компенсирующее напряжение U_k, снимаемое с делителя. Увеличение U_k (если $U_x > U_k$) или его уменьшение (если $U_x < U_k$) происходит до тех пор, пока U_k не станет примерно равно измеряемому напряжению U_x. При этом двигатель ДВ останавливается и с ЦОУ производится отсчет показаний. Дешифратор ДШ, связанный с двигателем и управляющий цифровым отсчетным устройством ЦОУ, обычно (как и ЦОУ) – электронное устройство. В этом случае связи между ДВ, ДШ и ЦОУ электрические. Но рассматриваемые устройства могут быть и электромеханическими. Тогда связи между ними механические.

Следует отметить, что вместо шагового двигателя часто используются электромеханические реле, которые осуществляют необходимую коммутацию в измерительных цепях. Делители напряжений выполняются, как правило, декадными (например, декада целых единиц измеряемой величины, декада десятых долей, декада сотых долей и т. д.).

Быстродействие электромеханических ЦИП составляет 1–2 измерения в секунду. Типичный класс точности – 0,05. Известны электромеханические цифровые приборы и более высокого класса точности (от 0,01 до 0,005).

20.3. Электронные цифровые приборы

20.3.1. Времяимпульсные вольтметры

Времяимпульсные вольтметры относятся к приборам последовательного преобразования. Они основаны на преобразовании измеряемого напряжения во временной интервал и измерении полученного интервала путем заполнения его высокочастотными импульсами (рис. 20.2).

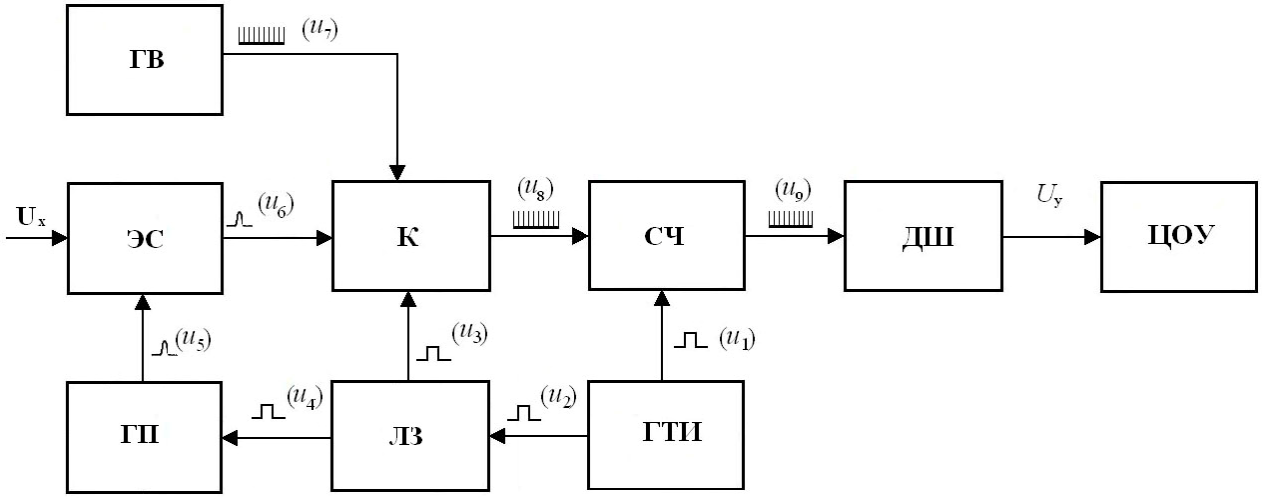


Рис. 20.2. Структурная схема времяимпульсного вольтметра:

ГТИ – генератор тактовых импульсов;
ЛЗ – линия задержки;
ДШ – дешифратор;
ЭС – элемент сравнения;
К– ключ;
СЧ – счетчик импульсов;
ГП – генератор пилообразного напряжения;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ГВ – генератор высокочастотных импульсов;
U_x – измеряемое напряжение (постоянное или медленно меняющееся);
U_y – управляющее напряжение

Работа прибора протекает в следующей последовательности. Такт работе прибора задает генератор тактовых импульсов (ГТИ), вырабатывающий с заданной периодичностью прямоугольные импульсы u_1 и u_2. Импульс u_1 поступает на счетчик импульсов (СЧ) и переводит его в исходное состояние («сбрасывает на ноль»). Импульс u_2 поступает на линию задержки (ЛЗ). С некоторой задержкой (необходимой для перевода СЧ в исходное состояние) на выходе ЛЗ

появляются импульсы u_3 и u_4. Импульс u_3 поступает на ключ (к) и открывает его. Импульс u_4 поступает на генератор пилообразного напряжения (ГП) и запускает его. С выхода ГП пилообразное напряжение u_5 поступает на элемент сравнения (ЭС). Одновременно на ЭС подается измеряемое напряжение U_x. Через открытый ключ К высокочастотные импульсы u_7 поступают на СЧ. Счет импульсов счетчиком СИ продолжается до тех пор, пока напряжения U_x и u_5 не станут равны друг другу и ЭС не выработает импульс u_6, который закроет ключ К. Число импульсов, накопленное в счетчике СЧ, преобразуется дешифратором (ДШ) в управляющее напряжение U_y, воздействующее на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), с которого и производится отсчет результата измерения.

На рис. 20.3 приведены временные диаграммы, поясняющие работу рассматриваемого прибора. Быстродействие времяимпульсных вольтметров обычно составляет 10–15 измерений в секунду. В отдельных случаях быстродействие может достигать 50–60 измерений в секунду.

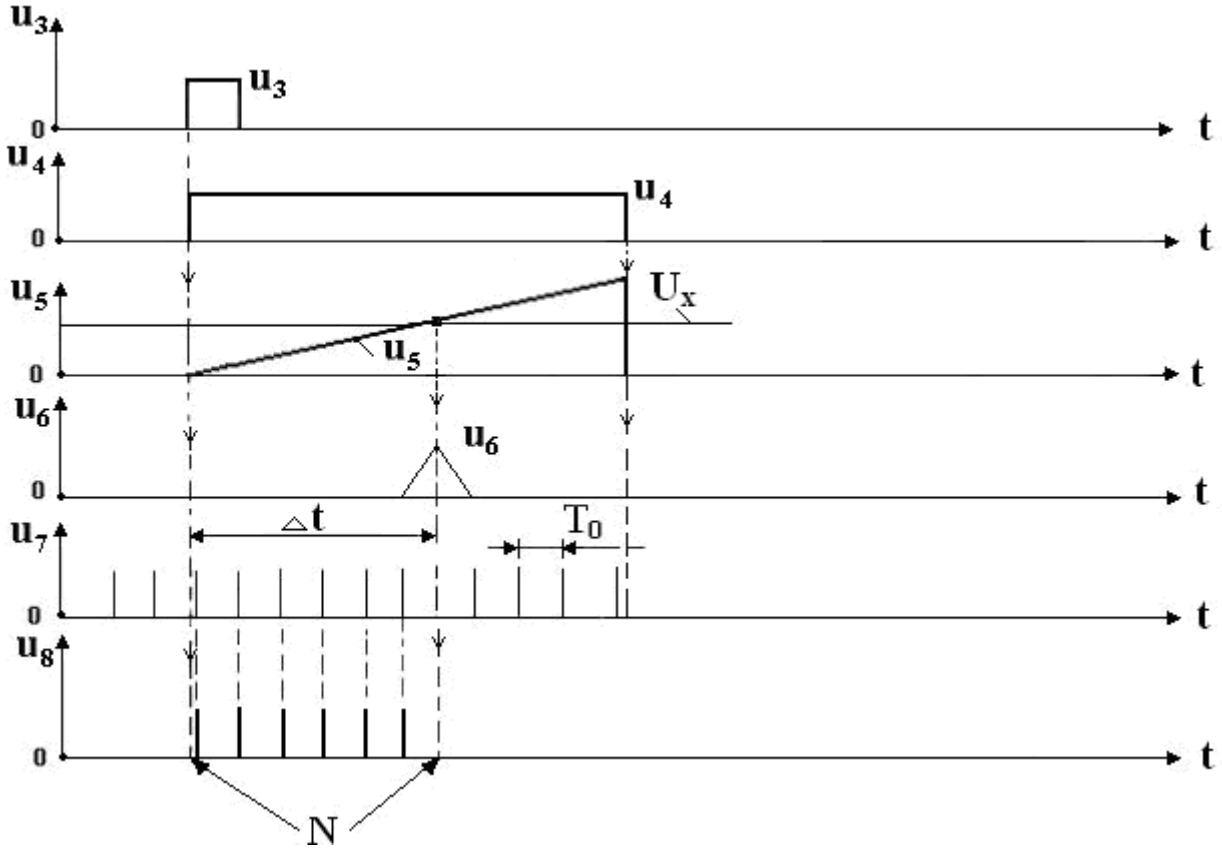


Рис. 20.3. Временные диаграммы

Отметим еще раз, что измеряемое напряжение преобразуется во временной интервал Δt, который заполняется импульсами, следующими с частотой $f_0 = 1/T_0$. Количество импульсов $N \approx \Delta t/T_0$ подсчитывается счетчиком и отображается на цифровом отсчетном устройстве прибора.

Времяимпульсные приборы имеют сравнительно большие погрешности. Это объясняется наличием погрешности дискретности из-за несовпадения появления счетных импульсов с началом и концом интервала Δt, а также за счет нелинейного коэффициента преобразования. Другим недостатком этих приборов является их низкая помехозащищенность, что требует применения специальных фильтров для подавления помех.

Промышленность выпускает ЦИП, построенные на описанном принципе. Все они имеют погрешности нисколько большие, чем цифровые приборы, построенные на других принципах. Например, погрешность универсального вольтметра типа ВК7-10А/1 при измерении постоянного напряжения составляет около 0,1–0,2 %.

20.3.2. Уравновешивающие вольтметры

В вольтметрах уравновешивающего преобразования (другое название – вольтметры сравнения) используется обратная связь, которая предполагает наличие в схеме цифро-аналогового преобразователя, преобразующего код (или число импульсов) в аналоговое напряжение. Существует несколько способов уравновешивания (сравнения) измеряемого напряжения с аналоговым напряжением обратной связи. Ниже рассмотрен уравновешивающий вольтметр с реверсивным счетчиком (рис. 20.4).

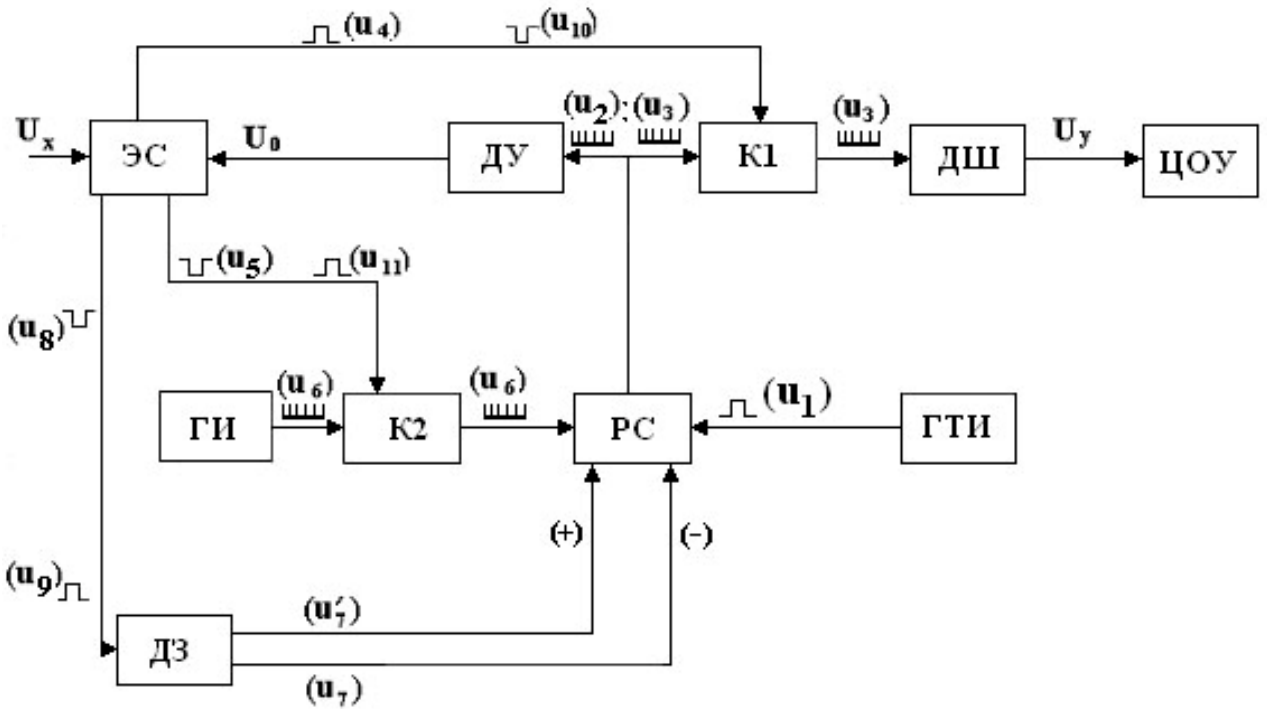


Рис. 20.4. Структурная схема уравновешивающего вольтметра с реверсивным счетчиком:

ЭС – элемент сравнения;
ДУ – декодирующее устройство;
К1, К2 – ключи;
ДШ – дешифратор;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ГИ – генератор высокочастотных импульсов;
РС – реверсивный счетчик;
ГТИ – генератор тактовых импульсов;
ДЗ – дискриминатор знака;
U_x – измеряемое напряжение;
U_0 – компенсирующее напряжение;
U_y – управляющее напряжение

Работа вольтметра протекает в следующей последовательности. Генератор тактовых импульсов ГТИ выдает тактовый импульс u_1, который воздействует на реверсивный счетчик РС и тем самым запускает всю схему. РС выдает серию из импульсов на декодирующее устройство ДУ (u_2) и на ключ $K1$ ($u_3 = u_2$), сохранившихся в РС от предыдущих измерений. ДУ преобразует импульсное напряжение u_2 в аналоговое напряжение U_0 ($U_0 = f(N)$). Дальнейшая работа прибора зависит от соотношения напряжений U_0 и U_x. Здесь возможны три случая: $U_0 = U_x$; $U_0 > U_x$; $U_0 < U_x$.

Первый случай ($U_0 = U_x$). Элемент сравнения ЭС вырабатывает импульсы u_4 и u_5. Импульс u_4 открывает ключ K_1, напряжение U_3 в виде серии импульсов (число импульсов – N) через K_1 поступает на дешифратор ДШ и преобразуется в управляющее напряжение U_y. Напряжение U_y воздействует на цифровое

отсчетное устройство ЦОУ, с которого и производится считывание результатов измерений в цифровой форме (например: 127,3 mV; 4,856 V и т. д.)

Второй случай ($U_0 > U_x$). В этом случае ЭС вырабатывает импульсные сигналы u_8, u_{10}, u_{11}. Импульс u_{10} закрывает ключ K_1, и доступ импульсов на ДШ прекращается. Импульс u_{11} открывает ключ K_2, и высокочастотные импульсы u_6 с генератора импульсов ГИ через K_2 начинают поступать на РС. Импульс u_8 воздействует на дискриминатор знака $Д_3$, который вырабатывает коммутационное напряжение u_7, переводящее РС в режим вычитания. Благодаря режиму вычитания вновь поступающие на РС импульсы u_6 вычитаются из того, что уже было накоплено в реверсивном счетчике. Уменьшение числа импульсов в РС приводит к уменьшению их числа на входе ДУ и соответственно к уменьшению аналогового компенсирующего напряжения U_0. Уменьшение напряжения U_0 происходит до тех пор, пока оно не станет равно измеряемому напряжению U_x. При $U_0 = U_x$ повторяется работа прибора, описанная выше (первый случай).

Третий случай ($U_0 < U_x$). В этом случае ЭС вырабатывает импульсные сигналы u_9, u_{10}, u_{11}. Импульс u_{10} закрывает ключ K_1, и доступ импульсов на ДШ прекращается. Импульс u_{11}, ключ K_2 и высокочастотные импульсы u_6 с генератора импульсов ГИ через K_2 начинают поступать на РС. Импульс u_9 воздействует на дискриминатор знака $Д_3$, который вырабатывает коммутационное напряжение u_7, переводящее РС в режим суммирования. Благодаря режиму суммирования вновь поступающие на РС импульсы u_6 суммируются с теми импульсами, которые уже были накоплены в реверсивном счетчике. Увеличение числа импульсов в РС приводит к увеличению их числа на входе ДУ и соответственно к увеличению компенсирующего напряжения U_0. Увеличение U_0 происходит до тех пор, пока оно не станет равно измеряемому напряжению U_x. При $U_x = U_0$ повторяется уже описанная работа прибора (первый случай).

Приборы сравнения имеют повышенные метрологические характеристики. Их погрешность при измерении постоянного напряжения обычно не превосходит 0,01–0,05 %. Быстродействие этих приборов может достигать 500–600 измерений в секунду.

20.3.3. Электронно-счетные частотомеры

Цифровые частотомеры предназначены для измерения среднего или мгновенного значения частоты периодического сигнала, а также для измерения абсолютного или относительного отклонения частоты от номинального значения.

Электронно-счетные частотомеры, рассматриваемые в данном пункте учебного пособия, основаны на подсчете числа импульсов частотой f_x за интервал времени T_0 (рис. 20.5).

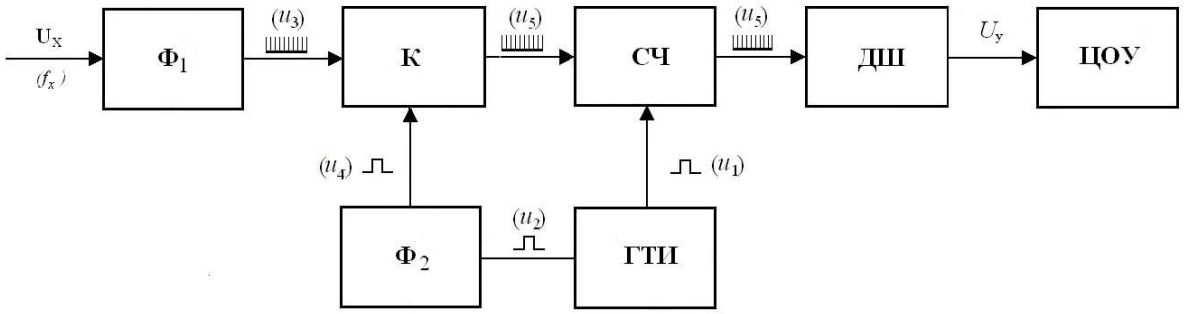


Рис. 20.5. Структурная схема электронно-счетного частотомера:

Ф1, Ф2 – формирователи;
К– ключ;
СЧ – счетчик импульсов;
ДШ – дешифратор;
ГТИ – генератор тактовых импульсов;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
f_x – измеряемая частота

На временных диаграммах показаны напряжения на входе (U_x) и на выходе отдельных элементов схемы (u_3, u_4, u_5). Эти же (и другие) напряжения показаны на структурной схеме (см. рис. 20.5).

Запуск прибора осуществляет генератор тактовых импульсов ГТИ, вырабатывающий импульсные напряжения u_1 и u_2. Импульс u_1 переводит счетчик СЧ в исходное состояние (срабатывает на «ноль»). Импульс u_2 воздействует на формирователь Ф2, который вырабатывает нормированный импульс u_4 с длительностью T_0 (рис. 20.5 и 20.6). Импульс u_4 подается на ключ *К* и открывает его на время T_0.

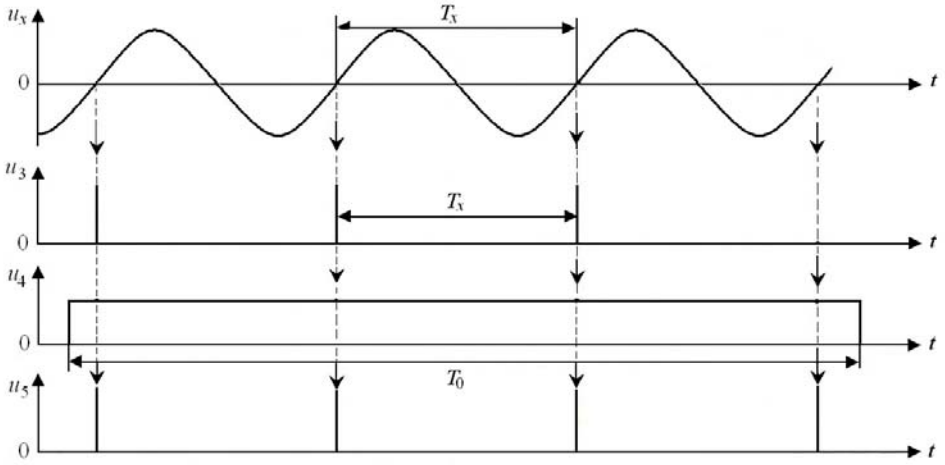


Рис. 20.6. Временные диаграммы работы электронно-счетного устройства

Периодическое напряжение U_x (его частота f_x измеряется) подается на формирователь $Ф_1$, который формирует импульсное напряжение u_3, подаваемое на ключ К. Отметим, что $Ф_1$ вырабатывает один импульс в начале каждого периода входного напряжения. Импульсы u_3 «проходят» через ключ К, пока действует импульс u_4. На счетчик импульсов СЧ подается серия импульсов u_5, число которых N зависит от длительности импульса u_4 (T_0) и периода входного напряжения (T_x):

$$N = \frac{T_0}{T_x} = T_0 f_x , \tag{20.3}$$

где $f_x = \dfrac{1}{T_x}$ – частота входного напряжения.

Напряжение u_5, содержащее N импульсов сосчитанных СЧ, подается на дешифратор ДШ. Последний преобразует его в управляющее напряжение U_y, воздействующее на цифровое отсчетное устройство ЦОУ. ЦОУ индицирует результат измерения в цифровой форме.

Если длительность интервала $T_0 = 1$ с, то число N дает непосредственное значение измеряемой частоты. В практических схемах частотомеров также предусматривается возможность задания других значений T_0 из ряда $T_0 = 10^m$ с, где m – целое положительное или отрицательное число. Это дает возможность измерять кратные или дольные значения f_x.

Погрешность прибора складывается из погрешности задания T_0 и погрешности дискретности. Благодаря использованию кварцевой стабилизации погрешность задания T_0 не превосходит 10^{-7} % (этой погрешностью обычно пренебрегают). Погрешность дискретности, возникающая в процессе квантования временного интервала, как правило, существенна, и ее необходимо учитывать.

$$\delta_g = \pm \frac{1}{T_0 \cdot f_x} \cdot 100\%, \qquad (20.4)$$

где δ_g – относительная погрешность дискретности;

T_0, f_x – определены выше.

Очевидно, что с увеличением временного интервала T_0 и значения измеряемой частоты f_x погрешность дискретности уменьшается. Например, при $T_0 = 1$ с и $f_x = 500$ Гц $д_g = \pm 0{,}2$ %; при $T_0 = 1$ с и $f_x = 5000$ Гц $д_g = \pm 0{,}02$ %; при $T_0 = 10$ с и $f_x = 5000$ Гц $д_g = \pm 0{,}002$ %.

При измерении низких частот погрешность дискретности становится определяющей и ограничивает точность измерений. Для снижения $д_g$ можно задавать большие T_0, однако это заметно увеличивает время измерения. Например, при измерении частоты промышленной сети ($f_x = 50$ Гц) для снижения $д_g$ до 0,02 % необходимо задать $T_0 = 100$ с. Для низкочастотных сигналов более рациональным оказывается измерение периода исследуемого напряжения.

20.3.4. Измерители временных интервалов

В измерителях временных интервалов (хронометрах) временной интервал (в том числе и период исследуемого напряжения) может быть измерен путем подсчета числа импульсов стабильной частоты $f_0 \left(f_0 = \frac{1}{T_0} \right)$, прошедших за измеряемое время T_x. В качестве примера ниже рассмотрен измеритель периодов (рис. 20.7).

При измерении временных интервалов вместо периодического напряжения u_x на формирователь Ф подаются импульсные напряжения $u_н$ (старт-импульс) и $u_к$ (стоп-импульс). Старт-импульс запускает формирователь, а стоп-импульс его останавливает. В результате вырабатывается импульс T_x, длитель-

ность которого равна длительности измеряемого временного интервала. Отметим, что $u_н$ и $u_к$ показаны на рис. 20.7 пунктиром, при измерении периода напряжения $u_х$ они не используются (вместо них на Ф подается $u_х$).

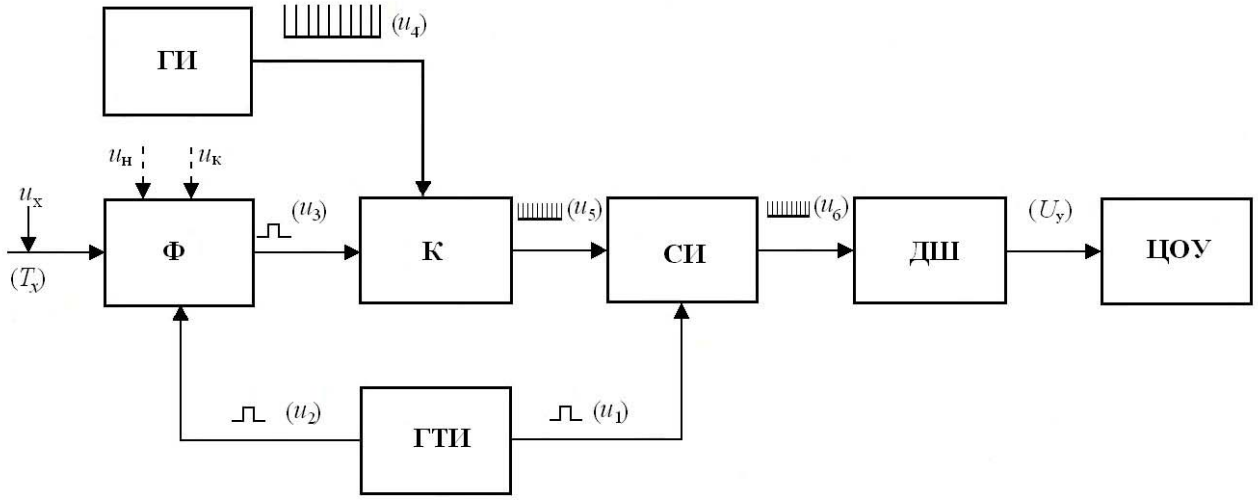


Рис. 20.7. Структурная схема измерителя периодов:

ГИ – стабильный генератор высокоточных импульсов;
Ф – формирователь;
К – ключ;
СЧ – счетчик импульсов;
ДШ – дешифратор;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ГТИ – генератор тактовых импульсов;
$u_х$ – напряжение с периодом $T_х$

Рассмотрим работу измерителя периодов более детально. Запуск прибора осуществляет ГТИ, вырабатывающий импульсные напряжения u_1 и u_2. Импульс u_1 «сбрасывает» СЧ на ноль, а импульс u_2 воздействует на формирователь Ф, который вырабатывает импульс u_3. Длительность импульса u_3 равна $T_х$ и соответствует периоду исследуемого напряжения (рис. 20.8). Импульс u_3 подается на ключ К и открывает его на время $T_х$. Одновременно на К подается высокочастотное импульсное напряжение u_4 со стабильной частотой $f_0 = \frac{1}{T_0}$. Напряжение u_5 с выхода ключа подается на СЧ. Число импульсов N, содержащееся в u_5 и сосчитанное СЧ, зависит от $T_х$ и $T_0 = \frac{1}{f_0}$.

$$N = \frac{T_x}{T_0} = T_x \cdot f_0 . \qquad (20.5)$$

Напряжение u_6 со счетчика импульсов подается на ДШ и преобразуется в управляющее напряжение U_y, которое воздействует на цифровое отсчетное устройство ЦОУ. ЦОУ индицирует результат измерения в цифровой форме.

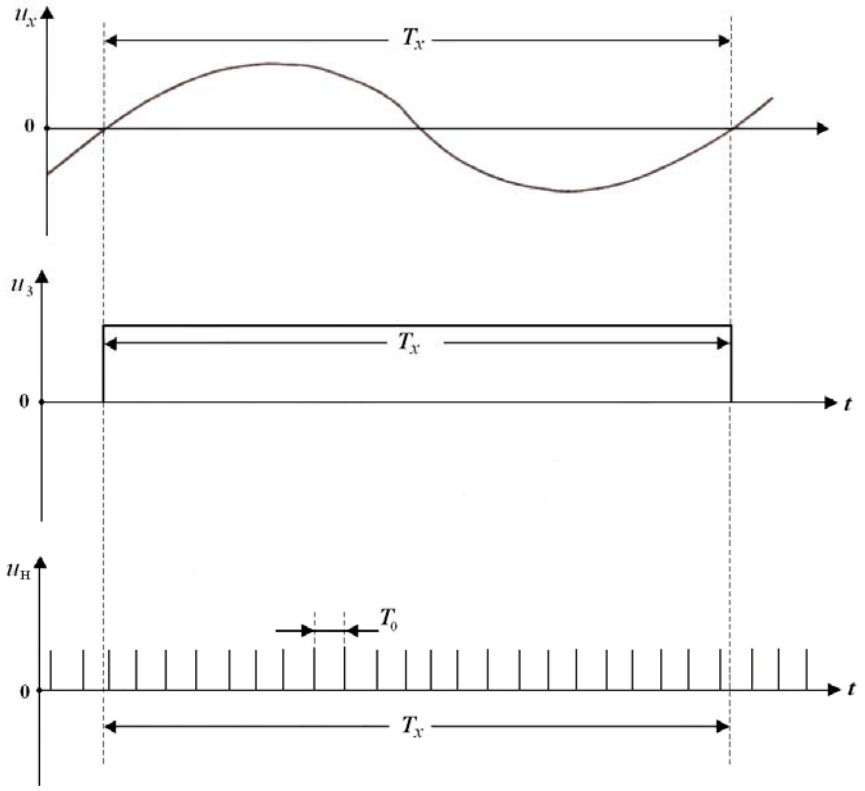


Рис. 20.8. Временные диаграммы работы измерителя периодов

Значение частоты f_0 целесообразно выбрать из ряда возможных значений, определяемых равенством $f_0 = 10^m$ Гц, где m – положительное целое число. Тогда число импульсов N совпадает со значением T_x, выраженным в секундах или дольных единицах секунды.

Погрешности цифрового периодомера определяются нестабильностью частоты f_0 генератора ГИ и дискретностью квантования T_x. Погрешность за счет нестабильности f_0 мала (обычно не более 10^{-7} %), и ею, как правило, пренебрегают. Погрешность дискретности $д_g$ чаще всего существенна, и ее необходимо учитывать.

$$\delta_g = \pm \frac{1}{T_x \cdot f_0} \cdot 100\% = \pm \frac{T_0}{T_k} \cdot 100\%, \qquad (20.6)$$

где δ_g – относительная погрешность дискретности;

T_0, T_x, f_0 – определены выше.

Очевидно, что с уменьшением $T_0 = \frac{1}{f_0}$ и увеличением T_x погрешность дискретности уменьшается. Например, при f_0 = 10 кГц и T_x = 0,1 с δ_g =±0,1 %; при f_0 = 100 кГц и T_x = 0,1 с $д_g$ = ±0,01 %; при f_0 = 100 кГц и T_x = 1 с δ_g = ±0,001 %.

Измерители периода иногда используются для измерения низких частот. Недостатком такого измерения является необходимость пересчета показаний периодомера в частоту (по формуле $f_x = \frac{1}{T_x}$).

В цифровых частотомерах и периодомерах используются одни и те же функциональные узлы, что позволяет выпускать универсальные приборы, предназначенные для измерения частоты, периода, интервалов времени, отношения двух частот и числа импульсов.

20.3.5. Измерители разности фаз

В измерителях разности фаз (цифровых фазометрах) используется преобразование фазового сдвига в соответствующий интервал времени, а также измерение этого интервала цифровым методом. Цифровые фазометры могут предназначаться для измерения мгновенных значений сдвига фаз и для измерения среднего значения сдвига фаз. Ниже рассмотрены цифровой фазометр мгновенных значений (рис. 20.9) и диаграммы напряжений этого фазометра (рис. 20.10)

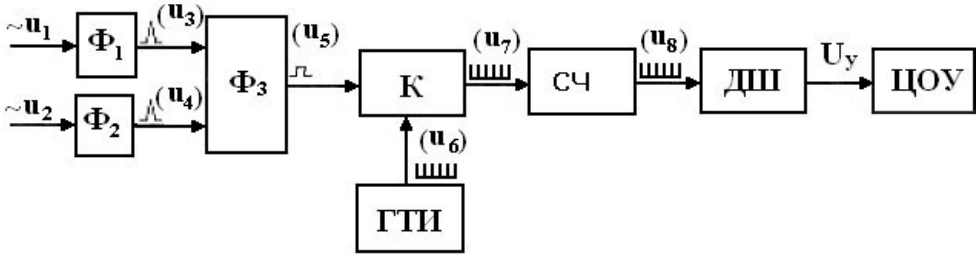


Рис. 20.9. Упрощенная структурная схема цифрового измерителя разности фаз:

$Ф_1$, $Ф_2$, $Ф_3$ – формирователи;
К– ключ;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ДШ – дешифратор;
СЧ – счетчик импульсов;
u_1 и u_2 – периодические входные напряжения, между которыми измеряется сдвиг по фазе;
ГТИ – генератор стабильных высокочастотных импульсов

Напряжения u_1 и u_2 поступают на формирователи Φ_1 и Φ_2, которые вырабатывают импульсы u_3 и u_4, соответствующие моментам перехода входных сигналов через ноль (импульсы u_3 и u_4 вырабатываются один раз за период напряжений u_1 и u_2, см. рис. 20.9 и 20.10). Импульсы u_3 и u_4 воздействуют на формирователь Φ_3 (первый как старт-импульс, а второй как стоп-импульс), на выходе которого образуется импульс u_5 с длительностью T_x, соответствующей измеряемому фазовому сдвигу α. Импульс u_5 открывает ключ К на интервал времени T_x, и в течение этого времени через К на счетчик импульсов СИ с генератора ГТИ поступают импульсы. Частота поступающих импульсов $f_0 = \frac{1}{T_0}$. Число импульсов N, сосчитанное СЧ, определяется соотношением (рис. 20.10)

$$N = \frac{T_x}{T_0}. \tag{20.7}$$

Измеряемый фазовый сдвиг φ

$$\varphi = K \cdot N \tag{20.8}$$

где K – коэффициент пропорциональности.

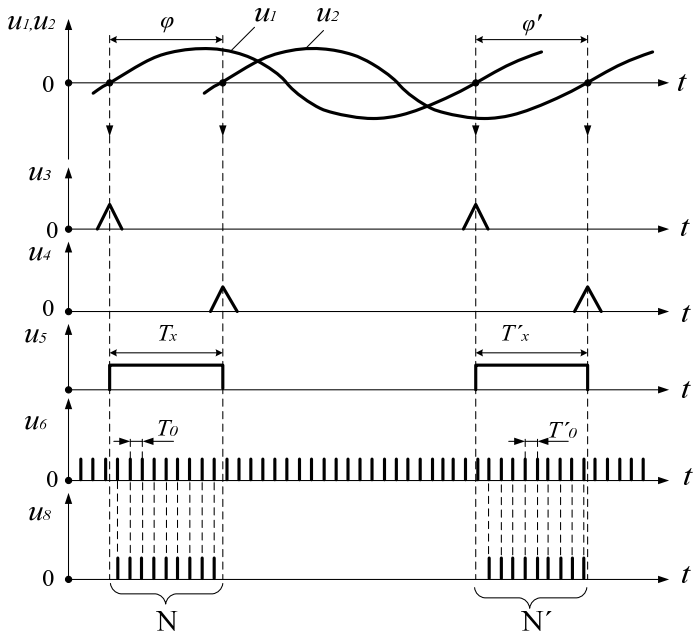


Рис. 20.10. Временные диаграммы измерителя разности фаз

Напряжение u_8 с выхода счетчика СЧ, содержащее N импульсов, подается на дешифратор ДШ, преобразуется в управляющее напряжение U_y и индицируется на ЦОУ в цифровой форме.

Составляющие погрешности прибора: погрешность квантования интервала T_x импульсами с частотой $f_0 = \frac{1}{T_0}$; погрешность задания частоты $f_0 = \frac{1}{T_0}$; погрешность от неточности формулирования и передачи напряжений u_3, u_4 и временного интервала T_x. Суммарная погрешность цифровых фазометров обычно не превосходит $\pm 0{,}3^0$ в широком частотном диапазоне.

20.4. Мультиметры

Термин «мультиметр» обычно используется для наименования универсальных цифровых измерительных приборов (ЦИП). Также приборы обычно имеют в своем составе встроенные микропроцессоры. Вместе с тем, терминология в области ЦИП еще окончательно не установилась, и аналогичные некоторые отечественные приборы с микропроцессорами или без них называют универсальными вольтметрами (например, прибор В7-34, имеющий в своем составе микропроцессор, официально именуется «Вольтметр универсальный цифровой»). Соответствующие импортные приборы всегда назывались мультиметрами, и этот термин постепенно приобретает признание как в отечественной литературе, так и в практической деятельности. Он используется и в настоящем учебном пособии.

Цифровые мультиметры применяются для измерения постоянных и переменных токов, постоянных и переменных напряжений, сопротивлений резисторов, частоты электрических колебаний и т .д.

На микропроцессоры в ЦИП возлагаются следующие функции:

1) управление процессом аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования;

2) управление работой преобразователей различных физических величин в электрические (для последующего их измерения);

3) автоматический выбор пределов измерения;

4) управление приборным интерфейсом;

5) управление цифровыми отсчетными устройствами;

6) статистическая обработка результатов измерений;

7) автоматическая коррекция систематических погрешностей и автокалибровка;

8) диагностика неисправностей.

Наличие в составе мультиметров микропроцессоров повышает надежность ЦИП, значительно улучшает их метрологические и эксплуатационные характеристики. Вместе с тем наметившаяся тенденция в развитии цифровой измерительной техники приводит к резкому повышению стоимости цифровых приборов (стоимость цифровых приборов, как правило, в 2–3 раза выше стоимости компьютеров). Высокая цена затрудняет широкое применение ЦИП, альтернативой которым может быть расширение использования аналоговых измерительных приборов (электромеханических и электронных), а также применение измерительно-компьютерных систем.

21. ИЗМЕРИТЕЛЬНО-КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время сформировалось новое направление в измерительной технике – измерительно-компьютерные системы (ИКС).

ИКС представляет собой имеющий соответствующее программное обеспечение персональный компьютер, в состав которого введена специальная измерительная плата.

ИКС заменяет стандартные измерительные приборы (вольтметры, осциллографы, генераторы и т. д.) системой виртуальных средств измерений (или виртуальных приборов). Причем на одном компьютере может быть одновременно или поочередно воспроизведен целый ряд стандартных измерительных приборов.

К преимуществам измерительно-компьютерных систем следует отнести:

1) наличие стандартных программ, что позволяет решать широкий круг прикладных задач (сбор и обработку данных, исследование полученных результатов, выработку управляющих сигналов и т. д.);

2) наличие внутренней и внешней памяти компьютеров, позволяющей накапливать и хранить большой объем измерительной информации;

3) наличие компьютерных сетей (локальных и глобальных), позволяющих оперативно передавать результаты измерений и исследований;

4) наличие возможности составлять компьютерные программы для решения конкретных измерительных задач;

5) наличие в составе компьютеров аналоговых (графопостроители) и цифровых (принтеры) регистрирующих устройств, позволяющих оперативно документировать результаты измерений;

6) меньшая стоимость измерений (по сравнению со стоимостью измерений с помощью отдельных цифровых измерительных приборов).

На рис. 21.1 приведена упрощенная структурная схема ИКС.

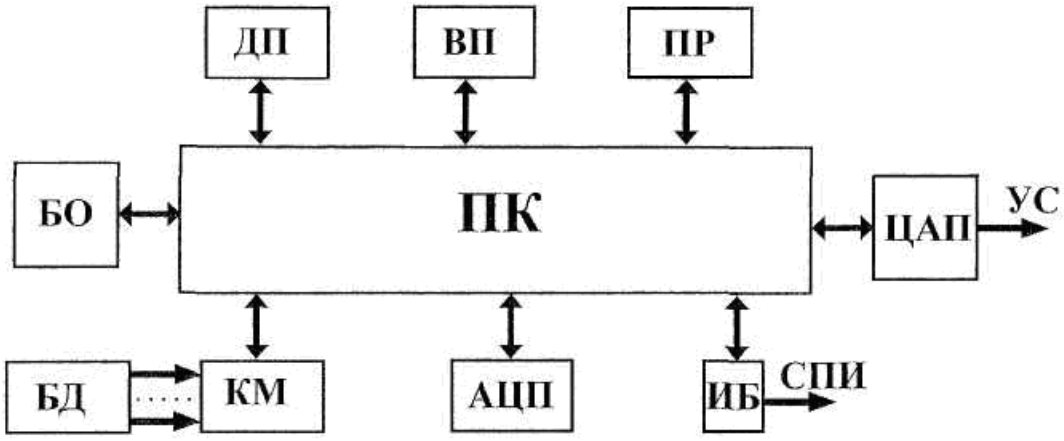


Рис. 21.1 Упрощенная структурная схема измерительно-компьютерной системы:

ПК – персональный компьютер;
ДП – дисплей;
ВП – внутренняя память;
ПР – принтер;
БО – блок образцовых мер;
БД – блок датчиков;
КМ – коммутатор;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
ИБ – интерфейсный блок;
СПИ – сигнал приборного интерфейса;
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь;
УС – управляющий сигнал

Основу ИКС составляет персональный компьютер ПК, через который взаимодействуют друг с другом все элементы системы: дисплей, внешняя память, принтер, коммутатор, АЦП, блок образцовых программно-управляемых

мер (меры напряжения, сопротивления, частоты и т. д.). ЦАП позволяет вырабатывать (если требуется для решения поставленной задачи) аналоговые управляющие сигналы. Интерфейсный блок (ИБ) осуществляет подключение к магистрали приборного интерфейса. Коммутатор (КМ) обеспечивает подключение аналоговых сигналов (обычно в виде напряжений) от блока датчиков (БД). С помощью БД осуществляется преобразование (при необходимости) и подача на ИКС измеряемых величин. ИКС могут быть специализированными и универсальными. Специализированные ИКС предназначены для измерения какой-либо одной физической величины (например, только постоянного напряжения или только температуры). Универсальные ИКС – для измерения нескольких физических величин (например, постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, частоты, температуры, давления и т.д.).

Одним из элементов ИКС является блок образцовых мер (БО). В качестве образцовых мер чаще всего используются образцовые меры (ОМ) напряжения и частоты. Обычно образцовыми мерами напряжения являются термостатированные стабилитроны, а в качестве образцовых мер частоты применяются кварцевые генераторы. В последнее время в ИКС стала использоваться возможность компенсировать температурную нестабильность ОМ программными методами. Предусматривается также возможность компенсации влияния температуры на параметры различных элементов ИКС, например на такие, как усилители постоянного тока, переключатели и т. п. Непрерывный контроль температуры отдельных элементов и блоков ИКС (с помощью специальных температурных датчиков и программных средств) позволяет автоматически корректировать возникающие погрешности измерений.

Измерительно-компьютерные системы являются своеобразными виртуальными приборами. Программная часть такого виртуального прибора создает на экране дисплея компьютера виртуальную панель управления обычного (реального) измерительного прибора. Такая панель с виртуальными кнопками, ручками, переключателями становится панелью управления виртуального прибора. С помощью клавиатуры, мыши или специализированной прикладной про-

граммы оператор воздействует на панель управления, выбирая измеряемую величину, режим работы виртуального прибора и выполняя другие необходимые операции для проведения измерения. Результат измерения выводится на дисплей компьютера и, если требуется, на принтер или графопостроитель. В зависимости от используемой измерительной платы и программного обеспечения пользователь получает виртуальный прибор под ту или иную задачу. При этом может быть реализован виртуальный осциллограф, виртуальный вольтметр, виртуальный термометр и т. д. Соответственно на дисплей компьютера выводится осциллограмма исследуемых сигналов (если реализован осциллограф), значение напряжения (если реализован вольтметр) или значение температуры (если реализован термометр) в цифровой форме.

Отметим еще раз преимущество виртуальных приборов перед микропроцессорными цифровыми приборами. Виртуальные приборы дают пользователю доступ к обширным объемам прикладных программ, к внешней памяти большой емкости и к различным устройствам документирования результатов измерений. Виртуальные приборы имеют высокую экономическую эффективность: практически любая измерительная плата и компьютерная программа по обработке информации намного дешевле стандартного цифрового измерительного прибора со встроенным микропроцессором.

Сочетание измерительной платы, специализированной программы и персонального компьютера представляет пользователю новые возможности, недостижимые автономными измерительными приборами [1; 2; 33; 34; 36–38].

22. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

22.1. Общие положения

Измерение силы электрического тока (в дальнейшем – измерение тока) является одной из наиболее распространенных операций в области электрических измерений. Измерение токов может проводиться аналоговыми электромеханическими приборами различных систем, аналоговыми электронными приборами, цифровыми измерительными приборами (ЦИП) [1; 2; 6]. Кроме того,

для измерения тока могут быть использованы виртуальные приборы (ВП), появившиеся в последнее время и реализуемые с помощью компьютеров (см. гл. 21 в настоящем учебном пособии и соответствующие разделы в учебниках [2; 6]).

Выбор средства измерения (для измерений тока) определяется совокупностью факторов: значением измеряемой величины, родом тока, требуемой точностью, условиями измерений и т. д. Приборы для измерения тока принято называть *амперметрами*. Если требуется подчеркнуть значение измеряемого тока, то это отражается в названии прибора. Так, например, приборы для измерения больших токов именуются *килоамперметрами*, малых токов – *миллиамперметрами* или *микроамперметрами* и т. д.

Измерение тока может осуществляться прямыми, косвенными или компенсационными методами. Каждый из перечисленных методов измерений обладает определенной методической погрешностью (см. параграф 2.4 в данном учебном пособии).

Диапазон измеряемых токов весьма широк. Например, при биологических исследованиях измеряемые токи могут составлять доли наноампер, а на металлургических предприятиях измеряемые токи могут достигать многих тысяч ампер. Для расширения пределов измерения приборов применяют шунты и измерительные трансформаторы, которые рассматриваются в последующих паранрафах учебного пособия. Использование шунтов и трансформаторов позволяет строить многопредельные приборы, которые позволяют измерять токи в широком диапазоне.

Косвенным показателем большей или меньшей пригодности используемого амперметра для измерения тока в исследуемой цепи является значение мощности, потребляемое этим амперметром:

$$P_A = I_A^2 R_A, \qquad (22.1)$$

где P_A – мощность, потребляемая амперметрами из измерительной цепи;

I_A – измеряемый ток;

R_A – сопротивление амперметра.

Погрешность от искажения режима работы исследуемой цепи тем меньше, чем меньше мощность P_A, определяемая соотношением (22.1).

22.2. Измерение постоянного тока

Для измерения постоянного тока используются аналоговые электромеханические приборы (магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические), аналоговые электронные и цифровые измерительные приборы.

Из электромеханических приборов наибольшее распространение для измерения постоянных токов получили приборы магнитоэлектрической системы. При непосредственном включении этих приборов их можно нагружать токами только до 40–50 мА. При больших токах повреждаются токопроводы к обмотке рамки магнитоэлектрического измерителя или выходит из строя сама обмотка рамки, выполняемая, как правило, тонким проводом.

Для измерения токов, больших 40–50 мА, магнитоэлектрические измерительные механизмы используются совместно с шунтами, которые включаются параллельно измерительному механизму (рис. 22.1). Электромеханические приборы других систем с шунтами не используются.

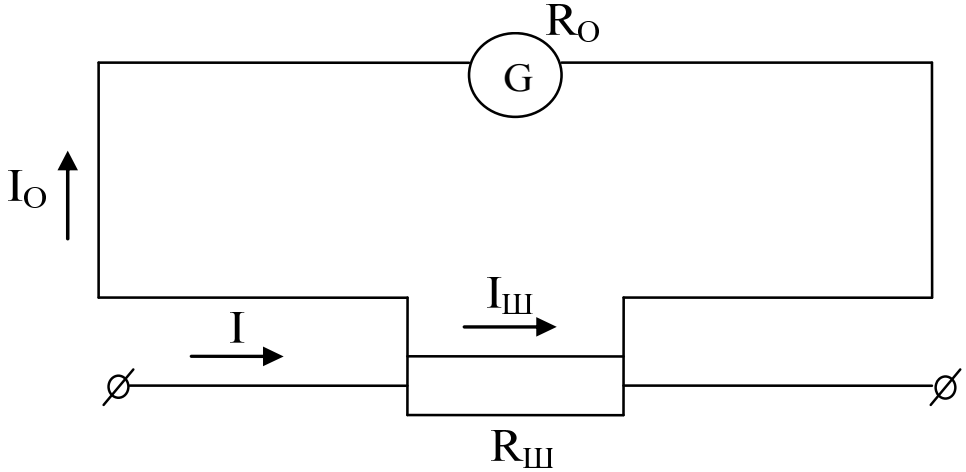


Рис. 22.1. Схема включения шунта:
$R_Ш$ – сопротивление шунта; G – магнитоэлектрический измерительный механизм;
R_0 – сопротивление измерительного механизма G; I – измеряемый ток;
$I_Ш$ – ток через шунт; I_0 – ток через измерительный механизм G

Сопротивление шунта $R_Ш$ выбирают таким, чтобы большая часть измеряемого тока I протекала по шунту, а остальная часть тока не превышала бы допустимого для измерителя значения.

Отношение токов I / I_0 обозначают n и называют *коэффициентом шунтирования*. Значение измеряемого тока $I = n \bullet I_0$, где n – целое число (n = 2; 5; 10 и т. д.). Шунты обычно изготавливают из манганина – сплава с малым температурным коэффициентом сопротивления. Типичная конструкция шунта приведена на рис. 22.2.

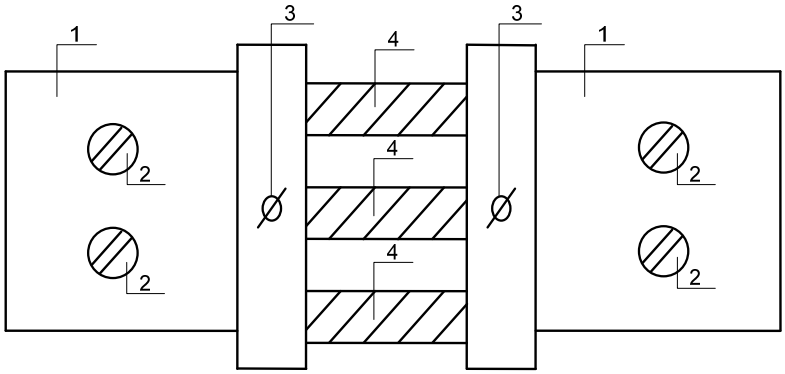


Рис. 22.2. Типичная конструкция шунта:
1 – массивные медные пластины; 2 – токовые зажимы;
3 – потенциальные зажимы; 4 – манганиновые пластины

С помощью зажимов 2 шунт включается в исследуемую цепь, а к зажимам 3 подключается магнитоэлектрический измерительный механизм.

Сопротивление шунта определяется из следующих равенств (см. рис. 22.1):

$$I_{Ш} R_{Ш} = I_0 R_0, \tag{22.2}$$

$$I = nI_0, \tag{22.3}$$

$$I_{Ш} = I – I_0 = nI_0 – I_0, \tag{22.4}$$

где n – коэффициент шунтирования.

Подставляя в (22.2) значение тока $I_{Ш}$, определяемое соотношением (22.4), получим

$$I_0(n–1)R_{Ш} = I_0 R_0, \tag{22.5}$$

откуда сопротивление шунта

$$R_{Ш} = \frac{R_0}{n-1},$$

где R_0, n – определены выше.

Шунты для измерения сравнительно небольших токов (до 30 А) монтируются в корпусе прибора и называются *внутренними*. Токи от 30 до 7500 А

измеряют с помощью наружных шунтов. Шунты могут быть однопредельными и многопредельными.

Шунты делятся на *индивидуальные*, пригодные только для того измерительного механизма, с которым проградуированы, и *калиброванные*, рассчитанные на определенные номинальные токи и определенные номинальные падения напряжения. Калиброванные шунты изготавливают обычно на номинальные напряжения 75 и 100 мВ, но могут быть шунты на другие номинальные напряжения (например, на 30, 45, 60, 150 или 300 мВ). Сопротивление шунта можно определить по закону Ома делением номинального напряжения на номинальный ток. В зависимости от точности изготовления шунты делятся на классы 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. При подключении шунта температурная погрешность измерения тока возрастает. Для ее уменьшения используются разные способы температурной компенсации. Например, может использоваться включение в цепь измерителя терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

В прил. 9 приведены технические характеристики некоторых стандартных шунтов.

Шунты используются при измерении токов до 7,5 кА. При измерении токов от 7,5 до 150 кА используются трансформаторы постоянного тока (рис. 22.3).

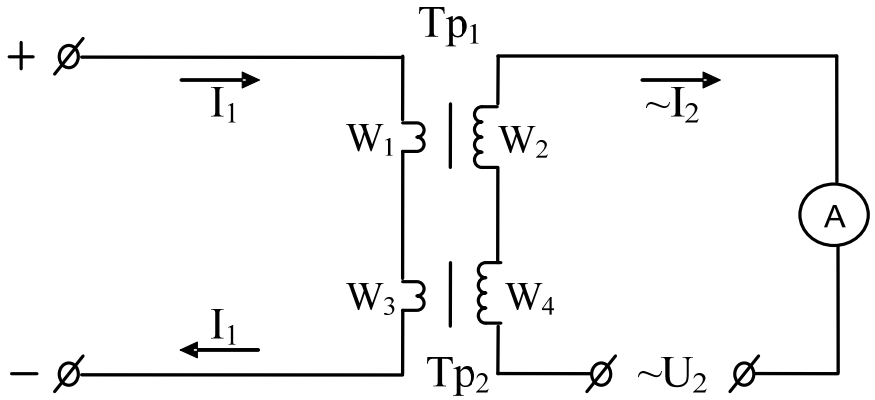


Рис. 22.3. Упрощенная схема включения трансформатора постоянного тока:
I_1 – измеряемый ток; $Тр_1$, $Тр_2$ – трансформаторы; $W_1 = W_3$ – первичные обмотки трансформаторов; $W_2 = W_4$ – вторичные обмотки трансформаторов;
U_2 – вспомогательное переменное напряжение;
I_2 – переменный ток во вторичном контуре

Трансформаторы $Тр_1$, $Тр_2$ имеют идентичные ферромагнитные сердечники из магнитомягкого материала с большой магнитной проницаемостью. Первичные обмотки трансформаторов включены встречно для компенсации в них ЭДС, возникающих при протекании тока I_2 по вторичным обмоткам трансформаторов (вторичные обмотки включены между собой согласно).

Значение тока во вторичном контуре:

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2 + (\omega L_2)^2}} \qquad (22.7)$$

где R_2 – активная составляющая вторичной цепи;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – циклическая частота;

L_2 – суммарная индуктивность обмоток трансформаторов.

Индуктивность L_2 зависит от магнитной проницаемости μ_a сердечников трансформаторов $Тр_1$ и $Тр_2$ (при постоянстве всех других параметров). В свою очередь, значение μ_a зависит от степени насыщения ферромагнитных сердечников трансформаторов магнитными потоками, создаваемыми измеряемым постоянным током I_1 при его протекании по первичным обмоткам трансформаторов W_1 и W_2 .

Таким образом, можно сделать вывод, что индуктивность L_2 зависит от тока I_1. Зависимость $L_2 = f(I_1)$ приведена на рис. 22.4.

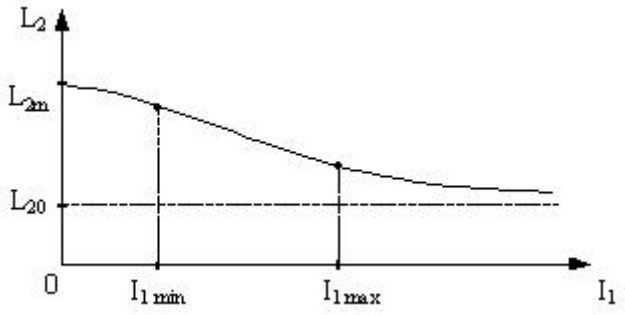


Рис. 22.4. Зависимость индуктивности обмоток трансформаторов от измеряемого тока

При изменении L_2 и при постоянстве U_2, R_2 и w (см. соотношение (22.7)) изменяется ток I_2 во вторичном контуре. Причем рост I_1 приводит к уменьшению L_2, а уменьшение L_2 – к росту тока I_2. При изменении I_1 от некоторого ми-

нимального значения I_{1min} до некоторого максимального значения I_{1max} справедливо равенство

$$I_2 = kI_1 \tag{22.8}$$

где k – коэффициент трансформации ($k >> 1$).

Коэффициент трансформации k нормируется и примерно постоянен в диапазоне измерений.

Благодаря постоянству (в пределах нормируемой погрешности) коэффициента k, амперметр А, измеряющий ток вторичного контура I_2, может быть проградуирован непосредственно в значениях искомого тока I_1, что обычно и используется в стандартных приборах с трансформаторами постоянного тока. Характеристики одного из устройств на основе трансформаторов постоянного тока приведены в прил. 10.

Пределы измерения постоянных токов приборами разных типов приведены в табл. 22.1.

Таблица 22.1

Пределы измерения постоянных токов

Типы приборов	**Пределы измерения, А**				
	Наименьшее значение	**Наибольшее значение**			
		прямое включение	**с внутренним шунтом**	**с внешним шунтом**	**с трансформатором постоянного тока**
Цифровые	10^{-17}	–	10	$7{,}5 \cdot 10^{3}$	–
Электронные аналоговые	$5 \cdot 10^{-17}$	–	1	10	–
Магнито-электрические	$3 \cdot 10^{-17}$	0,05	30	$7{,}5 \cdot 10^{3}$	$1{,}5 \cdot 10^{5}$
Электромагнитные	$5 \cdot 10^{-3}$	200	–	–	–
Электродинамические	$5 \cdot 10^{-3}$	10	–	–	–

Погрешность измерения постоянного тока в большой степени зависит от его значения (рис. 22.5).

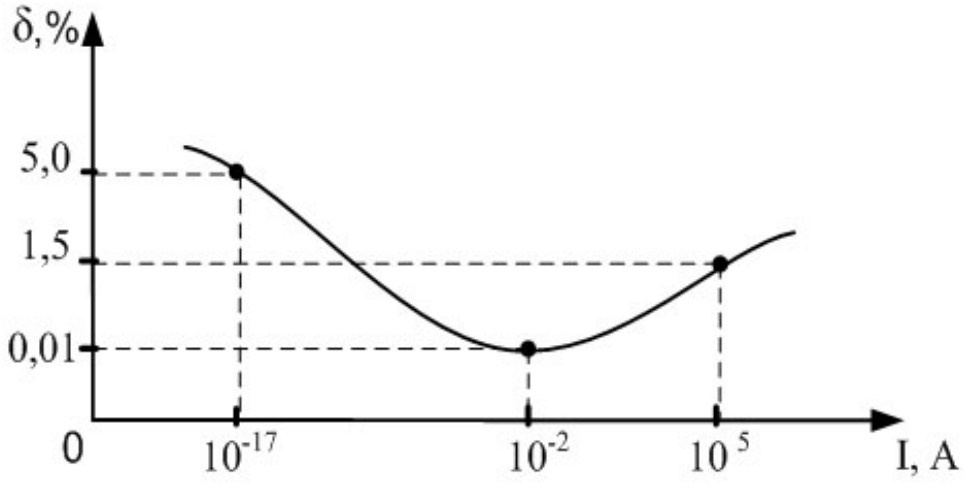


Рис. 22.5. Зависимость погрешности измерения постоянного тока от его значения:
δ – относительная погрешность измерения; *I* – значения измеряемого тока

Для наглядности на рис. 22.5 использован переменный масштаб по обеим осям координат.

Приведенный рисунок свидетельствует, что наименьшая погрешность достигается при измерении токов от 1 до 100 мА (примерно при 10 мА). Погрешность растет с ростом тока (при $I > 100$ мА) и особенно значительно возрастает при измерении малых токов (при $I < 1$ мА). Отметим, что рассматриваемая зависимость $\delta = f(I)$ правомерна для рабочих средств измерений.

В качестве примера в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющих измерять постоянные токи в широком диапазоне их значений.

22.3. Измерение переменного тока

Для измерения переменного тока используются аналоговые электромеханические приборы (электромагнитные, электродинамические, реже – индукционные), аналоговые электронные и цифровые измерительные приборы. Наибольшее распространение получили приборы электромагнитные, электродинамические, аналоговые электронные и цифровые. Для измерений могут также использоваться компенсаторы переменного тока, электронные осциллографы,

регистрирующие устройства, универсальные, комбинированные и виртуальные приборы.

Приборы для измерения переменных токов, аналогично приборам для измерения постоянных токов, именуются (в зависимости от значения измеряемой величины) амперметрами, микроамперметрами, миллиамперметрами или килоамперметрами.

Для синусоидального тока можно записать:

$$I(t) = I_{\text{m}}\sin\omega t \tag{22.9}$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока;

I_{m} – амплитудное значение тока;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – циклическая частота;

t – время.

Как следует из (22.9), переменный ток может быть полностью представлен мгновенными значениями в любой момент времени. Это измерение можно осуществить с помощью электронного осциллографа или регистратора. Переменные токи могут быть охарактеризованы своими отдельными параметрами (например, амплитудным значением) или интегральными параметрами, в качестве которых используются действующие значения (см. (22.10)) и средние значения (см. (22.11)) тока.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [i(t)]^2\,dt} \tag{22.10}$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,dt \tag{22.11}$$

где I – действующее значение измеряемого переменного тока;

$I_{\text{ср}}$ – среднее значение измеряемого переменного тока;

T – период измеряемого тока ($T = \frac{1}{f}$).

На практике чаще всего приходится измерять синусоидальные переменные токи, которые обычно характеризуются действующим значением и (реже)

средним значением или амплитудным. Поэтому подавляющее большинство приборов градуируется в действующих значениях синусоидального переменного тока. Приборы, проградуированные в средних или амплитудных значениях тока, используются сравнительно редко. Из этих соображений численные значения токов, приведенные в учебном пособии, даны, как правило, в действующих значениях. Измерение действующих значений переменных токов осуществляют, как уже отмечалось, различными средствами измерений, наиболее распространенные из которых приведены в табл. 22.2.

Для расширения пределов измерения переменных токов могут использоваться шунты (в составе выпрямительных приборов, в составе электронных аналоговых приборов, в составе термоэлектрических приборов или в составе цифровых измерительных приборов) и токовые измерительные трансформаторы. В табл. 22.2 приведены сведения о пределах измерения для четырех типов приборов.

Таблица 22.2

Характеристики измерителей действующих значений переменных токов

Виды приборов	**Верхний предел измерения, А**			**Частотный диапазон, Гц**
	наименьший	**наибольший**		
		с шунтом	**с измерительными трансформаторами**	
Цифровые	10^{-17}	10	–	$20–2•10^4$
Электронные аналоговые	10^{-5}	5	–	$10–10^7$
Термоэлектрические	$5•10^{-3}$	50	10^2	$1–10^8$
Выпрямительные	$2{,}5•10^{-5}$	$2•10^2$	10^4	$30–2•10^4$

В качестве примера в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющих измерять действующие значения переменных токов в широком диапазоне частот.

Более подробно с методами измерения электрических токов можно познакомиться по литературным источникам, приведенным в библиографическом списке в конце учебного пособия [1; 2; 4–7; 9; 36; 38].

23. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

23.1. Общие положения

Измерение значения электрического напряжения (в дальнейшем – измерение напряжения) является наиболее распространенной операцией в области электрических измерений. Большая часть электроизмерительных приборов предназначена именно для измерения напряжения (это вольтметры и универсальные вольтметры). Отметим, что приборы для измерения больших напряжений именуются киловольтметрами, а для измерения малых напряжений – милливольтметрами, микровольтметрами и т. д. Измерение напряжения может производиться с помощью аналоговых электромеханических приборов различных систем, с помощью аналоговых электронных, цифровых и виртуальных приборов (см., например, учебники [2; 6]).

При подключении вольтметр шунтирует исследуемую цепь, что приводит к появлению дополнительной (методической) погрешности. Особенно значительна эта погрешность при использовании аналоговых электромеханических приборов, так как их внутреннее сопротивление сравнительно невелико. Рассмотрим вопрос о методической погрешности более детально.

а *б*

Рис. 23.1. Исследуемые схемы: *а* – исходная схема; *б* – схема после подключения вольтметра; U – напряжение источника питания; R_1, R_2 – постоянные сопротивления; R_V – внутреннее сопротивление вольтметра; U_2 – напряжение на сопротивлении R_2; U_V – показание вольтметра; I – ток в цепи до подключения вольтметра; I' – ток в цепи после подключения вольтметра

Падение напряжения на сопротивлении R_2 до подключения вольтметра определяется соотношениями

$$U_2 = IR_2, \tag{23.1}$$

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}, \tag{23.2}$$

$$U_2 = \frac{UR_2}{R_1 + R_2}, \tag{23.3}$$

Падение напряжения на сопротивлении R_2 после подключения вольтметра определяется соотношениями

$$U_V = I'R_{2V}, \tag{23.4}$$

$$I' = \frac{U}{R_1 + R_{2V}}, \tag{23.5}$$

$$U_V = I'R_{2V}, \tag{23.6}$$

$$U_V = \frac{UR_{2V}}{R_1 + R_{2V}}, \tag{23.7}$$

где R_{2V} – эквивалентное сопротивление (эквивалентное параллельно включенным сопротивлениям R_2 и R_V).

Абсолютная методическая погрешность измерения, возникающая при подключении к сопротивлению R_2 вольтметра V с внутренним сопротивлением R_V (см. рис. 23.1, *б*) запишется в виде

$$\Delta_M = U_2 – U_V \tag{23.8}$$

где Δ_M – абсолютная методическая погрешность;

U_2, U_V – определены выше.

Подставив в (23.8) значения U_2 и U_V и выполнив приведение подобных, получим

$$\Delta_M = U\frac{R_1(R_2 - R_{2V})}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_{2V})}. \tag{23.9}$$

Относительная методическая погрешность измерения определяется соотношением

$$\delta_M = \frac{\Delta_M}{U_2} \cdot 100\% \tag{23.10}$$

где δ_M – относительная методическая погрешность.

После подстановки в (23.10) значений Δ_M и U_2 и приведения подобных получим

$$\delta_M = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_V} 100\%, \tag{23.11}$$

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \tag{23.12}$$

где R_{12} – эквивалентное сопротивление исследуемой цепи (эквивалентное параллельно включенным сопротивлениям R_1 и R_2);

R_1, R_2, R_V – определены выше.

Отметим, что формула (23.12) правомерна, если внутреннее сопротивление источника питания мало и им можно пренебречь. Если этим сопротивлением пренебречь нельзя, то его надо приплюсовать к сопротивлению R_1.

Выражения (23.9) и (23.11) свидетельствуют о том, что рассматриваемые методические погрешности зависят от соотношения сопротивлений R_1, R_2 и R_{12}, с одной стороны, и сопротивления R_V, с другой стороны. Особенно это очевидно при рассмотрении относительной погрешности δ_M по (23.11). Действительно, для уменьшения методической погрешности в данном случае необходимо выполнить условие

$$R_V >> R_{12} \tag{23.13}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что использование вольтметров высокого класса еще не гарантирует получение малых погрешностей, так как методические погрешности, не зависящие от класса точности, могут значительно превзойти инструментальные погрешности результата измерений.

Отметим, что вопрос о методических погрешностях особенно актуален при использовании приборов непосредственной оценки и прямых методов измерений. При использовании приборов сравнения (см. главу 18 и параграфы 18.1, 18.2, 18.3, 18.4 и 18.5) и компенсационных методов измерения методические погрешности малы и ими в этом случае, как правило, пренебрегают.

23.2. Измерение постоянного напряжения

Для измерения постоянного напряжения могут быть использованы аналоговые электромеханические приборы различных систем, аналоговые электронные приборы и цифровые измерительные приборы. Перечисленные средства

измерений принято относить к приборам непосредственной оценки. Кроме того, для измерения постоянных напряжений используются приборы сравнения (компенсаторы постоянного тока).

Из аналоговых электромеханических приборов наибольшее распространение для измерения постоянных напряжений получили приборы магнитоэлектрической системы. Для использования магнитоэлектрического механизма в качестве вольтметра необходимо последовательно с ним включить добавочное сопротивление R_g. Изменяя сопротивление R_g, можно изменять (в широких пределах) диапазон измеряемых напряжений. Рассмотрим вопрос о расширении пределов измерении вольтметров более детально (рис. 23.2).

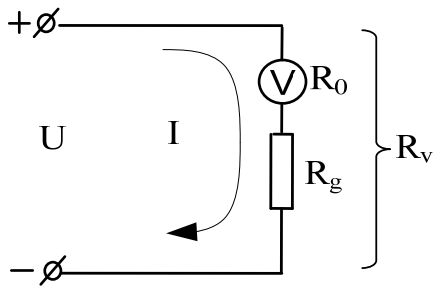


Рис. 23.2. Схема вольтметра:
U – измеряемое напряжение; R_0 – сопротивление измерительного механизма;
R_g – добавочное сопротивление; R_V – сопротивление вольтметра; I – ток в цепи

Обозначим через U_0 предельно допускаемое напряжение для используемого измерительного механизма и введем в рассмотрение коэффициент пропорциональности m, определяемый соотношением

$$m = \frac{U}{U_0}, \tag{23.14}$$

где m – коэффициент пропорциональности;

U, U_0 – определены выше.

Измеряемое напряжение U может быть записано в виде равенства

$$U = U_0 + U_g \tag{23.15}$$

где U_g – падение напряжения на добавочном сопротивлении.

$$U_0 = IR_0, \tag{23.16}$$

$$U_g = IR_g, \tag{23.17}$$

$$U = mU_0 \tag{23.18}$$

Учитывая соотношения (23.15)–(23.18), получим

$$U = IR_0 + IR_g, \tag{23.19}$$

$$mU_0 = IR_0 + IR_g,$$

$$mIR_0 = IR_0 + IR_g. \tag{23.20}$$

Сокращая в (23.20) ток I в левой и правой частях равенства, получим

$$mR_0 = R_0 + R_g. \tag{23.21}$$

Решая уравнение (23.21) относительно Rg, окончательно получаем

$$R_g = R_0 (m–1). \tag{23.22}$$

Соотношение (23.22) позволяет рассчитывать требуемое добавочное сопротивление R_g по заданному сопротивлению измерительного механизма R_0 и по заданному коэффициенту пропорциональности $m = U / U_0$, где U – измеряемое напряжение, а U_0 – предельно допускаемое напряжение для выбранного измерительного механизма.

Добавочные сопротивления могут использоваться, как уже отмечалось, с магнитоэлектрическими измерительными механизмами, а также с механизмами электромагнитной и электродинамической систем. С механизмами электростатической системы добавочные сопротивления не используются.

Добавочные сопротивления нормируются по току, по напряжению и по классу точности (табл. 23.1).

Таблица 23.1

Нормирование добавочных сопротивлений

Нормируемый параметр	**Значение нормируемого параметра**
Электрический ток, мА	0,5; 1,0; 3,0; 7,5; 15; 30
Электрическое напряжение, В	600; 1000; 1500; 3000 … 30 000
Класс точности	0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0

Добавочные сопротивления изготавливают из материала с малым температурным коэффициентом (например, из манганина), что позволяет снизить температурные погрешности.

Аналогично шунтам добавочные сопротивления могут быть внутренние и наружные, однопредельные и многопредельные, индивидуальные и калиброванные. Внутренние добавочные сопротивления используются, если измеряемое напряжение не превосходит 600 В. При измерении больших напряжений используются наружные сопротивления.

Наружные добавочные сопротивления монтируют в специальном корпусе с выведенными на панель зажимами от различных секций, соответствующих разным пределам измерения. Индивидуальные наружные сопротивления предназначаются для работы с определенным прибором и снабжаются надписью с указанием типа и номера этого прибора.

Калиброванные добавочные сопротивления могут применяться с любым прибором, ток полного отклонения которого не превосходит тока, на который рассчитано добавочное сопротивление.

В качестве примера в прил. 11 приведены технические характеристики добавочного сопротивления типа Р-109.

Пределы измерения постоянных напряжений приборами разных типов и их погрешности (наименьшие) приведены в табл. 23.2.

В качестве примера в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющие измерять в том числе и постоянные напряжения.

Таблица 23.2

Пределы и погрешности измерения постоянных напряжений

Типы приборов	Пределы измерений			Погрешность (наименьшая), %
	Минимальное значение, В	Максимальное значение, В	С внешним шунтом, кВ	
Цифровые	$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	до 40	0,001
Аналоговые электронные	$5 \cdot 10^{-8}$	10^3	–	0,5
Магнитоэлектрические	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^3$	до 20	0,05
Электромагнитные	1,5	600	–	0,5
Электродинамические	7,5	600	–	0,1
Электростатические	30	$75 \cdot 10^3$	–	0,5

23.3. Измерение переменного напряжения

Для измерения переменного напряжения используются аналоговые электромеханические приборы (электромагнитные, электродинамические, редко – индукционные), аналоговые электронные приборы (в том числе выпрямительной системы) и цифровые измерительные приборы. Для измерений могут также использоваться компенсаторы, осциллографы, регистрирующие устройства и виртуальные приборы.

При измерении переменного напряжения следует различать: мгновенное, амплитудное, среднее и действующее значения искомого напряжения.

Синусоидальное переменное напряжение может быть представлено в виде следующих соотношений:

$$u(t) = U_m \sin \omega t, \tag{23.23}$$

$$U_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)dt\,, \tag{23.24}$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[u(t)\right]^2 dt}\,. \tag{23.25}$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения;

U_{m} – амплитудное значение напряжения;

$\omega - 2\pi f$ – угловая частота;

f – циклическая частота;

t – время;

$U_{ср}$ – среднее значение напряжения;

T – период ($T = 1/f$) искомого синусоидального напряжения;

U – действующее значение напряжения.

Мгновенное значение переменного тока может быть отображено на электронном осциллографе или с помощью аналогового регистратора (самописца).

Средние, амплитудные и действующие значения переменных напряжений измеряются стрелочными или цифровыми приборами непосредственной оценки или компенсаторами переменных напряжений. Приборы для измерения средних и амплитудных значений используются сравнительно редко. Большая часть приборов градуируется в действующих значениях напряжения. Из этих соображений численные значения напряжений, приведенные в учебном пособии, даны, как правило, в действующих значениях (см. выражение (23.25)).

При измерениях переменных величин большое значение имеет форма искомых напряжений, которые могут быть синусоидальными, прямоугольными, треугольными и т. д. В паспортах на приборы всегда указывается, для измерения каких напряжений рассчитан прибор (например, для измерения синусоидальных напряжений или прямоугольных). При этом всегда указывается, какой параметр переменного напряжения измеряется (амплитудное значение, среднее значение или действующее значение измеряемого напряжения). Как уже отмечалось, большей частью используется градуировка приборов в действующих значениях искомых переменных напряжений. В силу этого все далее рассматриваемые переменные напряжения даны в действующих значениях.

Для расширения пределов измерения вольтметров переменных напряжений используются добавочные сопротивления, измерительные трансформаторы и добавочные емкости (с приборами электростатической системы).

Использование добавочных сопротивлений для расширения пределов измерения уже рассмотрено в п. 23.2 применительно к вольтметрам постоянного

напряжения и поэтому в данном разделе не рассматривается. Не рассматриваются также измерительные трансформаторы напряжения и тока. Сведения по трансформаторам даны в литературе, приведенной в библиографическом списке [5].

Рассмотрим более детально использование добавочных емкостей для расширения пределов измерения электростатистики вольтметров. С этой целью может использоваться одна дополнительная емкость (рис. 23.3, *а*) или же две (рис. 23.3, *б*).

Для схемы с одной дополнительной емкостью измеряемое напряжение U распределяется между емкостью вольтметра C_V и дополнительной емкостью C обратно пропорционально значениям C_V и C, т. е.

$$\frac{U_C}{U_V} = \frac{C_V}{C}, \tag{23.26}$$

где U_C, U_V, C_V, C – определены выше.

Учитывая, что $U_C = U - U_V$, можно записать

$$\frac{U - U_v}{U_V} = \frac{C_V}{C}. \tag{23.28}$$

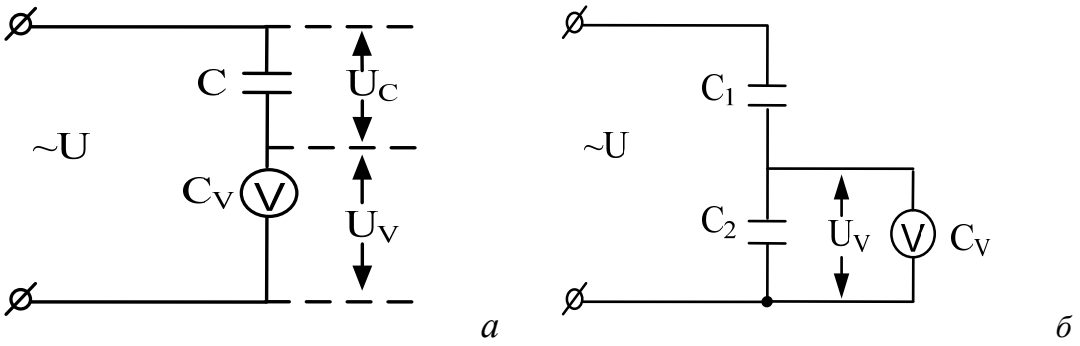


Рис. 23.3. Схема расширения пределов измерения электростатических вольтметров:
а – схема с одной добавочной емкостью; *б* – схема с двумя добавочными емкостями;
U – измеряемое переменное напряжение (действующее значение);
C, C_1, C_2 – добавочные емкости; C_V – емкость используемого электростатического вольтметра V; U_C – падение напряжения на дополнительной емкости C;
U_V – показание электростатического вольтметра

Решая уравнение (23.27) относительно U, получим

$$U = U_V \frac{C_V + C}{C}. \tag{23.28}$$

Из (23.28) следует, что чем больше измеряемое напряжение U по сравнению с предельно допускаемым напряжением для данного электростатического механизма, тем меньше должна быть емкость C по сравнению с емкостью C_V.

Следует отметить, что формула (23.22) правомерна лишь при идеальной изоляции конденсаторов, образующих емкости C и C_V. Если же диэлектрик, изолирующий пластины конденсаторов друг от друга, имеет потери, то возникают дополнительные погрешности. Кроме того, емкость вольтметра C_V зависит от измеряемого напряжения U, т. к. от U зависят показания вольтметра и соответственно взаимное расположение подвижных и неподвижных пластин, образующих электростатический измерительный механизм. Последнее обстоятельство приводит к появлению еще одной дополнительной погрешности.

Лучшие результаты получаются, если вместо одной добавочной емкости использовать две добавочные емкости C_1 и C_2, образующие делитель напряжения (см. рис. 23.3, *б*).

Для схемы с двумя добавочными емкостями правомерно соотношение

$$\frac{U_{C1}}{U_V} = \frac{C_2 + C_V}{C_1}, \tag{23.29}$$

где U_{C1} – падение напряжения на емкости C_1.

Учитывая, что $U_{C1} = U – U_V$, можно записать

$$\frac{U - U_V}{U_V} = \frac{C_2 + C_V}{C_1}. \tag{23.30}$$

Решая уравнение (23.30) относительно U, получим

$$U = U_V \frac{C_V + C_1 + C_2}{C_1}. \tag{23.31}$$

Из (23.31) можно сделать вывод, что если емкость конденсатора C_2, к которому подключен вольтметр, значительно превышает емкость самого вольтметра, то распределение напряжения практически не зависит от показания вольтметра. Кроме того, при $C_2 >> C_V$ изменение сопротивления изоляции конденсаторов C_1 и C_2 и частоты измеряемого напряжения также мало влияют на

показания прибора. То есть при использовании двух добавочных емкостей дополнительные погрешности результатов измерений значительно снижаются.

Пределы измерения переменных напряжений приборами разных типов и наименьшие погрешности этих приборов приведены в табл. 23.3.

В качестве примеров в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющих измерять, в том числе, и переменные напряжения.

В табл. П. 5.1 приведены технические характеристики вольтметров для измерения переменных напряжений.

Таблица 23.3

Пределы и погрешности измерения переменных напряжений

Типы приборов	**Пределы измерений, В**				**Частотный диапазон, Гц**	**Наименьшая погрешность, %**
	наименьший	**наибольший**				
		прямое включение	**с внешним добавочным сопротивлением**	**с измерительным трансформатором**		
Цифровые	10^{-5}	10^{3}	–	–	$4–10^{8}$	0,15
Аналоговые электронные	$3 \cdot 10^{-6}$	300	–	–	$10–10^{9}$	0,5
Электромагнитные	0,5	600	750	$6 \cdot 10^{5}$	$45–10^{4}$	0,5
Электростатические	30	$7{,}5 \cdot 10^{4}$	–	–	$20–10^{7}$	0,5
Электродинамические	7,5	600	–	$3 \cdot 10^{4}$	$45–2 \cdot 10^{3}$	0,1

В заключение следует отметить следующее.

Погрешности измерения токов (постоянных и переменных) приборами одного типа и в равных условиях всегда больше погрешностей измерения напряжений (и постоянных, и переменных). Погрешности измерения переменных

токов и напряжений приборами одного типа и в равных условиях всегда больше погрешностей измерения постоянных токов и напряжений.

Более подробно по затронутым вопросам можно ознакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке [1; 2; 4–7; 9; 36; 38].

24. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

24.1. Общие положения

Выбор метода измерения сопротивления и соответствующей измерительной аппаратуры зависит от значения измеряемого сопротивления, требуемой точности и условий, при которых производится измерение.

На практике приходится измерять сопротивления в чрезвычайно широком диапазоне – от тысячных и миллионных долей ома (например, при измерении сопротивления металлических контактов) до сопротивлений 10^{14}–10^{15} Ом (например, при измерении сопротивления изоляционных материалов).

Весьма различны и требования к точности измерений. Например, при поверке образцовых катушек сопротивлений допускаемая погрешность измерения обычно не превышает тысячных долей процента, а при измерении, например, сопротивления заземления погрешность 10–15 % является, в ряде случаев, вполне допускаемой.

Для измерения сопротивлений используются следующие методы:

1) метод вольтметра и амперметра;
2) метод сравнения с образцовой мерой;
3) метод заряда и разряда конденсатора известной емкости.

Для измерения сопротивлений можно пользоваться как аппаратурой общего назначения (амперметрами, вольтметрами, магазинами сопротивлений и др.), собирая соответствующие измерительные схемы, так и приборами, специально предназначенными для измерения сопротивлений (аналоговыми и цифровыми омметрами, мостовыми схемами и др.), позволяющими производить измерение удобнее и быстрее.

Используемые методы и приборы для измерения сопротивлений в большой степени зависят от значения измеряемых сопротивлений, которые подразделяются на малые, средние, большие и сверхбольшие (табл. 24.1).

Таблица 24.1

Классификация сопротивлений

Наименование сопротивлений	**Значение сопротивлений, Ом**
Малые	< 1
Средние	от 1 до 10^6
Большие	от 10^6 до 10^{12}
Сверхбольшие	$> 10^{12}$

Мостовые методы измерения сопротивлений частично уже рассмотрены в главах 11–15 учебного пособия. Ниже приводятся наиболее распространенные методы измерения малых, средних и больших сопротивлений (как с использованием мостовых схем, так и без их использования).

Наиболее универсальным методом измерения сопротивлений является метод вольтметра и амперметра. Этот метод может быть использован для измерения и малых, и средних, и больших сопротивлений. Схемы включения приборов при реализации метода вольтметра и амперметра приведены на рис. 24.1 (первый вариант) и на рис. 24.2 (второй вариант).

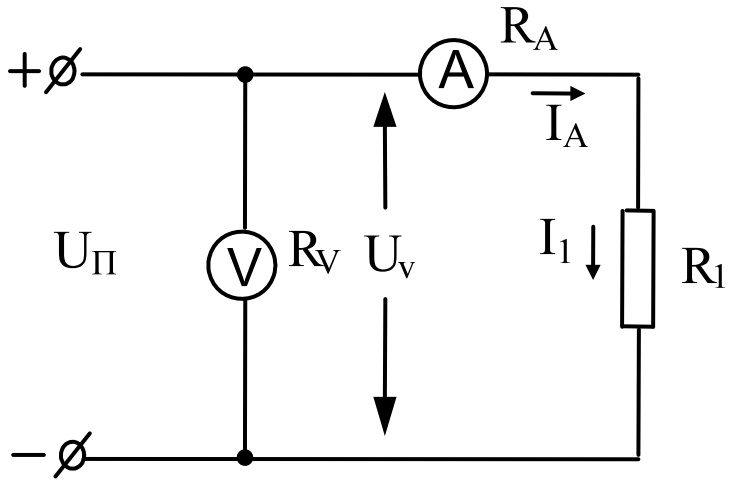


Рис. 24.1. Первый вариант включения приборов при измерении сопротивлений методом вольтметра и амперметра

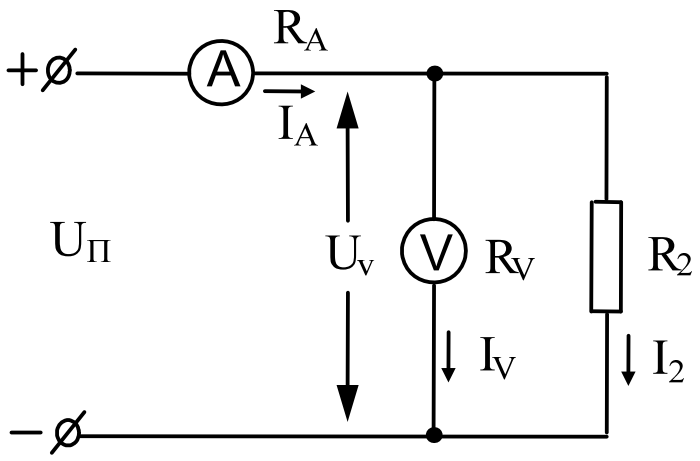


Рис. 24.2. Второй вариант включения приборов при измерении сопротивлений методом вольтметра и амперметра

На рис. 24.1 и 24.2 приняты следующие обозначения:

$U_П$ – напряжение питания;

I_A – показание амперметра;

U_V – показание вольтметра;

R_V – внутреннее сопротивление вольтметра;

R_A – внутреннее сопротивление амперметра;

I_V – ток через вольтметр (вторая схема включения приборов);

R_1 – искомое сопротивление при первом варианте включения приборов;

R_2 – искомое сопротивление при втором варианте включения приборов;

$I_1 = I_A$ – ток через сопротивление R_1 (первый вариант включения приборов);

I_2 – ток через сопротивление R_2 (второй вариант включения приборов).

Для обеих схем включения приборов измеряемые (искомые) сопротивления R_1 и R_2 могут быть приближенно оценены (в соответствии с законом Ома) по формулам

$$R_1^{'} = U_V / I_A, \tag{24.1}$$

$$R_2^{'} = U_V / I_A, \tag{24.2}$$

где U_V, I_A – определены выше;

$R_1^{'}$, $R_2^{'}$ – значения сопротивлений, найденные по показаниям приборов.

К недостаткам рассматриваемого метода измерения сопротивлений следует отнести использование двух приборов (вольтметра и амперметра) и необходимость проведения вычислений для получения искомого результата.

Кроме того, нетрудно заметить, что при включении приборов по схеме рис. 24.1 отношение напряжения U_V к току I_A (см. выражение (24.1)) равно сумме искомого сопротивления R_1 и сопротивления амперметра R_A. Т. е. для получения значения искомого сопротивления с поправкой необходимо из результата по (24.1) вычесть значение R_A:

$$R_1 = R_1^{'} - R_A, \tag{24.3}$$

где R_1 – значение искомого сопротивления с поправкой для первого варианта включения приборов («истинное» значение искомого сопротивления).

При включении приборов по схеме рис. 24.2 ток I_A является суммой токов I_V и I_2 (в соответствии с первым законом Кирхгофа). Т. е. для получения значения искомого сопротивления с поправкой необходимо из тока I_A (см. выражение (24.2)) вычесть ток I_V. В этом случае значение искомого сопротивления с поправкой запишется в виде

$$R_2 = \frac{U_V}{I_A - I_V}, \tag{24.4}$$

где R_2 – значение искомого сопротивления с поправкой для второго варианта включения приборов («истинное» значение искомого сопротивления).

Учитывая, что $I_V = U_V / R_V$, значение R_2 может быть получено в виде соотношения

$$R_2 = \frac{U_V}{I_A - U_V / R_V}, \tag{24.5}$$

где U_V, I_A, R_V – определены выше.

Кроме введения поправок, возможен и другой подход к решению рассматриваемой задачи по измерению сопротивлений методом вольтметра и амперметра. Другой подход заключается в определении искомых значений сопротивлений по (24.1) и (24.2) без поправок и в оценке возникающих при этом методических погрешностей.

Абсолютная методическая погрешность измерения сопротивлений методом вольтметра и амперметра при использовании первого варианта включения приборов оценивается соотношением

$$\Delta_1 = R_1^{'} - R_1, \tag{24.6}$$

где Δ_1 – абсолютная методическая погрешность при первом варианте включения приборов;

$R_1^{'}$ – результат измерения по показаниям приборов (см. выражение (24.1));

R_1 – «истинное» значение искомого сопротивления (см. выражение (24.3)).

Подставляя в (24.6) значение R_1 по (24.3), получим абсолютную методическую погрешность при первом варианте включения приборов:

$$\Delta_1 = R_A. \tag{24.7}$$

Относительная методическая погрешность при использовании первого варианта включения приборов запишется в виде

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{R_1}100\% = \frac{R_A}{R_1}100\% \tag{24.8}$$

где δ_1 – относительная методическая погрешность при первом варианте приборов.

Абсолютная методическая погрешность измерения сопротивлений методом вольтметра и амперметра при использовании второго варианта включения приборов оценивается соотношением

$$\Delta_2 = R'_2 - R_2 \tag{24.9}$$

где Δ_2 – абсолютная методическая погрешность при втором варианте включения приборов;

$R_2^{'}$ – результат измерения по показаниям приборов (см. выражение (24.2));

R_2 – «истинное» значение искомого сопротивления (см. выражение (24.5)).

Отметим, что «истинными» значениями искомых сопротивлений R_1 и R_2 названы значения измеряемых сопротивлений с поправками.

Результат измерения по показаниям приборов может быть записан в виде

$$R_2^{'} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I_2 + I_V} = \frac{U_V}{U_V(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V})} = \frac{R_V R_2}{R_V + R_2}. \qquad (24.10)$$

Подставляя в (24.9) значение $R_2^{'}$ по (24.10), получаем

$$\Delta_2 = \frac{R_V R_2}{R_V + R_2} - R_2 = -\frac{R_2^2}{R_V + R_2},$$

$$\Delta_2 = -\frac{R_2^2}{R_V + R_2}. \qquad (24.11)$$

Относительная методическая погрешность при использовании второго варианта включения приборов запишется в виде

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{R_2} 100\% = \frac{R_2^2}{R_2(R_\text{V} + R_2)} 100\%$$

$$\delta_2 = \frac{R_2}{R_\text{V} + R_2} 100\% \qquad (24.12)$$

где δ_2 – относительная методическая погрешность при втором варианте включения приборов.

Таким образом, методические погрешности при косвенном измерении искомого сопротивления методом вольтметра и амперметра оцениваются соотношениями (24.7) и (25.8) для первого варианта включения приборов и соотношениями (24.11) и (24.12) для второго варианта включения приборов.

Отметим, что схема первого варианта включения приборов, приведенная на рис. 24.1, обеспечивает меньшие погрешности при измерении больших сопротивлений, а схема, приведенная на рис. 24.2 (второй вариант включения приборов), – при измерении малых сопротивлений.

24.2. Измерение малых сопротивлений

При измерении малых сопротивлений необходимо учитывать, что значения сопротивлений соединительных проводов и сопротивлений контактов в местах соединения проводов с измеряемым сопротивлением могут быть сравнимыми со значением искомого сопротивления. Поэтому, чтобы сопротивления

проводов и контактов не искажали результат измерения, необходимо обратить серьезное внимание на способ подключения измерительных приборов, на способ включения измеряемого сопротивления в измерительную схему и на метод проведения измерений. Для измерения малых сопротивлений используются различные методы. В учебном пособии рассматривается три метода измерения: метод вольтметра и амперметра, метод сравнения и метод, основанный на использовании мостовых измерительных схем.

Метод вольтметра и амперметра

Измерение сопротивлений методом вольтметра и амперметра уже рассмотрено в параграфе 24.1. В данном параграфе учебного пособия описаны особенности этого метода при измерении малых сопротивлений. Для исключения больших погрешностей при измерении малых сопротивлений в последних всегда должны быть выделены четыре зажима – два токовых и два потенциальных.

Рассмотрим использование метода вольтметра и амперметра на примере измерения сопротивления медной шины (рис. 24.3).

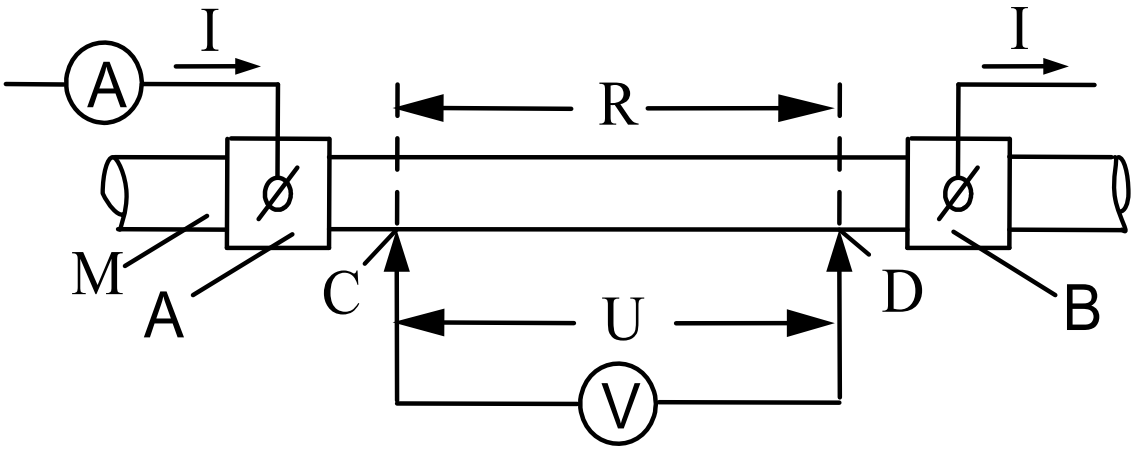


Рис. 24.3. Схема эксперимента при измерении методом вольтметра и амперметра сопротивления участка медной шины: *M* – медная шина; *A*, *B* – токовые зажимы; *C*, *D* – потенциальные контакты; *R* – искомое сопротивление; *A* – амперметр; *V* – вольтметр; *I* – ток в цепи; *U* – разность потенциалов между точками *C* и *D*

Искомое сопротивление *R* определяется соотношением

$$R = U / I \qquad (24.13)$$

Ток *I*, пропускаемый через исследуемую шину, подводят к зажимам *A* и *B* (токовым зажимам), а напряжение *U* измеряют между контактами *C* и *D* (по-

тенциальными зажимами), выполненными обычно в виде двух призм (ножей), прижатых острыми ребрами к шине. Для уменьшения погрешности при измерении U необходимо, чтобы сопротивление вольтметра было много больше сопротивления соединительных проводов и сопротивления контактов в точках C и D. Рассматриваемая погрешность будет полностью или частично отсутствовать, если измерение напряжения U производится без потребления тока (или этим током можно пренебречь). Подобное возможно, если напряжение измеряется с помощью потенциометра или электровольтметра, входное сопротивление которого весьма велико.

Метод сравнения

При измерении малых сопротивлений методом сравнения по схеме рис. 24.4 измеряемое и образцовое сопротивления следует подключать к источнику тока и соединять между собой посредством токовых зажимов (зажимы A, B и A', B' на рис. 24.4), а напряжение измерять между потенциальными зажимами C, D и C', D'.

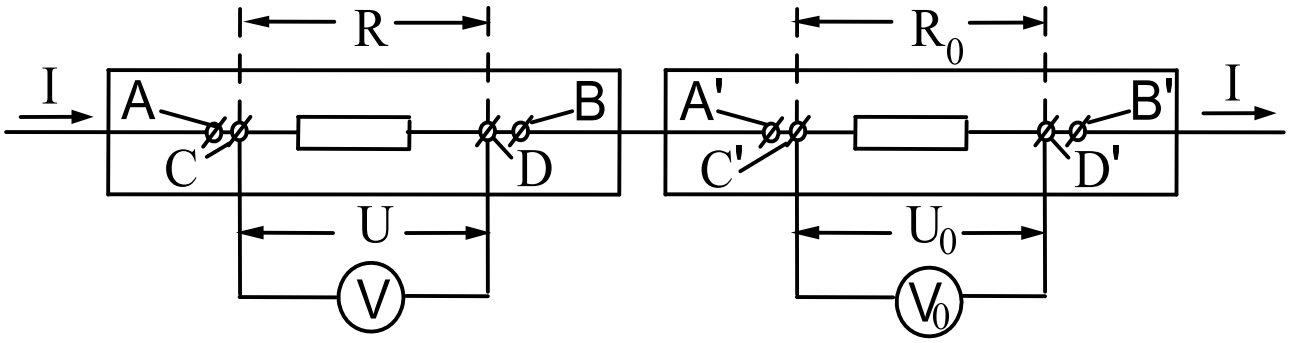


Рис. 24.4. Схема эксперимента при измерении малых сопротивлений методом сравнения: R – искомое сопротивление (четырехзажимное); R_0 – образцовое сопротивление (четырехзажимное); V, V_0 – вольтметры; U – падение напряжения на R; U_0 – падение напряжения на R_0; I – ток в цепи; A, B, A', B' – токовые зажимы; C, D, C', D' – потенциальные зажимы

Искомое сопротивление R определяется с использованием следующих соотношений:

$$R = \frac{U}{I},$$

$$I = \frac{U_0}{R_0},$$

$$R = R_0 \frac{U}{U_0}, \qquad (24.14)$$

где R, R_0, U, U_0 – определены выше.

Погрешность косвенного измерения искомого сопротивления по (24.14) может быть найдена в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 7.3 и табл. 7.1 данного учебного пособия.

$$\vartheta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2},$$

где ϑ – относительная суммарная погрешность косвенного измерения значения сопротивления R (%);

δ_1 – относительная суммарная погрешность прямого измерения значения сопротивления R_0 (%);

δ_2 – относительная суммарная погрешность прямого измерения значения напряжения U (%);

δ_3 – относительная суммарная погрешность прямого измерения значения напряжения U_0 (%).

Абсолютная суммарная погрешность косвенного измерения значения сопротивления R:

$$\Delta = \frac{R}{100\%} \vartheta \qquad (24.15)$$

где Δ – абсолютная суммарная погрешность косвенного измерения искомого сопротивления (Ом).

Мостовые методы

Четырехплечные мостовые схемы, описанные в главах 11–15 учебного пособия, малопригодны для измерения малых сопротивлений. Для этой цели применяются обычно двойные мосты (рис. 24.5).

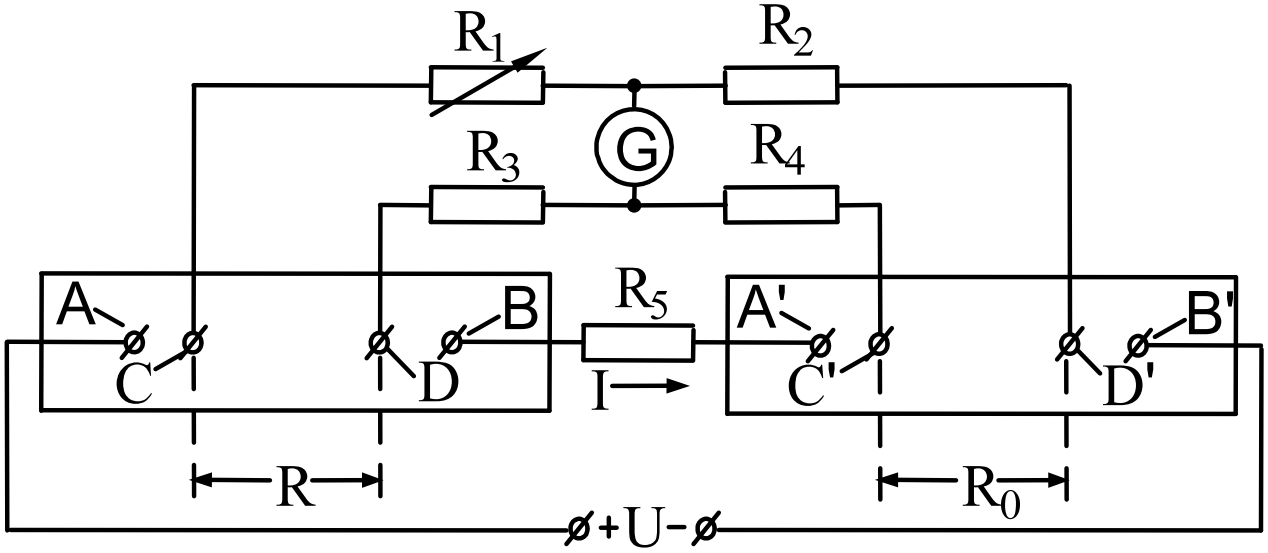


Рис. 24.5. Схема двойного моста: R – измеряемое (искомое) сопротивление; R_0 – образцовое сопротивление; A, B, A', B' – токовые зажимы (контакты); C, D, C', D' – потенциальные зажимы (контакты); R_1 – переменное (регулируемое) сопротивление; R_2, R_3, R_4, R_5 – постоянные сопротивления; G – гальванометр (используется в режиме ноль- индикатора); U – напряжение питания

Измеряемое (искомое) сопротивление R и образцовое сопротивление R_0 должны быть четырехзажимными и иметь значения одного порядка.

Для вывода уравнения, описывающего равновесное состояние моста, надо преобразовать треугольник, образованный сопротивлениями R_3, R_4, R_5 , в эквивалентную звезду. При этом двойной мост преобразуется в четырехплечий с плечами R_1, R_2, $R+R_\text{m}$ и R_0+R_n . Условием равновесия этого моста, а следовательно, и исходного двойного моста является соотношение

$$R_1(R_0 + Rn) = R_2(R + Rm). \tag{24.16}$$

Сопротивления R_n и R_m эквивалентной звезды, как известно:

$$Rn = \frac{R_4 R}{R_3 + R_4 + R_5}, \tag{24.17}$$

$$Rm = \frac{R_3 R}{R_3 + R_4 + R_5}. \tag{24.18}$$

Подставляя значения R_n и R_m в (24.16) и решая полученное уравнение относительно измеряемого (искомого) сопротивления R, получим

$$R = R_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_5}{R_3 + R_4 + R_5}\left(\frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_2}\right). \tag{24.19}$$

Использование соотношения (24.19) для определения значения R по значениям сопротивлений остальных плеч схемы затруднительно. Одна из причин затруднений – наличие в (24.19) сопротивления R_5, которое включает в себя не только сопротивление , но и сопротивление контактов в точках схемы B и A'.

Значение сопротивления R_5, в силу этого, непостоянно и обычно неизвестно. Выражение (24.19) упрощается, если подобрать сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_4 так, чтобы

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \qquad (24.20)$$

Если условие (24.20) выполняется, то выражение (24.19) принимает вид

$$R = R_0 \frac{R_1}{R_2}. \qquad (24.21)$$

Обычно в двойных мостах подбирают $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$, при этом в большинстве мостов сопротивление R_1 – регулируемое. Имеются, однако, мосты, в которых сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_4 – постоянны, а регулируемым является сопротивление R_0.

Для измерения сопротивления R изменяют регулируемые сопротивления мостовой схемы (R_1 или R_0) до тех пор, пока мост не будет уравновешен. О равновесии моста судят по показаниям гальванометра G (в момент равновесия его показания нулевые). После достижения равновесия искомое значение R определяют по формуле (24.21).

Для того чтобы свести к минимуму погрешность измерения, необходимо сделать возможно малым сопротивление R_5, т. е. соединять сопротивления R и R_0 по возможности коротким проводом большого сечения. Это особенно важно при измерении предельно малых сопротивлений, имеющих значения десятитысячных долей ома и менее.

Ниже приведена табл. 24.2 с техническими характеристиками универсального измерительного моста типа Р-329.

Таблица 24.2

Технические характеристики универсального измерительного моста типа Р-329

Предел измерения, Ом	Класс точности	Вид схемы
10^{-6} … 10^{-5}	1,5	Двойной мост (шестиплечий)
10^{-5} … 10^{-4}	1,0	
10^{-4} … 10^{-3}	0,5	
10^{-3} … 100	0,05	
50 … 10^{5}	0,05	Одинарный мост (четырехплечий)
10^{5} … 1,1 • 10^{6}	0,5	

В заключение данного параграфа учебного пособия следует отметить, что заметные погрешности при измерении малых сопротивлений могут быть вызваны паразитными ЭДС, возникающими в местах контакта проводов из-за неоднородности материала последних (контактные ЭДС). Кроме того, при отличии температур различных частей измерительной схемы возникает термоЭДС. Во многих случаях влияния контактных и термоЭДС можно в значительной мере исключить, проводя измерение два раза при различных полярностях измерения питания. При этом паразитные ЭДС при одной полярности питающего напряжения суммируются с полезными сигналами, а при другой полярности – вычитаются из них. В качестве результата (при двух измерениях) принимается среднее арифметическое значение по результатам обоих измерений.

24.3. Измерение средних сопротивлений

Для измерения средних сопротивлений могут быть использованы уже рассмотренные методы: метод вольтметра и амперметра, метод сравнения и метод с использованием мостовых измерительных схем. Так как эти методы уже описаны выше, в данном параграфе учебного пособия они не рассматриваются.

Средние сопротивления наиболее часто встречаются на практике, в силу чего разработано большое количество методов, часть из которых будет рассмотрена ниже.

Метод одного амперметра

При использовании одного амперметра измеряемое сопротивление может включаться последовательно с амперметром («последовательный» омметр) и параллельно к амперметру («параллельный омметр).

Схема «последовательного» омметра приведена на рис. 24.6.

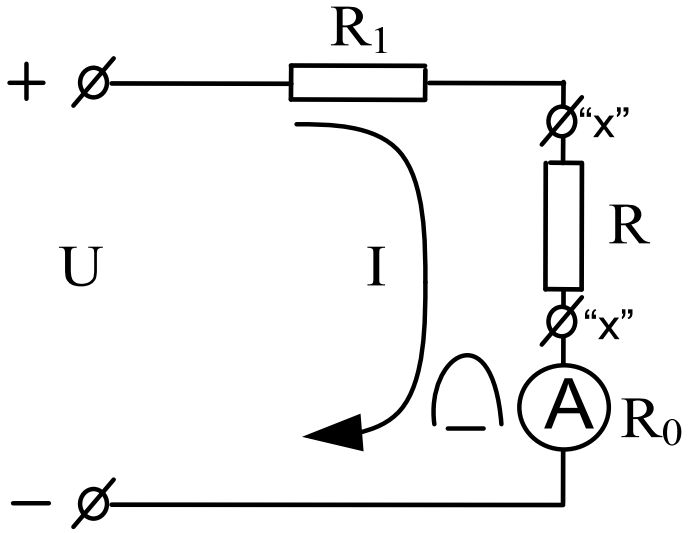


Рис. 24.6. Схема «последовательного» омметра:
R – измеряемое сопротивление; R_1 – добавочное (известное) сопротивление; R_0 – внутреннее сопротивление амперметра; A – амперметр магнитоэлектрической системы; U – напряжение питания; I – ток в схеме; "x" – x-зажимы, к которым подключается измеряемое сопротивление

Измерительный прибор, использованный в схеме на рис. 24.6, обозначен как амперметр. В действительности токи в цепи составляют тысячные и десятитысячные доли амперметра. Т. е. фактически используются миллиамперметры и микроамперметры магнитоэлектрической системы.

Показания прибора по схеме рис. 24.6 определяются следующими соотношениями:

$$\alpha = KI,$$

$$I = \frac{U}{R_0 + R_1 + R},$$

$$\alpha = KU\frac{1}{R_0 + R_1 + R}, \qquad (24.22)$$

где α – показание прибора;

K – коэффициент, характеризирующий чувствительность прибора;

U, R_0, R_1, R – определены выше.

Из выражения (24.22) следует, что показания прибора α обратно пропорциональны измеряемому сопротивлению R. Зависимость $\alpha = f(R)$ приведена на рис. 24.7.

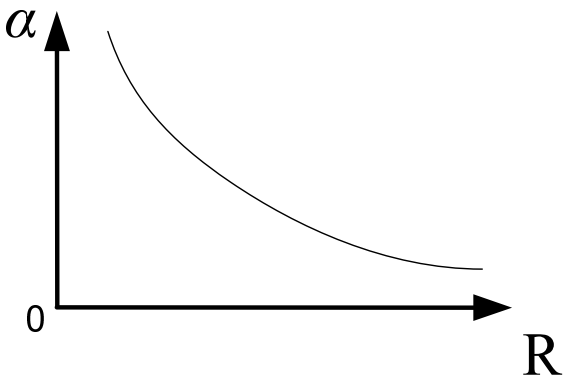


Рис. 24.7. График зависимости $\alpha = f(R)$ для «последовательного» омметра

Пример шкалы «последовательного» омметра приведен на рис. 24.8.

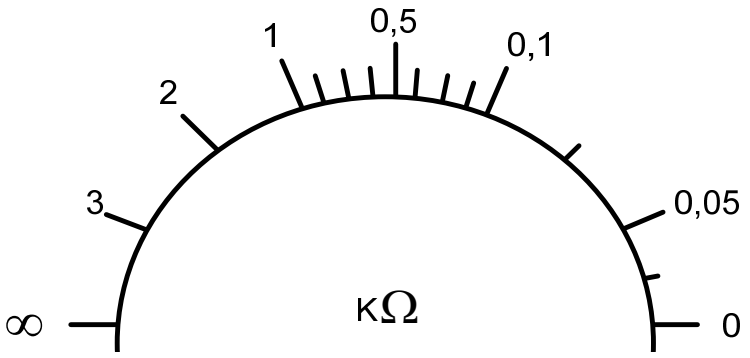


Рис. 24.8. Пример шкалы «последовательного» омметра

Выражение (24.22) и рис. 24.7 свидетельствуют, что при измеряемом сопротивлении $R = 0$ $\alpha = \alpha_{max}$; при $R \to \infty$ $\alpha \to 0$. Следует также отметить, что шкала рассматриваемого омметра градируется в единицах сопротивления, нелинейна и имеет ноль справа. «Последовательные» омметры используются, как правило, для измерения сравнительно больших сопротивлений (тысячи и миллионы ом). Соответственно на шкалу прибора наносятся единицы измерений “kΩ” (как на рис. 24.8) или “MΩ”.

Схема «параллельного» омметра приведена на рис. 24.9.

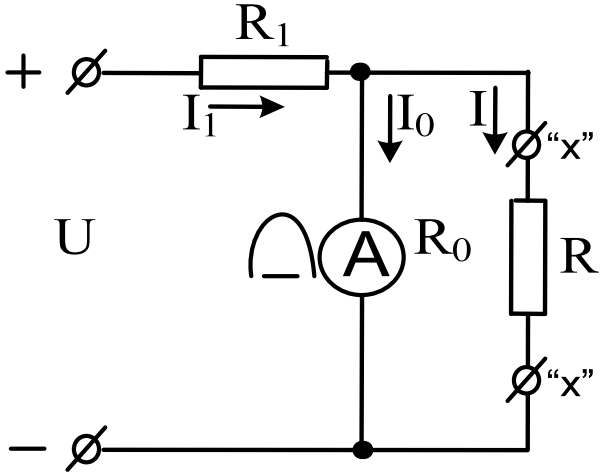


Рис. 24.9. Схема «параллельного» омметра:
R – измеряемое сопротивление; R_0 – внутреннее сопротивление амперметра;
R_1 – добавочное (известное) сопротивление; A – амперметр магнитоэлектрической системы; U – напряжение питания; I – ток через измеряемое сопротивление;
I_0 – ток через амперметр

Аналогично «последовательным» омметрам в цепях «параллельных» омметров протекают небольшие токи (миллиамперы и микроамперы), так что использование в схеме рис. 24.9 амперметра является несколько условным и применено для общности рассуждений.

Показания прибора по схеме рис. 24.9 определяются следующими соотношениями:

$$\alpha = kI_0$$

$$I_0 = \frac{U - I_1 R_1}{R_0},$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2},$$

$$R_2 = \frac{R_0 R}{R_0 + R_1},$$

$$\alpha = U \frac{kR}{R_1 R_0 + R(R_1 + R_0)}, \qquad (24.23)$$

где α – показание прибора;

k – коэффициент, характеризирующий чувствительность прибора;

U, R, R_0, R_1 – определены выше.

Из выражения (24.23) следует, что показания прибора α пропорциональны измеряемому сопротивлению R. Зависимость $\alpha = f(R)$ для рассматриваемого случая приведена на рис. 24.10.

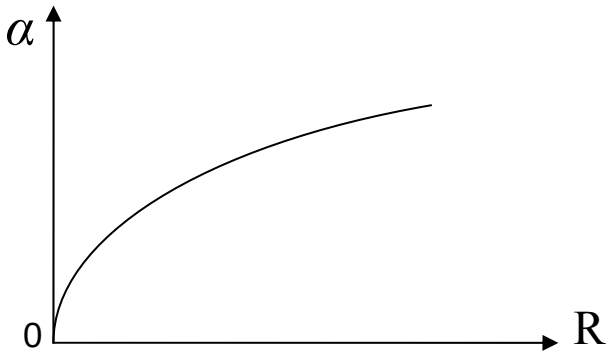


Рис. 24.10. График зависимости $\alpha = f(R)$ для «параллельного» омметра

Выражение (24.23) и рис. 24.10 свидетельствуют, что при значении измеряемого сопротивления, равном нулю, $\alpha = 0$, а при $R \to \infty$ $\alpha \to \alpha_{max}$. Шкала рассматриваемого омметра нелинейна и имеет ноль слева (рис. 24.11). Градуируется шкала в единицах сопротивления.

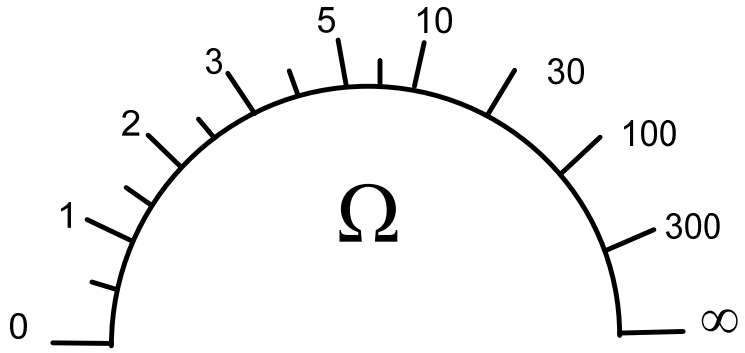


Рис. 24.11. Пример шкалы «параллельного» омметра

«Параллельные» омметры используются, как правило, для измерения сравнительно небольших сопротивлений (обычно это единицы, десятки и сотни ом). При больших значениях измеряемого сопротивления R (по сравнению с сопротивлением амперметра R_0) относительно значительные изменения R вызывают малое изменение показания прибора.

Метод одного вольтметра

Схема устройства, реализующего измерение сопротивления методом одного вольтметра, приведена на рис. 24.12. На этом рисунке приняты следующие обозначения:

U – напряжение питания;

V – вольтметр;

П – переключатель;

R – измеряемое сопротивление;

R_V – внутреннее сопротивление вольтметра;

I_1, I_2 – токи, протекающие в схеме при 1-м и 2-м положениях переключателя П.

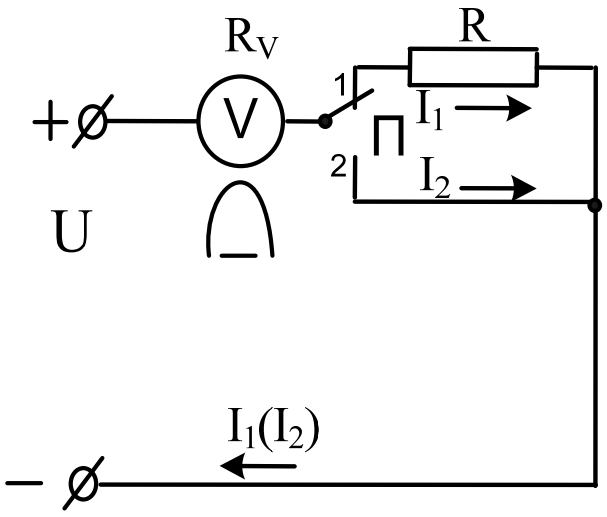


Рис. 24.12. Схема устройства при измерении сопротивления методом одного вольтметра

Показания прибора по схеме рис. 24.12 определяются нижеследующими соотношениями.

При переводе переключателя П в положение «1» ток в цепи I_1 будет иметь значение

$$I_1 = \frac{U}{R_V + R}. \qquad (24.24)$$

Показание вольтметра α_1 в этом случае запишется в виде

$$\alpha_1 = kI_1 = k\frac{U}{R_V + R} \qquad (24.25)$$

где k – коэффициент, характеризирующий чувствительность вольтметра.

При переводе переключателя П в положение «2» значение тока I_2 будет следующим:

$$I_2 = \frac{U}{R_V}. \tag{24.26}$$

Показание вольтметра α_2 в этом случае запишется в виде

$$\alpha_2 = kI_2 = k\frac{U}{R_V}. \tag{24.27}$$

Решая уравнения (24.25) и (24.27) относительно U, получим

$$U = \frac{\alpha_1(R_V + R)}{k}, \tag{24.28}$$

$$U = \frac{\alpha_2 R_V}{k}. \tag{24.29}$$

Приравнивая правые части равенств (24.28) и (24.29) и сокращая на k, получим

$$\alpha_1 = \left(R_V + R\right) = \alpha_2 R_V. \tag{24.30}$$

Решая соотношение (24.30) относительно R, окончательно получим соотношение

$$R = R_V \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1}, \tag{24.31}$$

где R – измеряемое сопротивление;

R_V – сопротивление вольтметра;

α_1 – показание вольтметра при переводе переключателя П в положение «1»;

α_2 – показание вольтметра при переводе переключателя П в положение «2».

Соотношение (24.31) правомерно, если напряжение питания U стабильно и не изменяется в ходе эксперимента по измерению искомого сопротивления.

Метод замещения

Схема устройства для измерения сопротивления методом замещения приведена на рис. 24.13, где приняты следующие обозначения:

U – напряжение питания;

И – измеритель;

К – ключ;

R – измеряемое сопротивление;

R_0 – магазин сопротивлений;

I_1, I_2 – токи в схеме (направление токов зависит от полярности напряжения питания);

R_g – добавочное сопротивление (ограничивает ток в цепи измерителя и при малых R).

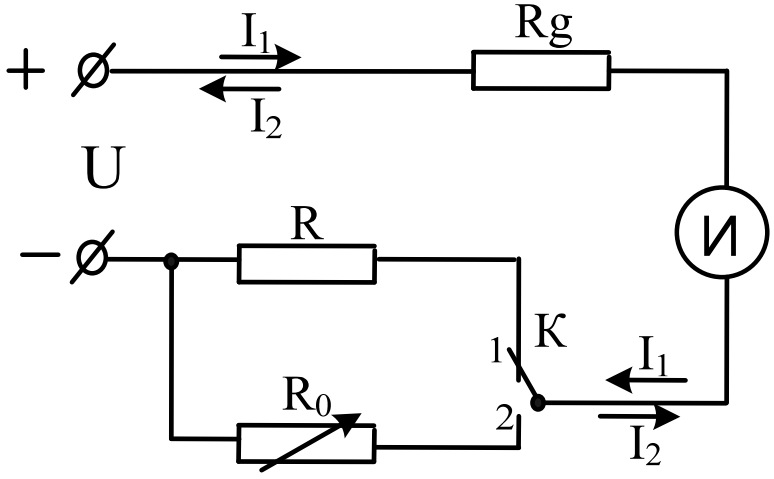


Рис. 24.13. Схема устройства для измерения сопротивления методом замещения

В качества измерителя «И» может быть использован миллиамперметр или вольтметр (миллиамперметр используется, если $R > 1$ кОм, и используется вольтметр, если измеряемое сопротивление $R < 1$ кОм).

Для проведения измерения сопротивления методом замещения необходимо выполнить нижеследующие операции.

Перевести ключ К в положение «1» и зафиксировать показания измерителя И при заданном напряжении питания U и заданном добавочном сопротивлении R_g.

Не меняя напряжение питания U и сопротивление R_g, перевести ключ К в положение «2». Изменяя сопротивление R_0, установить показание измерителя И

то же самое, что было в первом случае (при положении ключа К в позиции «1»).

При выполнении указанных условий измеряемое сопротивление R будет равно установленному сопротивлению R_0. Напомним, что R_0 представляет собой магазин сопротивлений, что позволяет набирать и удобно считывать набранные значения в широком диапазоне измерений. Например, магазин сопротивлений типа Р-33 позволяет набирать сопротивления от 0 до 99 999,9 Ом с шагом 0,1 Ом.

Измерение искомого сопротивления повторяется при смене полярности напряжения питания. Это делается с целью исключить влияние на результат контактных ЭДС и термоЭДС.

За результат измерения принимается среднее арифметическое значение по результатам двух экспериментов с разной полярностью напряжения питающего устройство источника питания.

Отметим, что добавочное сопротивление R_g необходимо при использовании в качестве измерителя И миллиамперметра и не требуется при использовании в качестве измерителя вольтметра.

24.4. Измерение больших сопротивлений

При измерении больших и особенно сверхбольших сопротивлений (например, сопротивление изоляционных материалов) необходимо считаться с тем, что сопротивление изоляции соединительных проводов соизмеримо с искомым сопротивлением. Для исключения больших погрешностей, возникающих из-за этого обстоятельства, в измерительные схемы вводят специальные «охранные кольца» и используются специфические методы измерений.

Наибольшее распространение для измерения больших сопротивлений получил метод вольтметра и амперметра, уже рассмотренный в п. 24.1 учебного пособия.

При измерении больших сопротивлений различают метод измерения объемных и метод измерения поверхностных сопротивлений. Рассмотрим оба метода более детально.

Измерение объемных сопротивлений

Схема устройства для измерения объемного сопротивления приведена на рис. 24.14.

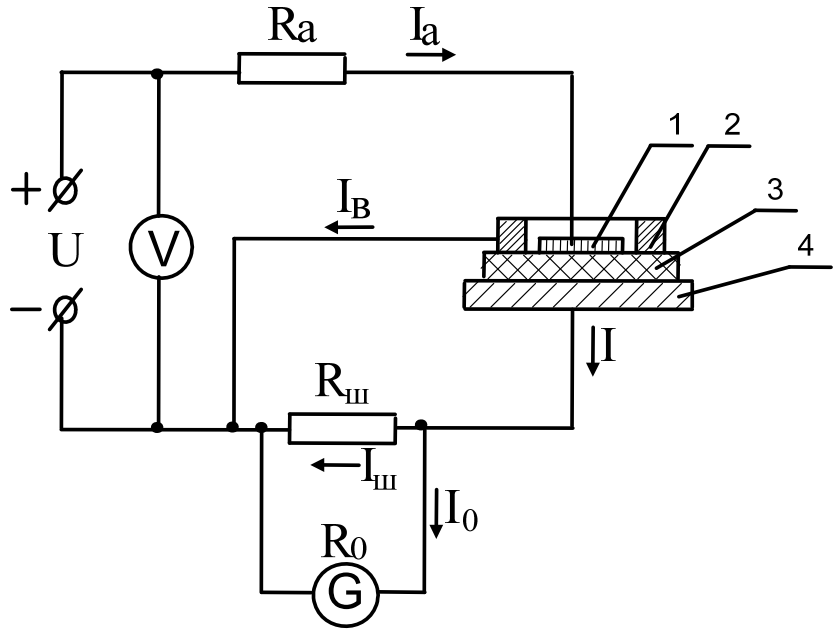


Рис. 24.14. Схема устройства для измерения объемного сопротивления:
1, 4 – контактные пластины; 2 – охранное кольцо; 3 – исследуемый образец;
U – напряжение источника питания; V – вольтметр; $R_а$ – защитное сопротивление;
$R_ш$ – сопротивление шунта; G – гальванометр; $R_о$ – внутреннее сопротивление гальванометра

Плоский образец изоляционного материала 3, объемное сопротивление которого измеряется, помещается между двумя металлическими (обычно – медными) электродами 1 и 4 (см. рис. 24.14).

К поверхности образца, на которой расположен электрод 1, прижат третий металлический электрод 2, выполненный в виде кольца («охранное кольцо»). Этот электрод («охранное кольцо») соединен с источником питания, как показано на рис. 24.13. Таким образом, через гальванометр G (вместе с шунтом $R_ш$) протекает тот же ток I, что и через измеряемое сопротивление. Отметим, что $I = I_а – I_в$ и что гальванометр градуируется вместе с шунтом и его показания соответствуют измеряемому току I. Шунт к гальванометру предусмотрен в связи с тем, что измеряемые сопротивления и соответственно ток I могут изме-

няться в широких пределах. Наличие шунта позволяет расширить диапазон измерения гальванометра, что расширяет возможности устройства в целом.

Защитное сопротивление R_a, предусмотренное в схеме, защищает устройство от возможных коротких замыканий. Обычно сопротивление R_a = 1 МОм. А поскольку устройство предназначено для измерения очень больших объемных сопротивлений, достигающих значений (10^{13}–10^{14}) Ом, то погрешность от введения в схему сопротивления R_a мала и практического значения не имеет.

Искомое объемное сопротивление образца определяется по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \tag{24.32}$$

где R – искомое объемное сопротивление исследуемого образца 3 (см. рис. 24.14);

U – показание вольтметра V;

I – показание гальванометра G.

Выражение (24.32) правомерно, если гальванометр проградуирован совместно с шунтом. В этом случае искомое объемное сопротивление исследуемого образца будет определяться соотношением

$$R = n\frac{U}{I_0}, \tag{24.33}$$

где n – коэффициент шунтирования, зависящий от значения сопротивлений $R_ш$ и R_0 (см. п. 22.2 учебного пособия);

I_0 – ток через гальванометр;

R, U – определены выше.

Измеритель G должен обеспечить измерение малых токов, значения которых могут быть не более 10^{-6}–10^{-9} А.

Использование в качестве G нормальных гальванометров магнитоэлектрической системы позволяет измерять объемные сопротивления R от 10^{14} Ом; использование баллистических гальванометров позволяет измерять значения R до 10^{16} Ом; использование в качестве измерителей электронных приборов позволяет повысить верхний предел измерения до 10^{17} Ом.

Измерение поверхностных сопротивлений

Схема устройства для измерения поверхностного сопротивления приведена на рис. 24.15.

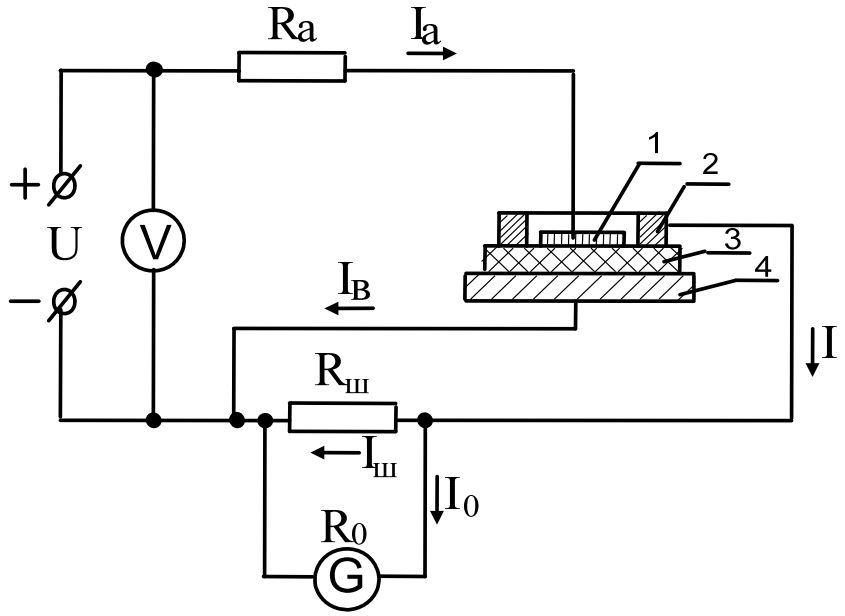


Рис. 24.15. Схема устройства для измерения поверхностного сопротивления:
1, 4 – контактные пластины; 2 – кольцевой электрод; 3 – исследуемый образец;
U – напряжение источника питания; V – вольтметр; $R_а$ – защитное сопротивление;
$R_ш$ – сопротивление шунта; G – гальванометр; R_0 – сопротивление гальванометра

Плоский образец изоляционного материала 3, поверхностное сопротивление которого измеряется, помещается между двумя металлическими электродами 1 и 4. К поверхности образца, на которой расположен электрод 1, прижат третий металлический электрод 2, выполненный в виде кольца. Как видно из схемы (см. рис. 24.15), через гальванометр G протекает ток I, идущий от электрода 1 к кольцевому электроду 2 по поверхности исследуемого образца, тогда как ток $I_в$, протекающий от электрода 1 к электроду 4 через толщу образца, минует цепь гальванометра. Поэтому отношение напряжения U к току I равно сопротивлению части поверхности образца, заключенной между электродом 1 и кольцом 2, т. е.

$$R = \frac{U}{I}, \tag{24.34}$$

где R – искомое поверхностное сопротивление исследуемого образца;

U, I – определены выше.

Сведения о подключении и градуировке гальванометра, а также о требованиях к чувствительности гальванометра уже приведены в пункте «Измерения объемных сопротивлений». Эти сведения целиком правомерны для рассматриваемого случая (при измерении поверхностного сопротивления) и, в силу этого, в данном пункте не рассматриваются.

Примеры стандартных приборов для измерения сопротивлений (малых, средних и больших), выпускаемых промышленностью, приведены в прил. 5 (см. табл. П. 5.1, П. 5.2 и П. 5.3).

Технические характеристики тераомметра типа Е6-14, рассматриваемые в качестве примера, приведены в табл. 24.3.

Таблица 24.3

Основные технические характеристики тераомметра типа Е6-14

Измеряемая величина	**Диапазон измерений, Ом**	**Допускаемая погрешность измерения**	**Габариты, мм Масса, кг**
Сопротивление постоянному току	$10^{17}…10^{17}$	± (4–10) % длины рабочей части шкалы	Прибора 320×210×295; Измерительной камеры 380×240×345; 14 (с измерительной камерой)

В данном пункте учебного пособия рассмотрена только часть методов, используемых для измерения сопротивлений (как малых, так и средних, и больших). Дополнительные сведения по методам измерения сопротивления можно найти в литературе, приведенной в библиографическом списке [1; 2; 5–7; 9; 36].

25. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

25.1. Общие положения

Температура характеризует тепловое состояние вещества. Оно определяется кинетической энергией поступательного движения молекул. Чем больше кинетическая энергия молекул, тем выше температура.

Верхний предел температуры пока не установлен. Примеры высоких температур: температура поверхности Солнца – примерно 6 000 °С; температура внутри Солнца – около $20 \cdot 10^6$ °С; еще более высокие температуры имеют белые и голубые звезды-карлики.

Нижний предел температуры соответствует такому состоянию вещества, при котором прекращается поступательное движение молекул. Это происходит при температуре, равной абсолютному нулю: 0 К или –273,15 °С. Абсолютный нуль – величина расчетная. Экспериментально достигнутая минимальная температура отличается от абсолютного нуля на сотые доли градуса.

Непосредственно воспринимать температуру человек может лишь качественно (холодно, тепло, горячо).

Для количественной оценки температуры необходимы технические средства. Технические средства преобразуют температуру с помощью термометрических тел к виду, удобному для восприятия человеком (в дальнейшем – оператором). Например, температура может преобразовываться в длину столбика ртути (ртутные термометры), в электрическое сопротивление (измерители температуры на основе термосопротивлений ТС), в термоЭДС (измерители температуры на основе термопар ТП) и т. д. Отметим, что электрическое сопротивление и термоЭДС не могут быть восприняты оператором непосредственно. Преобразователи ТС и ТП подключаются к вторичным приборам, с которых и производится отсчет показаний.

Для количественной характеристики теплового состояния вещества введены температурные шкалы. В настоящее время нашли практическое применение четыре шкалы: шкала Фаренгейта (используется в США), шкала Реомюра

(используется в Западной Европе); шкала Кельвина (используется в научных исследованиях); шкала Цельсия (используется в большинстве стран, в том числе и в России, как практическая шкала).

Рассмотрим перечисленные температурные шкалы. В 1715 г. немецкий физик Г.Д. Фаренгейт изготовил ртутный термометр и предложил температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Фаренгейта» и градуируемую в градусах Фаренгейта (°F). За градус Фаренгейта была принята температура смеси: лед + соль + нашатырь; температура тающего льда принята за +32 °F; температура кипящей воды принята за +212 °F. Температурный интервал от тающего льда до кипящей воды разделен на 180 частей, и 1/180 часть этого интервала принята за 1 °F.

В 1730 г. французский естествоиспытатель Р.А. Реомюр изготовил спиртовой термометр и предложил свою температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Реомюра», которая градуируется в «градусах Реомюра» (°R). Реомюр предложил разделить температурный интервал от температуры тающего льда (принятого за 0 °R) до температуры кипящей воды (принятой за +80 °R) на 80 частей. 1/80 часть этого интервала принята за 1°R.

В 1742 г. шведский физик и астроном Цельсий предложил стоградусную температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Цельсия». Цельсий предложил разделить температурный интервал от температуры тающего льда (принятой за 0 °C) до температуры кипящей воды (принятой за 100 °C) на 100 частей. 1/100 часть этого интервала принята за 1 °C.

Отметим, что температура тающего льда и температура кипящей воды соответствует нормальному атмосферному давлению (равному 760 мм рт. ст.).

В 1848 г. английский физик лорд Кельвин (до присвоения почетного титула лорда имел имя Уильям Томсон) ввел понятие абсолютного температурного нуля и предложил абсолютную температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Кельвина» или «абсолютная термодинамическая шкала». Единица измерения абсолютной температурной шкалы до 1967 г. именовалась «градус Кельвина» и обозначалась – 1°К. После 1967 г. единица изме-

рения абсолютной температурной шкалы стала именоваться «Кельвин» и обозначаться 1 К.

Основные реперные точки абсолютной температурной шкалы:

0 К – абсолютный ноль (–273,15 °С);

273,15 К – температура тающего льда (0 °С) при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.;

373,15 К – температура кипящей воды (100 °С) при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

Искомые значения, выраженные в единицах разных температурных шкал, связаны между собой соотношением

$$\theta_1\,^0\mathrm{C} = \frac{5}{4}\theta_2\,^0R = \frac{5}{9}(\theta_3 - 32)\,^0\mathrm{F} = (T - 273{,}15)\ \mathrm{K}, \qquad (25.1)$$

где θ_1, θ_2, θ_3 – значения температуры, выраженные (соответственно) в единицах шкал Цельсия, Реомюра, Фаренгейта;

T – значение термодинамической температуры, выраженное в единицах шкалы Кельвина.

Международная система единиц (СИ), узаконенная на территории Российской Федерации государственным стандартом ГОСТ 8.417–202 [116], использует в качестве основной единицы термодинамическую температуру. Кроме термодинамической температуры, допускается применять температуру Цельсия. Термодинамическую температуру, как уже отмечалось, выражают в кельвинах, температуру Цельсия – в градусах Цельсия. По размеру градус Цельсия равен кельвину (1 К = 1°С).

Использование температурных шкал Фаренгейта и Реомюра и соответственно выражение температуры в градусах Фаренгейта и Реомюра государственным стандартом [49] не предусмотрено.

В п. 1.4.2 учебного пособия приведено определение единицы измерения кельвин (см. табл. 1.1). Приведем это определение еще раз:

«Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды».

Тройная точка воды – это равновесное состояние трех фаз вещества: твердой, жидкой и газообразной (рис. 25.1, точка «А»).

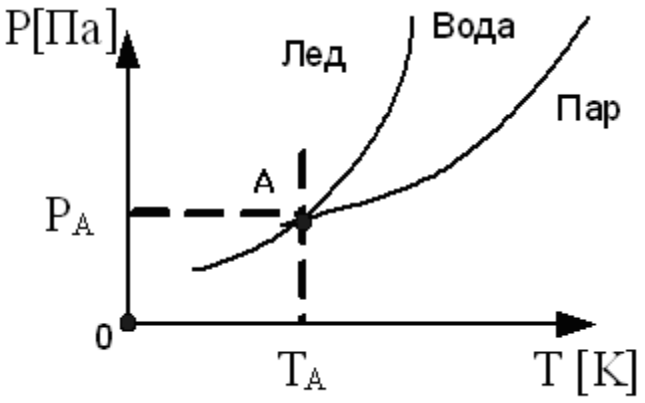


Рис. 25.1. Зависимость P = f(T) для воды:
P – давление; *T* – температура; *A* – тройная точка воды.

Температура тройной точки (точки одновременного сосуществования льда, воды и пара) T_A = +0,01 °С (273,16 К) при давлении P_A = 4,58 мм рт. ст. (610,6 Па).

Эталон для воспроизведения единицы температуры Кельвина хранится в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (эталон описан в учебных пособиях [3; 153; 154]).

Особенность температуры состоит в том, что она является неаддитивной физической величиной. Поэтому, если для измерения, например, длины, массы и других аддитивных величин можно ограничиться одним эталоном (эталоном метра, килограмма и др.), то для температуры воспроизведения одной эталонной точки недостаточно. Измерение температуры требует точного воспроизведения многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу. Температуры, определяемые по этой шкале, должны максимально совпадать с термодинамической шкалой Кельвина. Сформулированным требованием отвечает Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90). При этом основной реперной точкой шкалы остается кельвин (К), воспроизводимый в тройной точке воды. Эталон, воспроизводящий размер кельвина, был и остается «держателем» единицы температуры.

В табл. 25.1 приведены основные «приписанные» Международным комитетом по мерам и весам значения температур фазового равновесия веществ и материалов. Все значения температуры фазового равновесия даны для нормального атмосферного давления (P = 101 325 Па).

Таблица 25.1

Основные реперные точки по МТШ-90

Состояние фазового равновесия	**Значения по МТШ-90**	
	T_{90}, К	**t_{90},°С**
Давление насыщенных паров гелия	0,65…5	–272,50…–268,15
Тройная точка водорода	13,803	–259,346
Точка кипения водорода	20,280	–252,870
Тройная точка аргона	83,805	–189,344
Тройная точка ртути	234,315	–38,834
Тройная точка воды	273,16	+0,01
Точка кипения воды	373,15	100
Точка плавления индия	429,748	156,598
Точка плавления скандия	505,078	231,928
Точка плавления цинка	692,677	419,527
Точка плавления алюминия	933,473	660,323
Точка плавления серебра	1234,93	961,78
Точка плавления золота	1337,33	1064,18
Точка плавления меди	1357,77	1084,62

МТШ-90 охватывает область от 0,65 К до наивысшей температуры, практически доступной измерению в соответствии с законом излучения Планка (для монохроматического излучения). Приписанные значения температуры МТШ-90 обозначаются символом T_{90} при выражении температуры в кельвинах и символом t_{90} при выражении температуры в градусах Цельсия.

В соответствии с реперными точками, приведенными в табл. 25.1, созданы соответствующие эталоны для температур, лежащих выше и ниже температур тройной точки воды.

Измерение температуры может проводиться контактными и бесконтактными методами. При контактном методе измерения температуры измерители

температуры непосредственно контактируют со средой, температура которой измеряется. Приборы для контактного измерения температуры называются *термометрами*.

При бесконтактном измерении температуры измерители непосредственно со средой, температура которой измеряется, не контактируют. Измерение в этом случае осуществляется дистанционно. Приборы для бесконтактного (дистанционного) измерения температуры принято называть *пирометрами*.

25.2. Термометры

Термометрами принято называть приборы, используемые для контактного измерения температуры. Наибольшее распространение получили средства измерения температуры следующих типов:

1) жидкостные;
2) манометрические;
3) дилатометрические;
4) биметаллические;
5) электрические.

Электрические измерители температуры строятся на основе термочувствительных преобразователей (например, термосопротивлений или термопар), работающих совместно с вторичной аппаратурой. Термочувствительные преобразователи (датчики) и вторичная аппаратура уже рассмотрены выше и повторно в данном параграфе учебного пособия не приводятся.

Жидкостные термометры

На рис. 25.2 приведена одна из возможных конструкций жидкостного термометра.

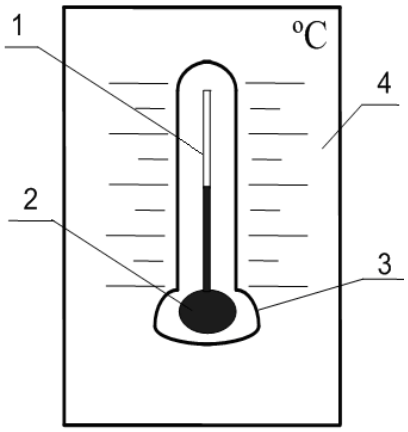


Рис. 25.2. Жидкостный термометр:
1 – капиллярная трубка; 2 – термометрическая жидкость; 3 – баллон (резервуар); 4 – шкала

Термометрическая жидкость 2 заполняет баллон 3 и часть капиллярной трубки 1. Свободное пространство в капилляре заполняется инертным газом под давлением или из него выкачивается воздух. Об измеряемой температуре судят по высоте жидкости в капилляре. Отсчет показаний производится по шкале 4. Шкала может быть нанесена на капилляр или может быть приложена к капиллярной трубке (как показано на приводимом рисунке).

Термометры с нанесенной на капилляр шкалой называются термометрами типа А («палочными»), а при отдельной прикладной шкале – типа Б (с вложенной шкальной пластиной).

Термометрические жидкости, используемые в жидкостных термометрах, и их основные характеристики приведены в табл. 25.2. Максимальная измеряемая температура приведена для двух случаев: свободное пространство над термометрической жидкостью в капиллярной трубке заполнено инертным газом под давлением от 5 до 7 МПа (обозначено 5–7 МПа) и из свободного пространства над жидкостью откачен воздух (обозначено 0 МПа).

Таблица 25.2

Основные характеристики термометрических жидкостей

Термометрическая жидкость	Измеряемая температура, °С		
	Минимальная	Максимальная	
		0 МПа	5–7 МПа
Ртуть	–35	350	900
Подкрашенный спирт	–100	+45	+79
Толуол	–90	+90	+111
Пентан технический	–200	+25	+36
Подкрашенный эфир	–100	+20	+35

Жидкостные термометры выпускаются трех разновидностей: промышленные (основные обозначения «ТП»); лабораторные («ТЛ»); образцовые («ТО»).

Промышленные термометры имеют шкалы с ценой деления от 0,5 до 10 °С и позволяют проводить измерение температуры с погрешностью от 0,5 до 10 °С.

Лабораторные термометры имеют цену деления шкалы от 0,2 до 2 °С и погрешность от 0,2 до 2 °С.

Образцовые термометры имеют цену деления шкалы от 0,01 до 0,1 °С и погрешность от 0,015 до 0,1 °С.

В качестве примера в прил. 12 приведены технические характеристики нескольких типов промышленных, лабораторных и одного образцового термометров.

Показания жидкостного термометра зависят не только от температуры баллона (резервуара), но и от температуры столбика жидкости в капилляре. Образцовые термометры и некоторые лабораторные градуируются при полном погружении термометра в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Если глубина погружения термометра не соответствует условиям градуировки, то появляется дополнительная погрешность, что необходимо учитывать.

Промышленные (называемые иногда «технические») и часть лабораторных термометров градуируются при частичном погружении на определенную глубину. Глубина погружения нормируется (см. прил. 12) и, как правило, приводится в паспортных данных конкретных типов термометров.

Для защиты от механических повреждений промышленные (технические) термометры часто помещают в защитную арматуру. Для удобства наблюдения сами термометры и защитная арматура к ним выпускаются прямыми и угловыми.

Выпускаются также ртутные электроконтактные термометры, предназначенные для сигнализации или поддержания заданной температуры. Термометры выпускаются с заданными постоянными контактами (ТЗК) или с подвижным контактом (ТПК). Кроме электроконтактных термометров, выпускаются бесшкальные термоконтакторы, которые настроены на определенные температуры замыкания электрических контактов. Дополнительные сведения по жидкостным термометрам и их паспортным данным можно найти в литературе [3; 32; 38].

Манометрические термометры

Схема манометрического термометра приведена на рис. 25.3.

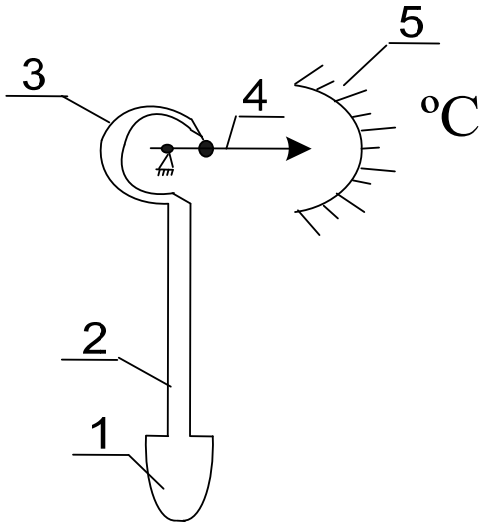


Рис. 25.3. Схема манометрического термометра:
1 – термометрический баллон; 2 – капиллярная трубка; 3 – трубчатая пружина (деформационный манометрический преобразователь); 4 – стрелка прибора; 5 – шкала, проградуированная в градусах Цельсия

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давления рабочего вещества в замкнутом объеме в зависимости от температуры чувствительного элемента (термометрического баллона).

Основными частями манометрических термометров являются термобаллон (чувствительный элемент), капиллярная трубка и трубчатая пружина (деформационный манометрический преобразователь), связанная со стрелкой прибора.

Различают три типа манометрических термометров: газовые, жидкостные и конденсационные.

В газовых приборах термобаллон и вся система заполняются газом (азотом, гелием или каким-либо другим инертным газом).

В жидкостных приборах термобаллон и вся система заполняются термометрической жидкостью с большим коэффициентом теплового расширения (ртуть, керосин, лигроин и др.). Могут также использоваться термометрические жидкости, приведенные в табл. 25.2.

В конденсационных приборах термобаллон на 2/3 заполняется жидкостью, кипящей при низких температурах (фреон, ацетон, CO_2 и др.). Оставшаяся часть термобаллона и вся система (капилляр и трубчатая пружина) заполняются при этом парами этой жидкости.

Газовые и жидкостные приборы имеют линейную шкалу. У конденсационных приборов шкала нелинейна.

При нагреве термобаллона газ или жидкость, находящиеся в нем, нагреваются и в системе создается повышенное давление. Трубчатая пружина 3 (см. рис. 25.3) под действием повышенного давления разворачивается и перемещает стрелку 4 вдоль оцифрованной шкалы 5. При понижении измеряемой температуры и соответственно температуры термобаллона давление жидкости или газа понижается, трубчатая пружина 3 под действием упругих сил сворачивается и стрелка 4 перемещается в сторону малых температур на шкале 5.

В конденсационных приборах при нагреве термобаллона усиливается испарение рабочей жидкости, за счет чего повышается давление паров и трубчатая пружина 3 разворачивается.

При понижении температуры термобаллона пары жидкости конденсируются и их давление понижается, что приводит к сворачиванию трубчатой пружины 3 и соответствующему перемещению стрелки 4.

При разворачивании и сворачивании трубчатой пружины развиваются значительные усилия, что позволяет нагружать подвижную часть манометрических термометров не только указательной стрелкой, но и электрическими контактами.

Газовые манометрические термометры выпускаются на температуры от -200 °С до +600 °С с классом точности (1,0–1,5).

Жидкостные приборы выпускаются на температуры от –50 °С до +600 °С класса точности (1,5–2,5).

Конденсационные приборы выпускаются на температуры от 0 °С до +400 °С класса точности (1,5–2,5).

Капиллярная трубка 2 (см. рис. 25.3) для всех типов манометрических термометров имеет длину от 1–2 м до 20–25 м и даже более, что позволяет использовать эти приборы для дистанционных измерений температуры.

В качестве примера в прил. 13 приведены технические характеристики нескольких типов газовых, жидкостных и конденсационных манометрических термометров. Дополнительные сведения по рассмотренным приборам можно найти в литературе [3; 32; 38].

Дилатометрические термометры

Схема дилатометрического термометра приведена на рис. 25.4.

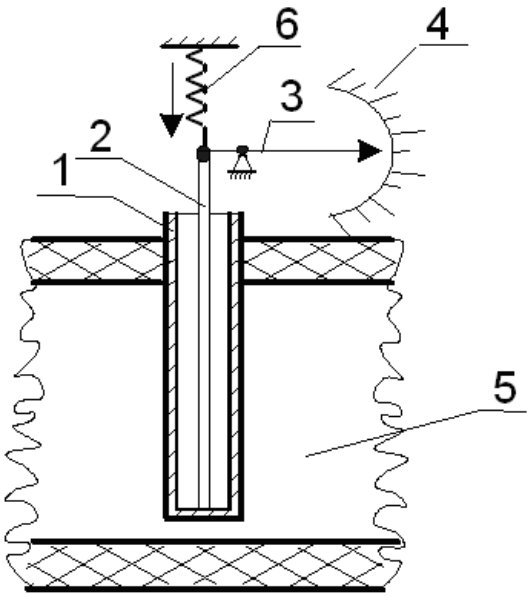


Рис. 25.4. Схема дилатометрического термометра:
1 – термочувствительный стакан; 2 – шток; 3 – стрелка; 4 – шкала;
5 – исследуемая среда; 6 – пружина (прижимает шток ко дну стакана)

Термометрический стакан 1 и шток 2 изготовляются из материалов, имеющих различные коэффициенты линейного температурного расширения α_1 и α_2. Обычно стакан изготовляют из алюминия ($\alpha_1 = 23 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$), а шток – из инвара (железоникелевого сплава) ($\alpha_2 = 1 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$). Таким образом, при изменении температуры исследуемой среды 5 длина стакана 1 изменяется значительно больше, чем длина штока 2. Шток прижимается пружиной 6 к дну стакана.

При увеличении температуры стакан удлиняется и шток (под действием пружины) вместе с концом стрелки, жестко скрепленной со штоком, перемещается вниз. При уменьшении температуры длина термометрического стакана уменьшается и шток (вместе с концом стрелки), преодолевая сопротивление пружины 6, перемещается вверх.

Стрелка 3 перемещается вдоль шкалы, проградуированной в градусах Цельсия, по которой и производится отсчет показаний.

При температурных деформациях стакана 1 развиваются значительные усилия, что позволяет нагружать подвижную часть прибора электрическими контактами и строить на его основе терморегуляторы.

Дилатометрические термометры работают в диапазоне температур от 0 °С до 1000 °С с погрешностью до ±5 %. Из-за большой погрешности дилатометрических устройств их редко используют в качестве термометров. Чаще их используют как терморегуляторы, термовыключатели и тепловые реле.

К достоинствам рассматриваемых устройств следует отнести их дешевизну, надежность и большие перестановочные усилия. Недостаток устройств – малая точность и большая инерционность.

Дополнительные сведения по дилатометрическим термометрам приведены в литературных источниках, представленных в библиографическом списке (см., например, [57]).

Биметаллические термометры

Схема биметаллического термометра приведена на рис. 25.5.

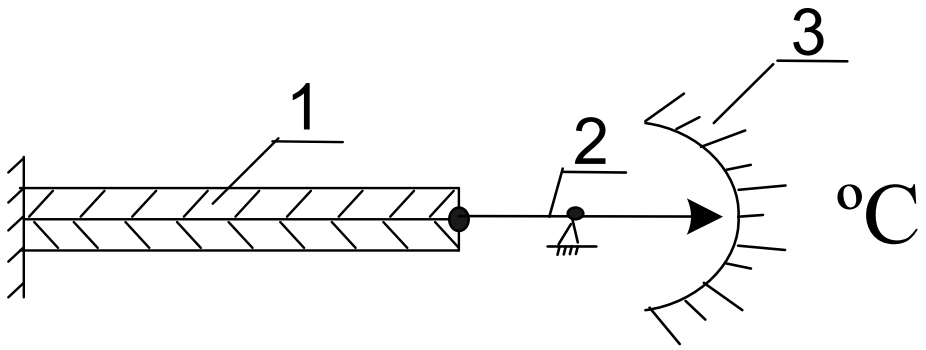


Рис. 25.5. Схема биметаллического термометра:
1 – двухслойная металлическая лента; 2 – стрелка (указатель); 3 – шкала

Биметаллические термометры состоят их двухслойных металлических лент (сваренных или спаянных между собой), образованных материалами с различными коэффициентами линейного температурного расширения. Наибольшее распространение получили латунь (сплав меди и цинка) и инвар (железоникелевый сплав).

При нагревании биметаллических элементов 1 происходит их деформация, которая используется для приведения в действие стрелки 2, перемещающейся вдоль оцифрованной шкалы 3.

Для плоской биметаллической пластины перемещение ее свободного конца при консольном закреплении:

$$x = S\Delta\theta \tag{25.2}$$

$$S = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)l^2}{4h}, \tag{25.3}$$

где x – перемещение свободного конца биметаллической пластины;

S – чувствительность;

$\Delta\theta$ – приращение температуры;

α_1, α_2 – температурные коэффициенты линейного расширения сваренных (или спаянных) пластин;

l – общая длина пластин;

h – общая толщина пластин.

Биметаллические термометры используются в диапазоне температур от 0 до 500 °С. Погрешность измерения температуры такими термометрами велика и может достигать ±5 %. Из-за большой погрешности биметаллические устройства редко используют для измерения температуры. Чаще их применяют в качестве чувствительных элементов в терморегуляторах (например, в утюгах), а также в качестве элементов компенсации температурных погрешностей приборов. К достоинствам рассматриваемых устройств следует отнести их дешевизну, надежность и большие перестановочные усилия, что позволяет нагружать их сравнительно мощными электрическими контактами. К недостаткам следует отнести малую точность и большую инерционность.

В заключение отметим особенности измерения температуры контактным методом с использованием рассмотренных термометров.

Во всех термометрах чувствительный элемент (ЧЭ) соприкасается с контролируемой средой, температура которой измеряется. При этом температура ЧЭ (в идеале) должна совпадать с температурой среды. Совпадение этих температур зависит от многих факторов, в том числе от размеров, формы и материала ЧЭ и от условий передачи тепла от среды к ЧЭ.

Передача тепла может происходить путем конвекции, лучеиспускания и теплопроводности. Теплообмен путем конвекции имеет место при измерении температуры жидкостей и газов.

При измерении температуры твердых тел в основе передачи тепла лежит теплопроводность.

Очевидно, что для улучшения теплообмена между ЧЭ и средой необходимо увеличивать площадь их соприкосновения. При измерении температуры жидкости и газов к этому требованию добавляется необходимость увеличивать теплопередачу путем, например, увеличения скорости обтекания ЧЭ средой.

При изменении температуры исследуемой среды возникают динамические погрешности. Под динамической погрешностью понимают запаздывание в показаниях термометра, вызванное конечной скоростью передачи тепла от исследуемой среды к ЧЭ. Подробно этот вопрос рассмотрен в главе 10 учебного пособия, где рассматривается динамика термочувствительных датчиков, которые выступают в качестве ЧЭ соответствующего термометра.

Более детально с методами контактного измерения температуры и с используемыми при этом термометрами можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 3; 8; 32; 33; 37; 38; 57–59].

25.3. Пирометры

Пирометрами называют приборы для бесконтактного измерения температуры. Работа пирометров основана на использовании энергии теплового излучения нагретых тел. Оно характеризуется распространением электромагнитных излучений, которые могут восприниматься другими телами. Электромагнитные излучения имеют широкий частотный спектр (от ультрафиолетового до инфракрасного). Пирометры используют все части спектра, но наибольшее распространение получили приборы, работающие в оптической (видимой) и инфракрасной частях спектра.

По принципу действия различают следующие типы пирометров:

1) оптические;
2) радиационные;
3) яркостные;
4) цветовые и некоторые другие.

Оптические пирометры работают в оптической (видимой) части спектра. В этих приборах интенсивность свечения исследуемого тела (температура которого измеряется) сравнивается с интенсивностью свечения нити лампы накаливания.

Радиационные пирометры основаны на измерении интенсивности интегрального (суммарного) излучения во всем спектре (от ультрафиолетового излучения до инфракрасного).

Яркостные пирометры основаны на измерении спектральной интенсивности излучения в определенной части спектра.

Цветовые пирометры основаны на измерении отношения спектральной интенсивности в двух частях спектра.

Ниже приводятся описания оптических и радиационных пирометров.

Оптические пирометры

Схема оптического пирометра приведена на рис. 25.6.

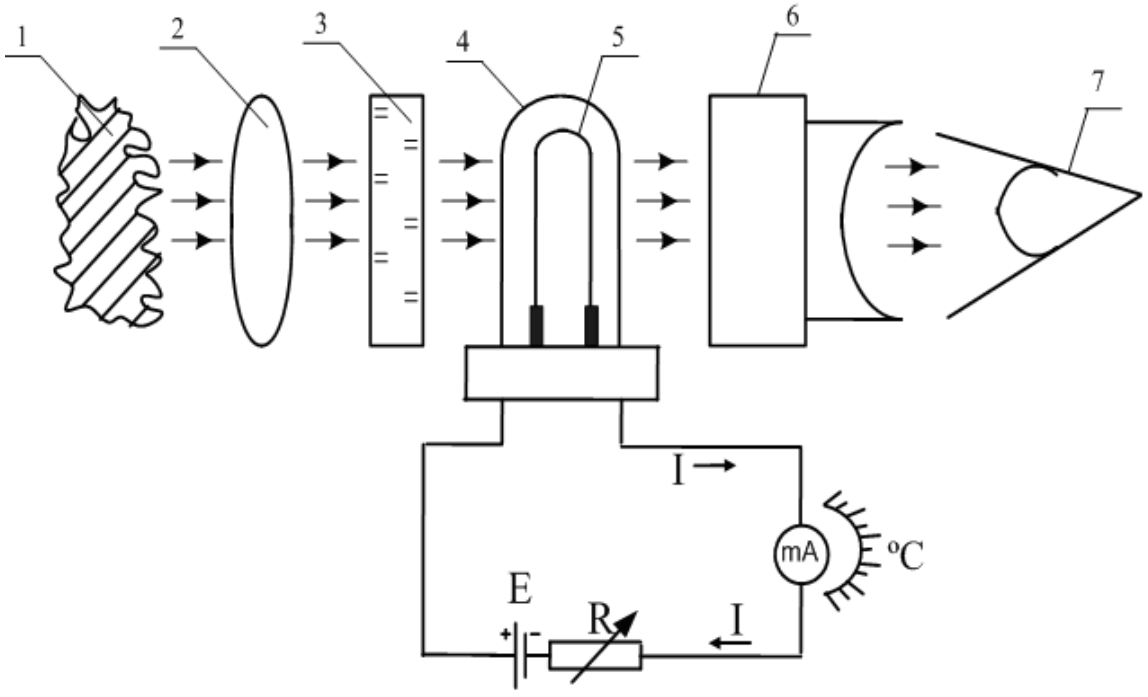


Рис. 25.6. Схема оптического пирометра:
1 – исследуемый объект, температура которого измеряется;
2 – оптическая система; 3 – светофильтр; 4 – термометрическая лампа;
5 – нить накаливания; 6 – окуляр; 7 – глаз оператора;
E – ЭДС источника питания; *R* – переменное сопротивление;
I – ток в цепи; mA – миллиамперметр, проградуированный в градусах Цельсия

Для проведения измерения оператор должен направить пирометр на исследуемый объект, температура которого измеряется. При этом оператор видит одну их трех картинок (рис. 25.7, *a*, рис. 25.7, *b*, рис. 25.7, *c*).

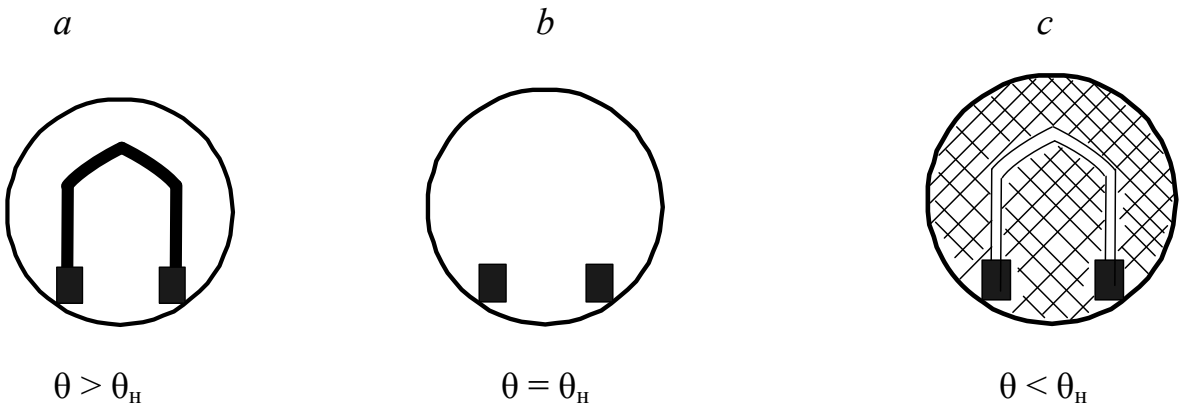


Рис. 25.7. Характерный вид «картинок» при проведении измерений:
$\theta_н$ – температура исследуемого тела; $\theta_н$ – температура нити накаливания;
a – измеряемая температура больше температуры нити накаливания термометрической лампы; *b* – измеряемая температура равна температуре нити накаливания термометрической лампы; *c* – измеряемая температура меньше температуры нити накаливания термометрической лампы

Если температура исследуемого тела 1 больше температуры нити накаливания 5 термометрической лампы 4, то оператор видит в окуляре 6 темную нить на светлом фоне (рис. 25.7, *a*). Яркость свечения нити регулируется переменным сопротивлением *R* (см. рис. 25.6). Оператор изменяет сопротивление *R* до тех пор, пока нить не сольется с фоном, который дает исследуемый объект (рис. 25.7, *b*). В этом случае температура нити накаливания равна температуре исследуемого объекта, что достигается при вполне определенном токе *I*, протекающем по нити накаливания и по миллиамперметру под воздействием ЭДС источника питания.

При измеряемой температуре меньшей температуры нити накаливания оператор видит в окуляре светлую нить на темном фоне (рис. 25.7, *c*). В этом случае с помощью переменного сопротивления *R* уменьшается ток *I* до тех пор, пока нить накаливания не сольется с фоном от объекта исследования.

Отсчет показаний проводится по миллиамперметру (mA), проградуированному в градусах Цельсия. Градуировка проводится по абсолютному черному телу, что приводит к дополнительным погрешностям из-за неполноты излуче-

ния реальных физических тел (излучения реальных физических тел меньше излучения абсолютно черного тела).

Нижний предел измерения оптических пирометров органичен порогом светимости тел при нагревании. Тела начинают светиться при температуре около 600 °С. При этой температуре появляется слабое малиновое свечение, которое трудно уловить и трудно сравнить со свечением нити накаливания. Во избежание значительных погрешностей нижний предел измерения выбирается больше порога светимости. Как правило, нижний предел измерения оптических пирометров равен 800 °С.

Нить термометрической лампы допустимо накаливать до определенной температуры (обычно не более 1400 °С). Для увеличения верхнего предела измеряемых температур в пирометр вводится светофильтр 3 (иногда – несколько светофильтров с разной оптической плотностью для уменьшения светимости исследуемого тела в определенное число раз).

Промышленность выпускает различные типы оптических пирометров, с разными пределами измерения. Например, известен оптический пирометр типа ОППИР-017 с диапазоном от 800 до 6000 °С. Диапазон измерения разбит на пять следующих поддиапазонов:

(800–1400) °С – 1-й поддиапазон измерений;

(1400–3000) °С – 2-й поддиапазон измерений;

(3000–4000) °С – 3-й поддиапазон измерений;

(4000–5000) °С – 4-й поддиапазон измерений;

(5000–6000) °С – 5-й поддиапазон измерений.

Измерения на 1-м поддиапазоне проводятся без светофильтра; измерения на 2-м поддиапазоне проводятся с использованием светофильтра Ф1; на 3-м поддиапазоне – со светофильтром Ф2; на 4-м поддиапазоне – со светофильтром Ф3 и на 5-м – со светофильтром Ф4. Погрешность измерения зависит от поддиапазона измерений и составляет от 1,0 до 2,0 %.

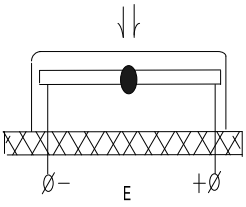
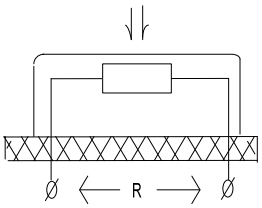
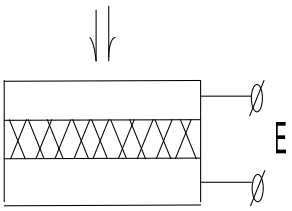
Описание и технические характеристики оптического пирометра «Проминь» приведены в прил. 14.

Радиационные пирометры суммарного излучения

Радиационные пирометры этого типа называют также пирометрами интегрального или полного излучения. Приемниками излучения в радиационных пирометрах суммарного излучения могут быть термобатареи (набор термопар); термосопротивления, в том числе полупроводниковые термисторы; пироэлектрические кристаллы (табл. 25.3). Приемники суммарного или полного излучения отличаются тем, что их спектральная чувствительность постоянна в широком диапазоне длин волн от дальней инфракрасной области до ближней ультрафиолетовой.

Таблица 25.3

Основные характеристики приемников суммарного (полного) излучения

Тип	**Термобатареи**	**Термосопротивления**	**Пироэлектрические приемники**
Принципиальная схема			
Инерционность, с	10^{-2}	10^{-3}	10^{-7}
Достоинства	Высокая временная стабильность	Большая чувствительность	Малая инерционность
Недостатки	Большая инерционность	Необходимость источника питания	Потеря работоспособности выше точки Кюри

Термобатареи выполняются на основе термопар, соединенных последовательно (до 20 термопар). Их горячие спаи располагаются на малом участке поверхности, на которой фокусируется излучение. Выходным параметром термобатареи является термоЭДС «±E».

Термосопротивления (полное наименование – «термопреобразователи сопротивления») изготавливаются из металлической фольги (обычно из материала пластины) либо из полупроводниковых материалов (термистов). В иностранной литературе термопреобразователи сопротивления (ТС) обычно назы-

вают *болометрами*. В отечественной технической литературе термин «болометр» иногда используется для обозначения полупроводниковых ТС. Выходным параметром ТС является активное сопротивление *R*.

Пироэлектрические приемники излучения – это кристаллы, в которых при изменении температуры появляется эффект спонтанной поляризации. Поэтому эти приемники излучения не требуют дополнительных источников питания. Пироэлектрические свойства проявляются в таких материалах, как монокристаллы триглицинсульфата и ниобата бария-стронция, монокристаллы и керамика титаната бария и некоторых других. При температуре выше точки Кюри поляризация исчезает. Для монокристаллов триглицинсульфата точка Кюри соответствует температуре +49 °С.

Фотоэлектрические приемники излучения (широко используемые в пирометрии) для пирометров суммарного излучения не применяются, т. к. их спектральная чувствительность неодинакова для различных длин волн и наиболее велика в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

Схема радиационного пирометра суммарного излучения приведена на рис. 25.8.

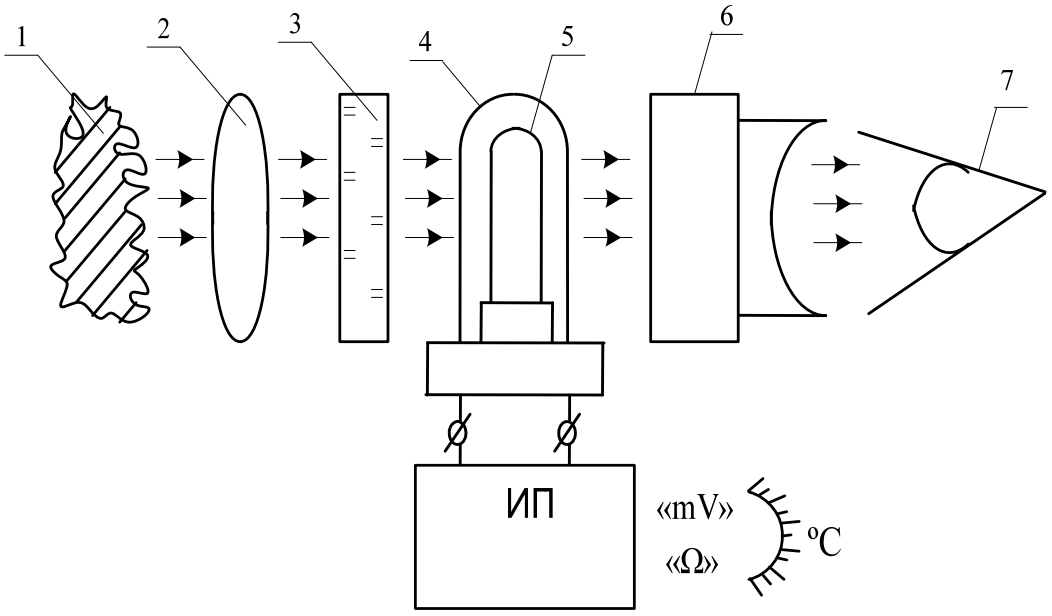


Рис. 25.8. Схема радиационного пирометра суммарного излучения:
1 – исследуемый объект, температура которого измеряется; 2 – оптическая система; 3 – светофильтр; 4 – термометрическое устройство; 5 – термочувствительный элемент; 6 – окуляр; 7 – глаз оператора; ИП – измерительный прибор (милливольтметр «mV» или омметр «Ω» в зависимости от типа термочувствительного элемента)

Работа описываемого пирометра протекает в следующей последовательности. Оператор через окуляр 6 направляет прибор на исследуемый объект. При этом суммарное излучение от исследуемого объекта 1 поступает на оптическую систему 2, которая направляет его через светофильтр 3 (вместо светофильтра может использоваться диафрагма) на приемник излучения 5. Приемник излучения может представлять собой, как уже отмечалось, батарею термопар, термосопротивление или пироэлектрический элемент.

Приемник излучения преобразует излучение в электрический сигнал (в темроЭДС, или в пироЭДС, или в электрический параметр (сопротивление)). Полученный электрический сигнал подается на электроизмерительный прибор ИП, проградуированный в единицах температуры (в градусах Цельсия). При использовании параметрических датчиков излучение преобразуется в сопротивление, для измерения которого может быть использован один из методов измерений сопротивления, описанных в главе 24 учебного пособия. Чаще используются мостовые методы измерения (в том числе автоматические мосты), но могут использоваться и обычные омметры, проградуированные в градусах Цельсия. При измерении термоЭДС и пироЭДС используются автоматические потенциометры, но могут быть применены стандартные аналоговые и цифровые милливольтметры, проградуированные в градусах Цельсия.

Конструктивно оптическая система, светофильтр, диафрагма, термочувствительный элемент и окуляр, как правило, составляют самостоятельный блок пирометра, который принято называть «телескоп». Измерительные приборы (ИП) образуют отдельный, самостоятельный блок пирометра.

Принципиально показания радиационного пирометра не должны зависеть от расстояния до исследуемого объекта при условии, что изображение излучающей поверхности полностью перекрывает термочувствительный элемент. Однако при близком расположении телескопа от излучающей поверхности происходит нагрев его корпуса, что вызывает дополнительные температурные погрешности или даже может вывести телескоп из строя. При большом удалении начинает сказываться столб атмосферного воздуха между объектом и теле-

скопом, который поглощает часть излучения. Особенно значительно возрастает поглощение излучения, если в воздухе присутствует пыль, дым, пар, углекислый газ или окись углерода. Наличие стекла между телескопом пирометра и излучателем также увеличивает погрешность измерения.

Нижний предел измеряемых температур для радиационных пирометров суммарного излучения составляет от 20–30 °С до 100–400 °С. Верхний предел измерения может быть от сотен до нескольких тысяч градусов Цельсия.

Для измерения температур в широком диапазоне выпускаются радиационные пирометры нескольких типов. Среди них, например, радиационные пирометры типа РАПИР с телескопом типа Тера-50, позволяющие бесконтактно измерять температуру от +100 до 400 °С с погрешностью от 4 до 8 %.

В прил. 15 приводится описание телескопа пирометра суммарного излучения типа ПИРС-019 с усилителем для бесконтактного измерения радиационной температуры поверхностей нагретых тел в диапазоне от +20–300 °С с погрешностью от ± 2,0 до ± 4,5 °С.

Более подробно с методами бесконтактного измерения температуры и с используемыми при этом средствами измерений можно ознакомиться по литературным источникам [1–3; 32–38; 57–59].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительно ограниченный объем учебного пособия не позволил рассмотреть все вопросы, возникающие при изучении метрологии и технических измерений. Степень важности опущенных или кратко рассмотренных вопросов различна. Одни из них носят чисто познавательный характер (например, история развития метрологии), другие – производственный (например, технология изготовления средств измерений), третьи имеют сугубо теоретический аспект (например, теоретические основы случайных погрешностей). При необходимости углубленные сведения по затронутым вопросам можно найти в литературных источниках, приведенных в обширном библиографическом списке [1–61].

Вопросы истории развития метрологии более подробно, чем в учебном пособии, изложены в литературе [10; 11].

Теоретическая метрология и вопросы обработки результатов измерений рассмотрены сравнительно кратко. При необходимости информацию в данных областях можно найти в [10; 11; 13; 27–30].

Поверка средств измерений, их калибровка, метрологическая аттестация и градуировка изучаются, обычно, в прикладной метрологии, и в настоящем пособии этим вопросам уделено мало внимания. Дополнительные сведения об этом приведены в [22].

Вопросы погрешностей средств измерений и погрешностей результатов измерений рассмотрены в пособии более или менее детально. Углубленные сведения по погрешностям можно почерпнуть в [7–11; 13; 19–21].

В учебном пособии рассмотрены лишь основные типы датчиков, что естественно при современном их многообразии. Дополнительные сведения о датчиках, о принципах их построения, применения и сопряжения с ЭВМ приведены в [3; 8; 32–34; 37; 38; 50].

Мостовые измерительные схемы рассмотрены в данном учебном пособии лишь с одной точки зрения – с точки зрения включения в них параметрических

датчиков. Более общий подход к мостовым измерительным схемам изложен в [35; 60].

Дополнительные сведения по электроизмерительным приборам можно почерпнуть в [6–9; 35; 36; 61].

Метрология и технические измерения относятся к областям, которые стремительно развиваются. Это приводит к тому, что учебники и учебные пособия быстро устаревают. Отсюда большое значение приобретает знакомство студентов с периодической литературой. Для облегчения поиска необходимой информации в библиографическом списке приведены ссылки на журнальные статьи [39; 40; 43].

Точностными характеристиками средств измерений и результатов измерений в настоящее время является погрешности. Существует предложение перейти на новую точностную характеристику – «неопределенность». В учебном пособии показано, что такой переход (от «погрешностей результатов измерений» к «неопределенностям результатов измерений) возможен при рассмотрении результатов измерений. Что же касается средств измерений, то переход от их погрешностей к неопределенностям затруднен (если вообще возможен). Нормативные документы по неопределенности, а также периодические издания по этой теме приведены в библиографическом списке [39–43].

Методы измерения электрических и неэлектрических величин и используемые при этом средства измерений рассмотрены сравнительно кратко. Дополнительные сведения по методам и средствам измерений можно найти в литературе [1–9; 18; 19; 33–37; 57; 58; 61–65].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Основы метрологии и электрические измерения**: учебник для вузов / под ред. Е.М. Душина. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

2. **Измерения электрических и неэлектрических величин**: учеб. пособие / под ред. Н.Н. Евтихаева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

3. **Туричин, А.М.** Электрические измерения неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / А.М. Туричин. – М.; Л. : Энергия, 1966. – 690 с.

4. **Методы электрических измерений**: учеб. пособие для вузов / под ред. Э.И. Цветкова. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

5. **Куликовский, К.Л.** Методы и средства измерений: учеб. пособие для вузов / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

6. **Метрология и радиоизмерения**: учебник для вузов / под ред. В.И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2003. – 526 с.

7. **Раннев, Г.Г.** Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 5-е изд., стер. – М. : Издат. центр «Академия», 2008. – 336 с.

8. **Миронов, Э.Г.** Метрология и технические измерения: учеб. пособие / Э.Г. Миронов, Н.П. Бессонов. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2005. – 299 с.

9. **Дворяшин, Б.В.** Метрология и радиоизмерения: учеб. пособие / Б.В. Дворяшин. – М. : Издат. центр «Академия», 2005. – 304 с.

10. **Кузнецов, В.А.** Основы метрологии: учеб. пособие / В.А. Кузнецов, Г.А. Ялунина. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 336 с.

11. **Кузнецов, В.А.** Метрология / В.А. Кузнецов, Л.К. Исаев, И.А. Шайко. – М. : Стандартинформ, 2005. – 300 с.

12. **Шишкин, И.Ф.** Теоретическая метрология: учебник для вузов / И.Ф. Шишкин. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.

13. **Маликов, М.Ф.** Основы метрологии / М.Ф. Маликов. – М. : Комитет по делам мер и измерительных приборов, 1949. – 290 с.

14. **Марков, Н.С.** Основы теории обработки результатов измерений / Н.С. Марков. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 176 с.

15. **Миронов ,Э.Г.** Основы метрологии: учеб. пособие для вузов / Э.Г. Миронов. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2000. – 113 с.

16. **Сергеев, А.Г.** Метрология: учеб. пособие для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – М. : Логос, 2000. – 408 с.

17. **Лифиц, И.М.** Основы стандартизации, метрологии и сертификации: учебник для вузов / И.М. Лифиц. – М. : Юрайт, 2001. – 286 с.

18. **Тартаковский, Д.Ф.** Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учебник для вузов / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М. : Высшая школа, 2001. – 205 с.

19. **Радкевич, Я.М.** Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. – М. : Высшая школа, 2004. – 767 с.

20. **Земельман, М.А.** Метрологические основы технических измерений / М.А. Земельман. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 288 с.

21. **Рабинович, С.Г.** Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. – Л. : Энергия, 1978. – 262 с.

22. **Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники** / под ред. В.А. Кузнецова. – М. : Радио и связь, 1990. – 240 с.

23. **Багаев, Е.** Всякое дело мера красит / Е. Багаев // Наука и жизнь. 1998. № 2. С. 102–107.

24. **Власов, А.Д.** Единицы физических величин в науке и технике: справочник / А.Д. Власов, Б.П. Мурин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.

25. **Деньгуб, В.М.** Единицы величин: словарь-справочник / В.М. Деньгуб, В.Г. Смирнов. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 240 с.

26. **Основные термины в области метрологии**: словарь-справочник / под ред. Ю.В. Тарбеева. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 113 с.

27. **Балакирев, В.С.** Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин. – М. : Энергия, 1967. – 206 с.

28. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей: учебник для вузов / Е.С. Венцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

29. **Диткин, В.А.** Справочник по операционному исчислению / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М. : Высшая школа, 1995. – 260 с.

30. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров: пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

31. **Бронштейн, И.Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1964. – 608 с.

32. **Левшина, Е.С.** Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

33. **Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC**: пер. с англ. / под ред. У. Топкинса. – М. : Мир, 1992. – 592 с.

34. **Васин, Н.Н.** Устройства связи с объектом автоматизации на базе IBM PC / Н.Н. Васин. – Самара : СГАУ, 1994. – 56 с.

35. **Харт, Х.** Введение в измерительную технику: пер. с нем. / Х. Харт. – М. : Мир, 1999. – 391 с.

36. **Классен, К.Б.** Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике: пер. с англ. / К.Б. Классен. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.

37. **Агейкин, Д.И.** Датчики контроля и регулирования / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.

38. **Васин Н.Н.** Датчики автоматизированных величин: учеб. пособие / Н.Н. Васин. – Самара : РИП «Кредо», 1987. – 34 с.

39. **Миронов, Э.Г.** Погрешности и неопределенности измерений / Э.Г. Миронов, В.А. Фирсанов // Практика приборостроения, 2004. № 2. С. 79–84.

40. **Кузнецов, В.П.** Сопоставительный анализ погрешности и неопределенности измерений / В.П. Кузнецов // Измерительная техника. 2003. № 8. С. 21–27.

41. **Руководство по выражению неопределенности измерения**: пер. с англ / под ред. В.А. Слаева. – СПб. : ВНИИМ, 1999. – 20 с.

42. **РМГ 43–2001. ГСОЕИ.** Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». Рекомендации межгосударственные. Введ. с 01.01.2003 впервые. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 38 с.

43. **Тарбеев, Ю.В.** Проблемы применения в России межгосударственного руководства по выражению неопределенности измерений / Ю.В. Тарбеев, А.В. Слаев, А.Г. Чуновкина // Измерительная техника. – 1997. №2. С. 69–72.

44. **ГОСТ 8.009–84.** ГСИ. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 34 с.

45. **ГОСТ 8.401–80.** ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.

46. **ГОСТ 8.207–76. ГСИ.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 9 с.

47. **ГОСТ 8.508–84. ГСИ.** Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 52 с.

48. **МИ 2083–90.** ГСИ. Измерения косвенные. Определения результатов из-мерений и оценивание их погрешностей. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.

49. **ГОСТ 8.417–2002.** ГСОЕИ. Единицы величин. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 28 с.

50. **ГОСТ Р 8.585–2001.** ГСОЕИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 36 с.

51. **ГОСТ 6651–84.** Термообразователи сопротивления ГСП. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 34 с.

52. **РД 50–453–84.** Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета: методические указания. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 17 с.

53. **РМГ 29–99 ГСИ.** Метрология. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 28 с.

54. **Р 50.2.038–2004.** Рекомендации по метрологии. ГСОЕИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений. – М. : Стандартинформ, 2005. – 7 с.

55. **Метрология и электроизмерения в телекоммуникационных системах:** учебник для вузов / под ред. В.И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.

56. **ГОСТ 1494–77.** Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. Введен с 01.07.1978 взамен ГОСТ 1494–61. Переиздан с изменениями в марте 1983 г. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 36 с.

57. **Хоффман, Д.** Техника измерений и обеспечение качества: справочная книга / пер. с нем.; под ред. Л.М. Закса, С.С. Кивилиса. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.

58. **Мейдза, Ф.** Электронные измерительные приборы и методы измерения: пер. с англ. / Ф. Мейдза. – М. : Мир, 1990. – 535 с.

59. **Чистяков, В.С.** Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В.С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

60. **Воробьев, С.А.** Электрические измерения неэлектрических величин. Вып. 2. Основы теории и расчета неуравновешенных мостовых схем с датчиками сопротивления / С.А. Воробьев. – Свердловск : УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 232 с.

61. **Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника**: учеб. пособие / под ред. К.К. Кима. – СПб. : Питер, 2006. – 386 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Статистические таблицы

Таблица П. 1.1

Интеграл вероятности $\Phi(T) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^T e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

T	$\Phi(T)$	T	$\Phi(T)$	T	$\Phi(T)$	T	$\Phi(T)$
0,00	0,0000	0,75	0,5467	1,50	0,8664	2,25	0,9756
0,05	0,0399	0,80	0,5763	1,55	0,8789	2,30	0,9786
0,10	0,0797	0,85	0,6047	1,60	0,8904	2,35	0,9812
0,15	0,1192	0,90	0,6319	1,65	0,9011	2,40	0,9836
0,20	0,1585	0,95	0,6579	1,70	0,9109	2,45	0,9857
0,25	0,1974	1,00	0,6827	1,75	0,9199	2,50	0,9876
0,30	0,2358	1,05	0,7063	1,80	0,9281	2,60	0,9907
0,35	0,2737	1,10	0,7287	1,85	0,9357	2,70	0,9931
0,40	0,3108	1,15	0,7499	1,90	0,9426	2,80	0,9949
0,45	0,3473	1,20	0,7699	1,95	0,9488	2,90	0,9963
0,50	0,3829	1,25	0,7887	2,00	0,9545	3,00	0,99730
0,55	0,4177	1,30	0,8064	2,05	0,9596	3,81	0,99806
0,60	0,4515	1,35	0,8230	2,10	0,9643	3,20	0,99863
0,65	0,4843	1,40	0,8385	2,15	0,9684	3,50	0,99953
0,70	0,5161	1,45	0,8529	2,20	0,9722	4,00	0,99994

Таблица П. 1.2

Значение коэффициентов Стьюдента *t* в зависимости от доверительной вероятности *P* и числа измерений *n*

n	Доверительная вероятность *P*					
	0,8	**0,9**	**0,95**	**0,98**	**0,99**	**0,999**
4	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
7	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,35	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
21	1,33	1,73	2,09	2,53	2,85	3,85
22	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
23	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82	3,79
24	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
25	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75
26	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
27	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78	3,71
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
29	1,31	1,70	2,05	2.47	2,76	3,67
30	1,31	1,70	2,05	2,46	2,76	3,66
31	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
40	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
60	1,30	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
120	1,29	1,66	1,98	2,36	2,62	3,37
∞	1,28	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

Таблица П. 1.3

Значение коэффициентов γ_1 и γ_2в зависимости от доверительной вероятности *P* и числа измерений *n*

n	Доверительная вероятность *P*							
	0,99		0,98		0,95		0,90	
	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2
4	0,48	6,47	0,51	5,11	0,57	3,73	0,62	2,92
5	0,52	4,39	0,55	3,67	0,60	2,87	0,65	2,37
6	0,55	3,48	0,58	3,00	0,62	2,45	0,67	2,09
7	0,57	2,98	0,60	2,62	0,64	2,20	0,69	1,92
8	0,59	2,66	0,62	2,38	0,66	2,04	0,71	1,80
9	0,60	2,44	0,63	2,21	0,68	1,92	0,72	1,71
10	0,62	2,28	0,64	2,08	0,69	1,83	0,73	1,65
11	0,63	2,15	0,66	1,98	0,70	1,76	0,74	1,59
12	0,64	2,06	0,67	1,90	0,71	1,70	0,75	1,55
13	0,65	1,98	0,68	1,83	0,72	1,65	0,76	1,52
14	0,66	1,91	0,69	1,78	0,73	1,61	0,76	1,49
15	0,67	1,85	0,69	1,73	0,73	1,58	0,77	1,46
16	0,68	1,81	0,70	1,69	0,74	1,55	0,78	1,44
17	0,68	1,76	0,71	1,66	0,75	1,52	0,78	1,42
18	0.69	1,73	0,71	1,63	0,75	1,50	0,79	1,40
19	0,70	1,69	0,72	1,60	0,76	1,48	0,79	1,39
20	0,70	1,67	0,72	1,58	0,76	1,46	0,79	1,37
21	0,71	1,64	0,73	1,56	0,77	1,44	0,80	1,36
22	0,71	1,62	0,73	1,54	0,77	1,43	0,80	1,35
23	0,72	1,59	0,74	1,52	0,77	1,42	0,81	1,34
24	0,72	1,58	0,74	1,50	0,78	1,40	0,81	1,33
25	0,73	1.56	0,75	1,49	0,78	1,39	0,81	1,32
26	0,73	1,54	0,75	1,47	0,78	1,38	0,82	1,31
27	0,73	1,53	0,76	1,46	0,79	1,37	0,82	1,30
28	0,74	1,51	0,76	1,45	0,79	1,36	0,82	1,29
29	0,74	1,50	0,76	1,44	0,79	1,35	0,82	1,29
30	0,74	1,49	0,77	1,43	0,80	1,34	0,83	1,28
31	0,75	1,48	0,77	1,42	0,80	1,34	0,83	1,27
40	0,77	1,39	0,79	1,34	0,82	1,28	0,85	1,23
50	0,79	1,34	0,81	1,30	0,84	1,24	0,86	1,19
60	0,81	1,30	0,82	1,27	0,85	1,22	0,87	1,18
70	0,82	1,27	0,84	1,24	0,86	1,20	0,88	1,16
80	0,83	1,25	0,84	1,22	0,87	1,18	0,89	1,15
90	0,84	1,23	0,85	1,21	0,87	1,17	0,89	1,14
100	0,85	1,22	0,86	1,20	0,88	1,16	0,90	1,13
200	0,89	1,15	0,90	1,13	0,91	1,11	0,93	1,09

Таблица П. 1.4

Значения коэффициентов W_T в зависимости от числа измерений *n* и доверительной вероятности *P* (табличный метод выявления промахов)

n	Доверительная вероятность *P*			
	0,90	**0,95**	**0,975**	**0,99**
4	1,65	1,69	1,71	1,72
5	1,79	1,87	1,92	1,96
6	1,89	2,00	2,07	2,13
7	1,97	2,09	2,18	2,27
8	2,04	2,17	2,27	2,37
9	2,10	2,24	2,35	2,46
10	2,15	2,29	2,41	2,54
12	2,23	2,39	2,52	2,66
14	2,30	2,46	2,60	2,76
16	2,35	2,52	2,67	2,84
18	2,40	2,58	2,73	2,90
20	2,45	2,62	2,78	2,96
22	2,49	2,66	2,82	3,01
24	2,52	2,70	2,86	3,05
50	–	–	–	3,35
75	–	–	–	3,52
100	–	–	–	3,60

Таблица П. 1.5

Значение квантилей нормального распределения *K* в зависимости от доверительной вероятности *P*

P	**K**	**P**	**K**	**P**	**K**	**P**	**K**
0,68	1,00	0,85	1,44	0,91	1,69	0,97	2,16
0,80	1,28	0,86	1,47	0,92	1,75	0,98	2,32
0,81	1,31	0,87	1,51	0,93	1,81	0,99	2,58
0,82	1,34	0,88	1,55	0,94	1,88	0,997	3,00
0,83	1,37	0,891	1,60	0,95	1,96	0,999	3,29
0,84	1,40	0,90	1,64	0,96	2,05	–	–

Таблица П. 1.6

Необходимое число измерений для получения отношения $\frac{\Delta\bar{x}}{\sigma}$

с доверительной вероятностью *P*

$\frac{\Delta\bar{x}}{\sigma}$	**Доверительная вероятность *P***					
	0,5	**0,7**	**0,9**	**0,95**	**0,99**	**0,999**
1,0	2	3	5	7	11	17
0,50	3	6	13	18	31	50
0,40	4	8	19	27	46	74
0,30	6	13	32	46	78	127
0,20	13	29	70	99	171	277
0,10	47	169	273	387	668	1089
0,05	183	431	1084	1540	2659	4338
0,01	4543	10732	27161	38416	66358	108307

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Критерий согласия по ГОСТ 8.508 – 84

П. 2.1. Общие положения

При обработке результатов измерений существенное значение имеет вопрос о том, подчиняется или нет результат нормальному закону распределения. Эта задача решается с помощью критериев согласия. Известно несколько критериев согласия: χ^2 (критерий Пирсона) [12; 14; 21], критерий Романовского, критерий А.Н. Колмогорова, составной критерий [21; 46], критерий на основе коэффициентов асимметрии и эксцесса [47] и др.

Критерий Пирсона применяется при большом числе измерений (n>50); при числе измерений от 16 до 50 может быть использован составной критерий, а при числе измерений от 10 до 200 используется критерий на основе коэффициентов асимметрии и эксцесса. Именно последний из указанных критериев, как пригодный при малом числе измерений и практически удобный, описывается в данном параграфе учебного пособия [47].

П. 2.2. Проверка нормальности распределения результатов измерений по значению коэффициентов асимметрии и эксцесса

П. 2.2.1. Коэффициент асимметрии оценивается по формуле

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3(x)}, \qquad (П.2.1)$$

где

$$\mu_3 = \frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}(x_i - \overline{x})^3, \qquad (П.2.2)$$

$$\sigma^3(x) = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2\right]^{\frac{3}{2}}, \qquad (П.2.3)$$

x_i – результат i-го измерения;

$\overline{x}$ – среднее арифметическое значение результатов измерений;

n – число измерений.

П.2.2.2. Точность оценки коэффициента асимметрии определяют из выражения

$$\sigma_{\gamma 1} = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} \qquad \text{(П.2.4)}$$

или находят из табл. П.2.1.

Таблица П.2.1

n	10	20	30	40	50	60	100	200
$\sigma_{\gamma 1}$	0,62	0,49	0,42	0,37	0,33	0,30	0,24	0,17

П.2.2.3. Распределение результатов измерений в первом приближении подчиняется нормальному распределению, если выполняется первое условие:

$$\gamma_1 < 3\sigma_{\gamma 1}\,. \qquad \text{(П.2.5)}$$

П.2.2.4. Распределение результатов измерений не подчиняется нормальному распределению, если условие (П2.5) не выполняется, т. е.

$$\gamma_1 \geq 3\sigma_{\gamma 1}\ . \qquad \text{(П.2.6)}$$

П.2.2.5. Коэффициент эксцесса оценивается по формуле

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4(x)} - 3\,, \qquad \text{(П.2.7)}$$

где μ_4 – четвертый центральный момент, определяемый по формулам

$$\mu_4 = \frac{n(n^4 - 2n + 3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot m_4 - \frac{3n(2n-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot m_2^2\,, \qquad \text{(П.2.8)}$$

$$m_4 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4\ , \qquad \text{(П.2.9)}$$

$$m_2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\ , \qquad \text{(П.2.10)}$$

$$\sigma^4(x) = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right]^2. \qquad \text{(П.2.11)}$$

П.2.2.6. Точность оценки коэффициента эксцесса определяют из выражения

$$\sigma_{\gamma 2} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2 \cdot (n+3)(n+5)}} \qquad \text{(П.2.12)}$$

или находят из табл. П.2.2.

Таблица П.2.2

n	10	30	60	100	200
$\sigma_{\gamma 2}$	0,92	0,75	0,63	0,48	0,34

П.2.2.7. Распределение предварительно считается нормальным, если выполняется второе условие:

$$\gamma_2 < 3\sigma_{\gamma 2} . \qquad \text{(П.2.13)}$$

П.2.2.8. Распределение считается отличным от нормального, если условие (П.2.12) не выполняется, т. е.

$$\gamma_2 \geq 3\sigma_{\gamma 2} . \qquad \text{(П.2.14)}$$

П.2.2.9. Распределение считается нормальным, если выполняются одновременно оба условия: ((П.2.5) и (П.2.13)), и распределение считается отличным от нормального, если не выполняется хотя бы одно из условий (или (П.2.5), или (П.2.13)).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Характеристики датчиков

Таблица П.3.1

Реостатные датчики угла поворота [37]

Технические данные	Тип датчика			
	МУ-62	**МУ-63**	**МУ-65**	**МУ-66**
Диапазон изменения рабочего угла поворота, град	±10; ±15	±12	±12	±12
Полный угол поворота ползунка, град	60	±35	±64	±32
Сопротивление реостата, Ом	250	—	1200	1200
Габаритные размеры, мм	33×77×53	33×77×53	45×35×31	45×35×31
Вес, г	450	450	50	50
Основная погрешность, град	±0,3; ±0,9	±0,15	±0,7	±0,7
Статическая характеристика преобразования	Линейная	Линейная	Линейная	Линейная

Таблица П.3.2

Датчики контактного сопротивления с угольными дисками [37]

Технические данные	**Тип датчика**	
	УММ-1	**УММ-3**
Верхний предел диапазона измерения сил, т	0,2; 0,3; 0,6; 1,0	2; 3; 5; 10; 20; 50
Нижний предел диапазона измерения сил, % от верхнего	15	15
Собственная частота датчика, Гц	10 000	10 000
Рабочий диапазон изменения сопротивления столбика, %	30	30
Величина предварительного сжатия столбика, кГс	15–20	15–20
Число дисков n, диаметр d и толщина S дисков, мм	$n = 7$; $d = 8$; $S = 1$	$n = 7$; $d = 8$; $S = 1$
Допустимая нагрузка, % от номинальной	200	100
Допустимая температура датчика, ^{0}C	+120	+120
Основная погрешность, %	±7	±10

Таблица П.3.3

Тензометрические датчики деформаций [38]

Тип тензорезистора	**Вид измерений**	**Предел измерения деформации, %**	**Диапазон рабочих температур, ^{0}C**	**Коэффициент тензочувствительности**	**Срок службы, лет**
ЛХ-364	Статодинамический	±0,3	–253…+50	3,9–4,5	12
ЛХ-352		±1,0	–196…+50	1,8–2,2	8
ВТ-356		±3,5	±50	1,8–2,2	7
ВТ-358		±1,0	–253…+50	1,8–2,2	12
ЕТ-286		±0,3	+3…+290	1,8–2,2	12

Таблица П.3.4

Терморезисторные датчики
(термопреобразователи сопротивления, ТС) [59]

Тип датчика	Пределы измерения, ^{0}C	Номинальная статическая характерис-тика преобразо-вания	Условное давление среды, МПа	Показатель тепловой инерции, с, не более	Материал защитной арматуры	Примечание
ТСП-0281	–50…+120	50П	0,4	10	Медь М1	Для измерения температуры твердых тел. Герметичный
ТСП-365-01	–2…+32	Индивидуальная	60	0,5	12Х18Н10Т	Для измерения температуры морской воды
ТСП-5081-01	–50…+200	100П	32	9	08Х13	Для измерения температуры агрессивных сред
ТСМ-275-01	–50…+150	100М	6,4	60	08Х13	Для измерения температуры природного газа
ТСМ-0979	–40…+120	50М	–	9	Латунь Л63 или Л96	Для измерения температуры малогабаритных подшипников

Продолжение таблицы П.3.4

ТСМ-0879	+50…+200	50М	–	40	Х23Ю5	Для измерения температуры жидких и газообразных сред
ТСМ-8052	+200…+600	100П	0,16	10	08Х18Н10Т	Для измерения температуры в испытательных камерах

Таблица П.3.5

Индуктивные датчики давления [38]

Тип датчика	**Предел измерения, 10^5 Па**	**Допустимое рабочее давление, 10^5 Па**	**Основная погрешность, %**	**Температурный диапазон, ^{0}С**	**Выходной сигнал, В**
ДРИ-088	1,25 2,5 5,0 10,0	60	0,5 … 1,0	± 50	0 … 6,0
С-041	0,3 0,6 1,25 2,5 5,0	10	0,5 … 1,5	± 100	0 … 6,0
ДРИ-086	1,25	10	2,0	–	0 … 6,0
С-050	1,25	30	3,0	0 … +35	0 … 6,0

Таблица П.3.6

Емкостные датчики индикаторов уровня типа ЭИУ-2 [59]

Конструкция емкостного датчика	**Верхние пределы измерения, м**	**Покрытие электродов датчика**	**Характеристики измеряемой среды**			
			Давление, МПа	**Температура, ^{0}С**	**Физическое состояние**	**Электрическая проводимость**
Стержневая	1; 1,6; 2; 2,5	Резина	2,5	0 … +50	Жидкость	Электропроводная
Пластинчатая	1; 1,6; 2,5	Фторопласт	2,5	–40…+200	Жидкость	Электропроводная
Кабельная	3; 4; 6; 10	Полиэтилен	1,0	–40…+80	Жидкость	Электропроводная
Тросовая	4; 6; 10; 16; 20	Без покрытия	2,5	–40…+200	Жидкость или сыпучий материал	Неэлектропроводная ($\varepsilon \le 5$)

Таблица П.3.7

Термоэлектрические датчики (термопары (ТП)) [59]

Тип термопреобразователя	Номинальная статическая характеристика преобразования	Диапазон измеряемых температур, ^{0}C	Показатель тепловой инерции, с	Длина погружаемой части, м	Материал защитной арматуры	Примечание
ТВР-0877	ВР (А) – 1	300–1800	10	от 0,16 до 0,5	Молибден	Для измерения температуры в водородных электропечах
ТПР-0573	ПР (В)	300–1500	60	от 1,25 до 2,5	Карбид кремния	Для измерения температуры горячего дутья доменных печей
ТПП-0679	ПП (S)	0–1300	90	от 0,32 до 2	Корунд или Al_2O_3 +1 % TiO_2	Для измерения температуры в окислительных и нейтральных средах
ТХК-0279	ХК (L)	–50…+600	180	от 0,16 до 3,15	08Х13 12Х18Н10Т	Для измерения температуры газообразных и жидких сред, не разрушающих защитную арматуру

Продолжение таблицы П.3.7

ТХА-410	ХА (К)	0–800	60	от 0,08 до 0,16	10Х17Н13М	Для измерения температуры выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания
ТХКП-18	ХК (L)	0–400	40	2,0	08Х13	Для измерения температуры поверхностей твердых тел в промышленных условиях

Таблица П.3.8

Трансформаторные датчики линейных перемещений [38]

Параметр	**Типы датчиков**			
	ПДИ-045	**ПДИ-052**	**ПЛИ-057**	**ПЛИ-079**
Диапазон измерений, мм	0,1–2,8	0–2,8 0–4,0	0–60 0–90 0–300	0–1,4 0–2,8 0–5,6 0–8,0
Частотный диапазон измерений, Гц	0–500	0–750	0–20	0–30
Основная погрешность, %	2,0	1,5	2,0	1,0
Габаритные размеры, мм	∅ 20×20	∅ 12×77 ∅ 20×80	∅ 25×170 ∅ 25×200 ∅ 25×465	∅ 10×38 ∅ 10×55
Диапазон рабочих температур, ^{0}C	от –100 до +50	от –196 до +50	от –60 до +345	от –50 до +50
Срок службы, лет	12	12	12	11

Таблица П.3.9

Индукционные датчики частоты вращения [38]

Параметр	**Типы датчиков**			
	ВТ-1850	**ВТ-1855**	**ОГ-018**	**ОЭ-019**
Диапазон измерения, об./мин	3000–65000	60–40000	860–49000	60–120000
Частотный диапазон измерений, Гц	100–13000	8–8000	113–6530	1–2000
Минимальный выходной сигнал, мВ	100	100	150	1000
Рабочий зазор, мм	3	3	1,5	1–15
Напряжение питания, В	–	27	–	27
Ток потребления, мА	–	3	–	50
Диапазон рабочих температур, ^{0}C	–60…+100	–212…+50	–253…+100	–5…+35

Фотоэлектрический датчик частоты вращения [37]

Действие датчика основано на преобразовании момента вращения в изменение освещенности фотоэлементов. Момент вращения воспринимается упругим валом, по концам которого расположены растровые диски с радиальными прорезями. При закручивании вала изменяется площадь взаимного перекрытия прорезей дисков и освещенность фотоэлементов.

Таблица П.3.10

Технические данные

Диапазон изменения момента вращения, кГс.м	6–280
Диапазон изменения фототока, мА	0–2,0
Максимальный угол закручивания измерительного вала, мин	45
База измерения, мм	180–400
Допустимая частота, Гц	
для селеновых фотоэлементов	5
для сернистосвинцовых фотоэлементов	250
Количество фотоэлементов, шт.	8
Основная погрешность, %	3–4

Магнитоупругий датчик момента вращения [37]

Действие датчика основано на изменении магнитных свойств материала вала в зависимости от приложенного вращающего момента. Изменения магнитных свойств закрученного вала приводят к нарушению симметрии распределения магнитного поля, что наводит в измерительной обмотке напряжение, пропорциональное измеряемому моменту.

Таблица П.3.11

Технические данные

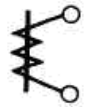
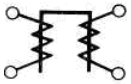
Диапазон изменения момента вращения, кГс · м	0–30
Намагничивающий 1 ток, мА	750
Скорость вращения вала, об./мин	300
Воздушный зазор между измерительным сердечником и валом, мм	2,5
Число витков обмотки возбуждения	2×110
Число витков измерительной обмотки	2×5100

Датчик работает в комплекте с измерительной схемой и предназначен для измерения вращающего момента электродвигателей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Условные обозначения на шкалах и корпусах приборов

Условные обозначения на шкалах приборов

Тип системы	Условные обозначения
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Логометр электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Логометр ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)	

Продолжение таблицы

Прибор магнитоэлектрический с неизолированным термопреобразователем (термоэлектрический прибор)		
Ток постоянный		—
Ток переменный (однофазный)		~
Ток постоянный и переменный		≂
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)		≋
Прибор применять при вертикальном положении шкалы		⊥
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы		⌐¬
Класс точности прибора		1,5 1,5 (1,5)
Напряжение испытательное, например 2 кВ		
Условия эксплуатации	Лабораторные условия (от +10 до +35 ^{0}C)	**А**
	Неотапливаемое помещение (от –30 до +50 ^{0}C)	**Б**
	Полевые и морские условия (от –40 до +50 ^{0}C)	$\mathbf{В_1}$
	Полевые и морские условия (от –50 до +60 ^{0}C)	$\mathbf{В_2}$
Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации		

Обозначения на корпусах электроизмерительных приборов

Наименование	**Условное обозначение**
Отрицательный зажим	
Положительный зажим	
Общий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов)	
Зажим переменного тока (в комбинированных приборах)	
Зажим, соединенный с корпусом	
Зажим (винт, шпилька) для заземления	
Корректор	

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Характеристики электроизмерительных приборов

Таблица П.5.1

Основные технические характеристики универсальных вольтметров

№ п/п	Тип, наимено-	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Основная погрешность	Автоматизация
1	2	3	4	5	6
1	В7-34, В7-34/1, В7-34/А Вольтметр универсальный цифровой системный	$U_{=}$ $U_{\sim}$ $R_{=}$ Отношение $U_{1=}/U_{2=}$ Отношение $U_{\sim}/U_{=}$ Измерение в режиме выборка / запоминание	(10^{-6}–1000) В (10^{-5}–500) В (20 Гц–500 кГц) (10^{-3}–10^{7}) Ом (10^{-6}–10) В (10^{-6}–10) В (10^{-6}–500) В (10^{-6}–10) В (10^{-4}–1000) В	$\pm\left[0{,}015+0{,}002\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}15+0{,}05\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}02+0{,}002\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left(A+B\frac{U_{K1}}{U_1}+C\frac{S_X U_{K2}}{U_2}\right)\%$ $\pm$Д$_{\sim}$ $\pm\left[0{,}04\pm0{,}02\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$	В7-34 и В7-34/1 имеют выход на КОП. Самопроверка работы основных узлов (семь тестов с индикацией результатов). Автоматическая установка нуля. АВП измерения $U_{=}$, $U_{\sim}$, $R_{=}$; автоматически определяется индикация полярности
2	В7-40, В7-40/1 Вольтметр универсальный цифровой	$U_{=}$ $I_{=}$ $U_{\sim}$ $I_{\sim}$	(10^{-5}–1000) В; 30 кВ с делителем (10^{-8}–2) А; 10 А с шунтом (2×10^{-3}–1000) В 20 Гц–100 кГц (2×10^{6}–2×10^{1}) А с шунтом до 2 А	$\pm\left[0{,}05+0{,}02\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}02+0{,}2\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}6+0{,}1\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[1{,}0+0{,}1\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}15+0{,}05\left(\frac{R_K}{R}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}5+0{,}1\left(\frac{R_K}{R}-1\right)\right]\%$	Выход на КОП. Ручной и автоматический выбор пределов измерений. Автоматическая установка нуля. Автоматическое определение и индексация полярности

Продолжение таблицы П.5.1

	В7-41 Вольтметр универ-сальный цифровой малогаба-ритный	$U_{=}$	$(10^{-4}–1000)$ В	$\pm\left[0{,}2+0{,}1\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$	
		$I_{=}$	$(10^{-7}–10)$ А	$\pm\left[0{,}4+0{,}1\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$	
		$U_{\sim}$	$(10^{-4}–750)$ В 20 Гц–100 кГц	$\pm\left[0{,}8+0{,}2\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ 40 Гц–5 кГц	
		$I_{\sim}$	$(10^{-7}–10)$ А 20 Гц–10 кГЦ	$\pm\left[1{,}2+0{,}2\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$ в диапазоне частот 40Гц-5кГЦ	
		$R_{=}$	$(0{,}1–2\times10^{7})$ Ом	$\pm\left[0{,}2+0{,}1\left(\frac{R_K}{R}-1\right)\right]\%$	

Примечание. В таблице приведен наилучший для данного типа прибора предел основной погрешности измерений.

U_K, I_K, R_K – наибольшее значение поддиапазона измерения;

U, I, R – показания прибора;

U_1 – напряжение на входе прибора 1;

U_{K1}, U_{K2} – значение поддиапазонов измерений по входам 1 и 2;

A, B, C – постоянные коэффициенты (для В7-34 A = 0,01; B = 0,005 или 0,002; C = 0,002);

д – предел допускаемой основной погрешности при измерении переменного напряжения.

Для прибора В7-41 предусмотрено питание от батареи типа «Крона ВЦ» или «Корунд» либо от сети 220 В, 50 Гц; масса прибора В7-41 составляет 0,5 кг.

Таблица П.5.2

Основные технические характеристики вольтметров переменного напряжения

№ п/п	Тип прибора, наименование	Диапазон измерений	Основная погрешность	Диапазон частот	Примечание
1	В3-59 Милливольт-метр цифровой широкополос-ный	(265×10^{-4}–300) В Поддиапазоны: 1, 3, 10, 30, 100, 300 мВ; 1, 3, 10, 30, 100, 300 В; с делителем до 1 кВ	±(0,4–10)%U_K	10 Гц – 100 МГц	Измеряет среднеквадратическое значение напряжения произвольной формы
2	В7К3-61 Вольтметр цифровой широкополосный	$U_=$ (10^{-2}–1000) В Поддиапазоны: 100 мВ, 1, 10, 100, 1000 В	+[0,4+0,2(U_K/U–1)]%	–	Выход на КОП. Ручной и автоматический выбор пределов измерения
		$U_\sim$ (1,7×10^{-3}–1000) В Поддиапазоны: 100 мВ, 1, 10, 100, 1000 В	±[0,6+0,4(U_K/U–1)]% на поддиапазоне 100 мВ при f = 60 Гц–100 кГц	10 Гц – 100 МГц	Измеряет напряжение произвольной формы с $K_A \leq 7U_K/U$. Индикация результатов измерения на цифровом табло 3; 3,5; 4 или 4,5
		Суммы $U_=+U_\sim$ (17×10^{-3}–1000) В Поддиапазоны 10 мВ, 1, 10, 100, 1000 В	–	2 Гц – 100 МГц	

Таблица П.5.3

Основные технические характеристики приборов для измерения параметров электрических цепей

№ п/п	Тип прибора	Рабочая частота, Гц	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность измерений	Габариты, мм Масса, кг
1	Е6-18	78	R	$(10^{-4}–10^{2})$ Ом	±1,5% от $R_к$	243×206×208; 5
2	Е6-16	Постоянный ток	R	$(2–2\times10^{8})$ Ом	±1,5 % длины рабочей части шкалы	120×205×90; 1,9
3	Е7-9	$7\times10^{5}–3\times10^{5}$	C	$(1–5\times10^{3})$ пФ	± (0,05×C+0,1) пФ от 1 до 2,5 пФ; ±(0,05×C+0,05) пФ от 2,5 до 10 пФ	385х185х335; 9
		$11\times10^{3}–1,55\times10^{6}$	H	$(10^{-7}–10^{1})$ Гн	±(0,015 h+2 к) мкГн от 1 до 10 мкГн; ±(0,012h+1,2$к$) мкГн от 10 мкГн и более, где K = 0,01; 0,1; 1; 10; 100 для соответствующего диапазона	
4	Е8-4	10^{3}	C	$(3\times10^{-2}–15,99\times10^{6})$ пФ	±(0,001 C+0,02) пФ	490×210×475; 26
			tg δ	$5\times10^{-4}–999\times10^{-4}$	±(0,02tgд+5×10^{-4})	

Продолжение таблицы П.5.3.

5	Е7-11	Постоянный ток	R	$(10^1–10)$ Ом	$\pm(0{,}02R+0{,}05)$ Ом	342×173×332; 9
		10^2; 10^3	R	$(10–10^6)$ Ом	$\pm(0{,}01R+0{,}05)$ Ом	
				$(10^6–10^7)$ Ом	$\pm(0{,}02R)$ Ом	
		10^2; 10^3	С при $\operatorname{tg}\delta \le 1$	$(0{,}5–10^7)$ пФ	$\pm(0{,}01C+0{,}2)$ пФ	
				$(10^7–10^{10})$ пФ	$\pm 0{,}02C$ пФ	
			при $\operatorname{tg}\delta > 1$	$(0{,}5–10^7)$ пФ	±[0,01С(1+tgд)+0,2]пФ	
				$(10^7–10^{10})$ пФ	±0,01С(2+tgд)пФ	
		10^2; 10^3	L при $Q \ge 1$	$(3\text{x}10^{-7}\text{-}10^{-4})$Гн	±(0,02L+0,1) мкГн	
				$(10^{-4}\text{-}10)$Гн	$\pm 0{,}01L$	
				$(10\text{-}10^3)$Гн	$\pm 0{,}02L$	
			L при $Q<1H$			
				$(3\times10^{-7}–10^{-4})$Гн	±[0,01(2+1/Q)L+0,1] мкГн	
				$(10^{-4}–10)$ Гн	$\pm 0{,}01(1+1/Q)L$ мкГн	
		10^2; 10^3		$(10–10^3)$ Гн	$\pm 0{,}01(2+1/Q)L$ мкГн	
				$10^{-1}–30$	$\pm(10+0{,}5Q)\%$	
				$5\times10^{-3}–10^{-1}$	$\pm(0{,}1\times1/Q+5\times10^{-3})\%$	

Таблица П.5.4

Основные технические характеристики измерителей разности фаз

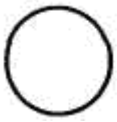
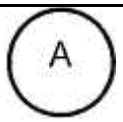
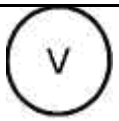
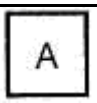
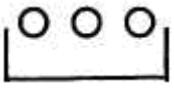
Параметр	**Значение параметра приборов**		
	Ф2-16	**ФК2-12**	**ФК2-29**
Диапазон частот	20 Гц – 20 Мгц	(1–1000) МГц	(1–1000) МГц
Предел измерения, град	0–360	0±180	0±180
Погрешность измерения, град	±(0,2–0,004)	±2,5	±0,5
Входное напряжение	(0,001–100) В	15 мВ – 1 В	$(3\times10^{-5}–1)$ В
Входное сопротивление	1 МОм	80 кОм	–
Входная емкость	30 пФ	3,5 пФ	–
Габаритные размеры, мм	490×175×475	490×175×475	488×475×173
Масса, кг	15	17,5	20

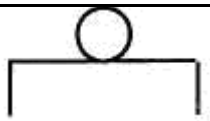
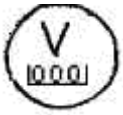
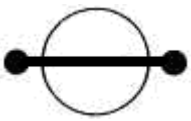
Прибор типа Ф2-16 предназначен для измерения разности фаз между двумя непрерывными синусоидальными сигналами одной частоты.

Приборы типа ФК-12 и ФК2-29 являются комбинированными приборами и предназначены для измерения не только разности фаз, но и отношения уровней входных синусоидальных сигналов, а также комплексных коэффициентов передачи четырехполюсников, параметров транзисторов и кварцевых фильтров.

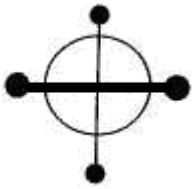
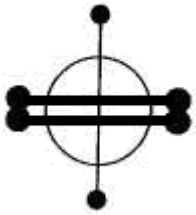
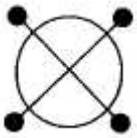
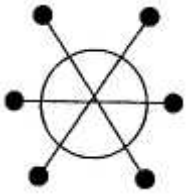
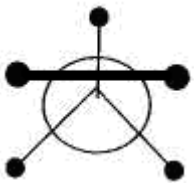
ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Условные графические обозначения в схемах

Наименование	Обозначение
1. Прибор показывающий	
Например:	
а) амперметр показывающий	
б) вольтметр показывающий	
2. Прибор регистрирующий	
Например:	
а) амперметр регистрирующий	
б) вольтметр регистрирующий	
3. Если необходимо указать характеристику отсчетного устройства прибора, то в его обозначения вписывают следующие квалификационные символы:	
3.1. Прибор, подвижная часть которого может отклоняться в одну сторону от нулевой отметки:	
•вправо	
•влево	
3.2. Прибор, подвижная часть которого может отклоняться в обе стороны от нулевой отметки	
3.3. Допускается применять обозначение	
3.4. Прибор с цифровым отсчетом	

3.5. Прибор с непрерывной регистрацией (записывающий)	
3.6. Прибор с точечной регистрацией (записывающий)	
3.7. Прибор печатающий с цифровой регистрацией	
3.8. Амперметр, подвижная часть которого отклоняется в обе стороны от нулевой отметки	
3.9. Гальванометр	
3.10. Вольтметр с цифровым отсчетом	
3.11. Вольтметр с непрерывной регистрацией	
3.12. Вольтметр с цифровой регистрацией	
4. Обмотки в схемах измерительных приборов, отражающих их взаимное расположение в измерительном механизме, изображают следующим образом:	
4.1. Обмотка токовая	
4.2. Обмотка напряжения	
4.3. Обмотки токовые для сложения или вычитания	
4.4. Обмотки напряжения для сложения или вычитания	
Например, механизм измерительный:	
а) амперметра однообмоточного	

Продолжение Приложения 6

б) вольтметра однообмоточного	
в) ваттметра однофазного	
г) ваттметра трехфазного одноэлементного с двумя токовыми обмотками	
д) логометра магнитоэлектрического (например, омметра-логометра)	
е) логометра электродинамического (например, фазометра однофазного)	
ж) логометра четырехобмоточного (например, фазометра трехфазного с одной токовой обмоткой)	
5. Выводные контакты обмоток допускается не изображать, если это не приведет к недоразумению и не затруднит чтение схемы (например, допускается обозначение фазометра трехфазного с одной токовой обмоткой)	

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Обозначение единиц измерения, их кратных и дольных значений

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Килоампер	kA	Киловольт	kV
Ампер	A	Вольт	V
Миллиампер	mA	Милливольт	mV
Микроампер	μA	Микровольт	μV
Наноампер	nA	Нановольт	nV
Мегаватт	MW	Мегаом	MΩ
Киловатт	kW	Килоом	kΩ
Ватт	W	Ом	Ω
Мегавар	Mvar	Миллиом	mΩ
Киловар	kvar	Микроом	μΩ
Мегагерц	MHz	Милливебер	mWb
Килогерц	kHz	Микрофарада	μF
Герц	Hz	Пикофарада	pF
Градусы угла сдвига фаз	φ	Генри	H
Коэффициент мощности	cosφ	Миллигенри	mH
Коэффициент реактивной мощности	sinφ	Микрогенри	μH
Тераом	TΩ	Наногенри	nH
Гигаом	GΩ	Градус стоградусной температурной шкалы	^{0}C

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Классификация электронных электроизмерительных приборов и система их обозначения

Электронные средства измерений подразделяют по характеру измерений и виду измеряемых величин на подгруппы, обозначаемые прописными буквами русского алфавита. Например, «В» – приборы для измерения напряжения.

Приборы, входящие в подгруппу, делятся на виды соответственно основной выполняемой функции. Видам присваивается буквенно-цифровое обозначение, состоящее из буквы подгруппы и номера вида. Например, «В2» – приборы для измерения постоянного напряжения.

По совокупности технических характеристик и очередности разработок приборы каждого вида разделяют на типы, которым соответствует порядковый номер модели (например, «В2-38»).

Наименование прибора определяется видом, к которому он относится.

Прописная буква русского алфавита, стоящая после модели, указывает на то, что прибор модернизирован (например, «В2-38А»). При этом буква «А» означает первую модернизацию, буква «Б» – вторую и т. д.

При конструктивной модификации приборов этот факт отмечается цифрой, которая ставится через дробь после номера модели. При этом цифра «1» означает первую конструктивную модификацию, цифра «2» – вторую, цифра «3» – третью и т. д. Например, «В2-38А/1».

Добавление к буквенному обозначению вида буквы «К» обозначает, что данный прибор многофункциональный (комбинированный). Например, «ВК 3-61Б/1» – вольтметр («В») комбинированный («К») для измерения переменного напряжения («3»), модель «61», вторая модернизация («Б»), первая конструктивная модификация («1»).

Следует отметить, что некоторые приборостроительные заводы используют другую (ведомственную) систему обозначений. Для электронных приборов используются буквы «Щ», Ф», «Р», которые не связаны с видом измеряе-

мых величин. Например, Щ68003; Ф-3О и Р386 – универсальные вольтметры; Ф5126 – цифровой фазометр; Щ400 – омметр; Р-33 – магазин сопротивлений.

Ниже приведены наиболее распространенные подгруппы и виды приборов.

Подгруппа	**Вид**	**Наименование**	**Пример обозначения**
В – приборы для измерения напряжения	В1	Поверочные приборы или установки	В1-18
	В2	Вольтметры постоянного напряжения	В2-32А/3
	В3	Вольтметры переменного напряжения	В3-55Б
	В4	Импульсные вольтметры	В4-8А/1
	В6	Селективные вольтметры	В6-9
	В7	Универсальные вольтметры	В7-34/1
	В8	Измерители отношений	В8-6
	В9	Преобразователи напряжений	В9-13/2
Ч – приборы для измерения частоты и времени	Ч1	Стандарты частоты и времени	Ч1-1
	Ч3	Частотомеры электронно-счетные	Ч3-32А
	Ч4	Частотомеры гетеродинные, емкостные, мостовые	Ч4-12Б
	Ч9	Преобразователи частоты	Ч9-5/1
Ф – приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания	Ф1	Установка для поверки измерителей разности фаз и группового времени запаздывания	Ф1-4
	Ф2	Измерители разности фаз (фазометры)	Ф2-13
	Ф3	Фазовращатели измерительные	Ф3-6А
	Ф4	Измерители группового времени запаздывания	Ф4-18
С – приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра	С1	Осциллографы универсальные	С1-144/1
	С2	Измерители коэффициента амплитудной модуляции	С2-15
	С3	Измерители девиации частоты	С3-12
	С4	Анализаторы спектра	С4-77
	С6	Измерители нелинейных искажений	С6-11
	С7	Осциллографы скоростные, стробоскопические	С7-19
	С8	Осциллографы запоминающие	С8-20
	С9	Осциллографы специальные	С9-23

Продолжение таблицы

Г – генераторы измерительные	Г2	Генераторы шумовые	Г2-59
	Г3	Генераторы низкочастотные	Г3-33
	Г4	Генераторы высокочастотные	Г4-158
	Г6	Генераторы универсальные	Г6-36
Е – измерители компонентов цепей	Е3	Измерители индуктивностей	Е3-7
	Е6	Измерители сопротивлений	Е6-18
	Е7	Измерители универсальные	Е7-11
	Е8	Измерители емкости	Е8-4
У – усилители измерительные	У2	Усилители селективные	У2-8
	У3	Усилители высокочастотные	У3-28
	У4	Усилители низкочастотные	У4-6
	У5	Усилители постоянного тока	У5-9
	У7	Усилители универсальные	У7-2
Б – источники питания	Б2	Источники переменного тока	Б2-3
	Б4	Источники калиброванные	Б4-16
	Б5	Источники постоянного тока	Б5-71/4
	Б6	Источники регулируемые	Б6-24
	Б7	Источники универсальные	Б7-12

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Технические характеристики стандартных измерительных шунтов

Тип	$I_{ном}$, А	$U_{ном}$, мВ	$R_ш$, мкОм	Размеры, см	Масса, кг	Класс точности
75 Ш	75	75	1000	12×6×6	0,240	0,2
	150	75	500	12×6×6	0,265	0,2
100 ШС	2000	100	50,00	30×10×10	8,0	0,5
	4000	100	25,00	30×21×10	18,0	0,5
	6000	100	16,67	30×30×10	24,3	0,5
75 ШСМ	7500	75	10,0	25×22×7	14,0	0,5

Примечания:

75 ШП – взаимозаменяемый переносный измерительный шунт с номинальным напряжением 75 мВ;

100 ШС – взаимозаменяемый стационарный измерительный шунт с номинальным напряжением 100 мВ;

75 ШСМ – взаимозаменяемый стационарный модернизированный измерительный шунт с номинальным напряжением 75 мВ;

$I_{ном}$ – номинальный (измеряемый) ток;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение на шунте при протекании по нему номинального тока;

$R_ш$ – номинальное сопротивление шунта.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Технические характеристики устройства типа И58М

Устройство предназначено для измерений постоянного тока в диапазоне от 4 до 70 кА в цепях с номинальным напряжением до 1 кВ и частоте вспомогательного напряжения (50 ± 0,5) Гц.

Устройство состоит из трансформатора постоянного тока (ТПТ) и вспомогательного устройства (ВУИ).

Устройство изготавливается в восьми модификациях. В качестве примера ниже (в таблице) приведены основные технические характеристики пяти модификаций устройства.

Модификация устройства	**Номинальный первичный измеряемый ток, кА**	**Пределы измерения, кА**	**Обозначение ТПТ, входящего в комплект**	**Размеры окна ТПТ, мм**
И-58М-1	15	от 7,5 до 15	И-58М/1	152×152
И-58М-2	25	от 12,5 до 25	И-58М/2	252×236
И-58М-3	35	от 24,5 до 35	И-58М/3	252×300
И-58М-4	50	от 25 до 50	И-58М/2×2	252×263
И-58М-5	70	от 49 до 70	И-58М/3×2	252×300

Во всех модификациях устройства в комплект входит один ТПТ, кроме модификаций 4 и 5, имеющих по два трансформатора типа И58М/2 и И58М/3 соответственно.

Номинальная нагрузка для модификаций 1–5 составляет 1,2 Ом.

Погрешность коэффициента трансформации в пределах измерений, указанных в приведенной таблице, не превышает ± 0,5 %.

Питание осуществляется от сети переменного тока напряжением 22 В и частотой 50 Гц. Потребляемая мощность не превышает 45 кг для модификации 1 и 200 кг для модификаций 2 и 3.

Масса вспомогательного измерительного устройства (ВУИ) не превышает 25 кг.

С устройствами типа И58М/2 – И 58М/5 поставляются токовое и промежуточное реле для защиты устройств при внезапном отключении измеряемого тока.

Наработка на отказ не менее 2500 ч. Срок службы не менее 6 лет.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Технические характеристики добавочного сопротивления типа Р-109

Номинальное значение сопротивления, кОм	Номинальный электрический ток, мА	Номинальное электрическое напряжение, В	Примечание
300	5,0	1,5	Предназначено для расширения пределов измерения вольтметров М-151 и М1501 Класс точности 0,5 Норм. усл. эксп. (20 ± 10) °С Масса 1,5 кг
400	5,0	2,0	
600	5,0	3,0	
1333	3,0	4,0	

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Технические характеристики жидкостных термометров

Термометр	Тип	Предел измерения, °С	Цена деления, °С	Предел допускаемой основной погрешности, °С	Размеры термометра, мм			Примечание
					Общая длина	Погружаемая длина	Диаметр	
Промышленный для судовых двигателей	ТП 14–1	0–150	2	± 2 (0–100) ± 4 (101–150)	235	115	7±1	Палочный (тип А)
	ТП 14–2				270	150		
	ТП 17–1	100–650	5	±5 (100–300) ±7 (301–500) ±10 (501–650)	410	200	6±1	Палочный, ртутный (тип А)
	ТП 17–2				485	275		
Промышленный виброустойчивый	ТП 21–1	0–100	1	±1	275; 295; 315; 335; 465; 614	60; 80; 120; 160; 400	–	Ртутный, с вложенной шкалой (тип Б)
	ТП 21–2	0–150	2	±2				
	ТП 21–3	0–200						
Лабораторный химический	ТЛ 4–1	от –3 до +20	0,1	± 0,3 ± 0,2	530_{-30}	–	11±1	Тип Б Для измерения температуры в лаборатор-ных условиях (тип Б)
	ТЛ 4–2	0–55						
	ТЛ 4–8	190–260	0,2	±0,4(101–200) ±0,8(201–300) ±1 (301–360)				
	ТЛ 4–9	240–310						

Продолжение таблицы

Лабораторный химический	ТЛ 2–1	от –30 до +70	1	± 1 (–30…+100) ± 2 (101–200)	250_{-20}	–	8±1	Для лабораторных измерений (тип Б)
	ТЛ 2–2	0–100						
	ТЛ 2–3	0–150			280_{-20}	–		
Образцовый	ТО–1	Основная шкала 0–5	0,01	± 0,015	560±10	–	16–1	Высокоточные измерения (не более 5 °С)
		Вспомогательная шкала от –20 до +150	5	–	–	–	–	

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Технические характеристики манометрических термометров

Тип	Характеристика	Диапазон измерений, °С		Класс точности	Термобаллон		Длина капилляра, м
		Нижний	Верхний		Диаметр, мм	Длина, мм	
ТПГ – 4	Термометр показывающий газовый	+50	600	1,0	20	до 630	до 2,5
ТПЖ – 4	Термометр показывающий жидкостный	+50	300	1,5	12	до 400	до 10
ТЖС – 711	Термометр показывающий самопищущий	+50	300	2,5	12	до 400	до 10
ТПП – 4Ш	Термометр показывающий конденсационный	0	300	1,5	16	до 250	до 16
ТПП-СК	Термометр показывающий конденсационный с электроконтактным устройством	0	300	2,5	16	до 250	до 16

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Визуальный оптический пирометр «Проминь»

Визуальный оптический пирометр «Проминь» предназначен для измерения яркостной температуры раскаленных твердых или жидких тел в металлической, машиностроительной, химической и других отраслях промышленности.

Пирометр выполнен в виде малогабаритного переносного прибора. Корпус состоит из камеры и рукоятки. В верхней части корпуса помещены объективная труба с однолинзовым объективом, перемещающимся при наводке вдоль оптической оси, и окулярная труба. В рукоятке находится блок питания пирометра.

Принцип действия пирометра основан на уравнивании яркости изображения объекта с яркостью эталонного источника – специальной пирометрической лампы.

Основные данные

Диапазон измеряемых температур, °С	800–4000
Поддиапазоны, °С	800–1400
	1200–2000
	1800–4000
Эффективная длина волны пиромета во всем диапазоне измеряемых температур, мкм	0,656±0,005
Основная допустимая погрешность, °С:	
– в пределах измерения температур 800–1400 °С	±12
– в пределах измерения температур 1800–3200 °С	±50
– в пределах измерения температур 3200–4000 °С	±90
Масса, кг	1,6
Вероятность безотказной работы пирометра за 500 часов	0,85
Срок службы пирометра, лет	≥ 6

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Телескоп пирометра суммарного излучения типа ПИРС-019 с усилителем

Телескоп пирометра типа ПИРС-019 предназначен для бесконтактного измерения радиационной температуры поверхностей нагретых тел. Рассчитан на эксплуатацию при температуре окружающего воздуха от 5 до 50 °С и относительной влажности от 30 до 80 %. Усилитель рассчитан на эксплуатацию при температуре окружающей среды от 10 до 35 °С и относительной влажности до 80 %.

Технические данные

Диапазон измерений, °С	20–300
Основная допускаемая погрешность в диапазоне измерения, °С	
20–100	± 2,0
40–150	± 2,5
50–200	± 3,0
100–300	± 4,5
Инерционность, С	не более 2,0
Потребляемая мощность, В•А	не более 6,0
Вероятность безотказной работы прибора за 500 часов	0,85
Габаритные размеры (мм) и масса (кг) комплектующих единиц:	
– телескопа	160×105×120; 10
– охладителя	115×125×150; 0,7
– усилителя	150×140×400; 8,0

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры информатики
(протокол № 1 от 12.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ А. В. Дружинин

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Б1.В.09.07 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

Введение

Цель данных лабораторных работ состоит в закреплении теоретических основ курса «Интеллектуальные системы» для студентов специальности «Прикладная математика», включающего изучение семейства методов оптимизации, известных как генетические алгоритмы.

Все работы проводятся в лаборатории, оборудованной персональными компьютерами под управлением *Microsoft Windows XP* или выше. Рекомендуемой средой для решения задач является *MATLAB*. Студенты, впервые приступившие к работе, обязаны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в соответствующем журнале. К выполнению лабораторных работ допускаются только студенты, получившие допуск преподавателя после собеседования о теоретической части и основах работы в среде *MATLAB*.

Порядок выполнения лабораторных работ

1. Загрузить систему *MATLAB* и изучить справочные материалы по функциям системы, необходимым для решения задачи.
2. Составить алгоритм и написать программу на языке *MATLAB* для решения задачи.
3. Оформить отчет по лабораторной работе. Каждый отчет должен содержать следующие элементы.
   3.1. Формулировку задачи и числовые данные конкретных примеров.
   3.2. Текст программы.
   3.3. Результаты работы программы.

Лабораторная работа №1. Оптимизация функций вещественных переменных

Цель работы

Приобретение навыков работы со стандартным модулем *MATLAB*, предоставляющим возможность решения различных оптимизационных задач с помощью генетических алгоритмов.

Методические указания

Генетические алгоритмы (ГА) относятся к семейству алгоритмов глобальной оптимизации. Первоначальная форма ГА, введенная Дж. Холландом, является алгоритмом перехода от рассматриваемой по-

пуляции хромосом[1], под которыми понимались последовательности бит фиксированной длины, к новой популяции с помощью своего рода естественного отбора, сопровождаемого применением так называемых операторов *скрещивания, мутации и инверсии.* Оператор селекции выбирает хромосомы, которым будет позволено воспроизводиться, так чтобы хромосомы с лучшими значениями целевой функции в среднем имели большее потомство. Оператор скрещивания меняет местами соответствующие отрезки двух хромосом, имитируя биологическую рекомбинацию; оператор мутации инвертирует значения случайным образом выбранных бит хромосомы; оператор инверсии переворачивает непрерывный отрезок хромосомы.

Впоследствии интенсивное взаимодействие между исследователями, изучающими различные эволюционные методы, привело к тому, что границы между ГА, эволюционными стратегиями, эволюционным программированием и другими подходами такого рода стали несколько размыты. Вследствие этого термин «генетический алгоритм» нередко обозначает нечто весьма отличное от оригинальной формулировки, данной Холландом. Таким образом, под генетическим алгоритмом понимается не столько конкретный алгоритм, сколько целое семейство методов, объединенных общей концепцией.

В целом, ГА описывает способ эволюционирования популяции, состоящей из множества индивидуумов, по определенным правилам таким образом, чтобы собрать как можно больше индивидуумов в области с как можно лучшими значениями целевой функции. Общая структура ГА включает следующие шаги.

1. Создается исходная популяция, обычно случайная.
2. Для каждого индивидуума вычисляется значение целевой функции.
3. К популяции применяются операторы селекции, скрещивания и мутации. В результате получается новая популяция такого же размера.
   3.1. Оператор селекции выбирает индивидуумов, которые будут участвовать в процессе репродукции. При этом вероятность выбора каждого конкретного индивидуума тем выше, чем лучше его значение целевой функции. Индивидуум может как быть выбран несколько раз, так и не быть выбран вовсе.

[1] Правильнее было бы *популяции особей,* но в ГА не делается различия между особями и их хромосомами.

3.2. Оператор скрещивания формирует одного или большее количество потомков, комбинируя хромосомы двух родителей (в некоторых случаях может использоваться большее количество родительских индивидуумов).
3.3. Оператор мутации модифицирует хромосому индивидуума случайным образом. Он может использоваться после оператора скрещивания, или же вместо него для генерации потомков с использованием хромосомы единственного родителя.
4. Текущая популяция заменяется новой.
5. Процесс повторяется с шага 2, пока не будет выполнен оговоренный заранее критерий останова.

В качестве хромосом/индивидуумов могут применяться объекты самого разного типа: битовые, целочисленные, вещественные или комплексные векторы, конечные автоматы, деревья выражений и пр.

В состав системы *MATLAB*[2] включен модуль «*Genetic Algorithm and Direct Search*» (*GADS*). Помимо ГА, в него также входят так называемые алгоритмы прямого поиска (*Direct/Pattern Search*) и имитации отжига (*Simulated Annealing and Threshold Acceptance*). Для работы с ГА предназначены следующие функции: `ga`, `gaoptimget` и `gaoptimset`, `gatool`. Первая является собственно реализацией ГА, две следующие предназначены для манипулирования ее параметрами, а последняя вызывает графический интерфейс, имеющий идентичную функциональность, но большую наглядность. Приведем несколько примеров использования данных функций.

Простейший пример: поиск минимумов функций одной переменной x^2 и $\sin x$ (поскольку ГА имеет стохастическую природу, при каждом его вызове ответы получаются различные).

```
>> ga(@(x)x^2,1)
ans =
    0.0048
>> ga(@sin,1)
ans =
   -1.5650
```

Не очень высокая точность результатов является следствием щадящих значений параметров ГА, выставляемых по умолчанию. Интересной особенностью второго примера является то, то минимум найден вне

[2] Приведенные здесь сведения относятся к *GADS* версии 2.1 в составе *MATLAB* 7.4 (R2007a).

начального диапазона поиска (по умолчанию отрезок $[0;1]$: в общем случае, в зависимости от параметров алгоритма, популяция в поисках экстремума может уйти довольно далеко от своего изначального месторасположения. Тем не менее, с точки зрения вычислительной эффективности выгоднее сразу нацеливать ГА на область, в которой, предположительно, находится решение.

Аналогично производится поиск минимума функции большего количества переменных (здесь $f(x) = (\sin x_1)(\sin x_2)$).

```
>> ga(@(x)sin(x(1))*sin(x(2)),2)
ans =
   -1.5663    1.5724
```

Чтобы получить более адекватный ответ, воспользуемся возможностью уточнения результатов с помощью традиционных алгоритмов минимизации (в данном случае стандартной функции `fminsearch`).

```
>> opt=gaoptimset('HybridFcn',@fminsearch);
>> ga(@(x)sin(x(1))*sin(x(2)),2,...
   [],[],[],[],[],[],[],opt)
ans =
   -1.5708    1.5708
```

Здесь `HybridFcn` — один из множества параметров, с помощью которых универсальный алгоритм, представленный функцией `ga`, адаптируется под конкретные задачи.

Общий синтаксис `ga` выглядит следующим образом:

```
x = ga(fitnessfcn,nvars,A,b,...
       Aeq,beq,LB,UB,nonlcon,options)
x = ga(problem)
[x,fval,exitflag,output,population,scores] = ga(...)
```

Здесь `fitnessfcn` — целевая функция с одним (векторным) аргументом; `nvars` — количество неизвестных. Параметры `A` и `b` описывают линейные ограничения в виде неравенств: $Ax \leq b$; `Aeq` и `beq` — линейные ограничения в виде равенств: $A_{eq}x = b_{eq}$. Параметры `LB` и `UB` представляют собой нижние и верхние границы значений неизвестных (*Lower Bounds* и *Upper Bounds* соответственно): $x_i \in [LB_i, UB_i]$. Параметр `nonlcon` — функция, описывающая нелинейные ограничения задачи. Эта функция принимает в качестве аргумента x и возвращает два вектора `C` и `Ceq`; ГА, в свою очередь, ищет такое решение задачи, чтобы вы-

полнялись условия $C \leq 0$ и $C_{eq} = 0$. Последний аргумент — структура, формируемая с помощью функции `gaoptimset`. Все аргументы, отвечающие за ограничения, имеют смысл только для индивидуумов типа `doubleVector`. Обязательными в первой форме вызова являются лишь первые два аргумента; остальные можно опустить или указать как `[]`. Во второй форме вызова единственный аргумент является структурой, формируемой при экспорте задачи из интерфейса `gatool`.

На выходе функции имеем вектор `x`, дающий искомую точку минимума; значение целевой функции в этой точке `fval`; числовой код `exitflag`, указывающий причину прекращения работы ГА (коды см. в справке); структуру `output`, содержащую вспомогательную информацию, которая, в частности, может применяться для воспроизведения работы алгоритма с сохранением идентичных результатов; финальную популяцию `population` и значения целевой функции на ней `scores`. Все выходные параметры (кроме `x`) опциональны.

Варианты задания

Построить графики (поверхности и линии уровня) следующих тестовых функций для размерности пространства поиска $n = 2$. Используя командный (`ga`) и графический интерфейсы (`gatool`) модуля *GADS*, продемонстрировать нахождение их минимумов для $n = 2, 5, 10, 100$ (где это применимо).

Вар.	**Функция**
1.	Сферическая функция, или функция Де Джонга 1 (*sphere model, De Jong's function 1*) — гладкая выпуклая унимодальная функция, мечта любого алгоритма оптимизации. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} x_i^2, \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
2.	Гиперэллипсоидная функция (*axis parallel hyper-ellipsoid function*). $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} i x_i^2, \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
3.	Повернутая гиперэллипсоидная функция (*rotated hyper-ellipsoid function*).

	$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{i} x_j \right)^2, \qquad x_i \in [-65{,}536; 65{,}536].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
4.	Ступенчатая функция, или функция Де Джонга 3 (*step function, De Jong's function 3*) состоит из множества плоских горизонтальных поверхностей. Подобные функции создают проблемы многим алгоритмам оптимизации, поскольку такие плоскости не дают информации о предпочтительном направлении поиска. $$f(x) = 6n + \sum_{i=1}^{n} \lvert [x_i] \rvert, \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$
5.	Функция (она же банановая функция, она же долина) Розенброка, или функция Де Джонга 2, (*Rosenbrock's function (banana function, valley), De Jong's function 2*). Классическая задача о поиске экстремума, находящегося в узкой изогнутой долине. Найти последнюю легко, но спуск по ней к минимуму — задача нетривиальная. Функция является мультимодальной при $n > 3$. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(100\left(x_{i+1} - x_i^2\right)^2 + (x_i - 1)^2 \right), \qquad x \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 1$.)
6.	Функция Де Джонга с гауссовыми возмущениями (*gaussian quartic, De Jong's function 4*) позволяет оценить надежность алгоритма оптимизации при работе с зашумленными данными. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(i x_i^4 + gauss(0{,}1) \right), \qquad x_i \in [-1{,}28; 1{,}28],$$ где $gauss(m, d)$ — функция, возвращающая нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием m и дисперсией d.
7.	Функция Растригина (*Rastrigin's function*): аналог функции №1 с многочисленными регулярно распределенными минимумами. $$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^{n} \left(x_i^2 - 10 \cos 2\pi x_i \right), \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
8.	Функция Швефеля (*Schwefel's sine root function*) имеет обманчивый рельеф: глобальный минимум находится вдалеке от локального ми-

	нимума, наиболее схожего с ним по величине функции. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(-x_i \sin\sqrt{|x_i|}\right), \qquad x_i \in [-500; 500].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 420{,}9687$.)
9.	Функция Грайвенка (*Griewangk's function*). Мультимодальная функция с регулярно распределенными минимумами; аналог функции Растригина. $$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^{n} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right), \qquad x_i \in [-600; 600].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
10.	Функция Эккли (*Ackley's path function*): часто используемая мультимодальная тестовая функция. $$f(x) = 20 + e - 20\exp\left(-0{,}2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos(2\pi x_i)\right),$$ $x_i \in [-30; 30]$. (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
11.	Сумма различных степеней (*Sum of different powers*): часто используемая унимодальная тестовая функция. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} |x_i|^{i+1}, \qquad x_i \in [-1; 1].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
12.	Функция Михалевича (*Michalewicz's function*): мультимодальная функция с $n!$ локальными экстремумами, рельеф которой состоит из почти плоских участков с глубокими прямыми расщелинами. При больших m последние становятся уже, их склоны — вертикальнее, а задача оптимизации превращается в своего рода поиск иголки в стоге сена. $$f(x) = -\sum_{i=1}^{n} \left(\sin(x_i)\sin^{2m}\left(\frac{ix_i^2}{\pi}\right)\right), \qquad m = 10, x_i \in [0; \pi].$$
13.	Функция Бранинса (*Branins's rcos function*): тестовая функция с тремя глобальными минимумами. $$f(x_1, x_2) = \left(x_2 - \frac{5{,}1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 +$$

	$$+10\left(1-\frac{1}{8\pi}\right)\cos(x_1)+10, \qquad x_1 \in [-5;10], x_2 \in [0;15].$$ (Глобальные минимумы: $(-\pi; 12{,}275)$, $(\pi; 2{,}275)$, $(9{,}425; 2{,}475)$.)
14.	Функция Изома (*Easom's function*): унимодальная тестовая функция, в которой глобальный минимум и окружающий его нетривиальный рельеф занимают лишь небольшую часть пространства поиска. $$f(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2) = -\cos(\mathrm{x}_1)\cos(\mathrm{x}_2)\exp(-(\mathrm{x}_1-\pi)^2-(\mathrm{x}_2-\pi)^2),$$ $$\mathrm{x}_{1,2} \in [-100; 100].$$ (Глобальный минимум: $(\pi; \pi)$.)
15.	Функция Голдстейна (*Goldstein-Price function*): $$f(x_1, x_2) =$$ $$= [1+(1+x_1+x_2)^2(19-14x_1+3x_1^2-14x_2+6x_1x_2+3x_2^2)] \times$$ $$\times [30+(2x_1-3x_2)^2(18-32x_1+12x_1^2+48x_2-36x_1x_2+27x_2^2)];$$ $$x_{1,2} \in [-2; 2].$$ (Глобальный минимум: $(0; -1)$.)
16.	Шестигорбая функция (*Six-hump camel back function*) имеет в области поиска шесть локальных минимумов, два из которых являются глобальными. $$f(x_1, x_2) = \left(4-2{,}1x_1^2+\frac{x_1^4}{3}\right)x_1^2+x_1x_2+(-4+4x_2^2)x_2^2;$$ $$x_1 \in [-3; 3], x_2 \in [-2; 2].$$ (Глобальные минимумы: $(-0{,}0898; 0{,}7126)$, $(0{,}0898; -0{,}7126)$.)

Вопросы для собеседования

1. Что такое генетический алгоритм?
2. Какова общая схема работы ГА?
3. Как производится решение задач с помощью ГА в *MATLAB*?
4. Чем отличается реализация ГА в *MATLAB* от канонического алгоритма?

Лабораторная работа №2. Оптимизация функций вещественных переменных, часть 2

Цель работы

Приобретение навыков реализации и применения генетических алгоритмов в задачах оптимизации функций нескольких вещественных переменных.

Методические указания

Существует большое количество разновидностей операторов, соответствующих шагу 3 общего ГА. Выбор тех или иных вариантов определяется в первую очередь типом хромосом. Приведем варианты операторов, применимых в задачах оптимизации функций вещественных переменных.

1. Селекция (для поиска минимума).
   1.1. Популяция упорядочивается по значениям целевой функции, после чего ее вторая половина отбрасывается, а первая дублируется.
   1.2. Популяция упорядочивается по значениям целевой функции. Каждому индивидууму назначается вес, равный $1/\sqrt{n}$, где n — номер его позиции. Производится случайный выбор индивидуума, причем вероятность выбора каждого из индивидуумов пропорциональна его весу. Процесс повторяется столько раз, сколько особей должно быть в популяции.
   1.3. Выбираются несколько случайных индивидуумов. Лучший из них помещается в новую популяцию. Процесс повторяется столько раз, сколько особей нужно выбрать.
2. Скрещивание. Популяция перемешивается случайным образом, после чего к первым $[nr_c/2]$ парам индивидуумов x_{2i-1} и x_{2i}, $i = 1, \dots, [nr_c/2]$, где n — размер популяции, а r_c — вероятность скрещивания, применяется один из следующих вариантов действий.
   2.1. Производится одноточечный или двухточечный кроссовер векторов-хромосом.
   2.2. Составляются (масштабированные) выпуклые линейные комбинации родительских хромосом.
   2.3. Симулированное бинарное скрещивание:

$$x'_{1,2} = \big((1 \pm \beta)x_1 + (1 \mp \beta)x_2\big)/2\,,$$
$$\beta = \begin{cases}(2u)^{1/(\eta+1)}, & u \le 1/2,\\ (2(1-u))^{-1/(\eta+1)}, & u > 1/2,\end{cases}$$

где $x_{1,2}$ — родительские хромосомы, $x'_{1,2}$ — потомки, u — случайная величина, равномерно распределенная на $[0;1]$, а η — выбираемый пользователем параметр, определяющий форму функции распределения коэффициента β.

3. Мутация. К $[nr_m]$ случайно выбранным индивидуумам, где n — размер популяции, а r_m — вероятность мутации, применяется один из следующих вариантов действий.
   3.1. К выбранным векторам прибавляются нормально распределенные смещения с нулевым математическим ожиданием и выбранной заранее дисперсией.
   3.2. Каждая координата выбранных векторов с некоторой вероятностью заменяется на случайное число из диапазона, соответствующего области поиска.

Варианты задания

Написать программу, реализующую генетический алгоритм, и решить с ее помощью задачу на нахождение минимума функции с одним экстремумом, с несколькими локальными экстремумами, а также минимума линейной функции на выпуклом множестве:

- $f(x,y) = (x-0{,}4)^2 + (y-0{,}6)^4 \to \min$;
- $g(x,y) = f(x,y) + (\sin 10x)(\sin 10y) \to \min$;
- $\begin{cases}x + y \to \min,\\ f(x,y) \le 1.\end{cases}$

На каждой итерации ГА показывать текущую популяцию в виде облака точек. Программы для каждого из трех пунктов должны отличаться *только* видом целевой функции.

Сравнить результаты с (более) точными, найденными аналитически или с помощью функций, реализующих традиционные алгоритмы оптимизации.

Решить те же задачи с помощью стандартного модуля *MATLAB GADS*. Сравнить количество итераций и время, необходимое для достижения аналогичной точности результата.

Ввиду особенностей языка *MATLAB* программа должна использовать технику векторизации вычислений везде, где это возможно, для достижения высокого быстродействия.

Операторы селекции, скрещивания и мутации выбираются из приведенного выше списка в соответствии со своим вариантом (параметры операторов оставлены на усмотрение разработчика).

Вариант	**Селекция**	**Скрещивание**	**Мутация**
1	1.1.	2.1.	3.1.
2	1.1.	2.1.	3.2.
3	1.1.	2.2.	3.1.
4	1.1.	2.2.	3.2.
5	1.1.	2.3.	3.1.
6	1.1.	2.3.	3.2.
7	1.2.	2.1.	3.1.
8	1.2.	2.1.	3.2.
9	1.2.	2.2.	3.1.
10	1.2.	2.2.	3.2.
11	1.2.	2.3.	3.1.
12	1.2.	2.3.	3.2.
13	1.3.	2.1.	3.1.
14	1.3.	2.1.	3.2.
15	1.3.	2.2.	3.1.
16	1.3.	2.2.	3.2.
17	1.3.	2.3.	3.1.
18	1.3.	2.3.	3.2.

Вопросы для собеседования

1. Приведите примеры операторов селекции.
2. Приведите примеры операторов скрещивания и мутации, используемых в дискретных ГА.
3. Приведите примеры операторов скрещивания и мутации, используемых в непрерывных ГА.

4. Почему недостаточно одной лишь классической (бинарной) версии ГА?

Лабораторная работа №3. Эволюционный процесс

Цель работы

Применение генетических алгоритмов к оптимизационным задачам нестандартного вида.

Методические указания

ГА обладают рядом преимуществ перед традиционными методами оптимизации, в частности:

- переменные целевой функции могут быть как непрерывными, так и дискретными;
- отсутствует необходимость в вычислении производных;
- производится одновременный поиск в широком диапазоне значений переменных;
- возможна эффективная работа с функциями большого числа переменных;
- возможно эффективное распараллеливание алгоритмов;
- ГА применимы к целевым функциям со сложным рельефом, с большим количеством локальных экстремумов;
- результат может представлять собой перечень возможных оптимальных решений, а не просто одну точку в пространстве поиска;
- могут применяться различные формы представления (кодирования) переменных;
- целевые функции могут иметь самую разную природу: замкнутые формулы, вычисления на основе сложных алгоритмов, экспериментальные данные и пр.

Данные свойства позволяют ГА решать задачи, не поддающиеся традиционным методам. Более того, существуют вариации[3], в рамках которых индивидуумы не просто указывают на некоторую точку пространства поиска, а, в некотором смысле, «ведут активный образ жизни». Это эволюционное и генетическое программирование. Роль хромосом играют в первом случае конечные автоматы, а во втором — программы. В то время как в ГА целевая *функция* фиксирована, а индивидуумы представля-

[3] Их не относят напрямую к ГА, но считают родственными алгоритмами.

ют собой *данные,* здесь ситуация обратная: исходные *данные* выбираются заранее, а популяция состоит из *функций,* представленных в специфическом виде. Общая схема алгоритма мало чем отличается от ГА. Наиболее существенная разница связана с вычислением целевой функции и операторами скрещивания и мутации.

Задача, поставленная в данной лабораторной работе, не сводится к оптимизации какой-либо конкретной функции вещественных переменных. Тем не менее, она естественным образом решается с помощью ГА, если позволить целевой функции ранжировать индивидуумов на основании не только их собственных характеристик, но также и характеристик остальных индивидуумов в популяции.

Таким образом, если в предыдущей работе целевая функция *могла* быть сконструирована так, чтобы применяться ко всей популяции сразу, здесь она *должна* быть написана именно таким образом. В качестве аргумента ей передается весь имеющийся набор хромосом, а значения функции формируются на основе сравнения нескольких (в данном случае двух) хромосом. При этом целевая функция фактически частично берет на себя роль оператора селекции.

Варианты задания

Смоделировать эволюционный процесс, определить его сходимость, локализовать устойчивое значение генотипа в $(0{,}05; 0{,}95)^2$ для целевой функции, назначающей каждой особи ранг путем случайного разбиения популяции на пары с последующим проведением поединков в каждой из них.

Две координаты в составе хромосом задают, соответственно, выносливость (x_i) и силу (y_i) особи. Кроме того, для каждой особи формулой $p_i = 1 - (x_i + y_i)/2$ задана вероятность попадания по противнику. В начале поединка каждая особь получает запас энергии, равный ее выносливости. В ходе поединка особи по очереди пытаются нанести друг другу удары (попадая со своей вероятностью p_i); в случае успеха энергия атакуемого уменьшается на величину, равную силе атакующего (p_i не изменяется). Как только энергия одной из особей становится неположительной, ее противник выигрывает поединок.

По итогам турниров ранги назначаются таким образом, чтобы проигравшие отсеивались, а победители оценивались по трем следующим вариантам критерия.

Вариант	Цель ранжирования победителей
1.	Без предпочтений.
2.	Минимизация количества раундов поединка.
3.	Максимизация количества раундов поединка.

Вопросы для собеседования

1. Какие понятия заимствует ГА из биологии?
2. Что такое векторизация целевой функции, для чего она применяется?
3. Каковы преимущества и недостатки ГА по сравнению с традиционными методами оптимизации?
4. Какие существуют разновидности ГА?
5. В каких еще, кроме ГА, задачах и методах оптимизации используются эволюционные аналогии?

Лабораторная работа №4. Рефлексивная метаоптимизация

Цель работы

Поиск параметров генетического алгоритма, обеспечивающих наилучшую его сходимость.

Методические указания

Генетические алгоритмы представляют собой не классические целостные последовательности действий, но системы взаимодействующих друг с другом компонент (популяция и модифицирующие ее операторы). Каждая из этих компонент может иметь различные качественные и количественные характеристики. Например, популяция может характеризоваться типом индивидуумов, их областью значений и количеством. Каждый оператор характеризуется своим алгоритмом и его числовыми параметрами, а скрещивание и мутация, кроме того, вероятностью применения.

В зависимости от перечисленных характеристик эффективность генетического алгоритма может существенно различаться. С самого начала развития технологии ГА предпринимались попытки поиска оптимальных параметров. В данной лабораторной работе предлагается один из возможных подходов к этой задаче, основанный на технике рефлексивной метаоптимизации.

При предложенном ниже выборе параметров, подвергаемых оптимизации, данная лабораторная работа может служить иллюстрацией к вопросу о целесообразности совместного применения операторов скрещивания и мутации. Поскольку они решают одну и ту же задачу (создание индивидуумов для нового поколения), может возникнуть желание исключить один из них, чтобы избавиться от дублирования функциональности.

Рассматривая данные операторы по отдельности, исследователи пришли к следующим выводам. Если целевая функция имеет высокую степень регулярности и четко выраженный глобальный минимум, использование оператора скрещивания позволяет существенно ускорить поиск последнего. При увеличении числа локальных минимумов эффективность оператора скрещивания существенно снижается. Аналогичный эффект имеет место, если значения целевой функции в точках локальных минимумов приближаются к величине глобального минимума. С другой стороны, при использовании исключительно оператора мутации на работу ГА практически не влияют ни количество локальных экстремумов, ни их величины.

Таким образом, взаимные преимущества двух данных видов операторов проявляются в различных классах задач. В целом, использование скрещивания позволяет ускорить сходимость ГА, в то время как мутация, внося в популяцию помехи, замедляет стягивание ее к искомой точке, одновременно защищая от вырождения (преждевременного схождения к ложным экстремумам).

Варианты задания

Взять решения трех подзадач лабораторной работы №2, соответствующие своему варианту. Выбрать 2–3 параметра ГА, подлежащие оптимизации (например, вероятность скрещивания, вероятность и силу мутации). Выбрать для них адекватные области поиска, а для остальных параметров — подходящие фиксированные значения. Сформировать целевую функцию верхнего уровня, которая принимает значения выбранных параметров в качестве аргументов, производит поиск решения соответствующим алгоритмом и возвращает некоторый показатель качества результата (на выбор разработчика), т.е. меру его близости к истинному положению минимума. Для каждой подзадачи определить положение минимума этой целевой функции с помощью ГА, сравнить и объяснить результаты.

Вопросы для собеседования

1. Какова функция оператора селекции?
2. Какова функция оператора скрещивания?
3. Какова функция оператора мутации?
4. Чем отличаются роли операторов скрещивания и мутации?
5. Что такое гибридный ГА?

Библиографический список

1. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы: Учебник. — М.: Финансы и статистика, 2004.
2. Афонин В. Л., Макушкин В. А. Интеллектуальные робототехнические системы: курс лекций: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям в области информ. технологий. — М.: Интернет-Ун-т Информ. Технологий, 2005.
3. Букатова И. Л. и др. Эвоинформатика. Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Наука, 1991.
4. Поздяев В. В. Интеллектуальные системы. Уч. пособие. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2008.

Содержание

Введение....3

Порядок выполнения лабораторных работ....3

Лабораторная работа №1. Оптимизация функций вещественных переменных....3

Лабораторная работа №2. Оптимизация функций вещественных переменных, часть 2....11

Лабораторная работа №3. Эволюционный процесс....14

Лабораторная работа №4. Рефлексивная метаоптимизация....16

Библиографический список....18

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры информатики
(протокол № 1 от 12.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ А. В. Дружинин

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.09.07 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные информационные системы проникают во все сферы нашей жизни, поэтому становятся неотъемлемым элементом при решении задач автоматизации и управления сложными объектами и процессами.

Современное понятие интеллектуальных систем (ИС) сформировалось в процессе развития теоретических основ кибернетики, современной теории управления, теории алгоритмов, развития современных информационных технологий и обобщения накопленных научных знаний, методов и средств в области искусственного интеллекта (ИИ).

Целью текста лекций является обзорное ознакомление студентов, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» и другим родственным направлениям, с проблематикой и областями использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах обработки информации и управления, освещение теоретических и организационно-методических вопросов построения и функционирования систем, основанных на знаниях, привитие навыков практических работ по проектированию баз знаний. В результате изучения лекционного материала студенты получат знания по архитектуре и классификации ИС, методам представления знаний, областям применения, а также научатся выбирать адекватные проблемной области методы проектировании базы знаний.

Поэтому в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования для формирования у студентов общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций в модуль «Профессиональные дисциплины» учебного плана подготовки магистров по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» введена учебная дисциплина «Интеллектуальные системы».

Изучение студентами дисциплины «Интеллектуальные системы» должно ознакомить с основными понятиями и концепциями теории интеллектуальных систем, а также осветить вопросы построения и функционирования ИС, основанных на знаниях, с целью вооружить будущих магистров теоретическими знаниями и практическими навыками, необходимыми для решения задач создания и использования современных интеллектуальных информационных технологий и систем в области информационно-аналитического обеспечения подготовки и принятия управленческих решений по всем аспектам экономических, социальных и технических проблем.

Предполагается, что студенты уже прослушали курсы по информатике, программированию и основам алгоритмизации, базам данных в информационно-управляющих системах, математическим основам кибернетики, теории систем и управления, моделированию систем, системам автоматизации и управления.

В связи с большим объемом информации при ограниченном количестве аудиторных часов в одном семестре (18 часов лекционных и 18 часов практических занятий) в определенной мере связаны ограниченный объем учебного по-

собия и краткость изложения материала, что во многом и предопределило его обзорный характер. Поэтому основная часть материала дана в виде краткой справочной информации со ссылками на более полные источники. В соответствии с этим в список рекомендуемой литературы включены источники, необходимые для углубленного изучения рассматриваемых вопросов. К настоящему времени издано множество научно-технической литературы по указанной проблематике, включая и учебно-методические издания из различных вузов. При формировании списка литературы учитывалась реальная возможность доступа студентов к рекомендуемым материалам, поэтому представленный список не претендует на полноту и не является исчерпывающим перечнем. В связи с этим ограничены ссылки на известные, но трудно доступные классические основополагающие работы, а в первую очередь указаны ссылки на более доступные современные книги, а также различные методические и справочные материалы в Интернете, отдельные фрагменты из которых частично использованы в данном пособии.

По причине ограниченности часов дисциплины внимание в тексте лекций уделено такому актуальному направлению ИИ как интеллектуальный анализ данных (ИАД). Приводится классификация методов и программных средств реализации ИАД, которые будут более подробно изучаться на практических занятиях.

Курс лекций включает 18 часов лекций, которые в соответствии с рабочей программой дисциплины сгруппированы в 3 раздела:

1. Введение в интеллектуальные системы.

2. Модели представления знаний. Способы формализации интеллектуальных задач с помощью методов искусственного интеллекта.

3. Интеллектуальный анализ данных. Методы ИАД и их программная реализация.

В конце каждого раздела помещены контрольные вопросы, которые служат для проверки качества усвоения и понимания материала и могут быть включены в экзаменационные билеты.

Фактическое содержание данного текста лекций является введением в научные и методические основы создания и применения современных интеллектуальных систем и технологий применительно к решению различных сложных задач управления в компаниях. Приведенный в тексте лекций материал интегрирует информацию из наиболее актуальных и значимых источников, что позволяет в лаконичной форме дать магистрантам результаты, достигнутые в теории и практике ИС.

Глава 1. ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1. История исследований и основные понятия в области искусственного интеллекта

Возникновение понятия интеллектуальных систем тесно связано с понятием искусственного интеллекта (ИИ) и современной теории управления [1-14]. Исследования в области ИИ стали развиваться наиболее активно с 50-х годов прошлого века в связи с развитием средств вычислительной техники, информатики и кибернетики.

На разных этапах развития ИИ исследователями различных направлений ИИ предлагались свои определения ИИ. Так в математическом энциклопедическом словаре приводилось следующее определение: «Искусственный интеллект (от латинского intellectus – познание, понимание, рассудок) это раздел информатики, изучающий методы, способы и приемы моделирования и воспроизведения с помощью ЭВМ разумной деятельности человека, связанной с решением задач». Академик Г.С. Поспелов в книге «Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии» писал: «под искусственным интеллектом понимается наука о том, как заставить машину делать то, что умеет делать умный человек». В зарубежной литературе применяют определение термина «искусственный интеллект» как «Artificial Intelligence» (AI). В отличие от философии и психологии, искусственный интеллект в области исследований и разработок технических систем ориентирован не столько на понимание, сколько на построение интеллектуальных систем.

На первоначальном этапе развития были выделены и на данный момент остались актуальными следующие **основные проблемы искусственного интеллекта и направления его развития**:

1. Представление знаний.
2. Решение неформализованных задач.
3. Создание комплексных экспертных систем.
4. Интеллектуальный анализ данных.
5. Общение с ЭВМ на естественном языке.
6. Обучение.
7. Когнитивное моделирование (cognos – знание) и моделирование разума.
8. Обработка визуальной информации и робототехника.

Исторически существует 2 направления исследований в области искусственного интеллекта:

1. Моделирование результатов интеллектуальной деятельности или так называемый машинный интеллект.
2. Моделирование биологических систем или так называемый искусственный разум.

Первое направление рассматривает продукт интеллектуальной деятельности человека, изучает его структуру и стремится воспроизвести этот продукт сред-

ствами компьютерной техники. Успехи этого направления тесно связаны с развитием вычислительной техники и программирования.

Второе направление ИИ рассматривает данные о нейрофизиологической деятельности человека. Разработчики стремятся воспроизвести структуры и процессы в нервной системе с помощью технических устройств так, чтобы их поведение хорошо совпадало с поведением человека в заданных ситуациях. Развитие этого направления тесно связано с успехами наук о человеке. В свою очередь работы по искусственному разуму ведутся по следующим направлениям:

1. Моделирование механизмов умственной деятельности, связанное с созданием нейроподобных сетей (нейрокибернетика). В первую очередь изучаются нервные клетки – нейроны и структуры из взаимосвязанных клеток – нейронные сети. Механизмы таких разработок воплощены в нейрокомпьютеры.

2. Моделирование информационных процессов или так называемое эвристическое программирование, при котором моделируется не нейронные клетки, а мыслительные операции, выполнение которых приводит к успешному решению задачи. Успехи теоретического и прикладного характера достигнуты за счет разработки общего решателя задач – GPS (General Problem Solver).

3. Комплексный подход или так называемое эвристическое моделирование.

Необходимо отметить, что современная теория ИИ и созданные на ее основе интеллектуальные системы (ИС) и технологии были подготовлены трудами многих исследователей на протяжении многих лет.

В 40-50-х годах прошлого века началось бурное развитие информационных технологий и автоматизации: были созданы первые ЭВМ, а Норберт Винер создал свои основополагающие работы по кибернетике, и произошло окончательное оформление искусственного интеллекта как научного направления.

В конце 50-х годов XX в. родилась модель лабиринтного поиска. В этом подходе задача представляется как некоторое пространство состояний в форме графа, и в этом графе проводится поиск оптимального пути от входных данных к результирующим.

Начало 60-х годов – это эпоха эвристического программирования. Эвристика – правило, теоретически не обоснованное, но позволяющее сократить количество переборов в пространстве поиска. Эвристическое программирование – разработка стратегии действий на основе известных, заранее заданных, эвристик.

В 1963-1970 гг. к решению задач ИИ стали подключать методы математической логики. На основе метода резолюций француз Альбер Кольмероэ в 1973 г. создает язык логического программирования Пролог. Однако большинство реальных задач не сводится к набору аксиом. Человек, решая производственные задачи, не использует классическую логику, и поэтому применение логических моделей при всех своих преимуществах имеют существенные ограничения по классам решаемых задач.

В середине 1970-х годов в США вместо поисков универсальных алгоритма мышления стала развиваться идея моделирования конкретных знаний специа-

листов экспертов. В США появились первые коммерческие системы, основанные на знаниях, или экспертные системы (ЭС). Возник новый подход к решению задач искусственного интеллекта – представление знаний. В это время были созданы две первые классические экспертные системы для медицины (MYCIN) и для химии (DENDRAL).

В конце 70-х годов в Японии было объявлено о начале разработки проекта машин V поколения, основанных на знаниях.

В середине 1980-х годов был разработан в Центре космических исследований NASA язык CLIPS, обеспечивающий поддержку программирования на основе правил объектно-ориентированного и процедурного программирования. Название языка CLIPS – аббревиатура от C Language Integrated Production System.

Начиная с середины 80-х годов, повсеместно происходит коммерциализация искусственного интеллекта. Растут ежегодные капиталовложения, создаются промышленные экспертные системы. Растет интерес к самообучающимся системам, издаются десятки научных журналов, ежегодно собираются международные и национальные конференции по различным направлениям ИИ.

В Советском Союзе работы по искусственному интеллекту начались даже раньше, чем на западе [1-3, 5]. В 1954 г. в МГУ начал свою работу семинар «Автоматы и мышление» под руководством академика А.А. Ляпунова В этом семинаре принимали участие физиологи, лингвисты, психологи, математики. Принято считать, что именно в это время родился искусственный интеллект в России.

Среди наиболее значимых результатов, полученных отечественными учеными в 60-е годы, отмечают алгоритм «Кора» М.М. Бонгарда, моделировавший деятельность человеческого мозга при распознавании образов.

В 1965-1980 гг. происходит рождение нового направления – cитуационного управления. Основателем этой научной школы стал проф. Д.А. Поспелов, разработавший специальные модели представления ситуаций.

В 1974 г. при Комитете по системному анализу при президиуме АН СССР начал работу Научный совет по проблеме «Искусственный интеллект». В 1988 г. создается Ассоциация Искусственного Интеллекта (АИИ). Ее членами стали более 300 исследователей, а президентом избирается Д. А. Поспелов.

В 1980-1990 гг. проводятся активные исследования в области представления знаний, разрабатываются языки представления знаний, экспертные системы (более 300). В МГУ им. М. В. Ломоносова создается язык РЕФАЛ.

В конце 90-х годов начинают более активно использоваться идеи и методы искусственного интеллекта в теории и практике управления, появляются отдельные разработки на базе ИИ, включаемые в состав систем управления (СУ). Такие разработки стали называть интеллектными компонентами (ИК) систем управления.

В качестве наиболее используемого типа ИК для СУ становятся искусственные нейронные сети. В системах управления применяется несколько типов ИНС: многослойный персептрон, сеть Кохонена (как однослойная самооргани-

зующаяся карта – Kohonen's Self-Organizing Map), сеть Хопфилда, машина Больцмана и другие [5-8].

В качестве второго типа интеллектных компонент систем управления рассматриваются эволюционные (генетические) алгоритмы, которые тоже являются инструментом поиска рациональных решений. Эволюционные алгоритмы (ЭА) понимаются как алгоритмы со специальными структурами данных, оперирующие с популяциями индивидов.

Для реализации высокоинтеллектуальных функций систем управления используются интеллектные компоненты третьего типа – системы, основанные на «знаниях» (СОЗ, Knowledge-Based Systems). Например, знания могут быть представлены в некотором логическом языке. Обработка знаний с помощью логических средств позволяет получать некоторые предпочтения на множестве допустимых управлений с целью выбора одного из них. В общем случае СОЗ оперируют с более широкой информацией логическими, объектно-ориентированными и другими моделями, основанными на знаниях экспертов. Вместе с тем СОЗ могут использовать и традиционные алгоритмы, базирующиеся на уравнениях динамики.

1.2. Основные направления исследований в области интеллектуальных систем

Рассмотрим краткие характеристики основных направлений исследований в области искусственного интеллекта, описанные в [1-3, 5-11].

Разработка интеллектуальных систем, основанных на знаниях. Это одно из главных направлений ИИ. Основной целью построения таких систем являются выявление, исследование и применение знаний высококвалифицированных экспертов для решения сложных задач, возникающих на практике. При построении систем, основанных на знаниях (СОЗ), используются знания, накопленные экспертами в виде конкретных правил решения тех или иных задач. Это направление преследует цель имитации человеческого искусства анализа неструктурированных и слабоструктурированных проблем. В данной области исследований осуществляется разработка моделей представления, извлечения и структурирования знаний, а также изучаются проблемы создания баз знаний (БЗ), образующих ядро СОЗ. Частным случаем СОЗ являются экспертные системы (ЭС), подробное описание которых можно найти в [1, 5, 9, 17].

Разработка естественно-языковых интерфейсов и машинный перевод. Проблемы компьютерной лингвистики и машинного перевода разрабатываются в ИИ с 1950-х гг. Системы машинного перевода с одного естественного языка на другой обеспечивают быстроту и систематичность доступа к информации, оперативность и единообразие перевода больших потоков. Системы машинного перевода строятся как интеллектуальные системы, поскольку в их основе лежат БЗ в определённой предметной области и сложные модели, обеспечивающие дополнительную трансляцию «исходный язык оригинала – язык смысла – язык перевода». Они базируются на структурно-логическом подходе, включающем последовательный анализ и синтез естественно-языковых сообщений. Кроме

того, в них осуществляется ассоциативный поиск аналогичных фрагментов текста и их переводов в специальных базах данных (БД). Данное направление охватывает также исследования методов и разработку систем, обеспечивающих реализацию процесса общения человека с компьютером на естественном языке (так называемые системы ЕЯ-общения). Кроме того, создаются системы речевого общения в целях повышения скорости ввода информации в ЭВМ, разгрузки зрения и рук, а также для реализации речевого общения на значительном расстоянии. В таких системах под текстом понимают фонемный текст (как слышится).

Обработка визуальной информации. В этом научном направлении решаются задачи обработки, анализа и синтеза изображений. Задача обработки изображений связана с трансформированием графических образов, результатом которого являются новые изображения. В задаче анализа исходные изображения преобразуются в данные другого типа, например в текстовые описания. При синтезе изображений на вход системы поступает алгоритм построения изображения, а выходными данными являются графические объекты (системы машинной графики).

Обучение и самообучение. Эта актуальная область ИИ включает модели, методы и алгоритмы, ориентированные на автоматическое накопление и формирование знаний с использованием процедур анализа и обобщения данных [19-21]. К данному направлению относятся появившиеся в 90-х годах системы добычи данных (Data Mining) и системы поиска закономерностей в компьютерных базах данных (Knowledge Discovery).

Игры и машинное творчество. Машинное творчество охватывает сочинение компьютерной музыки, стихов, интеллектуальные системы для изобретения новых объектов. Создание интеллектуальных компьютерных игр является одним из самых развитых коммерческих направлений в сфере разработки программного обеспечения. Кроме того, компьютерные игры предоставляют мощный арсенал разнообразных средств, используемых для обучения.

Программное обеспечение систем ИИ. Инструментальные средства для разработки интеллектуальных систем включают специальные языки программирования, ориентированные на обработку символьной информации (LISP, SMALLTALK, РЕФАЛ), языки логического программирования (PROLOG), языки представления знаний (OPS5, KRL, FRL), интегрированные программные среды, содержащие арсенал инструментальных средств для создания систем ИИ (КЕ, ARTS, GURU, G2), а также оболочки экспертных систем (BUILD, EMYCIN, EXSYS Professional, ЭКСПЕРТ), которые позволяют создавать прикладные ЭС, не прибегая к программированию [7, 15-17].

Новые архитектуры компьютеров. Это направление связано с созданием компьютеров не фон-неймановской архитектуры, ориентированных на обработку символьной информации. Известны удачные промышленные решения параллельных и векторных компьютеров, однако в настоящее время они имеют весьма высокую стоимость, а также недостаточную совместимость с существующими вычислительными средствами.

Интеллектуальные роботы. Создание интеллектуальных роботов составляет конечную цель робототехники. В настоящее время в основном используются программируемые манипуляторы с жёсткой схемой управления, названные роботами первого поколения. Несмотря на очевидные успехи отдельных разработок, эра интеллектуальных автономных роботов пока не наступила. Основными сдерживающими факторами в разработке автономных роботов являются нерешённые проблемы в области интерпретации знаний, машинного зрения, адекватного хранения и обработки трёхмерной визуальной информации.

1.3. Основные признаки и отличия интеллектуальных систем

Для интеллектуальных систем характерны следующие признаки [6-7, 10-11]:

1. Развитые коммуникативные способности: возможность обработки произвольных запросов в диалоге на языке максимально приближенном к естественному (система естественно-языкового интерфейса – СЕЯИ).

2. Направленность на решение слабоструктурированных, плохо формализуемых задач (реализация мягких моделей).

3. Способность работать с неопределенными и динамичными данными.

4. Способность к развитию системы и извлечению знаний из накопленного опыта конкретных ситуаций.

5. Возможность получения и использования информации, которая явно не хранится, а выводится из имеющихся в базе данных.

6. Система имеет не только модель предметной области, но и модель самой себя, что позволяет ей определять границы своей компетентности.

7. Способность к выводам по аналогии.

8. Способность объяснять свои действия, неудачи пользователя, предупреждать пользователя о некоторых ситуациях, приводящих к нарушению целостности данных.

В отличие от обычных аналитических и статистических моделей, ИС позволяют получить решение трудно формализуемых слабо структурированных задач.

Возможность ИС работать со слабоструктурированными данными подразумевает наличие следующих качеств:

− решать задачи, описанные только в терминах «мягких» моделей, когда зависимости между основными показателями являются не вполне определенными или даже неизвестными в пределах некоторого класса;

− способность к работе с неопределенными или динамичными данными, изменяющимися в процессе обработки, позволяет использовать ИС в условиях, когда методы обработки данных могут изменяться и уточняться по мере поступления новых данных;

− способность к развитию системы и извлечению знаний из накопленного опыта конкретных ситуаций увеличивает мобильность и гибкость системы, позволяя ей быстро осваивать новые области применения.

Отличия программирования систем искусственного интеллекта от обычных программных систем представлены в таблице.

Таблица

Отличия интеллектуальных систем от обычных программных систем

Характеристика	Программирование в интеллектуальных системах	Традиционное программирование
Тип обработки	Символьный	Числовой
Метод	Эвристический поиск	Точный алгоритм
Задание шагов решения	Неявное	Явное
Искомое решение	Удовлетворительное	Оптимальное
Управление и данные	Смешаны	Разделены
Знания	Неточные	Точные
Модификации	Частые	Редкие

Для интеллектуальных информационных систем, ориентированных на генерацию алгоритмов решения задач, характерны следующие признаки:

– развитые коммуникативные способности;
– умение решать сложные плохо формализуемые задачи;
– способность к самообучению.

Коммуникативные способности ИС характеризуют способ взаимодействия (интерфейса) конечного пользователя с системой, в частности, возможность формулирования произвольного запроса в диалоге с ИС на языке, максимально приближенном к естественному.

Сложные плохо формализуемые задачи – это задачи, которые требуют построения оригинального алгоритма решения в зависимости от конкретной ситуации, для которой могут быть характерны неопределенность и динамичность исходных данных и знаний.

Способность к самообучению – это возможность автоматического извлечения знаний для решения задач из накопленного опыта конкретных ситуаций.

В различных ИС перечисленные признаки интеллектуальности развиты в неодинаковой степени и редко, когда все четыре признака реализуются одновременно. Условно каждому из признаков интеллектуальности соответствует свой класс ИС:

– системы с интеллектуальным интерфейсом;
– экспертные системы;
– самообучающиеся системы.

Анализ интеллектуальности систем, разработанный профессором Логиновским О.В., основан на следующих базовых интеллектуальных структурах, которые приводятся ниже в соответствии с работой [10]. Такие структуры, как идентификаторы, исполнители, накопители, модификаторы являются базовыми элементами более сложных интеллектуальных систем (экспертных, систем автоматизации управления, в частности, автоматизированных систем проектирования и управления). При этом системы становятся многоуровневыми, иерархическими, на нижнем уровне которых обязательно присутствуют интеллектуальные идентификаторы, исполнители и накопители. В конкретной предметной

области управления (планирования, проектирования) объект управления выделяется в системе идентификаторами и накопителями по принципу обратной связи.

Перечисленные виды интеллектуальных систем:

1. Интеллектуальный идентификатор (ИДЕН)

$$<\text{ИДЕН}> = \{ A, p, w, a, \text{Ш} \},$$

где A – множество объектов предметной области (опорное множество); p – подмножество A, являющееся классом эквивалентности по какому-либо признаку; w – семантическая достоверность сведения об объекте; a – семантический указатель объекта из опорного множества A; Ш – шкала понятий для множества A.

Интеллектуальный идентификатор выполняет в системе функции идентификации данных об объектах предметной области по существующим семантическим указателям, решая задачу интеллектуального распознавания объектов.

2. Интеллектуальный исполнитель (ИСП) представляет собой интеллектуальную структуру, позволяющую по данным об объекте a из опорного множества A отыскать конкретный объект и (при необходимости) осуществить операции по его воплощению в предметной области.

3. Интеллектуальный накопитель (НАК) также выполняет функции интеллектуальной системы, состоящие в пополнении данных об объекте от различных источников из множества A, формируя соответствующие базы и банки данных территориального и муниципального управления.

Формульные соотношения интеллектуальных накопителя и исполнителя аналогичны интеллектуальному идентификатору.

4. Интеллектуальный модификатор (МОД) осуществляет функции преобразования данных из одного множества A в данные об объектах другого множества A' со шкалой понятий (перечнем свойств) Ш':

$$\{ A, p, w, a, \text{Ш} \} \Rightarrow \{ A', p, w, a', \text{Ш}' \}.$$

При совпадении опорных множеств A и A', данные об объекте $a \in A$ преобразуются модификатором в данные о том же объекте (сингулярные модификаторы). Свойство сингулярности весьма характерно для автоматизированных систем проектирования и управления.

5. Интеллектуальный анализатор (АНАЛ), выполняющий функции анализа и оценки эффективности системы с учетом интеллектуальности и других основополагающих характеристик.

6. Интеллектуальный синтезатор (СИН), осуществляющий синтез новых характеристик, свойств и возможностей системы на основе сформированных баз знаний о предметной области в целом и самой системе в частности с помощью искусственного или естественного интеллекта.

На основе представленного набора интеллектуальных структур можно анализировать или формировать на множестве компонент предметной области топологию интеллектуальности посредством понятия интеллектуальной системы:

$$SI_i = \{ R_i, t_i \},$$

где R_i – множество компонент предметной области для i-той системы; t_i – топология i-той системы, включающую базу топологий в виде набора базовых интеллектуальных структур.

При $t_i = 0$, любая из рассматриваемых систем не является интеллектуальной.

Формализация процедур оценки интеллектуальности систем должна осуществляться совместно с оценкой их эффективности и конкурентоспособности:

$$SE_i = \{R_i, F_i, C_i, P_i, I_i, E_i \},$$

где F_i – множество компонент функциональной модели i-той системы; C_i – множество компонент структурной модели i-той системы; P_i – множество компонент программного обеспечения i-той системы; I_i – множество компонент информационного обеспечения i-той системы; E_i - множество характеристик эффективности i-той системы.

Все указанные компоненты и характеристики для конкретных систем всегда больше нуля. Более сильная топология соответствует более высокому уровню эффективности и конкурентоспособности системы.

1.4. Основные типы интеллектуальных систем

В данном учебном пособии, как и в [11] мы будем рассматривать следующие классы систем искусственного интеллекта:

1. Системы с интеллектуальной обратной связью и интеллектуальными интерфейсами.
2. Автоматизированные системы распознавания образов.
3. Автоматизированные системы поддержки принятия решений.
4. Экспертные системы.
5. Нейронные сети.
6. Когнитивное моделирование.
7. Генетические алгоритмы и моделирование эволюции.
8. Выявление знаний из опыта (эмпирических фактов) и интеллектуальный анализ данных (Data Mining).

Этими классами системы ИС не исчерпываются, но мы вынуждены ограничится ими, как основными, в связи с ограниченностью объема учебного пособия.

Системы с интеллектуальным интерфейсом. Применение ИИ для усиления коммуникативных способностей информационных систем привело к появлению систем с интеллектуальным интерфейсом, среди которых можно выделить следующие типы [6-7]:

1. Интеллектуальные базы данных. Они позволяют в отличие от традиционных БД обеспечивать выборку необходимой информации, не присутствующей в явном виде, а выводимой из совокупности хранимых данных.

2. Естественно-языковой интерфейс. Он применяется для доступа к интеллектуальным базам данных, контекстного поиска документальной текстовой информации, голосового ввода команд в системах управления, машинного перевода с иностранных языков. Для реализации ЕЯ-интерфейса необходимо решить проблемы морфологического, синтаксического и семантического анализа, а также задачу синтеза высказываний на естественном языке. При морфологическом анализе осуществляются распознавание и проверка правильности написания слов в словаре.

3. Гипертекстовые системы предназначены для реализации поиска по ключевым словам в базах текстовой информации. Интеллектуальные гипертекстовые системы отличаются возможностью более сложной семантической организации ключевых слов, которая отражает различные смысловые отношения терминов. Таким образом, механизм поиска работает прежде всего с базой знаний ключевых слов, а уже затем непосредственно с текстом. В более широком плане сказанное распространяется и на поиск мультимедийной информации, включающей помимо текстовой и цифровой информации графические, аудио и видео-образы.

4. Системы контекстной помощи можно рассматривать, как частный случай интеллектуальных гипертекстовых и естественно-языковых систем. В отличие от обычных систем помощи, навязывающих пользователю схему поиска требуемой информации, в системах контекстной помощи пользователь описывает проблему (ситуацию), а система с помощью дополнительного диалога ее конкретизирует и сама выполняет поиск относящихся к ситуации рекомендаций. Такие системы относятся к классу систем распространения знаний (Knowledge Publishing) и создаются как приложение к системам документации (например, технической документации по эксплуатации товаров).

5. Системы когнитивной графики позволяют осуществлять интерфейс пользователя с ИС с помощью графических образов, которые генерируются в соответствии с происходящими событиями. Такие системы используются в мониторинге и управлении оперативными процессами. Графические образы в наглядном и интегрированном виде описывают множество параметров изучаемой ситуации. Например, состояние сложного управляемого объекта отображается в виде человеческого лица, на котором каждая черта отвечает за какой-либо параметр, а общее выражение лица дает интегрированную характеристику ситуации.

Экспертные системы. Назначение экспертных систем (ЭС) заключается в решении достаточно трудных для экспертов задач на основе накапливаемой базы знаний, отражающей опыт работы экспертов в рассматриваемой проблемной области. Достоинство применения экспертных систем заключается в возможности принятия решений в уникальных ситуациях, для которых алгоритм заранее не известен и формируется по исходным данным в виде цепочки рассуждений

(правил принятия решений) из базы знаний. Причем решение задач предполагается осуществлять в условиях неполноты, недостоверности, многозначности исходной информации и качественных оценок процессов.

Экспертная система является инструментом, усиливающим интеллектуальные способности эксперта, и может выполнять следующие роли:

– консультанта для неопытных или непрофессиональных пользователей;
– ассистента в связи с необходимостью анализа экспертом различных вариантов принятия решений;
– партнера эксперта по вопросам, относящимся к источникам знаний из смежных областей деятельности.

Область исследования экспертных систем называют «инженерией знаний». ЭС применяются для решения неформализованных проблем, к которым относят задачи, обладающие одной (или несколькими) из следующих характеристик:

– задачи не могут быть представлены в числовой форме;
– неоднозначностью, неточностью, противоречивостью;
– цели нельзя выразить с помощью чётко определённой целевой функции;
– не существует однозначного алгоритмического решения задачи;
– алгоритмическое решение существует, но его нельзя использовать по причине большой размерности пространства решений и ограничений на ресурсы (времени, памяти).

Главное отличие ЭС на рис. 1 и систем искусственного интеллекта от систем обработки данных состоит в том, что в них используется символьный, а не числовой способ представления данных, а в качестве методов обработки информации применяются процедуры логического вывода и эвристического поиска решений.

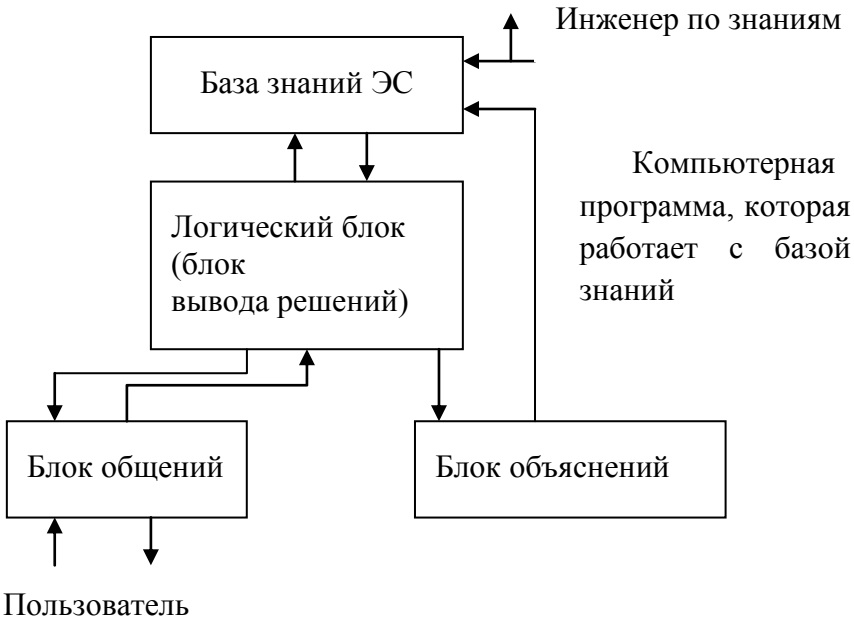


Рис. 1. Общая структура экспертной системы

Отличительным блоком структуры ЭС является логический блок (решатель), в котором вырабатывается экспертное заключение.

Структура классификации экспертных систем представлена на рис.2.

Рис. 2. Классификация экспертных систем

Классификация по решаемой задаче имеет вид:

1. Экспертные системы, обладающие средствами для интеллектуального анализа данных. Для интерпретации данных используются технологии Data Mining.

2. Диагностические экспертные системы. Они применяется при диагнозе технической системы, при диагностике в сфере медицины и в сфере финансов, банковского дела.

3. Экспертные системы мониторинга. Они способны дать объяснение данных в реальном масштабе времени, либо сигнализировать выход параметров за допустимые значения (границы) (например, в подразделениях министерства чрезвычайных ситуаций).

4. Экспертные системы прогнозирования. Системы, которые прогнозируют состояние финансового рынка, курс валют. ЭС прогнозирования являются первыми моделями аналитического плана, т. е. использующими элемент вероятности.

5. Экспертные системы планирования. С помощью таких систем составляется, например, бюджетное планирование, финансирование.

6. Экспертные системы для управления. Это системы, которые подготавливают варианты возможных решений для управления: например, системы-подсказчики для руководителей.

Классификация ЭС по связи с реальным временем:

1. Статические экспертные системы. К статическим относят такие системы, в которых базы данных и данные не меняются с течением времени (по меньшей мере, во время проведения экспертизы). Примером статической системы может служить ЭС диагностики технического состояния какого-либо устройства.

2. Динамические экспертные системы. Динамические системы применимы для задачи анализа, когда резко меняется ситуация или база знаний. Для работы такой системы должна существовать обратная связь и быстрые машины.

3. Квазидинамические экспертные системы. К квазидинамическим относятся ЭС, в которых если даже за время осуществления экспертизы параметры меняются, то при повторной экспертизе параметры остаются неизменными.

Классификация экспертных систем по типам применяемой архитектуры ЭВМ:

1. Экспертные системы с обычной архитектурой ЭВМ.
2. Экспертные системы со специальными нейрокомпьютерами – многопроцессорными вычислительными системами.

Классификация ЭС по степени интеграции с другими программами:

1. Автономные экспертные системы. К автономным ЭС относят системы, которые не требуют дополнительных программ для обработки данных.
2. Гибридные экспертные системы. К гибридным ЭС относят системы, которые работают с привлечением дополнительных программных средств.

Экспертные системы охватывают самые разные предметные области, среди которых лидируют бизнес, производство, медицина, проектирование и системы управления [1, 5-7, 15, 17, 18].

Нейронные сети. Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это кибернетическая модель нервной системы, которая представляет собой совокупность большого числа сравнительно простых элементов – нейронов, топология соединения которых зависит от типа сети. Чтобы создать нейронную сеть для решения какой-либо конкретной задачи, следует выбрать способ соединения нейронов друг с другом и подобрать значения параметров межнейронных соединений.

Нейронные сети – обобщённое название группы математических алгоритмов, обладающих способностью обучаться на примерах, «узнавая» впоследствии черты встреченных образцов и ситуаций. Благодаря этой способности нейронные сети используются при решении задач обработки сигналов и изображений, распознавания образов, а также для прогнозирования [7].

ИНС представляет собой совокупность простых вычислительных элементов – искусственных нейронов, каждый из которых обладает определённым количеством входов (дендритов) и единственным выходом (аксоном), разветвления которого подходят к синапсам, связывающим его с другими нейронами. На входы нейрона поступает информация извне или от других нейронов. Каждый нейрон характеризуется функцией преобразования входных сигналов в выходной (функция возбуждения нейрона). Нейроны в сети могут иметь одинаковые или разные функции возбуждения. Сигналы, поступающие на вход нейрона, неравнозначны в том смысле, что информация из одного источника может быть более важной, чем из другого. Приоритеты входов задаются с помощью вектора весовых коэффициентов, моделирующих синаптическую силу биологических нейронов.

Модель искусственного нейрона представляет собой дискретно-непрерывный преобразователь информации. Информация, поступающая на вход нейрона, суммируется с учётом весовых коэффициентов w_i, сигналов x_i, $i = 1, .., n$, где n – размерность пространства входных сигналов. Потенциал нейрона определяется по формуле:

$$P = \sum_{i=0}^{n} x_i w_i.$$

Взвешенная сумма поступивших сигналов (потенциал) преобразуется с помощью передаточной функции $f(P)$ в выходной сигнал нейрона Y, который передается другим нейронам сети, т. е. $Y = f(P)$. Вид передаточной (активационной) функции является важнейшей характеристикой нейрона. В общем случае эта функция может быть ступенчатой (пороговой), линейной или нелинейной). Тип функции переноса выбирается с учётом конкретной задачи, решаемой с применением нейронных сетей. Например, в задачах аппроксимации и классификации предпочтение отдают логистической (сигмоидальной) кривой.

Нейронная сеть представляет собой совокупность искусственных нейронов, организованных слоями. При этом выходы нейронов одного слоя соединяются с входами нейронов другого.

В зависимости от топологии соединений нейронов ИНС подразделяются на одноуровневые и многоуровневые, с обратными связями и без них. Связи между слоями могут иметь различную структуру.

В однолинейных сетях каждый нейрон (узел) нижнего слоя связан с одним нейроном верхнего слоя. Если каждый нейрон нижнего слоя соединён с несколькими нейронами следующего слоя, то получается пирамидальная сеть. Воронкообразная схема соединений предполагает связь каждого узла верхнего слоя со всеми узлами нижнего уровня. Существуют также древовидные и рекуррентные сети, содержащие обратные связи с произвольной структурой межнейронных соединений.

Чтобы построить ИНС для решения конкретной задачи, нужно выбрать тип соединения нейронов, определить вид передаточных функций элементов и подобрать весовые коэффициенты межнейронных связей.

При всём многообразии возможных конфигураций ИНС на практике получили распространение лишь некоторые из них. Классические модели нейронных сетей:

- многослойные сети;
- сети Хопфилда;
- сети Хемминга;
- сети обратного распространения;
- сети встречного распространения;
- РБФ-сети;
- сети Кохонена и др.

С помощью нейронных сетей, которые относят к методам эволюционного моделирования, решается широкий класс задач: классификация образов, кластеризация, аппроксимация, прогноз данных, оптимизация, ассоциативная память, управление динамическими объектами. Причем в силу всего вышесказанного, нейронные сети в сравнении с методами математической статистики справляются с перечисленными задачами тем успешнее, чем хуже формализуема задача.

Нейросетевые технологии нашли широкое применение в таких направлениях, как распознавание печатного текста, контроль качества продукции на производстве, идентификация событий в ускорителях частиц, разведка нефти,

борьба с наркотиками, медицинские и военные приложения, управление и оптимизация, финансовый анализ, прогнозирование и др.

В сфере экономики нейросетевые технологии могут использоваться для классификации и анализа временных рядов путём аппроксимации сложных нелинейных функций.

Экспериментально установлено, что модели нейронных сетей обеспечивают большую точность при выявлении нелинейных закономерностей на фондовом рынке по сравнению с регрессионными моделями [7].

Когнитивное моделирование – это способ анализа, обеспечивающий определение силы и направления влияния факторов на перевод объекта управления в целевое состояние с учетом сходства и различия в влиянии различных факторов на объект управления.

Ведущей научной организацией России, занимающейся разработкой и применением технологии когнитивного анализа, является Институт проблем управления РАН. На их научных трудах в области когнитивного анализа и основывается данная лекция [11].

В основе технологии когнитивного анализа и моделирования (рис. 3) лежит когнитивная (познавательно-целевая) структуризация знаний об объекте и внешней для него среды.

Когнитивная структуризация предметной области – это выявление будущих целевых и нежелательных состояний объекта управления и наиболее существенных (базисных) факторов управления и внешней среды, влияющих на переход объекта в эти состояния, а также установление на качественном уровне причинно-следственных связей между ними, с учетом взаимовлияния факторов друг на друга.

Результаты когнитивной структуризации отображаются с помощью когнитивной карты (модели).

Отбор базисных факторов проводится путем применения ***PEST-анализа,*** выделяющего четыре основные группы факторов (аспекта), определяющих поведение исследуемого объекта:

- **P**olicy – политика;
- **E**conomy – экономика;
- **S**ociety – общество (социокультурный аспект);
- **T**echnology – технология.

PEST-анализ можно рассматривать как вариант системного анализа, так как факторы, относящиеся к перечисленным четырем аспектам, в общем случае тесно взаимосвязаны и характеризуют различные иерархические уровни общества, как системы.

В этой системе есть детерминирующие связи, направленные с нижних уровней иерархии системы к верхним (наука и технология влияет на экономику, экономика влияет на политику), а также обратные и межуровневые связи. Изменение любого из факторов через эту систему связей может влиять на все остальные.

Эти изменения могут представлять угрозу развитию объекта, или, наоборот, предоставлять новые возможности для его успешного развития.

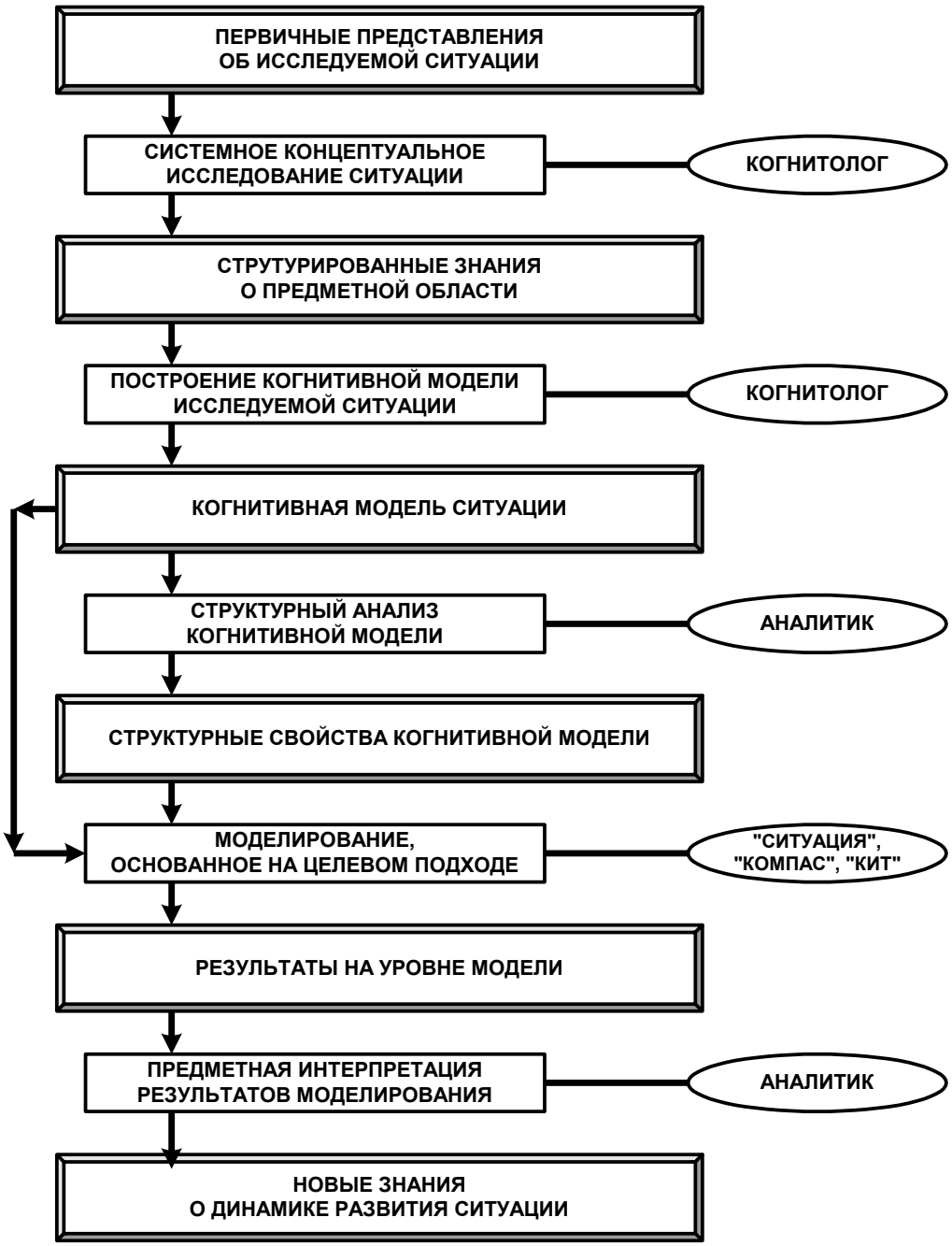


Рис. 3. Технология когнитивного анализа и моделирования

Следующий шаг – ситуационный анализ проблем, так называемый ***SWOT-анализ***:

- **S**trengths – сильные стороны;
- **W**eaknesses – недостатки, слабые стороны;
- **O**pportunities – возможности;
- **T**hreats – угрозы.

SWOT-анализ включает анализ сильных и слабых сторон развития исследуемого объекта в их взаимодействии с угрозами и возможностями и позволяет определить актуальные проблемные области, узкие места, шансы и опасности, с учетом факторов внешней среды.

Технология когнитивного анализа и моделирования поддерживается программными комплексами «Ситуация», «Компас», «КИТ» (см. рис. 3), созданными в ИПУ РАН, которые позволяют в сложных и неопределенных ситуациях быстро, комплексно и системно охарактеризовать и обосновать сложившуюся ситуацию и на качественном уровне предложить пути решения проблемы в этой ситуации с учетом факторов внешней среды.

Применение когнитивных технологий открывает новые возможности прогнозирования и управления в различных областях:

– в экономической сфере – позволяет в сжатые сроки разработать и обосновать стратегию экономического развития предприятия, банка, региона или даже целого государства с учетом влияния изменений во внешней среде;

– в сфере финансов и фондового рынка – учесть ожидания участников рынка;

– в военной области и области информационной безопасности – противостоять стратегическому информационному оружию, заблаговременно распознавая конфликтные структуры и вырабатывая адекватные меры реагирования на угрозы.

Когнитивные технологии автоматизируют часть функций процессов познания, поэтому они с успехом могут применяться во всех областях, в которых востребовано само познание. Вот лишь некоторые из этих областей:

1. Модели и методы интеллектуальных информационных технологий и систем для создания геополитических, национальных и региональных стратегий социально-экономического развития.

2. Модели выживания «мягких» систем в изменяющихся средах при дефиците ресурсов.

3. Ситуационный анализ и управление развитием событий в кризисных средах и ситуациях.

4. Информационный мониторинг социально-политических, социально-экономических и военно-политических ситуаций.

5. Разработка принципов и методологии проведения компьютерного анализа проблемных ситуаций.

6. Выработка аналитических сценариев развития проблемных ситуаций и управления ими.

7. Подготовка рекомендаций по решению первоочередных стратегических проблем на основе компьютерной системы анализа проблемных ситуаций.

8. Мониторинг проблем в социально-экономическом развитии корпорации, региона, города, государства.

9. Технология когнитивного моделирования целенаправленного развития региона РФ.

10. Анализ развития региона и мониторинг проблемных ситуаций при целенаправленном развитии региона.

Интеллектуальный анализ данных. Данная лекция основана на работах [8, 19-21]. К числу интеллектуальных технологий анализа данных относят технологии ***Data Mining*** (разведка, добыча данных), которые реализуют:

– поиск ранее неизвестных функциональных и логических закономерностей накопленной информации (интеллектуальная деятельность);

– построение моделей и правил с целью объяснения этих найденных закономерностей или найденных аномалий;

– прогнозирование развития изучаемых процессов.

Специфика современных требований к переработке данных:

– данные имеют практически неограниченный объем;

– данные являются разнородными (количественными, качественными, тестовыми и т.д.);

– результаты должны быть конкретны и понятны;

– инструменты для обработки «сырых», т. е. непроверенных, неверифицированных данных должны быть просты в использовании.

Процесс обнаружения в «сырых» данных включает в себя поиск:

– ранее неизвестных знаний;

– нетривиальных выводов;

– практически полезных выводов;

– доступных для интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности.

Место технологий ***Data Mining*** среди других технологий обработки данных по уровню знаний, извлекаемых из данных, приведено на рис 4.

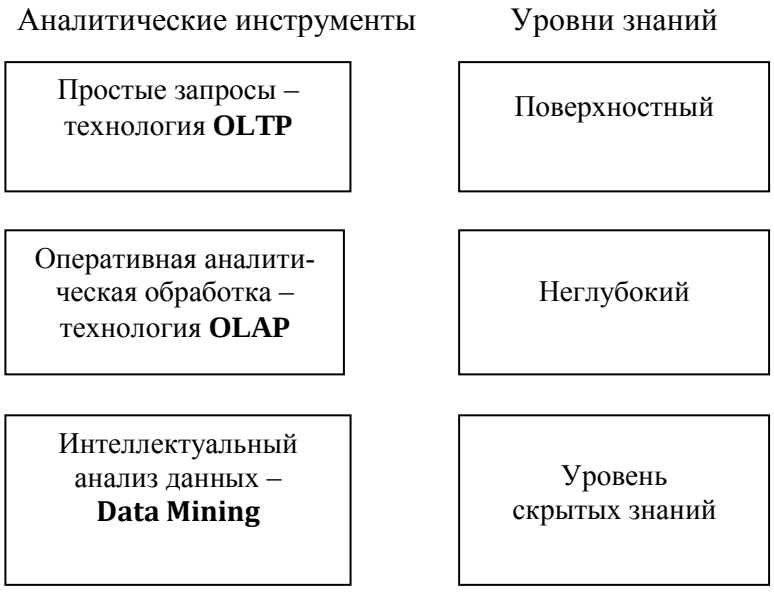


Рис. 4. Схема уровней знаний, извлекаемых из данных

Data Mining применяется в следующих отраслях:

– торговля, в том числе и розничная (анализ покупательской корзины, анализ временных шаблонов, создание прогнозируемых моделей);

– страхование;

– банковское дело (выявление мошенников с кредитными карточками, сегментация клиентов (разбиение на группы – каким клиентам какие услуги предлагать), прогнозирование изменения клиентуры);

– в сфере коммуникаций (здесь ставятся следующие задачи: анализ записей по характеристикам вызовов – какой круг клиентов, какими видами услуг пользуется; выявление лояльности клиентов);

– химия;

– промышленность;

– медицина и т. д.

Успех применения систем Data Mining основан на том, что эти технологии обеспечивают исследование эмпирических данных и выявление в них скрытых закономерностей различных видов, т. е. обеспечивают решение следующих задач:

1. Классификация – задача выявления признаков однотипных объектов для того, чтобы отнести новый объект к тому или иному классу.

2. Кластеризация – развитие идеи классификации на более сложный случай, когда сами классы объектов не предопределены, но стоит задача определить однородные группы данных.

3. Выявление ассоциаций – установление правил, указывающих на то, что при наступлении одного события с определенной вероятностью наступает другое.

4. Выявление последовательностей – установление связи между событиями, наступающими не одновременно, а с некоторым временным шагом.

5. Задача прогнозирования – оценка будущих значений, определяемых показателей на основе их текущих и ретроспективных данных. Это наиболее сложная из перечисленных задач.

Процесс информационной деятельности может быть представлен рядом временных стадий, которые изображены на рис.5.

Свободный поиск – это процесс исследования накопленных данных на предмет поиска скрытых закономерностей без предварительного выявления гипотез относительно этих закономерностей (если гипотеза скрытая, то поиск свободный).

В процессе свободного поиска используется математический аппарат условной логики, с помощью правил которой могут быть описаны группы примеров в задачах классификации и кластеризации.

На основе использования правил ассоциативной логики можно решать задачи выявления ассоциаций и последовательностей.

Выявление трендов (наличие какой-то устойчивой закономерности в том объеме данных, которые используются) и колебаний является первым этапом программирования.

<table>
<tr><td colspan="6">Стадии</td></tr>
<tr><td colspan="3">Свободный поиск</td><td colspan="2">Прогностическое моделирование</td><td>Анализ исключений</td></tr>
<tr><td>Выявление закономерностей условной логики</td><td>Выявление закономерностей ассоциативной логики</td><td>Выявление трендов и колебаний</td><td>Предсказание неизвестных значений</td><td>Предсказание развития процессов</td><td>Выявление и объяснение отклонений</td></tr>
<tr><td colspan="6">Действия</td></tr>
</table>

Рис. 5. Стадии информационной деятельности

Вторая стадия информационной деятельности – прогностическое моделирование. Осуществление действий на этой стадии становится возможным после выполнения действий на стадии свободного поиска.

Третья стадия – анализ исключения из правил. Данная стадия занимается тем, чем обусловлено выпадение какого-то параметра от ранее установленной закономерности, выявляются отклонения и даются им объяснения.

Математической основой систем Data Mining является следующие методы поиска различных закономерностей в данных: деревья решений; алгоритмы кластеризации; регрессионный анализ; нейронные сети; временные ряды и др. Указанные методы и программные продукты Data Mining подробнее описаны в главе 3.

Генетические Алгоритмы (ГА) – это адаптивные методы функциональной оптимизации, основанные на компьютерном имитационном моделировании биологической эволюции. Основные принципы ГА были сформулированы Голландом в 1975 году и хорошо описаны во многих работах и на ряде сайтов в Internet [7-8].

В генетических алгоритмах используются специфические термины, взятые из генетики, которые трактуются следующим образом. Исходные логические закономерности в базе данных именуют хромосомами, а весь набор закономерностей называют популяцией хромосом. Популяция обрабатывается с помощью процедур репродукции, изменчивости (мутаций), генетической композиции. В ходе работы процедур на каждой стадии эволюции получают популяции со все более совершенными индивидуумами.

Генетические алгоритмы сконструированы таким образом, что при генерации каждой новой популяции используются фрагменты исходных решений, к которым добавляются новые элементы, обеспечивающие улучшение решений относительно сформулированного критерия отбора. Другими словами, генети-

ческие алгоритмы используют информацию, накопленную в процессе эволюции.

В генетических алгоритмах и эволюционном программировании используют два основных механизма воспроизводства хромосом:

– воспроизводство без мутаций, соответствующее митозу, результатом которого являются потомки – копии родителей;

– воспроизводство потомков, имеющих большие отличия от родителей. Этот механизм соответствует половому размножению.

В генетических алгоритмах в основном используется механизм родительского воспроизводства с рекомбинацией и мутацией, а в эволюционном программировании – механизм на основе мутации без рекомбинации.

Таким образом, по сути дела каждый конкретный генетический алгоритм представляют имитационную модель некоторой определенной теории биологической эволюции или ее варианта. Материальное воплощение сконструированных таким образом систем до сих пор была невозможна без участия человека. Однако интенсивно ведутся работы, результатом которых является уменьшение зависимости машинной эволюции от человека. Эти работы ведутся по двум основным направлениям:

1. Естественный отбор, моделируемый ГА, переносится из виртуального мира в реальный, например, проводятся эксперименты по реальным битвам роботов на выживание.

2. Интеллектуальные системы, основанные на ГА, конструируют роботов, которые в принципе могут быть изготовлены на автоматизированных заводах без участия человека.

Генетические алгоритмы используют в теории нечётких систем для настройки параметров функций принадлежности. Интеграция чётких и нечётких нейронных сетей и генетических алгоритмов обеспечивает реализацию оптимизационной задачи. Средства fuzzy–neuro–genetic используются в интеллектуальных системах и содержат следующие процедуры:

– преобразование входных примеров в нечёткое представление;

– извлечение знаний, представленных в виде продукций ЕСЛИ–ТО из нечёткой обучающей выборки с помощью нейронной сети;

– оптимизацию структуры продукционных правил с помощью генетического алгоритма.

Активно развивается направление, ориентированное на использование генетических алгоритмов для обучения нейронных сетей и корректировки структуры уже обученной сети. В отличие от метода обратного распространения ошибки генетические алгоритмы мало чувствительны к архитектуре сети. Генетические алгоритмы чаще всего применяются для улучшения характеристик ИНС, уже созданных и обученных с применением других методов

На основе генетических алгоритмов предложены классифицирующие системы, которые можно использовать для целей управления. Классифицирующая система состоит из трёх вложенных друг в друга подсистем: классификатора, системы обучения и генетического алгоритма. В классификатор поступают

внешние сообщения и положительные оценки (поощрения) его действий. Классификатор содержит правила вида «ЕСЛИ<условие>, ТО<сообщение>», с помощью которых формируются выходные сообщения. Обучающая система выполняет оценку используемых правил. Генетический алгоритм предназначен для случайно направленной модификации правил.

В настоящее время активно развиваются методы, основанные на объединении технологий инженерии знаний и генетических алгоритмов. В области ГА разрабатываются операторы, ориентированные на обработку знаний.

Генетические алгоритмы нашли широкое практическое применение в менеджменте и управлении для решения задач поиска оптимальных решений, формирования моделей и прогнозирования значений различных показателей. Они осуществляют поиск лучших решений на основе заданной целевой функции. Значение целевой функции для многих задач весьма непросто вычислить, поэтому в ряде случаев при исследовании плохо обусловленных проблем с этой целью применяются нейронные сети, позволяющие найти решение при отсутствии явной модели. Кроме того, для вычисления целевых функций в условиях неопределённости применяются статистические методы и методы логического вывода в чёткой или нечёткой среде.

Формирование системы прогнозирующих правил. Генетические алгоритмы могут использоваться для нахождения оптимального набора правил, позволяющих прогнозировать страховые риски с учётом ряда определяющих его факторов. Для решения этой задачи необходимо иметь базу данных, содержащую фактические значения переменных, влияющих на страховой риск.

Выводы

Современное состояние разработок в области интеллектуальных систем в России можно охарактеризовать как стадию все возрастающего интереса среди широких слоев специалистов – менеджеров, инженеров, программистов и других. Наибольшие трудности в разработке интеллектуальных систем, основанных на знаниях, вызывает не сколько процесс машинной реализации систем, а этап анализа знаний и проектирования базы знаний.

Создание интеллектуальных систем должно включать три этапа:

– создание материальной системы поддержки (эта проблема в основном решена, так как ИС могут создаваться даже на базе современных персональных компьютеров);

– создание системы потенциального искусственного интеллекта, то есть программной оболочки, инструментальной системы (таких систем в настоящее время существует пока еще очень мало);

– обучение и самообучение системы искусственного интеллекта и преобразование ее в реальную ИС.

Интеллектуальные системы применяются для решения сложных задач, связанных с использованием слабо формализованных знаний специалистов-практиков, а также с логической обработкой информации. Например, поддерж-

ка принятия решения в сложных ситуациях, анализ визуальной информации, управление в социально-экономической сфере.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные проблемы искусственного интеллекта и направления его развития.
2. Назовите основные направления исследований в области искусственного интеллекта.
3. Какова история исследований в области искусственного интеллекта в нашей стране и за рубежом?
4. Перечислите признаки интеллектуальных информационных систем.
5. Сформулируйте характеристики базовых интеллектуальных структур для анализа интеллектуальности систем.
6. Дайте определение понятия «интеллектуальная система», ее место в классификации информационных систем.
7. Сформулируйте основные отличия интеллектуальных систем от обычных программных систем.
8. Приведите классификацию интеллектуальных систем, цели и пути их создания.
9. Перечислите основные типы систем с интеллектуальным интерфейсом и дайте им краткую характеристику.
10. Перечислите основные типы экспертных систем и дайте им краткую характеристику.
11. Перечислите и охарактеризуйте основные компоненты экспертных систем.
12. Каков вид передаточной (активационной) функции нейрона?
13. Назовите классические модели нейронных сетей.
14. Назовите и дайте краткую характеристику базовым архитектурам нейронных сетей.
15. Охарактеризуйте место технологий интеллектуального анализа данных (Data Mining) среди других технологий обработки данных.
16. Сформулируйте задачи и стадии интеллектуального анализа данных и типы определяемых закономерностей.
17. Перечислите основные направления эволюционного моделирования и приведите основные факторы, определяющие неизбежность эволюции.
18. Какие алгоритмы называют генетическими? Сформулируйте основные особенности генетических алгоритмов.
19. Как проводится отбор базисных факторов управления и внешней среды, влияющих на переход объекта в будущие целевые и нежелательные состояния при когнитивной структуризации предметной области?
20. Назовите области применения когнитивных технологий для решения задач прогнозирования и управления.

Глава 2. МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

2.1. Представление знаний, рассуждений и задач

Систему знаний (СЗ) можно определить как некую математическую модель определенной области прикладного неформализованного знания. Система понятий и отношений этой математической модели должны отображать систему понятий и отношений прикладного знания, а зависимости, существующие в этой модели, аппроксимируют соответствующие зависимости прикладного знания [5, 8, 12, 25].

Разработанные модели должны быть зафиксированы в памяти ЭВМ и использоваться для решения с помощью прикладных программ.

Создание интеллектуальных систем, основанных на знаниях, связано с решением следующих взаимосвязанных проблем:

1. Проблема формализации знаний. Эта задача решается с помощью специалистов-прикладников и математиков. Результатом ее будет разработка концептуальной схемы модели.
2. Проблема представления знаний. Ее решение состоит в разработке формального аппарата для фиксации знаний в памяти ЭВМ.
3. Проблема использование знаний. Суть ее заключается в необходимости разработки теории вычислений и преобразований в построенных ранее моделях.
4. Проблема создания баз знаний и систем управления ими. Эта задача для системных программистов по разработке средств программной поддержки моделей знаний.

Знания о предметной области и способах решения в ней задач весьма разнообразны. Возможны различные классификации этих знаний, которые подробно описаны в литературе по управлению знаниями, в частности в [12, 25].

Требования к системам знаний. Выделяют следующие особенности, которыми должна обладать система знаний:

– Терпимость к противоречиям, которая вытекает из открытости внешнего мира и соответственно неполноты знаний о нем.

– Обеспечение вывода, т.е. система знаний должна быть способна к логическому выводу как из уже имеющейся информации, так и из вновь поступающих сведений. Различают два типа вывода**:**

  – свободный (вывод осуществляется при поступлении новой информации в СЗ);

  – направленный (вывод запускается при поступлении в СЗ конкретного запроса).

– Критичность к новой информации. Это способность проверить достоверность новой информации и согласовать её с имеющимися знаниями.

– Дробность системы знаний – знания в системе должны быть разбиты на фрагменты, каждый из которых может быть эффективно использован.

– Обучаемость и способность к переструктуированию знаний, т. е. в ходе функционирования должна обеспечиваться перестройка структуры СЗ, повышающая ее эффективность.

Особенности знаний для их представления в ЭВМ. Для представления СЗ в компьютере она должна обладать следующими особенностями:

1. Внутренняя интерпретируемость – каждая информационная единица должна иметь уникальное имя, по которой бы информационная система находила ее, а также отвечала бы на запросы, в которой это имя упомянуто.

2. Структурированность знаний, т. е. информационные единицы должны обладать определенной структурой, это означает, что должны быть возможности для установления отношений типа: часть – целое или род – вид, или элемент – класс.

3. Связность – в информационной базе между информационными единицами должна быть возможность установления связей различного типа, характеризующих отношения между ними. Семантика отношений может носить декларативный или процедурный характер.

Различают отношения структуризации, функциональные отношения типа аргумент – функция, казуальные отношения (причинно – следственные связи) и семантические отношения (объединяют и представляют все ранее перечисленные связи).

Перечисленные особенности позволяют создавать общую модель знаний, которую называют «семантическая сеть». Она представляет модель знаний, в вершинах которой находятся информационные единицы, а дуги характеризуют виды связей между информационными единицами. Если связи иерархичны, то они определяют отношение структуризации, а неиерархические связи будут определять отношения иных типов.

4. Семантическая метрика – отношение, которое характеризует ситуационную близость информационных единиц, т.е. силу ассоциативных связей между ними.

5. Активность. Появление новых данных должны стать источником активности интеллектуальной системы, т.е. выполнение программ в ИС должно инициироваться текущим состоянием информационной базы.

Перечисленные пять особенностей информационных единиц определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, базы данных перерастают в базы знаний (БЗ), а совокупность средств, обеспечивающих работу со знаниями, образуют систему управления базой знаний (СУБЗ).

Таким образом, база знаний (англ. Knowledge Base, KB) – это особого рода база данных, разработанная для управления знаниями (метаданными), то есть сбором, хранением, поиском и выдачей знаний. Раздел искусственного интеллекта, изучающий базы знаний и методы работы со знаниями, называется инженерией знаний. Под базами знаний понимают совокупность фактов и правил вывода, допускающих логический вывод и осмысленную обработку информации.

База знаний – важный компонент интеллектуальной системы. Наиболее известный класс таких программ – экспертные системы. Они предназначены для построения способа решения специализированных проблем, основываясь на записях БЗ и на пользовательском описании ситуации.

Создание и использование систем искусственного интеллекта потребует огромных баз знаний.

2.2. Модели представления знаний

В интеллектуальных системах в соответствии с [2, 5, 8] наиболее распространенными являются следующие способы представления знаний:

1. Логические модели.
2. Сетевые модели.
3. Фреймовые модели.
4. Продукционные модели.
5. Другие методы представления знаний.

Логические модели. В основе модели лежит формальная система, которая на языке теории множеств описывается следующей четверкой множеств:

$$M = <T, P, A, B>,$$

где T – это множество базовых элементов различной природы, представляющих тезаурус, например: термины из какого либо словаря, набор деталей из конструкции; P – это множество синтаксических правил, с помощью которых из элементов множества T образуют синтаксически правильные совокупности; A – элементы этого множества образуют аксиомы, определенные на множестве P; B – множество правил вывода, которые применяются к элементам множества A.

Для множества T существует некоторый способ П(T) определения принадлежности к этому множеству, а для определения принадлежности к множеству A вводится процедура П(A).

Во множество A входят информационные единицы, которые введены в базу извне, а с помощью правил вывода из них получают новые производные знания. Таким образом, описанная система представляет собой генератор порождения новых знаний в данной предметной области.

Логические модели представления знаний реализуются с помощью логики предикатов. Предикатом называют функцию, принимающую только два значения: истина и ложь и предназначенную для выражения свойств объектов или связей между ними. Кроме того, могут использоваться логические знаки конъюнкции (∨), импликации (∧), логического следования (=>), кванторы ∀,∃ и другие.

Рассмотрим в качестве примера знание: «Когда температура в печи достигает 120˚ и прошло менее 30 мин с момента включения печи, то давление не превосходить критического. Если с момента включения прошло более 30 мин, то необходимо включить вентиль N2».

В этой записи первая строка представляет собой описание декларативного знания, а вторая строка описывает процедурные знания.

С помощью логики предикатов, указанное утверждение выглядит следующим образом:

$$P(p = 120)\ T(t < 30) \rightarrow (D < D\text{кр.});$$
$$P(p = 120)T(t > 30) \Rightarrow F(N2),$$

где $P(p = 120)$ создает предикат, который становится истинным, когда температура достигается 120˚; $T(t < 30)$ – предикат, остающийся истинным в течение 30 мин с начала процесса; $T(t > 30)$ – предикат, становящийся истинным по истечении 30 мин; $(D < D\text{кр.})$ – это утверждение о том, что давление ниже критического; $F(N2)$ – команда открыть вентиль $N2$.

Разработанные системы логического программирования Пролог, в ответах на простейшие запросы к базам знаний, выдают значения «истина» и «ложь» в зависимости от наличия соответствующих фактов [15, 16]. Преимущества логической модели представления знаний заключается в возможности непосредственно запрограммировать механизм вывода правильных высказываний.

Подобные языки логического типа использовались на ранних стадиях развития интеллектуальных систем, однако впоследствии большее внимание стали уделять другим моделям, что связано с такими недостатками логической модели, как отсутствие наглядности и удобочитаемости, а также громоздкость записи, которая приводит к трудности нахождения ошибок. Еще один недостаток состоит в том, что большинство интеллектуальных задач характеризуется недостаточной полнотой, неточностью и некорректностью. Это важно, например, в медицине и биологических науках, так как они слабо формализованные. Поэтому в данных областях науки чаще используют методы аналогий и ассоциаций.

Сетевые модели. В основе этой модели лежит конструкция, которая называется семантической сетью, которая может быть описана на языке теории множеств:

$$H = < I, C1, C2, \ldots., Cn , G >,$$

где I – множество информационных единиц; $C1, C2, \ldots., Cn$ – множество типов связей между информационными единицами; G – множество отображений между информационными единицами.

В зависимости от типов связей между информационными единицами, которые используются в данной модели, различают следующие типы сетей:

– Классифицирующие сети – применяют отношение структуризации.

– Функциональные сети – функциональные отношения между информационными единицами. Примером могут выступать вычислительные модели.

– Сценарии.

В сценариях часто используются казуальные отношения (причинно-следственные отношения) между информационными единицами. Кроме того, могут встречаться отношения следующих типов «средство – результат», «орудие – действие» и т. п.

Так семантическая сеть, представляющая знания об автомобиле гр. Васильева, показана на рис. 6.

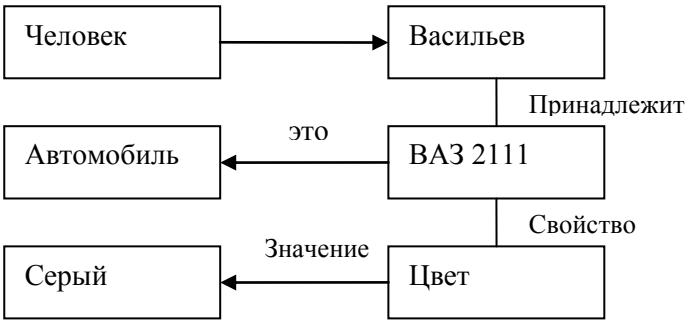


Рис. 6. Пример семантической сети

Преимущества модели представления знаний на основе семантических сетей: с помощью этой модели могут быть представлены родовидовые отношения; простота и наглядность описания предметной области.

Недостатки модели представления знаний на основе семантических сетей: снижение скорости работы механизма вывода, а также понижение быстродействия.

Фреймовые модели. Фреймы часто используют как структуру для представления стереотипных ситуаций. Фрейм – единица представления знаний, детали которой могут изменяться в соответствии с текущей ситуацией.

Структура фрейма такова, что он состоит из характеристик описанных ситуаций и их значений, которые называются соотносительно слотом и заполнителем слота.

Имя фрейма:

Имя слота 1 (Значение слота 1);

Имя слота 2 (Значение слота 2);

……

Имя слота *k* (Значение слота *k*).

Эта структура, пока она не заполнена какими-то значениями, называется протофреймом. Значением слота может быть число, математическое выражение, текст на естественном языке, программа для ЭВМ, правила вывода, ссылки на другие слоты данного фрейма или других фреймов.

При заполнении фрейма, имени слота и значения слотов из протофрейма получают фрейм-экземпляр (экзофрейм).

Пример:

Список работников: Фамилия (значение слота 1);
Год рождения (значение слота 2);
……
Стаж работы (значение слота k).

Список работников: Фамилия (Попов – Сидоров – Иванов);
Год рождения (1965 – 1946 – 1925);
…….
Стаж работы (5 – 20 – 30).

Преимущество фреймовой модели заключается в том, что значения слотов представляются в такой системе в единственном экземпляре, поскольку включается только в один фрейм. Таким образом, обеспечивается экономное размещение баз знаний в памяти компьютера.

Недостатком фреймовой модели является снижение скорости работы механизма вывода, т. е. системы должны «просканировать» всю структуру на предмет ненужной информации.

Продукционные модели. Психологические исследования процессов принятия человеком решений показали, что, рассуждая и принимая решения человек, использует правила, аналогичные продукциям. Продукционная модель, основанная на правилах, позволяет представить знания в виде предложений типа «если (условие), то (действие)».

В общем случае продукцию можно представить в виде следующего выражения:

$$(i);\ Q;\ P;\ A => B;\ N,$$

где (i) – имя продукции, с помощью которой данная продукция выделяется из всего множества (порядковый номер, некоторая совокупность слов или цифр).

Элемент Q характеризует сферу применения продукции.

Основным элементом продукции является ее ядро $A => B$. Оно может быть прочитано: если выполняется A, то следует B. Ядро продукции описывает преобразования, которые представляют суть продукционного правила.

Элемент P есть условие применимости ядра продукции. Обычно P представляет собой логическое выражение типа предиката. Если P принимает значение «истина», то ядро продукции активируется, если P ложно, то ядро продукции не может быть использовано.

Элемент N описывает постусловие продукции. Оно активируется, когда ядро продукции реализовано. N – это действия и условия процедуры, которые могут быть выполнены после P.

Таким образом, продукционная модель хорошо применима для представления процедурных знаний.

Имя продукции i – интерпретация результатов психологического тестирования.

Предусловие Q – использовать в первую очередь.

Условие P – шкала лжи $L < 70$.

Ядро $A => B$ – если (шкала ошибок – шкала коррекции) < - 11, то сообщение: «Результаты недостоверны».

Постусловие N – закончить интерпретацию результатов.

Все ядра можно разделить на 2 большие группы:

1. Детерминированные ($A=>B$ наступит с вероятностью 1).
2. Недетерминированные (если A выполняется, то возможно B).

Возможны различные оценки реализации ядра:

1. Вероятностная (если выполняется A, то с вероятностью P реализуется B).

2. Лингвистическая (малая, меньшая). Если выполняется *A*, то с большой долей уверенности наступит *B*.

Детерминированные продукции могут быть:

1. Однозначными (если выполняется *A*, то наступит *B*).

2. Альтернативные (если *A* выполняется, то чаще наступит *B*1, реже *B*2).

Продукции могут быть прогнозирующего типа (если наступит *A*, то с вероятностью *P* можно ожидать *B*).

Продукционной называется система знаний, которая использует понятие продукции в качестве основного элемента.

В общем случае продукционная система знаний (см. рис. 1) включает следующие компоненты:

1. Базу данных, содержащую множество фактов;

2. Базу правил, содержащую набор продукций;

3. Механизм логического вывода или решатель;

4. ЭВМ;

5. Система общения с внешней средой.

Продукционные системы делят на 2 типа*:*

1. С прямым выводом, т. е. рассуждения, идут от данных к гипотезе.

2. С обратным выводом, когда вначале выдвигается гипотеза, а потом для нее ищутся доказательства.

Достоинства продукционных систем:

– модульность;

– единообразие структуры (позволяет применять оболочку продукционных систем в различных проблемных областях);

– естественность вывода знаний;

– гибкость родовидовой иерархии понятий (изменение правил влечет изменения в иерархии).

Недостатки продукционных систем:

– процесс вывода может быть менее эффективен, чем в других системах.

– процесс вывода новых знаний трудно поддается управлению.

– линейный рост объема базы знаний по мере включения новых фрагментов знаний. Если используются деревья решений, то изменения происходят по логарифмическому закону.

Другие методы представления знаний. В качестве других методов представления знаний можно указать представление знаний по примерам. При использовании такого метода база знаний заполняется следующим образом: инженер по знаниям берет задачу и заполняет матрица из совокупности задач и правильных решений. Можно построить программу с поиском аналогичной задачи (метод на основе примеров).

Такой метод применяется, например, в области медицины и в юридической практике.

Достоинством метода представления знаний по примерам является простота данного способа, т. е. для данной задачи находится метод и вносится в память.

К недостатку можно отнести отсутствие интеллектуальной гибкости.

Выводы

Центральная парадигма интеллектуальных технологий – это обработка знаний. Системы, ядром которых является база знаний или модель предметной области, описанная на языке сверхвысокого уровня, приближенном к естественному языку, называют интеллектуальными.

В связи с организацией базы знаний в информационной системе, возникли задачи по поиску оптимального и верного решения на поставленную задачу перед информационной системой. Таким образом, неструктурированную массу знаний нужно было представить в такой форме, которая позволяла бы найти оптимальное решение с наименьшими затратами, например, временными. И начиная со второй половины 20-го века в области искусственного интеллекта стали появляться различные методы представления знаний.

Рассмотренные модели представления знаний широко используются в современных интеллектуальных системах и прежде всего в экспертных системах. Каждая из форм представлений знаний может служить основой для создания языка программирования, ориентированного на работу со знаниями. В конце 80-х годов наметилась тенденция создавать комбинированные языки представления знаний. Чаще всего комбинируются фреймовые и продукционные модели.

Контрольные вопросы

1. Определение системы знаний для задач создания интеллектуальных систем.
2. Требования к системам знаний в задачах создания интеллектуальных систем.
3. Особенности знаний для их представления в компьютере.
4. Понятие инженерии знаний и баз знаний.
5. Понятие и сравнительные характеристики основных моделей представления знаний.
6. Модели представления знаний, основанные на логике предикатов, их преимущества и недостатки, области применения.
7. Семантические сети: понятие и их роль для формализации знаний.
8. Фрейм как жесткая структура информационных единиц для представления стереотипных ситуаций, достоинства и недостатки фреймовых систем.
9. Сценарии – описание стандартной последовательности фактов, определяющих типичную ситуацию предметной области.
10. Определение продукции, классификация ядер продукции, типовая схема продукционной системы (база данных, база правил, интерпретатор). Преимущества и недостатки продукционной системы.

Глава. 3. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗНАНИЙ ИЗ ДАННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

3.1. Особенности и классификация методов интеллектуального анализа данных

Потоки текстовой и числовой информации ежедневно порождаются и оседают в хранилищах данных. Закономерности, которые скрываются в этих массивах данных, могут представлять большую ценность.

С другой стороны в связи с высокой трудоемкостью извлечения знаний по обычной технологии инженерии знаний, в последнее время интенсивно разрабатывались методы автоматического извлечения знаний из накопленных фактов. В основе этих методов лежат известные из логики методы индуктивного вывода и ряд методов распознавания образов. В западной литературе эти методы получили название ***«раскопка данных и открытие знаний» – Data Mining (DM)*** и ***Knowledge Discovery in Databases (KDD)***. В отечественной литературе привился термин «Интеллектуальный анализ данных» (ИАД) [8, 19-21].

Процесс Knowledge Discovery in Databases, состоит из следующих шагов:

1. **Подготовка исходного набора данных.** Этот этап заключается в создании набора данных, в том числе из различных источников, выбора обучающей выборки и т. д. Для этого должны существовать развитые инструменты доступа к различным источникам данных. Желательно иметь поддержку работы с хранилищами данных и наличие семантического слоя, позволяющего использовать для подготовки исходных данных не технические термины, а бизнес понятия.

2. **Предобработка данных.** Для того чтобы эффективно применять методы Data Mining, следует обратить внимание на вопросы предобработки данных. Данные могут содержать пропуски, шумы, аномальные значения и т. д. Кроме того, данные могут быть избыточны, недостаточны и т. д. В некоторых задачах требуется дополнить данные некоторой априорной информацией. Наивно предполагать, что если подать данные на вход системы в существующем виде, то на выходе получим полезные знания. Данные должны быть качественны и корректны с точки зрения используемого метода DM. Поэтому первый этап KDD заключается в предобработке данных. Более того, иногда размерность исходного пространства может быть очень большой, и тогда желательно применять специальные алгоритмы понижения размерности. Это как отбор значимых признаков, так и отображение данных в пространство меньшей размерности.

3. **Трансформация, нормализация данных.** Этот шаг необходим для приведения информации к пригодному для последующего анализа виду. Для чего нужно проделать такие операции, как приведение типов, квантование, приведение к «скользящему окну» и прочее. Кроме того, некоторые методы анализа, которые требуют, чтобы исходные данные были в каком-то определенном виде. Нейронные сети, скажем, работают только с числовыми данными, причем они должны быть нормализованы.

4. **Data Mining.** На этом шаге применяются различные алгоритмы для нахождения знаний. Это нейронные сети, деревья решений, алгоритмы кластеризации, установления ассоциаций и т. д.

5. **Постобработка данных.** Интерпретация результатов и применение полученных знаний в бизнес приложениях.

Безусловно, сердцем всего этого процесса KDD являются методы DM, позволяющие обнаруживать знания.

Классической основой извлечения знаний из накопленных данных является математическая статистика. Методы математической статистики оказались полезными, главным образом, для проверки заранее сформулированных гипотез и для «грубого» разведочного анализа, составляющего основу оперативной аналитической обработки данных.

Интеллектуальный анализ данных *— это процесс поддержки принятия решений, основанный на поиске в данных скрытых закономерностей, то есть извлечения информации, которая может быть охарактеризована как* ***знания.***

Интеллектуальный анализ данных является кратким обозначением довольно широкого спектра процедур автоматического анализа данных высокоинтеллектуальными технологиями. Эти методы позволяют извлекать из «сырых» данных ранее неизвестные зависимости между параметрами объектов и закономерности поведения классов объектов. Подобные программные продукты позволяют как бы «осмыслить» данные, оценивая их как с количественной, так и с качественной точки зрения.

Сферы применения систем Data Mining, задачи и стадии ИАД приведены в параграфе 1.4 данного пособия. Далее предлагается изложение основных методов ИАД, примеры их программной реализации для различных предметных областей в соответствии с [8, 19-21, 27].

В последнее время наряду с использованием арсенала классической статистики активно развиваются новые методы анализа данных и извлечения знаний, базирующиеся на иных, нежели традиционная интегро–дифференциальная парадигма, подходах и представленные на рис. 7:

– методы эволюционного моделирования,
– методы машинного обучения.

Термин «эволюционное моделирование» в настоящее время является достаточно устоявшимся, и общепринято под этим термином подразумевать генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети.

Термин «машинное обучение» оставляет больше возможностей для дискуссий о том, какие методы имеются в виду, в частности, сюда относятся деревья решений.

Сформированы методологии анализа и основных принципов работы с данными в процессе анализа данных, поиска закономерностей и извлечения знаний не зависит от конкретной предметной области, поэтому может с успехом применяться для решения самого широкого спектра задач.

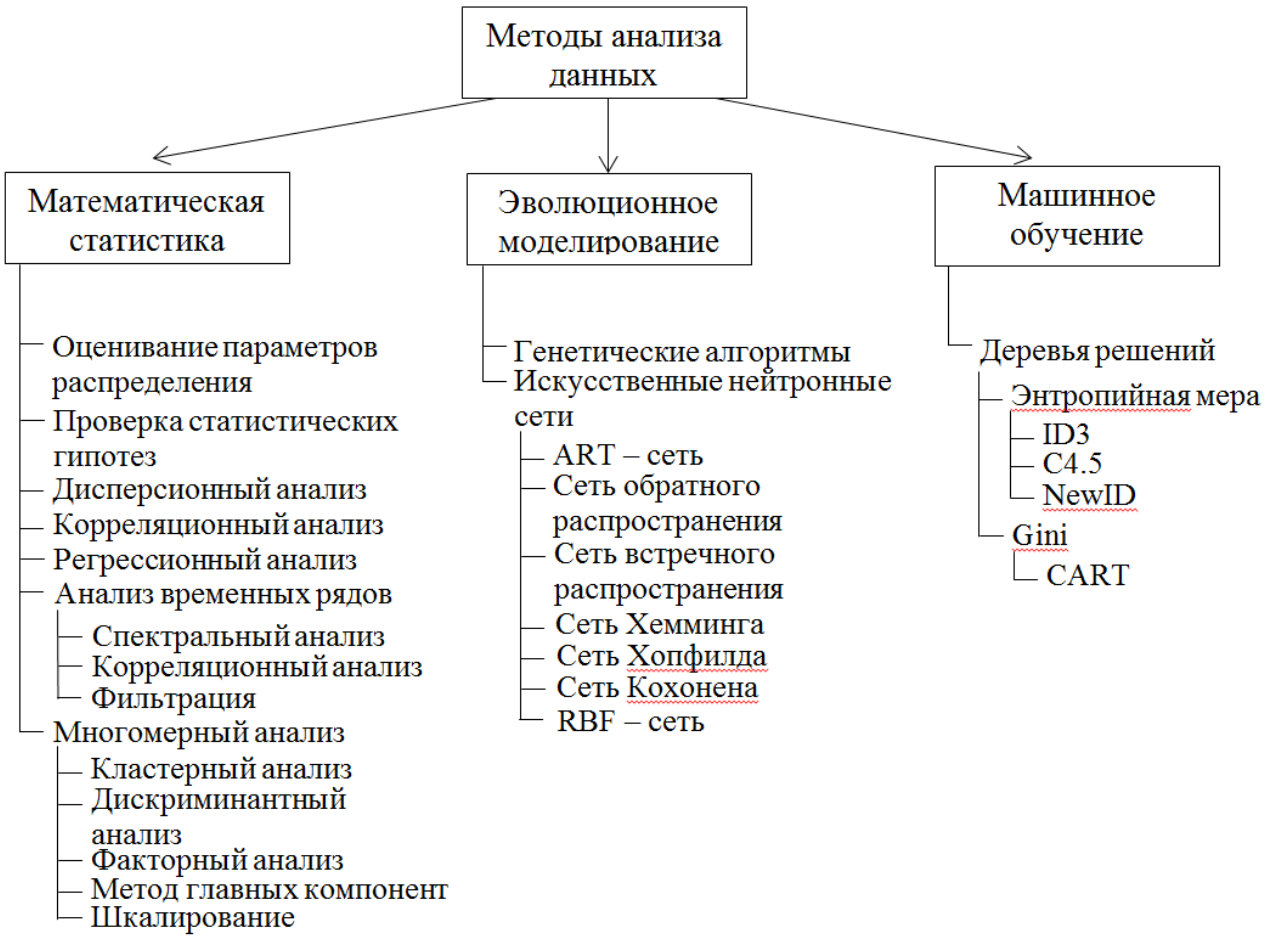


Рис.7. Классификация методов анализа данных

Алгоритмы, используемые в Data Mining, требуют большого количества вычислений. Раньше это являлось сдерживающим фактором широкого практического применения DM, однако сегодняшний рост производительности современных процессоров снял остроту этой проблемы. Теперь за приемлемое время можно провести качественный анализ сотен тысяч и миллионов записей.

Далее будут рассмотрены ряд методов интеллектуального анализа данных из числа приведенных на рис. 7. Приводится краткое изложение основных положений из статей Н.Б. Паклина и др., изложенных на сайте компании Base Group Labs – профессионального поставщика программных продуктов и решений в области анализа данных [27].

3.2. Логистическая регрессия и ROC-анализ данных

Логистическая регрессия – полезный классический инструмент для решения задачи регрессии и классификации. Без логистической регрессии и ROC-анализа, как аппарата для анализа качества моделей, немыслимо построение моделей в медицине и проведение клинических исследований. В последние годы логистическая регрессия получила распространение в скоринге для расчета рейтинга заемщиков и управления кредитными рисками. Поэтому, несмотря на

свое происхождение из статистики, логистическую регрессию и ROC-анализ почти всегда можно увидеть в наборе Data Mining алгоритмов.

Логистическая регрессия – это разновидность множественной регрессии, общее назначение которой состоит в анализе связи между несколькими независимыми переменными (называемыми также регрессорами или предикторами) и зависимой переменной. Бинарная логистическая регрессия, как следует из названия, применяется в случае, когда зависимая переменная является бинарной (т. е. может принимать только два значения). Иными словами, с помощью логистической регрессии можно оценивать вероятность того, что событие наступит для конкретного испытуемого (больной/здоровый, возврат кредита/дефолт и т. д.).

В множественной линейной регрессии предполагается, что зависимая переменная y является линейной функцией независимых переменных x_i, $i = 1, \ldots n$, т. е.:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots b_nx_n.$$

Однако множественная регрессия просто игнорирует ограничения на диапазон значений для y. Поэтому для решения проблемы задача регрессии может быть сформулирована иначе: вместо предсказания бинарной переменной, мы предсказываем непрерывную переменную P со значениями на отрезке [0,1] при любых значениях независимых переменных. Это достигается применением следующего регрессионного уравнения (логит-преобразование):

$$P = 1/(1 + e^{-y}),$$

где P – вероятность того, что произойдет интересующее событие.

Поскольку логистическое преобразование решает проблему об ограничении на 0-1 границы для первоначальной зависимой переменной (вероятности), то эти преобразованные значения можно использовать в обычном линейном регрессионном уравнении. А именно, если произвести логистическое преобразование обеих частей описанного выше уравнения, мы получим стандартную модель линейной регрессии.

Существует несколько способов нахождения коэффициентов логистической регрессии. На практике часто используют метод максимального правдоподобия. Он применяется в статистике для получения оценок параметров генеральной совокупности по данным выборки. Основу метода составляет функция правдоподобия (likehood function), выражающая плотность вероятности (вероятность) совместного появления результатов выборки y.

Кроме того известно, что логистическую регрессию можно представить в виде однослойной нейронной сети с сигмоидальной функцией активации, веса которой есть коэффициенты логистической регрессии, а вес поляризации – константа регрессионного уравнения. Как известно, однослойная нейронная сеть может успешно решить лишь задачу линейной сепарации. Поэтому возможности по моделированию нелинейных зависимостей у логистической регрессии отсутствуют. Однако для оценки качества модели логистической регрессии су-

ществует эффективный инструмент ROC-анализа, что является несомненным ее преимуществом.

Для расчета коэффициентов логистической регрессии можно применять любые градиентные методы: метод сопряженных градиентов, методы переменной метрики и другие.

ROC-кривая (Receiver Operator Characteristic) – кривая, которая наиболее часто используется для представления результатов бинарной классификации в машинном обучении. Название пришло из систем обработки сигналов. Поскольку классов два, один из них называется классом с положительными исходами, второй – с отрицательными исходами. ROC-кривая показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров. В терминологии ROC-анализа первые называются истинно положительным, вторые – ложно отрицательным множеством. При этом предполагается, что у классификатора имеется некоторый параметр, варьируя который, мы будем получать то или иное разбиение на два класса. Этот параметр часто называют порогом, или точкой отсечения (cut-off value). В зависимости от него будут получаться различные величины *ошибок I и II рода*.

В логистической регрессии порог отсечения изменяется от 0 до 1 – это и есть расчетное значение уравнения регрессии. Будем называть его рейтингом.

Для понимания сути ошибок I и II рода рассмотрим четырехпольную таблицу сопряженности (confusion matrix), которая строится на основе результатов классификации моделью и фактической (объективной) принадлежностью примеров к классам. Таблица содержит следующие данные:

- *TP* (*True Positives*) – верно классифицированные положительные примеры (так называемые истинно положительные случаи);
- *TN* (*True Negatives*) – верно классифицированные отрицательные примеры (истинно отрицательные случаи);
- *FN* (*False Negatives*) – положительные примеры, классифицированные как отрицательные (ошибка I рода). Это так называемый ложный пропуск – когда интересующее нас событие ошибочно не обнаруживается (ложно отрицательные примеры);
- *FP* (*False Positives*) – отрицательные примеры, классифицированные как положительные (ошибка II рода). Это ложное обнаружение, т. к. при отсутствии события ошибочно выносится решение о его присутствии (ложно положительные случаи).

Что является положительным событием, а что – отрицательным, зависит от конкретной задачи.

Вводят два определения: чувствительность и специфичность модели. Ими определяется объективная ценность любого бинарного классификатора.

Чувствительность *Se* (Sensitivity) – это и есть доля истинно положительных случаев:

$$Se = TP / (TP + TN).$$

Специфичность *Sp* (Specificity) – доля истинно отрицательных случаев, которые были правильно идентифицированы моделью:

$$Sp = TN / (TN + FP).$$

ROC-кривая получается следующим образом:

1. Для каждого значения порога отсечения, которое меняется от 0 до 1 с шагом *dx* (например, 0.01) рассчитываются значения чувствительности *Se* и специфичности *Sp*. В качестве альтернативы порогом может являться каждое последующее значение примера в выборке.

2. Строится график зависимости: по оси *Y* откладывается чувствительность *Se* в процентах, по оси *X* откладывают (100% - *Sp*) (сто процентов минус специфичность), или, что тоже самое, *FPR* – доля ложно положительных случаев. Пример графиков приведен на рис.8.

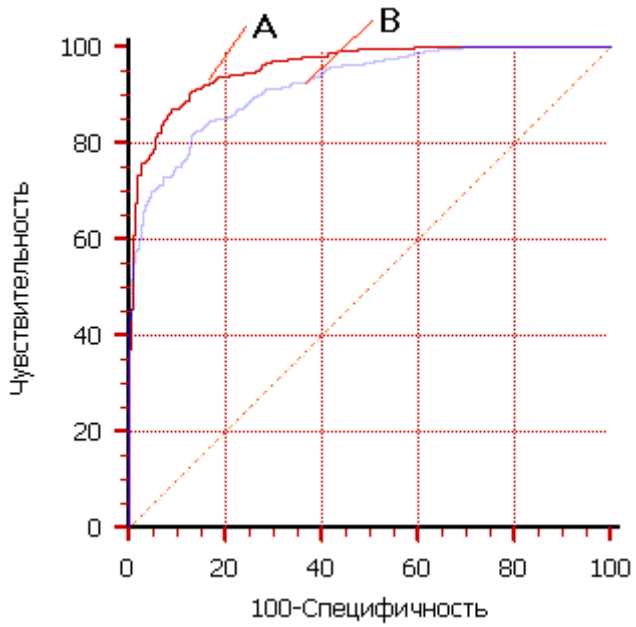


Рис. 8. – Сравнение ROC-кривых

Для идеального классификатора график ROC-кривой проходит через верхний левый угол, где доля истинно положительных случаев составляет 100% или 1.0 (идеальная чувствительность), а доля ложно положительных примеров равна нулю. Поэтому чем ближе кривая к верхнему левому углу, тем выше предсказательная способность модели. Наоборот, чем меньше изгиб кривой и чем ближе она расположена к диагональной прямой, тем менее эффективна модель. Диагональная линия соответствует бесполезному классификатору, т. е. полной неразличимости двух классов.

При визуальной оценке ROC-кривых расположение их относительно друг друга указывает на их сравнительную эффективность. Кривая, расположенная выше и левее, свидетельствует о большей предсказательной способности модели. Так, на рис. 8 две ROC-кривые совмещены на одном графике. Видно, что модель А лучше.

Идеальная модель обладает 100% чувствительностью и специфичностью. Однако на практике добиться этого невозможно, более того, невозможно одновременно повысить и чувствительность, и специфичность модели. Компромисс находится с помощью порога отсечения, так как пороговое значение влияет на соотношение *Se* и *Sp*. Можно говорить о задаче нахождения *оптимального порога отсечения* (optimal cut-off value).

Порог отсечения нужен для того, чтобы применять модель на практике: относить новые примеры к одному из двух классов. Для определения оптимального порога нужно задать критерий его определения, так как в разных задачах присутствует своя оптимальная стратегия.

3.3. Алгоритмы кластеризации на службе Data Mining

Кластеризация как объединение в группы схожих объектов является одной из фундаментальных задач в области анализа данных и Data Mining. Список прикладных областей, где она применяется, широк: сегментация изображений, маркетинг, борьба с мошенничеством, прогнозирование, анализ текстов и многие другие. Отсюда многообразие синонимов понятию кластер – класс, таксон, сгущение.

На современном этапе кластеризация часто выступает первым шагом при анализе данных.

Очень часто данные, с которыми сталкивается технология Data Mining, имеют следующие важные особенности:

- высокая размерность (тысячи полей) и большой объем (сотни тысяч и миллионы записей) таблиц баз данных и хранилищ данных (сверхбольшие базы данных);
- наборы данных содержат большое количество *числовых* и *категорийных* атрибутов.

Все атрибуты, или признаки объектов делятся на ***числовые*** (numerical) и ***категорийные*** (categorical).

Числовые атрибуты – это такие, которые могут быть упорядочены в пространстве, соответственно категорийные – которое не могут быть упорядочены. Например, атрибут «возраст» – числовой, а «цвет» – категорийный.

Большинство алгоритмов кластеризации предполагают сравнение объектов между собой на основе некоторой ***меры близости*** (сходства). В качестве меры близости для числовых атрибутов очень часто используется *евклидово расстояние***.**

Для категорийных атрибутов распространена мера сходства Чекановского-Серенсена и Жаккара.

Можно классифицировать кластерные алгоритмы на ***масштабируемые*** **и** ***немасштабируемые***.

Алгоритм называют масштабируемым (scalable), если при неизменной емкости оперативной памяти с увеличением числа записей в базе данных время его работы растет линейно.

По способу разбиения на кластеры алгоритмы бывают двух типов: ***иерархические и неиерархические***.

Классические **иерархические** алгоритмы работают только с категорийными атрибутами, когда строится полное дерево вложенных кластеров. Здесь распространены агломеративные методы построения иерархий кластеров – в них производится последовательное объединение исходных объектов и соответствующее уменьшение числа кластеров. Иерархические алгоритмы обеспечивают сравнительно высокое качество кластеризации и не требуют предварительного задания количества кластеров.

Неиерархические алгоритмы основаны на оптимизации некоторой целевой функции, определяющей оптимальное в определенном смысле разбиение множества объектов на кластеры. В этой группе популярны алгоритмы семейства k-средних (k-means, fuzzy c-means, Густафсон-Кесселя), которые в качестве целевой функции используют сумму квадратов взвешенных отклонений координат объектов от центров искомых кластеров.

Одним из эффективных считается алгоритм алгоритм обработки транзакционных данных CLOPE, который быстрее и проще в программной реализации.

Под термином *транзакция* здесь понимается некоторый произвольный набор объектов, будь это список ключевых слов статьи, товары, купленные в супермаркете, множество симптомов пациента, характерные фрагменты изображения и так далее.

Задача кластеризации транзакционных данных состоит в получении такого разбиения всего множества транзакций, чтобы похожие транзакции оказались в одном кластере, а отличающиеся друг от друга – в разных кластерах.

В основе **алгоритма кластеризации CLOPE** (англ.: Clustering with sLOPE) лежит идея максимизации глобальной функции стоимости, которая повышает близость транзакций в кластерах при помощи увеличения параметра *кластерной гистограммы*.

Пусть имеется база транзакций D, состоящая из множества транзакций $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$. Каждая транзакция есть набор объектов $\{i_1, ..., i_m\}$. Множество кластеров $\{C_1, ..., C_k\}$ есть разбиение множества $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$, такое, что $C1 \dots C_k = \{t_1, t_2, ..., t_n\}$ и $C_i <> \wedge C_i\ C_j = 1 <= i, j <= k$. Каждый элемент C_i называется *кластером*, n, m, k – количество транзакций, количество объектов в базе транзакций и число кластеров соответственно.

Каждый кластер C имеет следующие характеристики:

$D(C)$ – множество уникальных объектов; $Occ(i,C)$ – количество вхождений (частота) объекта i в кластер C; $W(C) = |D(C)|$ – ширина кластера; $H(C) = S(C)/W(C)$ – высота кластера, а площадь кластера определяется в виде $S(C) = \sum_{i \in D(C)} Occ(i, C) = \sum_{ti \in C} | ti |$.

Гистограммой кластера C называется графическое изображение его расчетных характеристик: по оси OX откладываются объекты кластера в порядке убывания величины $Occ(i,C)$, а сама величина $Occ(i,C)$ – по оси OY (рис. 9). На рис. 9 $S(C)$, равное 8, соответствует площади прямоугольника, ограниченного

осями координат и пунктирной линией. Очевидно, что чем больше значение *H*, тем более «похожи» две транзакции. Поэтому алгоритм должен выбирать такие разбиения, которые максимизируют *H*.

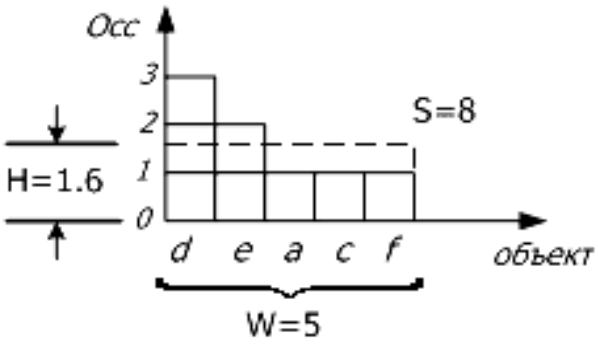


Рис.9. Пример гистограммы кластера

При совпадении значений высот применяют другие более сложные критерии: значение градиента, либо функцию стоимости.

Кластеризация транзакционных данных имеет много общего с анализом ассоциаций. Обе эти технологии Data Mining выявляют скрытые зависимости в наборах данных. Но есть и отличия.

С одной стороны, кластеризация дает общий взгляд на совокупность данных, тогда как ассоциативный анализ находит конкретные зависимости между атрибутами.

С другой стороны, ассоциативные правила сразу пригодны для использования, тогда как кластеризация чаще всего используется как первая стадия анализа.

Преимущества алгоритма CLOPE:

1. Высокие масштабируемость и скорость работы, а также качество кластеризации, что достигается использованием глобального критерия оптимизации на основе максимизации градиента высоты гистограммы кластера. Он легко рассчитывается и интерпретируется. Во время работы алгоритм хранит в RAM небольшое количество информации по каждому кластеру и требует минимальное число сканирований набора данных. Это позволяет применять его для кластеризации огромных объемов категорийных данных.

2. CLOPE автоматически подбирает количество кластеров, причем это регулируется одним единственным параметром – коэффициентом отталкивания в функции стоимости.

3.4. Деревья решений

Деревья решения являются одним из наиболее популярных подходов к решению задач Data Mining. Они создают иерархическую структуру классифицирующих правил типа «ЕСЛИ ..., ТО...», имеющую вид дерева.

Для того чтобы решить, к какому классу отнести некоторый объект или ситуацию, требуется ответить на вопросы, стоящие в узлах этого дерева, начиная с его корня, как показано на рис.10.

Вопросы имеют вид «значение параметра *A* больше *x*». Если ответ положительный, осуществляется переход к правому узлу следующего уровня, если отрицательный – то к левому узлу; затем снова следует вопрос, связанный с соответствующим узлом.

Введем основные понятия из теории деревьев решений, которые будут употребляться далее:

– объект – пример, шаблон, наблюдение;
– атрибут – признак, независимая переменная, свойство;
– метка класса – зависимая переменная, целевая переменная, признак определяющий класс объекта;
– узел – внутренний узел дерева, узел проверки;
– лист – конечный узел дерева, узел решения;
– проверка (test) – условие в узле.

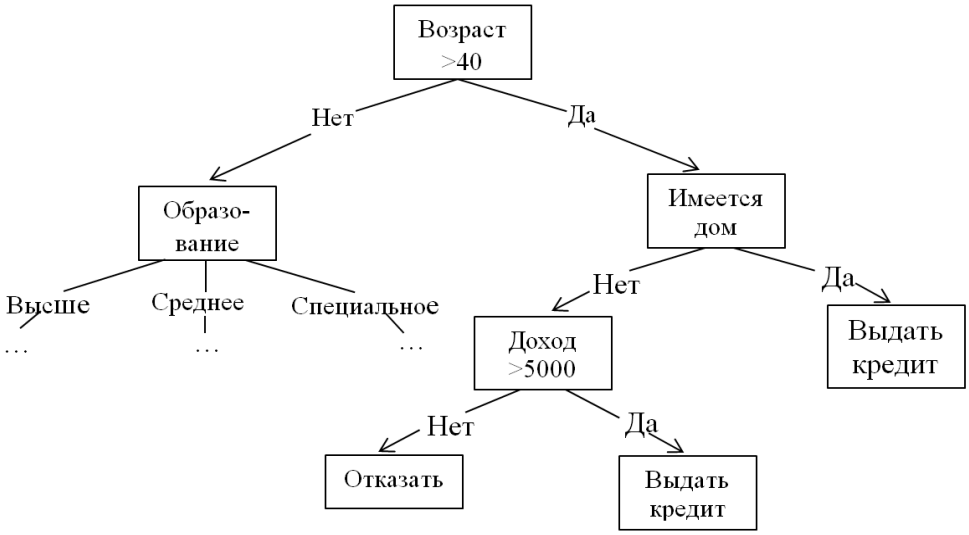


Рис.10. Пример дерева решений

Область применения деревья решений в настоящее время широка, но все задачи, решаемые этим аппаратом могут быть объединены в следующие три класса:

– **Описание данных:** Деревья решений позволяют хранить информацию о данных в компактной форме, вместо них мы можем хранить дерево решений, которое содержит точное описание объектов.
– **Классификация:** Деревья решений отлично справляются с задачами классификации, т. е. отнесения объектов к одному из заранее известных классов. Целевая переменная должна иметь дискретные значения.
– **Регрессия:** Если целевая переменная имеет непрерывные значения, деревья решений позволяют установить зависимость целевой переменной от независимых (входных) переменных. Например, к этому классу относятся задачи численного прогнозирования (предсказания значений целевой переменной).

Пусть нам задано некоторое обучающее множество T, содержащее объекты (примеры), каждый из которых характеризуется m атрибутами (атрибутами), причем один из них указывает на принадлежность объекта к определенному классу.

Пусть через $\{C_1, C_2, ... C_k\}$ обозначены классы(значения метки класса), тогда существуют 3 ситуации:

1. Множество T содержит один или более примеров, относящихся к одному классу C_k. Тогда дерево решений для T – это лист, определяющий класс C_k.
2. Множество T не содержит ни одного примера, т. е. пустое множество. Тогда это снова лист, и класс, ассоциированный с листом, выбирается из другого множества отличного от T, скажем, из множества, ассоциированного с родителем.
3. Множество T содержит примеры, относящиеся к разным классам. В этом случае следует разбить множество T на некоторые подмножества. Для этого выбирается один из признаков, имеющий два и более отличных друг от друга значений $O_1, O_2, ... O_n$. Множество T разбивается на подмножества $T_1, T_2, ... T_n$, где каждое подмножество T_i содержит все примеры, имеющие значение O_i для выбранного признака. Это процедура будет рекурсивно продолжаться до тех пор, пока конечное множество не будет состоять из примеров, относящихся к одному и тому же классу.

Вышеописанная процедура лежит в основе многих современных алгоритмов построения деревьев решений, этот метод известен еще под названием разделения и захвата (divide and conquer). Очевидно, что при использовании данной методики, построение дерева решений будет происходит сверху вниз.

Поскольку все объекты были заранее отнесены к известным нам классам, такой процесс построения дерева решений называется обучением с учителем (supervised learning). Процесс обучения также называют индуктивным обучением или индукцией деревьев (tree induction).

На сегодняшний день существует значительное число алгоритмов, реализующих деревья решений CART, C4.5, NewId, ITrule, CHAID, CN2 и т. д. Но наибольшее распространение и популярность получили следующие два:

- **CART (Classification and Regression Tree)** – это алгоритм построения бинарного дерева решений – дихотомической классификационной модели. Каждый узел дерева при разбиении имеет только двух потомков. Как видно из названия алгоритма, решает задачи классификации и регрессии.
- **C4.5** – алгоритм построения дерева решений, количество потомков у узла не ограничено. Не умеет работать с непрерывным целевым полем, поэтому решает только задачи классификации.

Большинство из известных алгоритмов являются жадными алгоритмами. Если один раз был выбран атрибут, и по нему было произведено разбиение на подмножества, то алгоритм не может вернуться назад и выбрать другой атрибут, который дал бы лучшее разбиение. И поэтому на этапе построения нельзя сказать даст ли выбранный атрибут, в конечном итоге, оптимальное разбиение.

При построении деревьев решений особое внимание уделяется следующим вопросам: выбору критерия атрибута, по которому пойдет разбиение, остановки обучения и отсечения ветвей. Рассмотрим все эти вопросы по порядку.

Правило разбиения. Для построения дерева на каждом внутреннем узле необходимо найти такое условие (проверку), которое бы разбивало множество, ассоциированное с этим узлом на подмножества. В качестве такой проверки должен быть выбран один из атрибутов.

Общее правило для выбора атрибута можно сформулировать следующим образом: выбранный атрибут должен разбить множество так, чтобы получаемые в итоге подмножества состояли из объектов, принадлежащих к одному классу, или были максимально приближены к этому, т. е. количество объектов из других классов (примесей) в каждом из этих множеств было как можно меньше.

Алгоритм C4.5, усовершенствованная версия алгоритма ID3 (Iterative Dichotomizer), использует теоретико-информационный подход.

Алгоритм CART использует так называемый индекс Gini (в честь итальянского экономиста Corrado Gini), который оценивает «расстояние» между распределениями классов.

Правило остановки. В дополнение к основному методу построения деревьев решений были предложены следующие правила:

– Использование статистических методов для оценки целесообразности дальнейшего разбиения, так называемая ранняя остановка (prepruning). В конечном счете ранняя остановка процесса построения привлекательна в плане экономии времени обучения.

– Ограничить глубину дерева. Остановить дальнейшее построение, если разбиение ведет к дереву с глубиной превышающей заданное значение.

– Разбиение должно быть нетривиальным, т. е. получившиеся в результате узлы должны содержать не менее заданного количества примеров.

Правило отсечения. Очень часто алгоритмы построения деревьев решений дают сложные деревья, которые переполнены данными, имеют много узлов и ветвей. Такие ветвистые деревья очень трудно понять. К тому же ветвистое дерево, имеющее много узлов, разбивает обучающее множество на все большее количество подмножеств, состоящих из все меньшего количества объектов. Ценность правила, справедливого скажем для 2-3 объектов, крайне низка, и в целях анализа данных такое правило практически непригодно. Гораздо предпочтительнее иметь дерево, состоящее из малого количества узлов, которым бы соответствовало большое количество объектов из обучающей выборки.

Для решения вышеописанной проблемы часто применяется так называемое отсечение ветвей (prepruning).

Пусть под точностью (распознавания) дерева решений понимается отношение правильно классифицированных объектов при обучении к общему количеству объектов из обучающего множества, а под ошибкой – количество неправильно классифицированных. Предположим, что нам известен способ оценки

ошибки дерева, ветвей и листьев. Тогда, возможно использовать следующее простое правило:

- построить дерево;
- отсечь или заменить поддеревом те ветви, которые не приведут к возрастанию ошибки. Отсечение ветвей происходит снизу вверх, двигаясь с листьев дерева, отмечая узлы как листья, либо заменяя их поддеревом.

Преимущества использования деревьев решений:

- быстрый процесс обучения;
- извлечение правил на естественном языке;
- генерация правил в областях, где эксперту трудно формализовать свои знания;
- интуитивно понятная классификационная модель;
- высокая точность прогноза, сопоставимая с другими методами (статистика, нейронные сети);
- построение непараметрических моделей.

В силу этих и многих других причин, методология деревьев решений является важным инструментом в работе каждого специалиста, занимающегося анализом данных, вне зависимости от того практик он или теоретик.

Деревья решений являются прекрасным инструментом в системах поддержки принятия решений, интеллектуального анализа данных. В состав многих пакетов, предназначенных для интеллектуального анализа данных, уже включены методы построения деревьев решений. В областях, где высока цена ошибки, они послужат отличным подспорьем аналитика или руководителя

Деревья решений успешно применяются для решения практических задач в следующих областях:

- Банковское дело. Оценка кредитоспособности клиентов банка при выдаче кредитов.
- Промышленность. Контроль за качеством продукции (выявление дефектов), испытания без разрушений (например, проверка качества сварки) и т.д.
- Медицина. Диагностика различных заболеваний.
- Молекулярная биология. Анализ строения аминокислот.

Это далеко не полный список областей, где можно использовать деревья решений.

3.5. Классификация программных реализаций систем Data Mining

1. Предметно-ориентированные аналитические пакеты (например, в финансовой области предназначены для предсказания курса валют). Часто основой для таких технологий является несложный статистический аппарат (аппарат прикладной статистики), в наибольшей мере учитывающий специфику рассматриваемой области. Цена таких продуктов меньше $1000, т. е. они недорогие и их много.

2. Статистические пакеты, включающие наряду с традиционными методами математической статистики также элементы Data Mining. Круг задач, ре-

шаемых с помощью статистических пакетов: создание корреляционных моделей; факторный анализ, регрессионный анализ и др.

Достоинства данных методов состоит в том, что они основываются на строгом математическом аппарате.

Недостатки: для их использования требуется специальная математическая подготовка пользователя, а также, принципиальный недостаток пакетов состоит в том, что они опираются на статистическую парадигму и поэтому дают математически усредненный вывод.

Наиболее распространены такие мощные статистические пакеты, как SAS (компания SAS Institute), SPSS (SPSS), Statistica и др. Эти системы достаточно дороги – от $1000 до $15000.

3. Нейросетевые системы. Принцип работы нейронных сетей заключается в следующем: имитируется работа нейронов в составе иерархической сети. При этом сигналы передаются от нижних слоев к верхним, а сила сигнала зависит от сложности связи.

Недостатки:

– необходимо иметь большой объем обучающей выборки;
– результаты работы такого пакета трудно объяснить.

Нейронные сети могут быть реализованы программным или аппаратным способом.

Вариантами аппаратной реализации являются нейрокомпьютеры, нейроплаты и нейроБИС (большие интегральные схемы). Одна из самых простых и дешёвых нейроБИС – модель MD 1220 фирмы Micro Devices, которая реализует сеть с 8 нейронами и 120 синапсами.

Большинство современных нейрокомпьютеров представляют собой персональный компьютер или рабочую станцию, в состав которых входит дополнительная нейроплата. К их числу относятся, например, компьютеры серии FMR фирмы Fujitsu.

К программам, реализующим технологии нейронных сетей относятся: пакет Brain Maker (CSS), NeuroShell (Ward Systems Group) и др. Стоимость таких систем очень высока (более $1000). Пакет Brain Maker используется несколькими тысячами финансовых и промышленных компаний, а также оборонными ведомствами США для решения задач прогнозирования, оптимизации и моделирования ситуаций. К таким задачам относятся прогнозирование курсов валют и акций на биржах, моделирование кризисных ситуаций, распознавание образов и многие другие на основе использования сети Хопфилда с обучением по методу обратного распространения ошибки.

4. Системы рассуждений на основе аналогичных случаев (Case Based Reasoning – CBR) основаны на поиске аналога наличной ситуации. Назначение таких систем: среди БД множества случаев найти тот, который наиболее близок к рассматриваемому.

Недостатки:

– не создается никакой модели (ищем аналогию, но не ищем модель, правило);

– результат зависит от меры близости, которую можно выбрать и достаточно неправильной. Для эффективного решения задач классификации или прогноза необходимо, чтобы был накоплен большой объем данных.

Пример системы, использующей CBR, – Pattern Recognition Workbench (Unica, США).

5. Деревья решений (Decision Tree). Указанная технология используется в том случае, если применимо правило типа «If …,Then …» и она представляет собой процесс мышления, при котором идет логический вывод от корня к ветвям и листьям. Такие переходы понятны и видны графически, т. е. пользователь получает модель, по которой он может сделать выводы о результатах.

Недостаток технологии деревьев решений заключается в том, что трудно найти оптимальное решение, такая система не дает ответа, какое решение следует считать оптимальным.

На использовании технологии деревьев решений работают продукты See5 / C5.0 (компания RuleQuest), KnowledgeSeeker (ANGOSS) и др. Стоимость таких пакетов от $1000.

6. Пакеты на основе алгоритмов ограниченного перебора. Суть работы таких технологий заключается в следующем: алгоритм вычисляет частоты комбинаций простых логических событий в подгруппах данных и на основании вычисленных частот делается вывод о полезности той или иной комбинации. Они определяют логические «If …,Then …» правила и выдают результат. Технология ограниченного перебора используется там, где трудно найти функциональную связь.

Известным представителем этого подхода является продукт WizWhy (фирма WizSoft). Стоимость таких пакетов – около $4000.

7. Генетические алгоритмы. Данная технология представляет собой попытку найти решение путем обращения к генетике. Генетический алгоритм (ГА) – это поисковый алгоритм, основанный на природных механизмах селекции и генетики. Эти алгоритмы обеспечивают выживание сильнейших решений из множества сгенерированных, формируя и изменяя процесс поиска на основе моделирования эволюции исходной популяции решений.

Коммерческое программное обеспечение, реализующее ГА, можно разделить на программные средства общего назначения, прикладные и алгоритмические программные продукты.

Программное обеспечение общего назначения включает разнообразные наборы инструментальных средств для построения конкретных программ, которые содержат библиотеки алгоритмов, программы моделирования, средства визуализации и другие инструменты. Пакеты подобного типа рассчитаны на опытных программистов, требуют знания основ теории эволюционных вычислений и характеризуются высокой трудоёмкостью освоения, которая в значительной мере зависит от квалификации пользователя.

Прикладные программные продукты ориентированы на решение проблем определённого класса в конкретных предметных областях (реинжиниринг, маркетинг, стратегическое планирование и др.). Такие средства не требуют от

пользователя теоретических знаний в области методологии создания интеллектуальных систем. Достаточно, чтобы он был специалистом в своей предметной области.

Алгоритмическое программное обеспечение поддерживает один (или несколько) генетический алгоритм. Преимущества таких программных продуктов – их гибкость и простота использования. При этом пользователям необходимо иметь представление об основах теории ГА.

Система PC/Beagle представляет собой программу поиска решающих правил, классифицирующих примеры из базы данных. Она превращает данные в знания за счёт использования машинного обучения. Один из модулей системы путём репродукции и селекции порождает правила, представленные в виде логических выражений.

Система Evolver реализует шесть методов генетической оптимизации и выполнена в виде расширения MS Excel. Основные области применения пакета – оптимизация доходности с учётом уровня риска и максимизация прибыли с учётом возможных издержек.

Genesis – известный алгоритмический программный продукт, который используется в качестве инструмента тестирования генетических алгоритмов. Он позволяет создать модифицированную программную среду и обеспечивает пользователя статистической информацией на выходе.

Программный продукт общего назначения EnGENEer помогает адаптировать генетические алгоритмы к новым проблемным областям.

Известен пакет GeneHunter фирмы Ward Systems Group, который может использоваться как приложение MS Excel и допускает составление собственных программ на языках C и Visual Basic. Его стоимость – около $1000.

8. Эволюционное программирование. Процесс построения программ строится как эволюции в мире программ. Когда система находит программу, более или менее выражающую искомую зависимость, она начинает вносить в нее небольшие модификации и отбирает среди построенных дочерних программ те, которые повышают точность. Так работает отечественная программная система PolyAnalyst.

Другое направление эволюционного программирования связано с поиском зависимости целевых переменных от остальных в форме функций какого-то определенного вида, например, в форме полиномов. Указанное направление реализовано в системе NeuroShell компании Ward System Group. Стоимость систем до $4000.

9. Аналитические платформы. Аналитические программные комплексы имеют тенденцию совершенствоваться в направлении увеличения количества параметров многомерного анализа и уровня адекватности математического аппарата реальным, многосторонним бизнес-процессам для повышения точности и долгосрочности прогнозирования развития процессов и ситуаций, и их оптимизации в интересах предприятий и организаций. Аналитические программные комплексы должны создаваться с расчетом на слияние с другими интеллектуальными средствами, имитационными математическими моделями, многокри-

териальными системами поддержки принятия решений, системами искусственного интеллекта и др. Только в этом случае возможно образование интегрированных комплексов поддержки принятия оптимальных решений, причем как в интересах достижения стратегических целей, так и в интересах своевременного, достаточно быстрого и адекватного реагирования на изменения внешних условий в процессе управления деятельностью предприятий и организаций.

Разработанный в России компанией BaseGroup Labs программный продукт Deductor является аналитической платформой, т. е. основой для создания законченных прикладных решений на основе решения задач анализа данных. Реализованные в Deductor технологии предоставляет полный набор инструментов и позволяют на базе единой архитектуры пройти все этапы построения аналитической системы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов [21, 27].

Deductor предоставляет аналитикам инструментальные средства, необходимые для решения самых разнообразных аналитических задач: корпоративная отчетность, прогнозирование, сегментация, поиск закономерностей – эти и другие задачи, где применяются такие методики анализа, как OLAP, Knowledge Discovery in Databases и Data Mining. Deductor является идеальной платформой для создания систем поддержки принятия решений.

3.6. Краткое описание применения аналитической платформы Deductor для решения задач интеллектуального анализа данных

Состав платформы Deductor. Система состоит из пяти частей:

– **Studio** – программа, реализующая функции импорта, обработки, визуализации и экспорта данных. Deductor Studio может функционировать и без хранилища данных, получая информацию из любых других источников, но наиболее оптимальным является их совместное использование. В Deductor Studio включен полный набор механизмов, позволяющий получить информацию из произвольного источника данных, провести весь цикл обработки (очистку, трансформацию данных, построение моделей), отобразить полученные результаты наиболее удобным образом (OLAP, диаграммы, деревья и др.) и экспортировать результаты на сторону.

– **Viewer** – рабочее место конечного пользователя. Позволяет отделить процесс построения сценариев от использования уже готовых моделей. Все сложные операции по подготовке сценариев обработки выполняются аналитиками-экспертами при помощи Deductor Studio, а Deductor Viewer обеспечивает пользователям простой способ работы с готовыми результатами, скрывает от них все сложности построения моделей и не предъявляет высоких требований к квалификации сотрудников.

– **Warehouse** – многомерное хранилище данных, аккумулирующее всю необходимую для анализа предметной области информацию. Использование единого хранилища позволяет обеспечить непротиворечивость данных, их централизованное хранение и автоматически обеспечивает всю необходимую поддержку процесса анализа данных.

– **Server** – служба, обеспечивающая удаленную аналитическую обработку данных. Позволяет автоматически обрабатывать данные и переобучать модели на сервере, оптимизирует выполнение сценариев за счет кэширования проектов и использования многопоточной обработки.

– **Client** – клиент доступа к Deductor Server. Обеспечивает доступ к серверу из сторонних приложений и управление его работой.

Реализованная в Deductor архитектура позволяет добиться максимальной гибкости при создании законченного решения. Благодаря данной архитектуре можно собрать в одном аналитическом приложении все необходимые инструменты анализа и реализовать автоматическое выполнение подготовленного сценария. Создание законченного решения занимает очень мало времени. Достаточно получить данные, определить сценарий обработки и задать место для экспорта полученных результатов. Наличие мощного набора механизмов обработки и визуализации позволяет двигаться по шагам, от наиболее простых способов анализа к более мощным. Таким образом, первые результаты пользователь получает практически сразу, но при этом можно легко наращивать мощность решения.

Хранилище данных. Deductor включает в себя кросс-платформенное хранилище Deductor Warehouse – специализированную базу, в которую загружается информация из существующих учетных систем. Оно спроектировано специально для обработки аналитических запросов и включает удобный семантический слой, благодаря которому пользователи в состоянии извлечь любые интересующие их сведения без написания сложных запросов, только оперируя понятными бизнес-терминами.

Deductor поддерживает работу практически с любыми источниками данных: офисные приложения, 1С:Предприятие, популярные СУБД, ERP-, CRM-, BI-системы, текстовые файлы, XML-источники и десятки других. Где бы ни хранилась информация, ее можно будет извлечь, трансформировать к нужному виду и загрузить в хранилище данных.

Интеграция. Для получения аналитической отчетности при помощи Deductor может использоваться информация из десятков источников: хранилища данных, учетные системы, СУБД, файлы и многое другое. Полученные результаты можно просмотреть на экране, передать в офисные приложения (MS Excel, Word, Access), разместить на веб-сайте, загрузить в базу данных.

Простота применения. Для построения аналитического решения на базе платформы Deductor не требуется написания сложного кода. Практически все операции производятся в режиме визуального проектирования, при помощи специальных мастеров, облегчающих работу аналитика, которая отделена от работы конечного пользователя. Аналитик строит при помощи мастеров сценарии, в которых реализована произвольная логика обработки, а конечный пользователь просто выбирает нужный отчет и автоматически получает интересующие данные.

Прогнозирование – одна из самых востребованных, но при этом и самых сложных задач анализа. Качественный прогноз является ключом к решению та-

ких актуальных бизнес-задач, как оптимизация складских запасов и финансовых потоков, бюджетирование, оценка инвестиционной привлекательности и многие другие. Обработчики в Deductor обеспечивают возможность построения прогностических моделей с использованием как простых моделей (по среднему, на основе предыдущих периодов, по жестким правилам), так и мощных самообучающихся алгоритмов (регрессионные модели, нейронные сети, анализ временных рядов).

OLAP-визуализатор. Результаты планирования, моделирования, различные варианты сценарных прогнозов можно просмотреть при помощи множества удобных визуализаторов, в частности с использованием встроенного OLAP-модуля. Он поддерживает весь необходимый для бюджетирования функционал: просмотр в любых срезах, детализация (drill down), сортировки, группировки, множество способов фильтрации.

Анализ отклонений. Одним из важнейших этапов работы системы бюджетирования является выявление отклонений и анализ причин их возникновения. Deductor включает мощные Data Mining алгоритмы, позволяющие не только найти аномалии, отклонения, противоречия, но и проанализировать что привело к такому результату, выявить влияние на аномалии множества факторов, найти причинно-следственные связи.

Версии платформы. Существует три версии этой платформы. Версия *Enterprise* предназначена для корпоративного использования. В ней присутствуют:

– серверные компоненты Deductor Server и Deductor Client;
– интерфейс доступа к Deductor через механизм OLE Automation;
– традиционное хранилище данных Deductor Warehouse на трех СУБД: Firebird, MS SQL, Oracle;
– виртуальное хранилище данных Deductor Virtual Warehouse.

Версия *Professional* предназначена для небольших компаний и однопользовательской работы. В ней отсутствуют серверные компоненты, поддержка OLE, виртуальное хранилище, а традиционное хранилище данных можно создавать только на СУБД Firebird.

Версия *Academic* предназначена для образовательных и обучающих целей. Ее функционал аналогичен версии Professional за исключением того, что отсутствуют пакетный запуск сценариев, т. е. работа в программе может вестись только в интерактивном режиме, а также нет импорта из промышленных источников данных: 1С, СУБД, файлы MS Excel, Deductor Data File.

Реализованные технологии Data Mining:

– задача ассоциации на основе алгоритма Apriori;
– задача кластеризации на основе сетей и карт Кохонена, а также алгоритмов k-means и G-means;
– задача классификации и регрессии на основе линейной и логистической регрессии, деревьев решений (алгоритм C 4.5), многослойного персептрона (алгоритмы BProp, RProp);

– анализ и прогнозирование временных рядов на основе регрессионных и нейросетевых моделей;

– сравнение моделей на основе ROC-анализа.

В Deductor Studio вся работа ведется с использованием пяти мастеров.

Для создания сценариев обработки данных используются *мастера импорта*, *обработки* и *экспорта*. Для настройки подключений к источникам данных используется *мастер подключений*. *Мастер визуализации* настраивает визуализаторы для конкретного узла.

Подробное изложение системы Deductor изложено в работах Н.Б. Паклина и других разработчиков и исследователей в [21, 27]. Учебные примеры применения платформы содержатся также в пособиях [22, 23].

Сопоставление Deductor со известными специализированными продуктами других производителей. По производительности работа Warehouse на Oracle, SQL и Firebird при более-менее активном лазании в Хранилище (закачка транзакций и какой-то дополнительной информации, а также постоянное ее использование для прогнозирования порядка 30000-40000 временных рядов в месяц и сохранение прогнозов) отличается существенно, при больших объемах раз в 10-20. При грамотной оптимизации можно добиться еще большей разницы в скорости. Это связано с тем, что тяжелые базы сами по себе работают быстрее (точнее могут больше выжать из оборудования), но не только. Дело в том, что у Oracle и MS SQL есть нестандартные опции, позволяющие загружать данные пачками, извлекать большими кусками и прочее. Кроме того, поддерживается размещение в различные табличные пространства и прочее. При небольших объемах (база до гигабайта) разницы в производительности у указанных баз данных и Deductor 5 почти нет [27]. В Deductor 5 есть алгоритмы для построение прогнозных моделей. Так что теоретических проблем нет, а вот насчет качества – это уже вопрос обучения, данных и прочее. Для работы нужен Deductor Studio. Даже бесплатная версия Deductor Academic может обрабатывать выборки объемом в несколько миллионов записей без особых проблем.

Выводы

Технологии извлечения знаний из хранилищ данных основаны на методах статистического анализа и моделирования, ориентированных на поиск моделей и отношений, скрытых в совокупности данных. Эти модели могут в дальнейшем использоваться для оптимизации деятельности предприятия или фирмы.

Для извлечения значимой информации из хранилищ данных имеются специальные методы (OLAP-анализа, Data Mining или Knowledge Discovery), основанные на применении методов математической статистики, нейронных сетей, индуктивных методов построения деревьев решений и др.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные шаги процедур Knowledge Discovery in Databases при работе с данными в процессе анализа данных?

2. Перечислите основные методы из арсенала математической статистики, применяемые при анализе данных.

3. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные методы из арсенала эволюционного моделирования, применяемые для интеллектуального анализе данных.

4. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные методы из арсенала машинного обучения, применяемые для интеллектуального анализе данных.

5. Дайте определение бинарной логистической регрессии, логит-преобразования, определение ROC-кривой для представления результатов бинарной классификации в машинном обучении.

6. Какова процедура построения и визуальной оценки ROC-кривых для представления результатов бинарной классификации и прогноза?

7. Каковы особенности алгоритмов кластеризации наборов данных, содержащих большое количество числовых и категорийных атрибутов?

8. В чем смысл задачи кластеризации транзакционных данных?

9. Какие процедуры содержит алгоритм кластеризации транзакционных данных CLOPE?

10. Каковы преимущества алгоритма кластеризации транзакционных данных CLOPE?

11. Каковы основные понятия из теории деревьев решений используются при решении задач Data Mining?

12. Каковы области применения деревья решений при решении задач Data Mining?

13. Какие процедуры лежит в основе многих современных алгоритмов построения деревьев решений?

14. Каковы особенности алгоритмов CART и C4.5, реализующих деревья решений?

15. Выбор критерия атрибута, по которому пойдет разбиение, остановка обучения и отсечение ветвей деревьев решений.

16. Перечислите и кратко охарактеризуйте виды программных реализаций систем Data Mining.

17. Каковы параметры алгоритма конструирования классификатора в программе See5?

18. Как преобразовать полученное дерево решений в набор правил If….Then?

19. Как можно уменьшить ошибки классификации в программе See5?

20. Какой алгоритм положен в основу работы программы WizWhy для поиска логических правил в данных?

21. Какие параметры следует задать для работы процедуры поиска правил и какие отчеты готовит система WizWhy?

22. Каков перечень решаемых задач и состав аналитической платформы Deductor 5?

23. В чем заключена новизна взгляда на данные при применении аналитической платформы Deductor?

24. Какой объем выборки данных может обрабатывать и какие задачи может решать демоверсия Deductor 5?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сферу приложений искусственного интеллекта в настоящее время вошли практически все направления современной информатики. Многие из этих направлений, таких как вопросы создания экспертных систем, искусственных нейросетей и др., в достаточной мере освещены в учебной и методической литературе. Поэтому я не ставил перед собой цель «объять необъятное», а включил в текст лекций как разделы, содержащие описание традиционных моделей знаний, понятий, определений и типов интеллектуальных систем, так и новый перспективный подход к решению проблем интеллектуальной обработки накопленных массивов данных.

При написании пособия автор видел свою цель в том, чтобы познакомить студентов с принципами создания и функционирования интеллектуальных информационных систем. Практический опыт показывает, что люди, не знакомые с этими принципами, испытывают большие трудности, выступая в роли пользователей интеллектуального программного обеспечения.

С учетом динамичного развития современной области ИИ текст лекций является лишь введением в огромную и интересную область знаний. Слушатели, заинтересовавшиеся работами в этом перспективном научном направлении и вопросами практического применения методов ИИ в решении сложных задач управления, имеют прекрасную возможность самостоятельно продолжить изучение этой тематики. Огромный мир Интернета позволяет получить быстрый доступ к самой различной информации по тематике создания и применения интеллектуальных систем и технологий, к имеющейся обширной библиографии, углубленным теоретическим и практическим курсам по систематическому освещению многих вопросов, относящихся к области ИИ и ИС. Многие перспективные направления ИИ, ИС в работе лишь упомянуты, или приведены в качестве примеров развития возможных теоретических направлений и практических применений.

Автор надеется, что знания, полученные при изучении данной книги, помогут читателю решать практические примеры при самостоятельном освоении технологии и продуктов Data Mining, а также позволят расширить кругозор в области интеллектуальных информационных систем и технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 1: Системы общения и экспертные системы / под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990. – 461 с.
2. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 2: Модели и методы / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
3. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 3: Программные и аппаратные средства / под ред. В.Н. Захарова и В.Ф. Хорошевского. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
4. Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики: учебное пособие для вузов / Ю.М. Коршунов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.
5. Острейковский, В.А. Информатика: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2009. – 510 с.
6. Тельнов, Ю.Ф. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / Ю.Ф. Тельнов. – М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2002. – 118 с.
7. Интеллектуальные информационные системы и технологии: учебное пособие / Ю.Ю. Громов, О.Г. Иванова, В.В. Алексеев и др. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2013. – 244 с.
8. Дюк, В. Data Mining: учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. – СПб.: Питер, 2001. – 366 с.
9. Попов, Э.В Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель и др. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 310 с.
10. Логиновский, О.В. Управление и стратегии: учебное пособие / О.В. Логиновский. – Оренбург: Изд-во ОГУ; Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 704 с.
11. Луценко, Е.В. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие для студентов специальности 230400 «Информационные системы и технологии» / Е.В. Луценко. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 645 с.
12. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем: учебное пособие для вузов / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 382 с.
13. Романов, В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике: учебное пособие для вузов по специальности «Прикладная информатика» и другим междисциплинарным специальностям / под общ. ред. Н.П. Тихомирова. – М.: Экзамен, 2003. – 494 с.
14. Макаренко, С.И. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / С.И. Макаренко. – Ставрополь: СФ МГГУ, 2009. – 206 с.
15. Таунсенд, К. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таунсенд, Д. Фохт; пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 356 с.
16. Программные средства интеллектуальных систем / А.Е. Городецкий. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 2000. – 316 с.

17. Бессмертный, И.А. Искусственный интеллект: учебное пособие / И.А. Бессмертный.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 132 с.
18. Барыкин, С.Г. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие / С.Г. Барыкин, Н.В. Плотникова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004 – 85 с.
19. Барсегян, А.А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: учебное пособие для специальности «Информационные системы» / А.А. Барсегян. – СПб.: БХВ Петербург, 2007. – 376 с.
20. Кацко, И.А. Практикум по анализу данных на компьютере: учебное пособие / И.А. Кацко, Н.Б. Паклин. – М.: КолосС, 2009.– 278 с.
21. Паклин, Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: учебное пособие / Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.
22. Поллак, Г.А. Современные технологии анализа информации: учебное пособие / Г.А. Поллак. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 115 с.
23. Поллак, Г.А. Современные технологии анализа информации: учебное пособие к практическим работам / Г.А. Поллак. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 99 с.
24. Чинакал, В.О. Интеллектуальные системы и технологии: учебное пособие / В.О. Чинакал. – М.: РУДН, 2008. – 303 с.
25. Коровин, А.М. Управление знаниями на основе ИТ-технологий: текст лекций / А.М. Коровин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 48 с.
26. http://www.ipu.ru/labs/lab51/projects.html.
27. http://www.basegroup.ru/deductor/
28. http://www.rulequest.com/
29. http://www.interface.ru/sysmod/
30. http://www.bipartner.ru/services/dm.html.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……...…… 3
Глава 1. ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
1.1. История исследований и основные понятия в области искусственного интеллекта..... 5
1.2. Основные направления исследований в области интеллектуальных систем …….. 8
1.3. Основные признаки и отличия интеллектуальных систем……. 10
1.4. Основные типы интеллектуальных систем…….…. 13
Глава 2. МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
2.1. Представление знаний, рассуждений и задач…….…….. 28
2.2. Модели представления знаний……... 30
Глава 3. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗНАНИЙ ИЗ ДАННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ
3.1. Особенности и классификация методов интеллектуального анализа данных …….. 36
3.2. Логистическая регрессия и ROC-анализ данных…… 38
3.3. Алгоритмы кластеризации на службе Data Mining ……. 42
3.4. Деревья решений…….. 44
3.5. Классификация программных реализаций систем Data Mining……. 48
3.6. Краткое описание применения аналитической платформы Deductor для решения задач интеллектуального анализа данных……... 52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….……..... 57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК……..... 58

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

Методические указания к выполнению лабораторных работ Часть 1

Б1.В.09.08 МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА В МЕХАТРОНИКЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА 4
1.1 Назначение стенда 4
1.2 Состав 5
1.3 Технические характеристики стенда 5
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ 6
2.1 Работа №1. Изучение контроллера ОВЕН ПЛК-160 6
2.2 Работа №2. Основы работы со SCADA-системой 42

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА

1.1 Назначение стенда

Лабораторный стенд предназначен для изучения программируемого логического контроллера с объектом управления в виде мехатронного модуля – сборки деталей. Стенд позволяет изучить основы построения систем цикловой автоматики. Элементная база мехатронного модуля состоит из ленточного конвейера с электроприводом постоянного тока, модуля подачи базовых деталей, модулей подачи крышек из различного материала, пневматических толкателей и датчиков различного типа.

Внешний вид учебного комплекта представлен ниже (см. Рисунок 1).

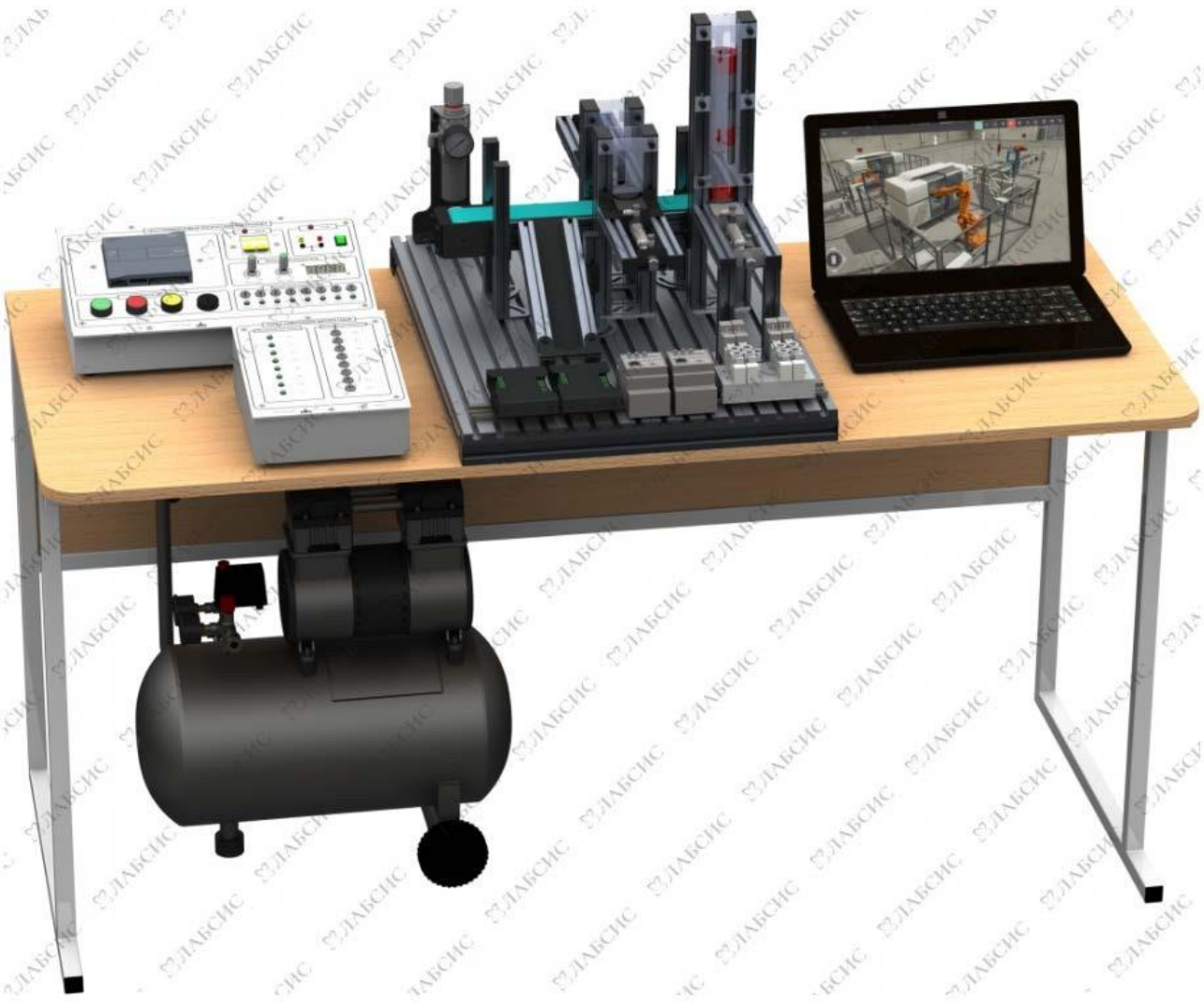


Рисунок 1 – Внешний вид стенда ММ-СБ-НН

1.2 Состав

Лабораторный стенд включает в себя следующие компоненты (см. Таблица 1).

Таблица 1

№	Наименование	Кол-во
1	Моноблок, содержащий: источник питания, программируемый логический контроллер, элементы индикации и управления	1 шт.
2	Мехатронный модуль сборки деталей	1 шт.
3	Модуль пульта симуляции	1 шт.
4	Компрессор	1 шт.
5	Ноутбук	1 шт.
7	Комплект кабелей и принадлежностей для проведения лабораторных работ	1 шт.
8	Техническое описание	1 шт.
9	Методические указания к проведению лабораторных работ	1 шт.

1.3 Технические характеристики стенда

Общие технические характеристики типового комплекта учебного оборудования представлены ниже (см. Таблица 2).

Таблица 2

Параметр	Значение
Напряжение электропитания, В	220
Частота питающего напряжения, Гц	50
Потребляемая мощность, ВА	1600
Габаритные размеры, мм	480x600x650
Масса, кг	60 кг
Диапазон рабочих температур	+10…+35 ˚С
Относительная влажность воздуха, не более	80%

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

2.1 Работа №1. Изучение контроллера ОВЕН ПЛК-160

Цель работы

Научиться составлять простейшие программы на программируемом логическом контроллере ОВЕН

Порядок работы

1. Изучить необходимый теоретический материал.
2. Ознакомиться с конструкцией и назначением элементов лабораторного стенда «Промышленные датчики давления».
3. Подготовить стенд к проведению лабораторной работы.
4. Изучить назначение, технические характеристики ОВЕН ПЛК-160.
5. Изучить основы системы команд и принципы программирования контроллера.
6. Дома при подготовке к работе:

– выполнить синтез системы автоматизации согласно варианту;

– составить программу на языке лестничных диаграмм.

7. В лаборатории:

– освоить графическую среду программного обеспечения CODESYS;

– набрать на компьютере подготовленную дома программу и откомпилировать ее;

– ввести программу в контроллер и убедится в правильности её работы.

Ход работы

В данной лабораторной работе программирование пользовательской задачи реализуется при помощи программного обеспечения CODESYS.

Обучающийся, в соответствии с поставленной задачей, разрабатывает алгоритм автоматизации управления объектом либо в виде логических уравнений, либо в виде схемы алгоритма. Входным, выходным сигналам и внутренним переменным (меркерам) присваиваются адреса в соответствии с конфигурационной таблицей.

Перед проведением лабораторной работы необходимо установить все элементы стенда в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе QF1 «Сеть», расположенном на лицевой панели стенда:

– установить в выключенное состояние клавишный переключатель «Питание контроллера»;

– тумблеры блока дискретных входов I1 … I8 перевести в нижнее положение, соответствующее состоянию «Выкл»;

– рукоятку потенциометра PR1 блока аналогового ввода/вывода перевести в крайнее положение против часовой стрелки;

После установки начальных условий необходимо подготовить к работе персональный компьютер и обеспечить его связь со стендом:

– включить персональный компьютер и дождаться загрузки операционной системы Windows;

– подать напряжение на стенд включением автоматического выключателя QF1 «Сеть»;

– подать напряжение на программируемый логический контроллер и датчики включением клавишного выключателя «Питание контроллера», дождаться загрузки ПЛК.

В комплексе используется программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК-160, внешний вид которого представлен на рис. 3. Описание основных элементов ПЛК представлено в таблице 1.

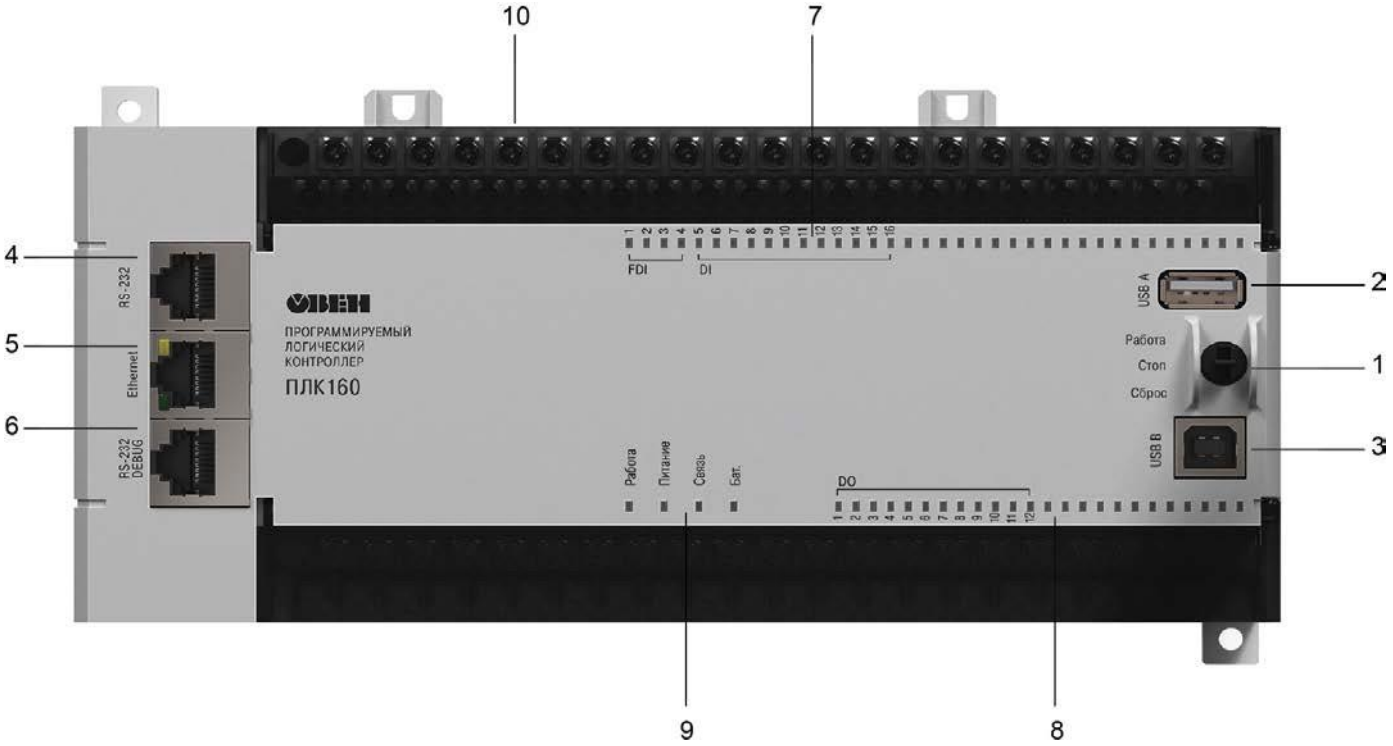


Рис. 3. Внешний вид ОВЕН ПЛК-160

Таблица 1

№ п/п	Элемент	Функциональное назначение
1	Переключатель работа/стоп/сброс	Положения переключателя определяют состояния прибора
2	USB-Host (Разъем USB Type-A)	Порт для подключения USB-flash накопителей
3	USB-Device (Разъем USB Type-B)	Порт для программирования
4	RS-232 Разъем RJ45	Последовательный интерфейс для подключения устройств
5	Ethernet Разъем RJ-45	Порт Ethernet 100 Base-T предназначен для подключения ПЛК в локальные сети, передачи данных и программирования
6	RS-232 Debug (Разъем RJ-45)	Последовательный интерфейс предназначен для подключения устройств и программирования
7	Светодиодные индикаторы состояния входов	FDI – обозначение для быстрых входов контроллера; DI – обычные дискретные входы
8	Светодиодные индикаторы состояния выходов	DO – обычные дискретные выходы
9	Светодиодные индикаторы состояния	Индикация состояния контроллера: «Работа», «Питание», «Связь», «Батарея»
10	Съемные клеммные колодки	Для подключения питания прибора, дискретных датчиков, исполнительных механизмов, аналоговых входов и выходов, интерфейсов RS-485 и клеммы встроенного источника постоянного напряжения 24 В

Описание состояний ПЛК, индицируемых светодиодами «Работа», «Питание», «Связь», «Батарея» представлены в табл. 2 и основные параметры в табл. 3.

Таблица 2

Индикатор	Состояние индикатора	Описание
«Работа»	Слабо светится	Ядро ОС еще не загрузилось после включения питания контроллера
	Мигает раз в 500 мс	Ядро ОС повреждено (не совпадает контрольная сумма)
	Мигает раз в 200 мс	Перегрузка центрального процессора
	Светится	Ядро ОС загружено успешно, программа CODESYS загрузилась и запустилась
	Не светится	Программа CODESYS не работает, остановлена или не загружена
«Питание»	Светится	Наличие питания у контроллера
	Не светится	Отсутствие питания у контроллера
«Связь»	Светится	Наличие связи с CODESYS
	Не светится	Отсутствие связи с CODESYS
«Бат.»	Светится	Необходимо заменить батарейку
	Не светится	Батарейка не требует замены

«FDI», «DI»	Светится	Соответствующий вход замкнут
	Не светится	Вход разомкнут
«DO»	Светится	Соответствующий выход замкнут
	Не светится	Выход разомкнут

Таблица 3

Параметр	Значение
Модель	ПЛК-160
Размеры, Ш х В х Г	208 х 110 х 83 мм
Потребляемая мощность, не более	45 ВА
Напряжение питания	от 90 до 264 В переменного тока (номинальное 120/230 В) частотой от 47 до 63 Гц (номинальное значение 50 Гц)
Встроенные цифровые входы/выходы	16 входов / 12 выходов
Встроенные аналоговые входы/выходы	8 входов / 4 выхода
Центральный процессор	RISC-процессор Texas Instruments Sitara AM1808
Объем оперативной памяти	Пользовательская программа 1 Мбайт, данные пользовательской программы 128 Кбайт, heap до 4 Мбайт в зависимости от использования ресурсов (сокеты, конфигурация и др.) (SDRAM), RAM-диск 8 Мбайт
Объем энергонезависимой памяти (FLASH)	6 Мбайт доступно для хранения файлов и архивов
Размер Retain-памяти (MRAM)	16 Кбайт
Количество сокетов	30
Время выполнения пустого цикла	Установленное по умолчанию (стабилизированное) – 1 мс (настраивается в окне «Конфигурация ПЛК (PLC Configuration) CODESYS». Настоятельно не рекомендуется устанавливать время цикла, равное 0 мс
Интерфейсы связи	RS-485, RS-232, RS-232 Debug, Ethernet 100 Base-T, USB-Device, USB-Host

Ниже представлены схемы подключения входных и выходных цепей ОВЕН ПЛК -160 (рис. 4).

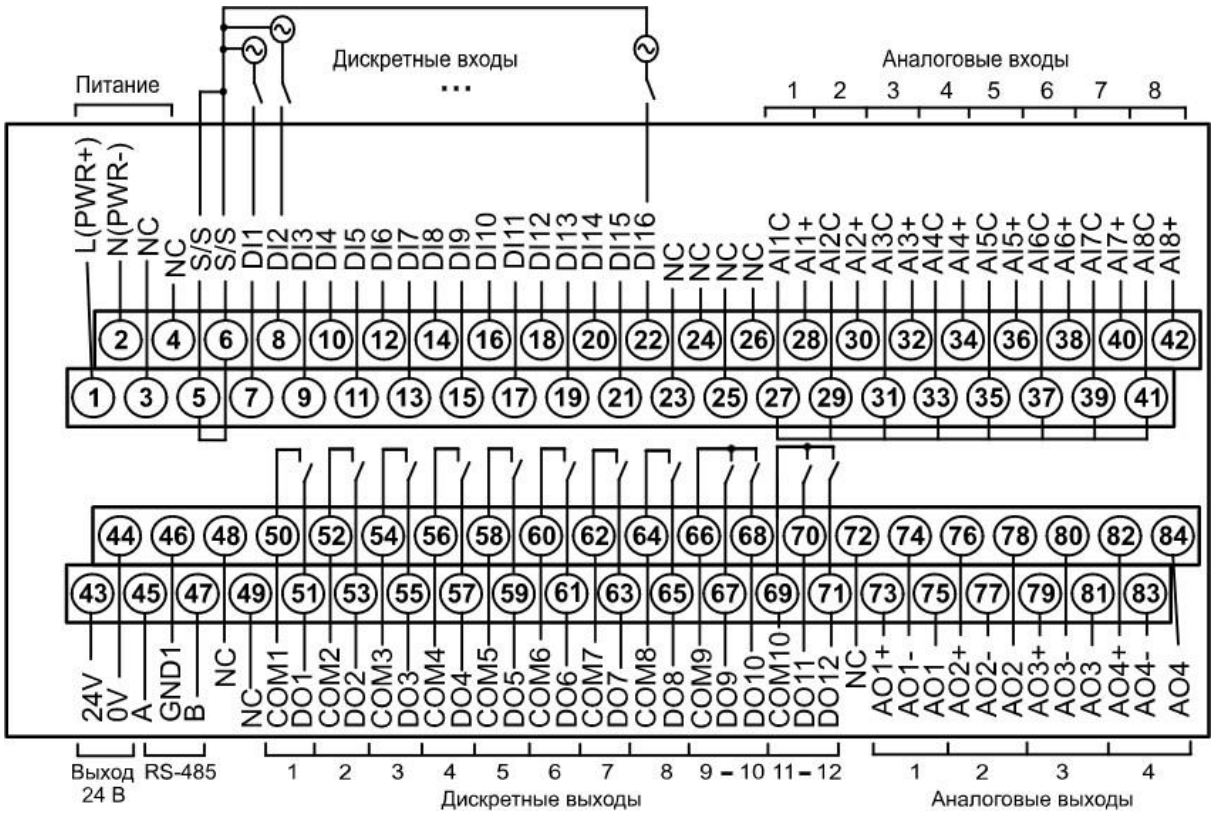


Рис. 4. Схемы подключения входных и выходных цепей контроллера ПЛК-160

Технические характеристики входных и выходных цепей контроллера представлены в табл.4.

Таблица 4

Параметр	**Значение**
Дискретные входы	
Количество входов из них быстродействующих	16 4 (DI1–DI4)
Тип входов по ГОСТ Р 52931	1 и 2
Напряжение питания дискретных входов	24 ± 3 В
Максимальный входной ток дискретного входа, не более	7 мА при питании 24 В, 8,5 мА при питании 27 В
Сигнал «логической единицы», соответствующий состоянию «Включено», дискретных входов для постоянного напряжения (ток в цепи)	От 15 до 30 В (ток от 3 до 15 мА)
Сигнал «логического нуля», соответствующий состоянию «Выключено», дискретных входов для постоянного напряжения (ток в цепи)	От минус 3 до 5 В (ток до 15 мА)

Минимальная длительность импульса, воспринимаемого дискретным входом:	
для обычных входов	1 мс
для быстродействующих	0,02 мс
Подключаемые входные устройства	Коммутационные устройства (контакты кнопок, выключателей, герконов, реле и т. п.),
	датчики, имеющие на выходе транзистор n-p-n или p-n-p типа с открытым коллектором,
	дискретные сигналы 24 ± 3 В
Аналоговые входы	
Количество аналоговых входов	8
Тип поддерживаемых унифицированных сигналов	Ток от 0 (4) до 20 мА, ток от 0 до 5 мА, напряжение от 0 до 10 В
Разрядность АЦП	14 бит
Входное сопротивление, не более:	
в режиме измерения тока	170 Ом
в режиме измерения напряжения, не менее	200 кОм
Период опроса одного входа	10 мс
Предел основной приведенной погрешности преобразования	± 0,25 %
Предел дополнительной приведенной погрешности преобразования на каждые 10 градусов изменения температуры	± 0,05 %
Дискретные выходы	
Количество релейных выходных каналов	12
Максимальный ток, коммутируемый контактами реле, не более	3 А (для переменного напряжения не более 250 В, частотой 50 Гц и cos φ > 0,4 – нагрузка для категории использования АС-15 по ГОСТ IEC 60947-1), 3 А (для постоянного напряжения не более 30 В – нагрузка для категории использования DC-13 по ГОСТ IEC 60947-1)
Время переключения контактов реле из состояния «лог. 0» в «лог. 1» и обратно, не более	50 мс (выходы DO1–DO12)
Механический ресурс реле, не менее	300 000 циклов переключений при максимальной коммутируемой нагрузке, 500 000 циклов переключений при коммутации нагрузки менее половины от максимальной

Аналоговые выходы			
Количество аналоговых выходов	4		
Тип выходного сигнала	Универсальный, ток от 4 до 20 мА, напряжение от 0 до 10 В	Напряжение от 0 до 10 В	Ток от 4 до 20 мА
Сопротивление нагрузки	Не более 500 Ом для 4…20 мА, не менее 2000 Ом для 0…10 В	Не менее 2000 Ом	Не более 500 Ом
Предел основной приведенной погрешности ЦАП	± 0,5 %		
Разрядность ЦАП	12 бит	10 бит	10 бит
Минимальный период обновления выходов	100 мс		
Питание аналоговых выходов, внешнее	24 ± 3 В, длина линии от источника питания не должна превышать 30 м		
Предел допускаемой дополнительной приведенной погрешности аналоговых выходов, вызванной изменением температуры окружающего воздуха от нормальной на каждые 10 °С изменения температуры	Не более 0,5 предела допускаемой основной приведенной погре		

Для более подробного изучения технических характеристик следует обратиться к технической документации на изучаемый программируемый логический контроллер.

Для имитации пульта оператора используется блок дискретного ввода, который содержит 8 двухпозиционных переключателей DI1 – DI8, подсоединенных ко входам ПЛК DI1 – DI8 соответственно.

Индикация включенного состояния выходных цепей ПЛК осуществляется за счет блока дискретного вывода, который содержит 8 светодиодов DO1 – DO8, подсоединенных к выходам ПЛК DO1 – DO8 соответственно.

Для включения питания модуля используется кнопка с фиксацией и подсветкой.

Основы программирования ПЛК

Для подготовки программ при проведении лабораторных работ служит среду программного обеспечения *CoDeSys*. Для запуска программы необходимо на рабочем столе *Windows* дважды щелкнуть курсором мыши по соответствующему ярлыку.

После этого откроется пустое окно программы *CoDeSys* (рис. 5), в котором можно создать новый проект или открыть уже созданный проект.

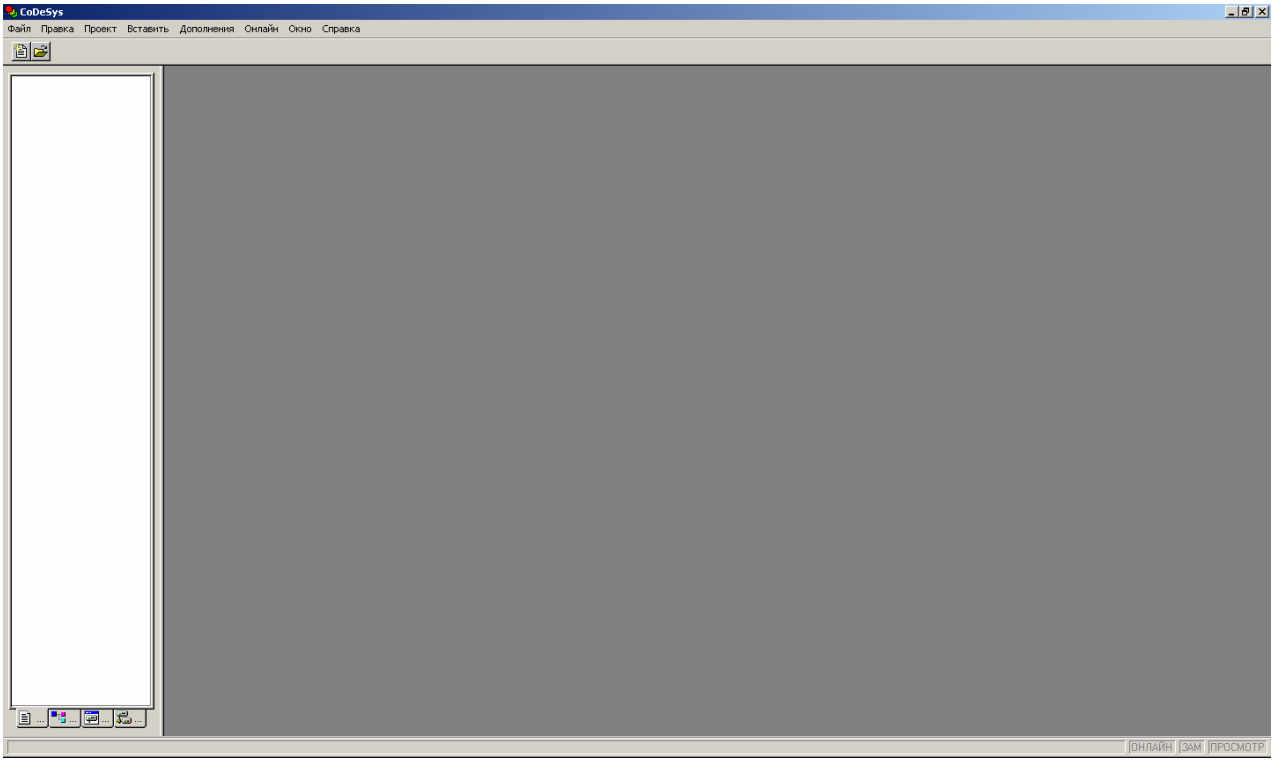


Рис. 5. Стартовое окно *CoDeSys*

Для создания нового проекта необходимо в выпадающем меню «Файл» выбрать пункт «Создать», после чего появится окно конфигурирования проекта «Настройка целевой платформы» (рис. 6). В выпадающем списке вариантов конфигурации (*target*-файлов) выбрать используемый в стенде контроллер ПЛК-160. *Target*-файл содержит информацию о ресурсах контроллера: количестве и типах входов и выходов, интерфейсов, памяти, дополнительных устройствах и т.д., с которыми работает программная среда *CoDeSys*. После выбора контроллера появится окно общих настроек выбранного ПЛК (рис. 7), в котором необходимо выставить те же параметры, которые представлены на рисунке. После завершения настройки необходимо нажать «ОК».

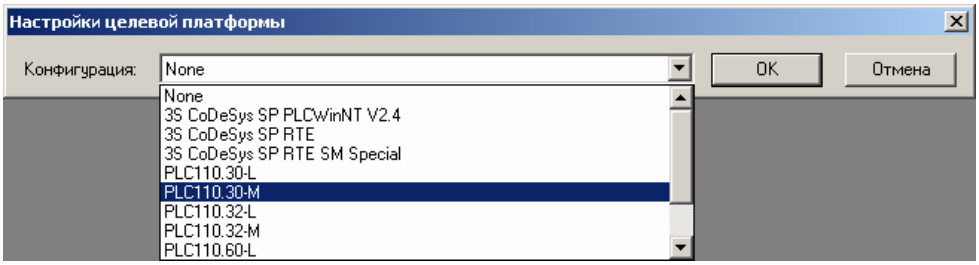


Рис. 6. Окно выбора контроллера

После конфигурирования проекта откроется окно настройки программных компонентов (POU) проекта (рис. 8), в котором выбирается имя и тип POU, а также язык реализации управляющей программы. После завершения настройки также необходимо нажать «ОК».

CoDeSys поддерживает следующие программные компоненты (POU):

1) программный блок (PRG);

2) функциональный блок (FB);

3) функция (FC).

CoDeSys поддерживает следующие языки программирования:

1) текстовые: список инструкций (IL) и структурированный текст (ST);

2) графические: язык последовательных функциональных схем (SFC), язык функциональных блоковых диаграмм (FBD), язык релейных диаграмм (LD)

Кроме того, CoDeSys включает поддержку основанного на языке FBD редактора непрерывных функциональных схем (CFC).

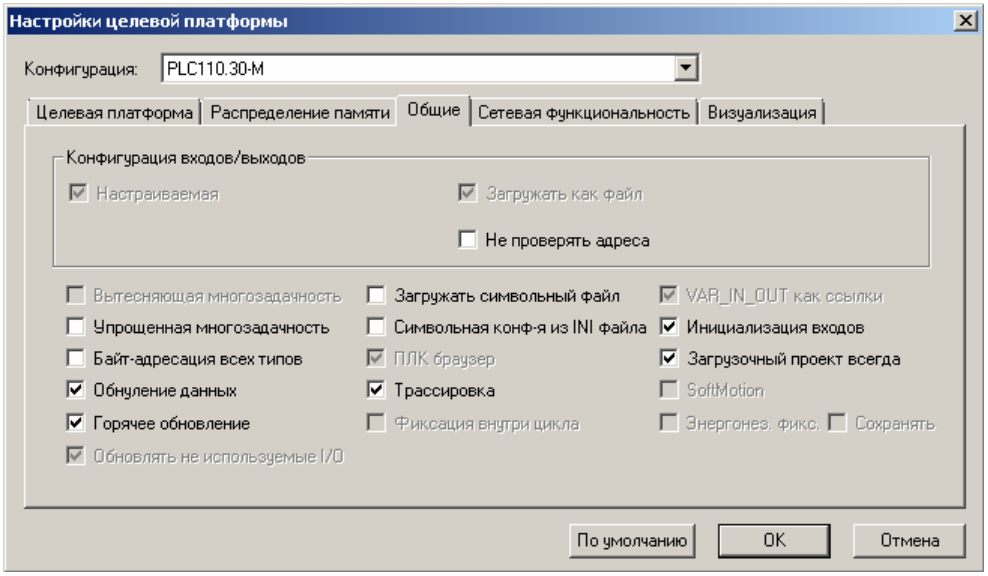


Рис. 7. Окно настройки параметров контроллера

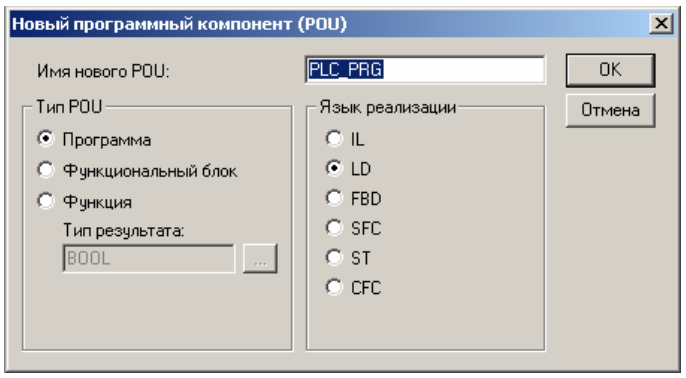


Рис. 8. Окно настройки *POU* проекта

В CoDeSys введено несколько языков для того, чтобы пользователь мог применить язык, наиболее удобный для него: программисты выбирают язык IL или ST, специалисты, имеющие опыт работы с релейной логикой, выбирают язык LD, специалисты по системам автоматического управления (САУ) и схемотехнике выбирают привычный для них язык FBD.

Выбор одного из шести языков определяется не только предпочтениями пользователя, но и смыслом решаемой задачи:

Если исходная задача формулируется в терминах последовательной обработки и передачи сигналов, то для нее проще и нагляднее использовать язык FBD. Если задача описывается как последовательность срабатываний контактов и реле, то для нее нагляднее всего будет язык LD. Для задач, которые изначально формулируются в виде сложного разветвленного алгоритма, удобнее будет язык ST.

В результате конфигурирования откроется рабочее окно программы (рис. 9).

Всю рабочую область программы можно условно разделить на несколько частей:

- I – окно менеджера проекта;
- II – область объявления переменных проекта;
- III – рабочая область;
- IV – панели инструментов;
- V – окно сообщений;
- VI – строка состояния.

В менеджере проекта все настройки проекта распределены по четырем закладкам:

1) Менеджер программных компонентов (*POU*). В данной закладке можно редактировать текущие или добавлять новые компоненты (программы, блоки, функции).

2) Менеджер данных. В данном окне есть возможность добавлять и редактировать уже созданные базы данных проекта.

3) Менеджер визуализаций. В этой закладке есть возможность управления (создание и редактирование свойств) экранов для системы визуализации.

4) Менеджер ресурсов ПЛК объединяет ряд меню, необходимых для конфигурирования свойств ПЛК: различные библиотеки, конфигураторы контроллера, задач и тревог, менеджеры библиотек и параметров и ряд других.

В рабочей области проекта производится непосредственно набор управляющей программы.

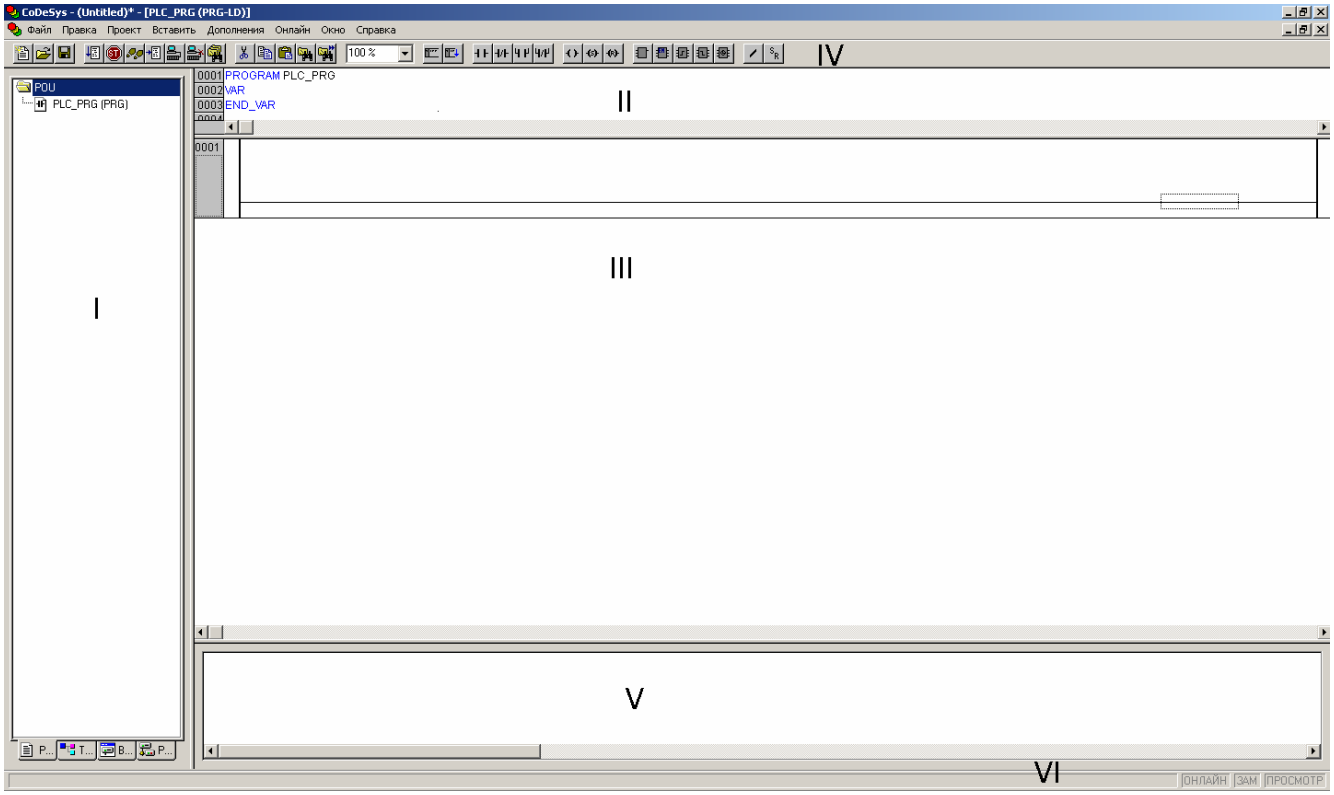


Рис. 9. Рабочее окно программы *CoDeSys* 2.3

Панель инструментов (рис. 10) используется для создания пользовательской управляющей программы, также компиляции, отладки и загрузки проекта в память ПЛК.

Рис. 10. Панель инструментов

При выборе в окне настроек различных языков программирования, например *LD*, *FBD* и *SFC*, панель инструментов принимает различный вид. В табл. 5 представлено краткое описание функций, доступ к которым осуществляется с панели инструментов при программировании на языке *LD*, а также представлены пиктограммы панели инструментов для других языков МЭК: *FBD* и *SFC*.

Таблица 5

Язык	**№ п/п**	**Пиктограмма**	**Описание**
LD	1		Вставка нового сегмента до текущего сегмента
	2		Вставка нового сегмента после текущего сегмента
	3		Вставка замыкающего контакта
	4		Вставка размыкающего контакта

Язык	№ п/п	Пиктограмма	Описание
	5		Вставка параллельного замыкающего контакта
	6		Вставка параллельного размыкающего контакта
	7		Вставка выходной катушки
	8		Установка состояния *SET* обмотки выходного реле
	9		Установка состояния *RESET* обмотки выходного реле
	10		Установка функционального блока
	11		Установка функционального блока со входом *EN*
	12		Установка детектора переднего фронта
	13		Установка детектора заднего фронта
	14		Установка таймера *TON*
	15		Установка инверсии
	16		Установка функции *SET/RESET* на обмотке выходного реле
FBD	1		Добавление входа в функциональный блок
	2		Добавление выхода из функционального блока
	3		Добавление элемента схемы (функционального блока)
	4		Присваивание
	5		Переход
	6		Возврат
	7		Инверсия
	8		*SET/RESET*
SFC	1		Шаг-переход (сверху)
	2		Шаг-переход (снизу)
	3		Альтернативная ветвь (справа)
	4		Альтернативная ветвь (слева)
	5		Параллельная ветвь (справа)
	6		Параллельная ветвь (слева)
	7		Безусловный переход
	8		Переход – безусловный переход
	9		Использовать МЭК-шаги

Далее в соответствии с поставленной задачей необходимо разработать алгоритм автоматизации управления объектом либо в виде логических уравнений, либо в виде схемы алгоритма.

Разработчик присваивает входным, выходным сигналам и внутренним переменным адреса в соответствии с конфигурацией контроллера.

Адресация контроллера имеет следующие особенности:

– прямое указание адреса дает способ непосредственного обращения к конкретной области памяти;

– использование области памяти через объявленную особым образом переменную (входную, выходную или локальную).

Прямой адрес образуется из префикса «%», префиксов области памяти и размера, одного или нескольких целых чисел, разделенных точкой.

Префиксы области памяти: *I* – входы, *Q* – выходы, *M* – память данных.

Префиксы размера: *X* – один бит, *B* – байт (8 бит), *W* – слово (16 бит), *D* – двойное слово (32 бит).

Примеры:

1) %*QX*7.5 и %*Q*7.5 – бит 7.5 в области выходов;
2) %*IW*215 – 215-е слово в области входов;
3) %*QB*7 – байт 7 в области выходов;
4) %*MD*48 – двойное слово в позиции памяти 48;
5) %*IW*2.5.7.1 – зависит от конфигурации ПЛК;

По умолчанию конфигурация ПЛК имеет вид, представленный в табл. 6.

Таблица 6

Входные сигналы				**Выходные сигналы**			
Адрес ПЛК	Адрес пользователя	Адрес ПЛК	Адрес пользователя	Адрес ПЛК	Адрес пользователя	Адрес ПЛК	Адрес пользователя
%*IX*0.0	*I*1	%*IX*1.0.6	*I*9	%*QX*2.0	*Q*1	%*QX*3.0.2	*Q*7
%*IX*0.1	*I*2	%*IX*1.0.7	*I*10	%*QX*2.1	*Q*2	%*QX*3.0.3	*Q*8
%*IX*1.0.0	*I*3	%*IX*1.1.0	*I*11	%*QX*2.2	*Q*3	%*QX*3.0.4	*Q*9
%*IX*1.0.1	*I*4	%*IX*1.1.1	*I*12	%*QX*2.3	*Q*4	%*QX*3.0.5	*Q*10
%*IX*1.0.2	*I*5	%*IX*1.1.2	*I*13	%*QX*3.0.0	*Q*5	%*QX*3.0.6	*Q*11
%*IX*1.0.3	*I*6	%*IX*1.1.3	*I*14	%*QX*3.0.1	*Q*6	%*QX*3.0.7	*Q*12
%*IX*1.0.4	*I*7	%*IX*1.1.4	*I*15				
%*IX*1.0.5	*I*8	%*IX*1.1.5	*I*16				

Ниже рассматривается пример программирования на языке *LD*.

При программировании на языке *LD* в виде релейно-контактной схемы программа разделяется на сегменты. Каждый сегмент представляет собой отдельную цепь, по которой может протекать ток. Шина питания находится слева (вертикальная линия). Таким образом, каждому логическому уравнению соответствует свой сегмент.

По умолчанию в блоке *PLC_PRG* (*PRG*) уже есть пустой шаблон сегмента. Для создания нового сегмента необходимо на панели инструментов нажать пиктограмму «Цепь (Перед)» или «Цепь (После)»

Рассмотрим ввод программы на языке лестничных диаграмм **(*LD*)** для реализации простого уравнения:

$Q0 = I1 \cdot \overline{I2} + I3$

В адресах контроллера это уравнение примет следующий вид:

$\%QX\,2.0 = \%IX\,0.0 \cdot \overline{\%IX\,0.1} + \%IX1.0.0$

1) Установить в токовую цепь (сегмент) обмотку (рис. 11а). Для этого нажать на кнопку .

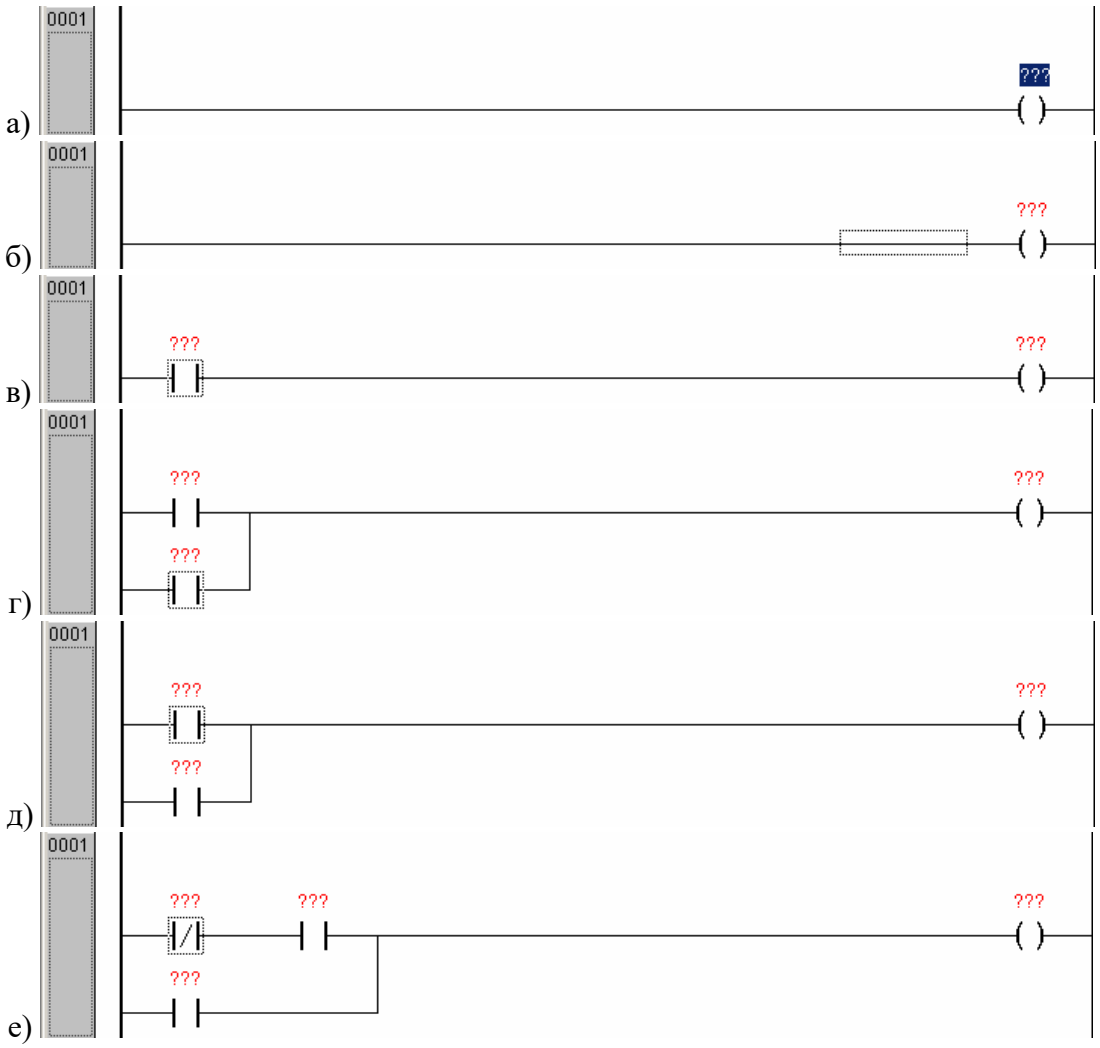


Рис. 11.

2) Щёлкнуть по тому месту (непосредственно по линии), куда нужно установить замыкающий (нормально открытый) контакт (рис. 11б).

3) Вставить замыкающий контакт, нажав на пиктограмму (рис. 11в).

4) Вставить параллельный замыкающий контакт, нажав на пиктограмму (рис. 11г).

5) Выделить место, куда необходимо поставить нормально замкнутый (размыкающий) контакт (рис. 11д).

6) Вставить размыкающий контакт, нажав на пиктограмму (рис. 11е).

7) Теперь необходимо ввести адреса контактов. Для этого щёлкнуть по знакам ??? над контактом и ввести адрес (ввод адреса завершается нажатием клавиши «ENTER» рис. 12).

Рис. 12.

Для удобства пользователя при разработке программы доступна символьная адресация. Для этого предварительно необходимо в окне задания переменных проекта объявить переменные.

Для этого необходимо выбрать элемент на схеме, ввести имя переменной и нажать «*ENTER*». В открывшемся окне необходимо выбрать класс, тип, адрес переменной и нажать «ОК» (рис. 13). После объявления всех входных и выходных переменных программа примет следующий вид (рис. 14), а окно задания переменных – рис. 15.

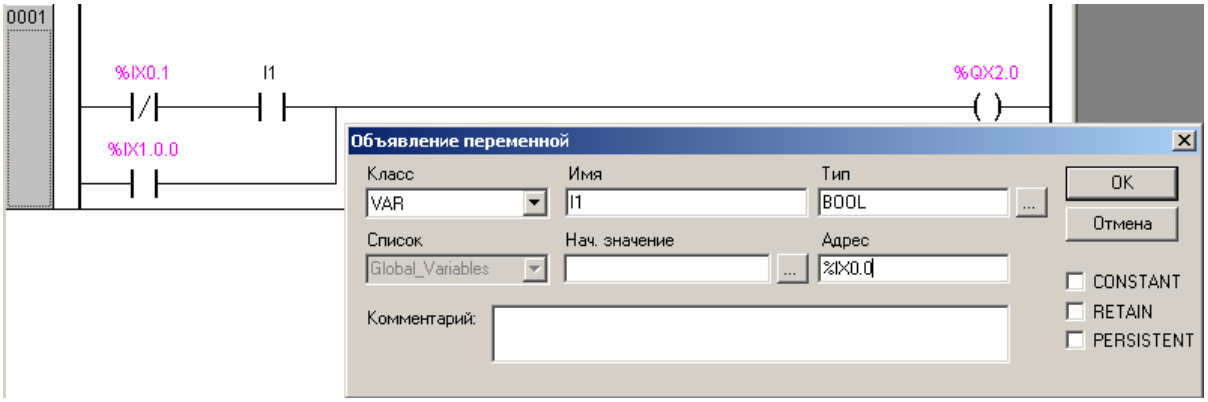


Рис. 13.

Рис. 14.

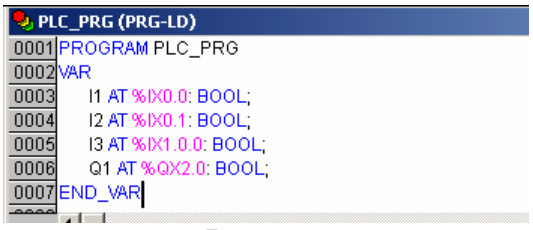


Рис. 15.

Для удаления какого-либо элемента программы необходимо его выделить и нажать на клавиатуре клавишу *Delete*. Для отмены предыдущего действия необходимо выбрать в меню «Правка» пункт «Отменить».

В случае некорректного ввода адреса или символического имени программа высвечивает некорректное обозначение красным цветом.

После ввода программы необходимо скомпилировать ее. Для этого в выпадающем меню «Проект» необходимо выбрать пункт «Компилировать», либо нажать «быструю» клавишу *F*11. Лог компиляции программы будет выведен в окно сообщений. Если программа набрана правильно (рис. 16а), то последняя строка будет вида: 0 ошибок, 0 предупреждений. В том случае, если в программе будут найдены ошибки (рис. 16б), то они будут выделены в логе красным цветом. Также в последней строке будет: *X* ошибок, *X* предупреждений. После исправления ошибок необходимо еще раз откомпилировать программу. После компиляции программа готова к загрузке в память ПЛК.

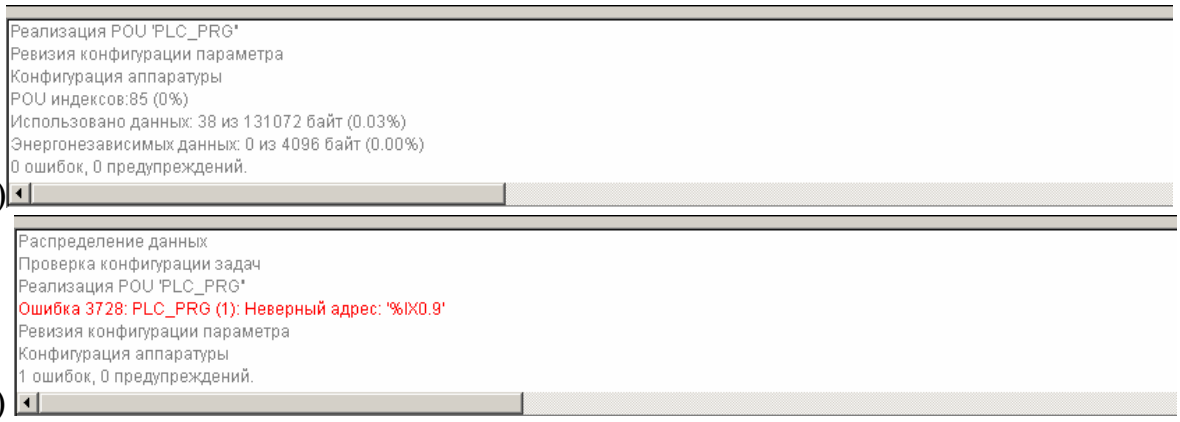


Рис. 16. Примеры сообщений при проведении компиляции пользовательской программы

Далее необходимо рассмотреть реализацию этого же логического уравнения ($Q0 = I1 \cdot \overline{I2} + I3$) на других языках:

1) **на языке инструкций (*IL*)** программа будет иметь достаточно простой и понятный вид:

LDN %*IX*1.0.0 (загрузить инверсный контакт)
AND %*IX*0.0 (загрузить контакт)
OR %*IX*0.1 (загрузить параллельный контакт)
ST %*QX*2.0 (результат выдать на обмотку)

2) разработка программы **на языке функциональных блоковых диаграмм (*FBD*)** ведется в следующей последовательности:

– в свойствах проекта настроить язык программирования *FBD*;

– на панели инструментов левой клавишей мыши нажать пиктограмму . На рабочем поле в новом сегменте должно появиться изображение элемента (рис. 17а), В поле названия элемента указать тип элемента *AND* (И);

– около входов элемента указать адреса %*IX*0.0 и %*IX*0.1 сверху вниз соответственно;

– на входе, соответствующем адресу %*IX*0.1, нажать правую клавишу мыши и выбрать пункт «Инверсия» (рис. 17б);

– установить курсор на выходной части элемента И;

– левой клавишей мыши нажать пиктограмму . В поле названия элемента указать тип элемента *OR* (ИЛИ), напротив свободного входа указать адрес %*IX*1.0.0 (рис. 17в);

– установить курсор на выходной части элемента *OR* (ИЛИ);

– левой клавишей мыши нажать пиктограмму . В сформировавшемся выходе необходимо указать адрес %*QX*2.0. Программа примет итоговый вид (рис. 17г).

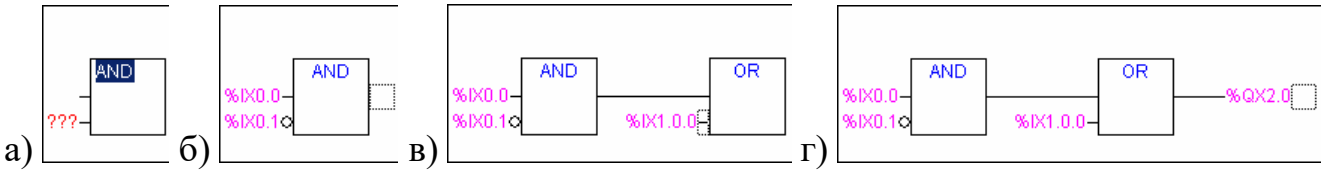


Рис. 17. Программа на языке *FBD*

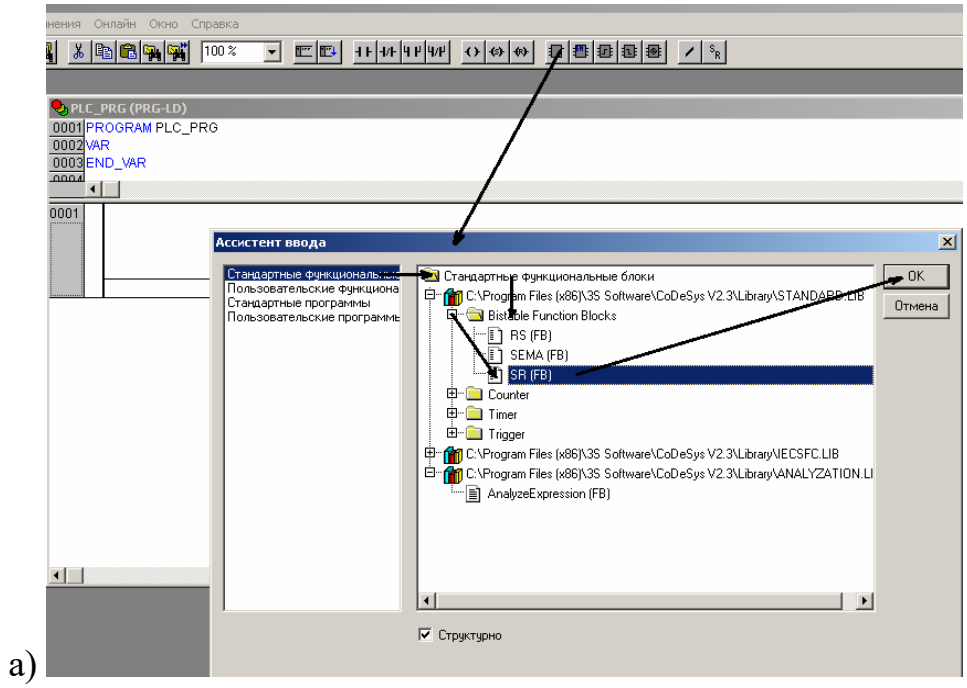
Далее рассматривается вставка функции на примере создания следующей программы: если кратковременно включить тумблер *I*1 (адрес *IX*0.0), то включится выход *Q*1 (адрес *QX*2.0), если кратковременно включить тумблер *I*2 (адрес *IX*0.1), то выход *Q*1 выключится. Для этого воспользуемся функцией *SR*-триггера:

1) установить выходную обмотку с адресом %*QX*2.0, установить контакт с адресом %*IX*0.0;

2) установить курсор в новом сегменте. Левой клавишей мыши на панели инструментов нажать пиктограмму . В появившемся окне (рис. 18а) в закладке «Стандартные функциональные блоки» раскрыть библиотеку «*STANDART*». В открывшемся перечне раскрыть закладку «*Bistable Function Blocks*», в которой выбрать функциональный блок *SR*, после чего нажать «ОК». В сегменте установится блок *SR*-триггера (рис. 18б);

3) в поле ??? над блоком вписать название блока *SR*1;

4) во входной цепи *RESET* на месте ??? установить адрес %*IX*0.1. Программа примет следующий вид (рис. 18в).



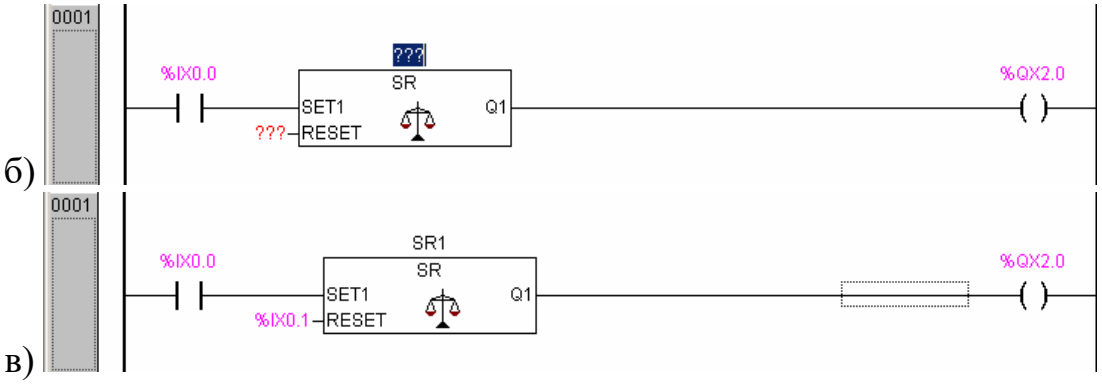


Рис. 18. Пример использования функциональных блоков в лестничных диаграммах

3. Для программирования контроллера ПЛК160 доступно 4 вида таймеров:

– таймер-формирователь импульса (*TP*);
– таймер с задержкой включения (*TON*);
– таймер с задержкой выключения (TOF);
– часы реального времени (RTC).

В табл. 7 представлены примеры реализации таймеров на языках IL и ST.

На рис. 19 представлено графическое изображение блоков таймеров, используемое в языке *FBD*. Блок, реализующий таймер, имеет следующие входы и выходы: *IN* – вход запуска, *EN* – вход разрешения, *PT* – уставка (заданное время), *Q* – выход (состояние таймера), *ET* – оставшееся время.

Для задания уставки времени используется идентификатор *T#*. Уставку времени можно задать в *BCD*-коде с использованием следующего синтаксиса:

T#AAd_BBh_CCm_DDs_EEEms,

где *AA* = сутки, *BB* = часы, *CC* = минуты, *DD* = секунды и *EEE* = миллисекунды.

Таблица 7

	Пример объявления	Пример IL	Пример ST
TP	*TPInst: TP*	*CAL TPInst(IN := VarBOOL1, PT := T#5s)* *LD TPInst.Q* *ST VarBOOL2*	*TPInst(IN := VarBOOL1, PT:= T#5s);* *VarBOOL2 :=TPInst.Q*
TON	*TONInst: TON*	*CAL TONInst(IN := VarBOOL1, PT := T#5s)* *LD TONInst.Q* *ST VarBOOL2*	*TONInst(IN := VarBOOL1, PT:= T#5s)*
TOF	*TOFInst: TOF*	*CAL TOFInst(IN := VarBOOL1, PT := T#5s)* *LD TOFInst.Q* *ST VarBOOL2*	*TOFInst(IN := VarBOOL1, PT:= T#5s);* *VarBOOL2 :=TOFInst.Q*

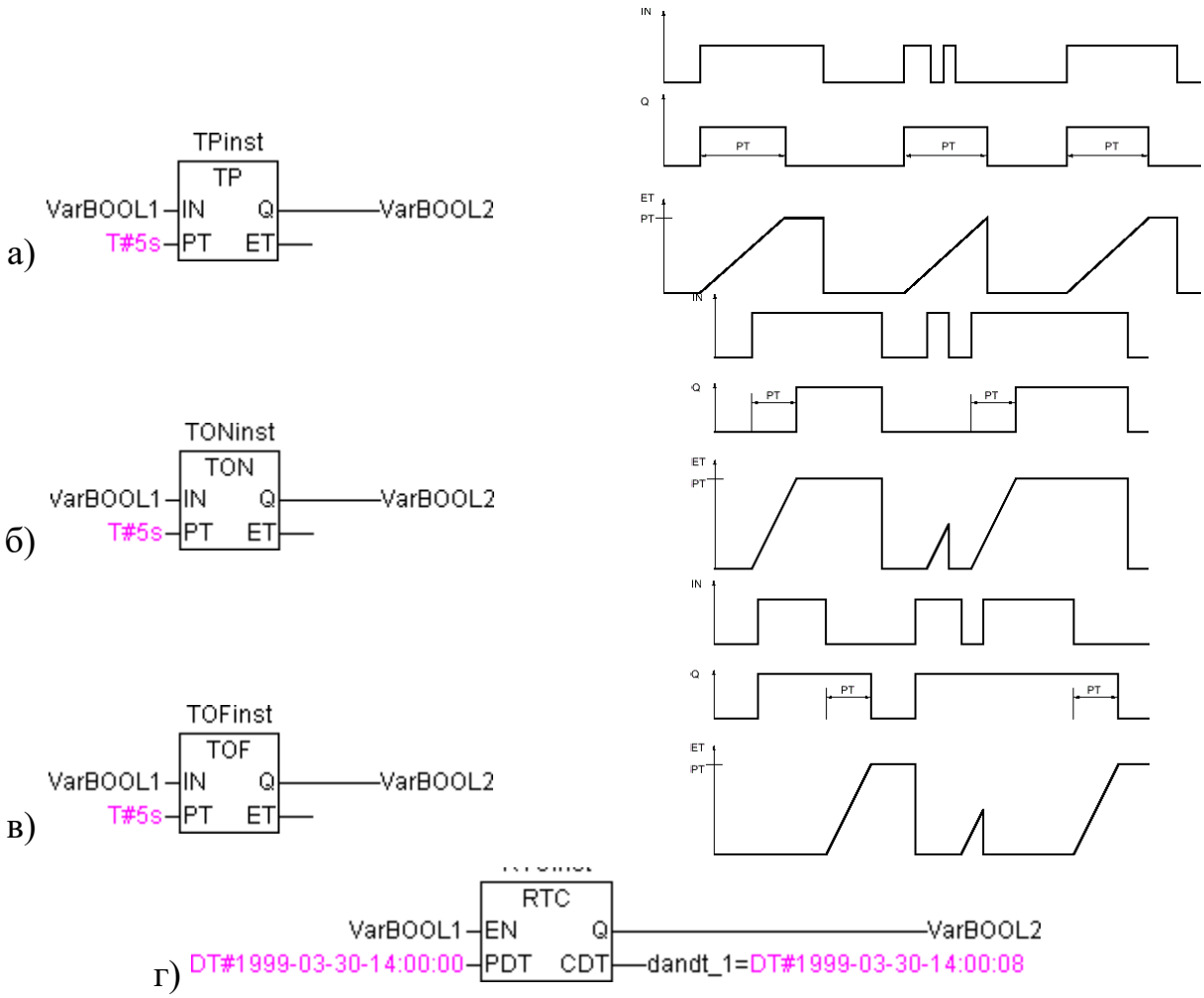


Рис. 19. Таймеры и их временные диаграммы работы

Каждый таймер использует структуру, хранящуюся в блоке данных, для сохранения данных о времени. При этом назначается блок данных, когда устанавливается команда таймера.

В режиме RUN текущее значение таймера уменьшается на одну единицу через интервал времени, установленный базой времени, до тех пор, пока значение времени не станет равным нулю, что соответствует срабатыванию таймера.

4. Для программирования контроллера ПЛК160 доступно 3 вида счетчиков:

- инкрементный (на сложение) счетчик (*CTU*);
- декрементный (на вычитание) счетчик (*CTD*);
- инкрементный/декрементный (реверсивный) счетчик (*CTUD*).

В табл. 8 представлены примеры реализации счетчиков на языках IL и ST. На рис. 20 представлено графическое изображение блоков счетчиков, используемое в языке *FBD*. Блок, реализующий счетчик, имеет следующие входы и выходы: *CU* – вход на сложение, *CD* – вход на вычитание, *PV* – задание (уставка) счетчика, *RESET* – вход сброса, *LOAD* – вход загрузки задания счетчика, *Q*, *QU*, *Q*D – выход (состояние) счетчика, *CV* – текущее значение счетчика в двоичном формате.

Таблица 8

	Пример объявления	**Пример IL**	**Пример ST**
CTU	*CTUInst: CTU*	*CAL CTUInst*(*CU* := *VarBOOL*1, *RESET* := *VarBOOL*2, *PV* := *VarINT*1) *LD CTUInst.Q* *ST VarBOOL*3 *LD CTUInst.CV* *ST VarINT*2	*CTUInst*(*CU*:= *VarBOOL*1, *RESET*:=*VarBOOL*2 , *PV*:= *VarINT*1); *VarBOOL*3 := *CTUInst.Q* ; *VarINT2* := *CTUInst.CV*
CTD	*CTDInst: CTD*	*CAL CTDInst*(*CD* := *VarBOOL*1, *LOAD* := *VarBOOL*2, *PV* := *VarINT*1) *LD CTDInst.Q* *ST VarBOOL*3 *LD CTDInst.CV* *ST VarINT*2	*CTDInst*(*CD*:= *VarBOOL*1, *LOAD*:=*VarBOOL*2 , *PV*:= *VarINT*1); *VarBOOL*3 := *CTDInst.Q* ; *VarINT*2 := *CTDInst.CV*
CTUD	*CTUDInst : CUTD*	*CAL CTUDInst*(*CU*:=*VarBOOL*2, *RESET*:=*VarBOOL*3, *LOAD*:=*VarBOOL*4, *PV*:=*VarINT*1) *LD CTUDInst.Q* *ST VarBOOL*5 *LD CTUDInst.QD* *ST VarBOOL*5 *LD CTUInst.CV* *ST VarINT*2	*CTUDInst*(*CU* := *VarBOOL*1, *CU*:= *VarBOOL*2, *RESET* := *VarBOOL*3, *LOAD*:=*VarBOOL*4 , *PV*:= *VarINT*1); *VarBOOL*5 := *CTUDInst.QU* ; *VarBOOL*6 := *CTUDInst.QD* ; *VarINT*2 := *CTUDInst.CV*

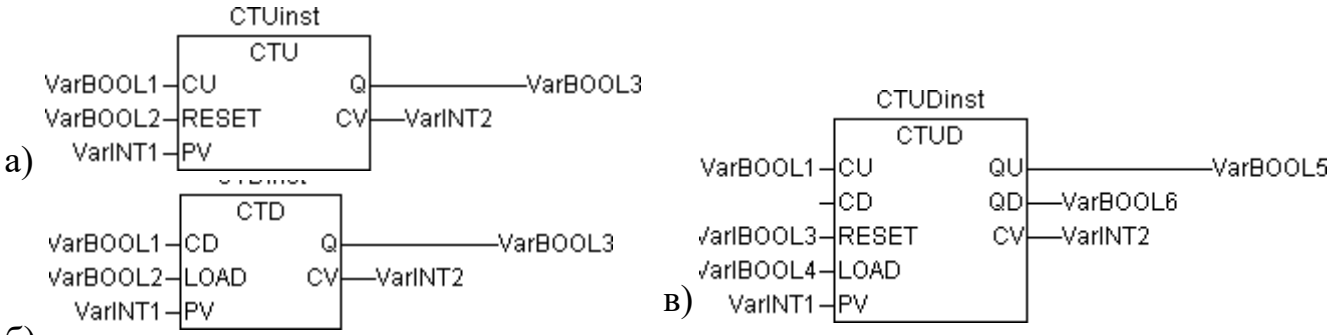


Рис. 20. Счетчики

Уставка счетчика задается либо константой в формате <значение>, либо из области памяти (I, Q, M). Нарастающим фронтом сигнала на входе LOAD в счетчик заносится уставка с входа PV. При нарастающем сигнале на входе CU значение счетчика увеличивается на «1». При нарастающем фронте сигнала на входе CD значение счетчика уменьшается на «1», если значение счетчика больше, чем «0». При нарастающем фронте сигнала на входе RESET счетчик сбрасывается (в счетчик записывается значение «0»).

Для реверсивного счетчика, если оба счетных входа имеют нарастающий фронт, то значение счетчика остается неизменным.

В счетчике CTU выход Q устанавливается в «1», когда значение CV достигает значения PV.

В счетчике CTD выход Q устанавливается в «1», когда значение CV достигает «0».

В счетчике CTUD выход QU устанавливается в «1», когда значение CV больше или равно значению PV, а выход QD – когда значение CV достигает «0».

5. Кроме таймеров и счетчиков в программируемом контроллере ОВЕН ПЛК160 используется стандартный набор операндов и функций, присущий всем контроллерам:

- логические;
- арифметические
- операции сдвига;
- операции сравнения и т.д.

6. Программирование функциональных блоков и функций

Среда разработки CoDeSys предусматривает возможность упростить программирование, если возникает необходимость в программировании управления однотипными технологическими операциями. Ниже рассматриваются, в качестве примера, испытания двигателей бензинового и дизельного. Испытания в принципе одинаковые, только аппараты (кнопки, датчики и устройства индикации) свои. В этом случае необходимо запрограммировать функциональный блок FB, который может многократно вызываться в программе

Например, создадим функциональный блок FB1, которому дадим символическое имя «ENGINE [двигатель]». При кратковременном появлении

команды «turn_on [включить]» двигатель должен включиться и сформировать сигнал «on [включен]».

При достижении фактической скорости «fact [факт]» заданного значения «preset [задание]» формируется сигнал «ready [готов]». Двигатель отключается по сигналу «turn_off [отключить]» или по сигналу «trouble [неисправность]».

Последовательность программирования сводится к следующему:

1) Создать новый проект, в котором создать три программных компонента POU: программный блок PLC_PRG, функциональный блок ENGINE и функция VENT (рис. 21);

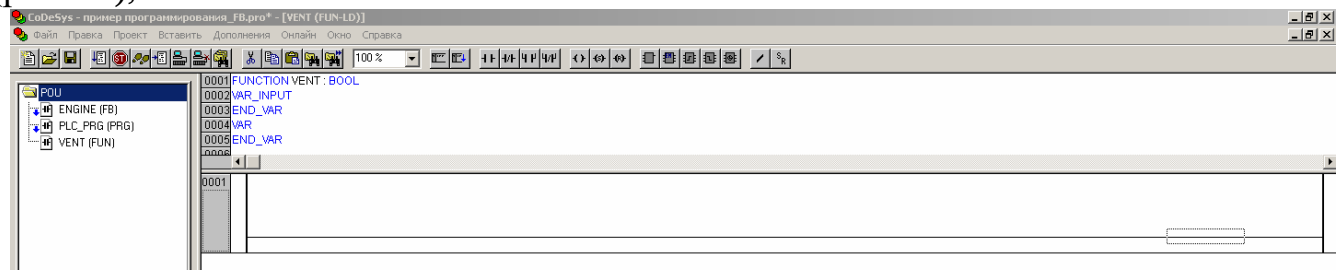


Рис. 21.

2) Объявить переменные для функционального блока *ENGINE* (рис. 22а):

```
FUNCTION_BLOCK
ENGINE
VAR_INPUT
        turn_on: BOOL;
        turn_off: BOOL;
        trouble: BOOL;
        fact: INT;
        preset: INT;
END_VAR
VAR_OUTPUT
        on: BOOL;
        ready: BOOL;
END_VAR
VAR
END_VAR
```

3) Объявить переменные для основной программы *PLC_PRG* (табл. 9 и рис. 22б).

4) Затем разрабатывается программа, управляющая включением и отключением двигателя, как было описано выше.

Таблица 9

Символическое имя	**Адрес на модуле**	**Адрес ПЛК**	**Тип данных**	**Комментарии**
Входные переменные				
turn_on_B	*I*1	%*IX*0.0	*BOOL*	Включить бензиновый
turn_off_B	*I*2	%*IX*0.1	*BOOL*	Отключить бензиновый
trouble_B	*I*3	%*IX1*.0.0	*BOOL*	Неисправность бензинового

Символическое имя	Адрес на модуле	Адрес ПЛК	Тип данных	Комментарии
turn_on_D	*I*4	%*IX1*.0.1	*BOOL*	Включить дизель
turn_off_D	*I*5	%*IX1*.0.2	*BOOL*	Отключить дизель
trouble_D	*I*6	%*IX1*.0.3	*BOOL*	Неисправность дизеля
Выходные переменные				
on_B	*Q*1	%*QX*2.0	*BOOL*	Бензиновый включен
ready_B	*Q*2	%*QX*2.1	*BOOL*	Заданная скорость достигнута
vent_B	*Q*3	%*QX*2.2	*BOOL*	Вентилятор бензинового включен
on_D	*Q*5	%*QX*3.0.0	*BOOL*	Дизель включен
ready_D	*Q*6	%*QX*3.0.1	*BOOL*	Заданная скорость достигнута
vent_D	*Q*7	%*QX*3.0.2	*BOOL*	Вентилятор дизеля включен
Промежуточные переменные				
fact_B		*MW*0	*INT*	Фактическая скорость бензинового двигателя
fact_D		*MW*2	*INT*	Фактическая скорость дизеля
Таймеры				
tim_B		*TON*		Таймер вентилятора бензинового
tim_D		*TON*		Таймер вентилятора дизеля

а)

ENGINE (FB-LD)

```
0001 FUNCTION_BLOCK ENGINE
0002 VAR_INPUT
0003     turn_on: BOOL;
0004     turn_off: BOOL;
0005     trouble: BOOL;
0006     fact: INT;
0007     preset: INT;
0008 END_VAR
0009 VAR_OUTPUT
0010     on: BOOL;
0011     ready: BOOL;
0012 END_VAR
0013 VAR
0014 END_VAR
0015
```

б)

PLC_PRG (PRG-LD)

```
0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003     turn_on_B AT %IX0.0: BOOL;
0004     turn_off_B AT %IX0.1:    BOOL;
0005     trouble_B AT %IX1.0.0:  BOOL;
0006     turn_on_D AT %IX1.0.1:  BOOL;
0007     turn_off_D AT %IX1.0.2:  BOOL;
0008     trouble_D AT %IX1.0.3:  BOOL;
0009     on_B  AT %QX2.0:   BOOL;
0010     ready_B  AT %QX2.1:   BOOL;
0011     vent_B AT %QX2.2: BOOL;
0012     on_D  AT %QX3.0.0: BOOL;
0013     ready_D  AT %QX3.0.1: BOOL;
0014     vent_D AT %QX3.0.2: BOOL;
0015     tim_B: TON;
0016     tim_D: TON;
0017     fact_B AT      %MW0:    INT;
0018     fact_D AT %MW2:  INT;
0019
0020 END_VAR
0021
```

Рис. 22. Объявление переменных

Набранная программа на языке лестничных диаграмм имеет вид, представленный на рис. 23.

Созданный блок *ENGINE* должен управлять и контролировать работу бензинового и дизельного двигателей. Различные заданные скорости хранятся в отдельных ячейках памяти.

5) Далее необходимо запрограммировать вызов функционального блока в программном блоке. Для этого в сегменте программного блока необходимо установить курсор в заданном положении, на панели инструментов нажать пиктограмму и установить 2 блока на поле сегмента. В поле названия блока необходимо списать название пользовательского блока (*ENGINE*). Один блок

необходимо назвать «*Gasoline*», другой – «*Diesel*». Соответственно один блок будет отвечать за работу бензинового двигателя, а второй – за работу дизельного (рис. 24а).

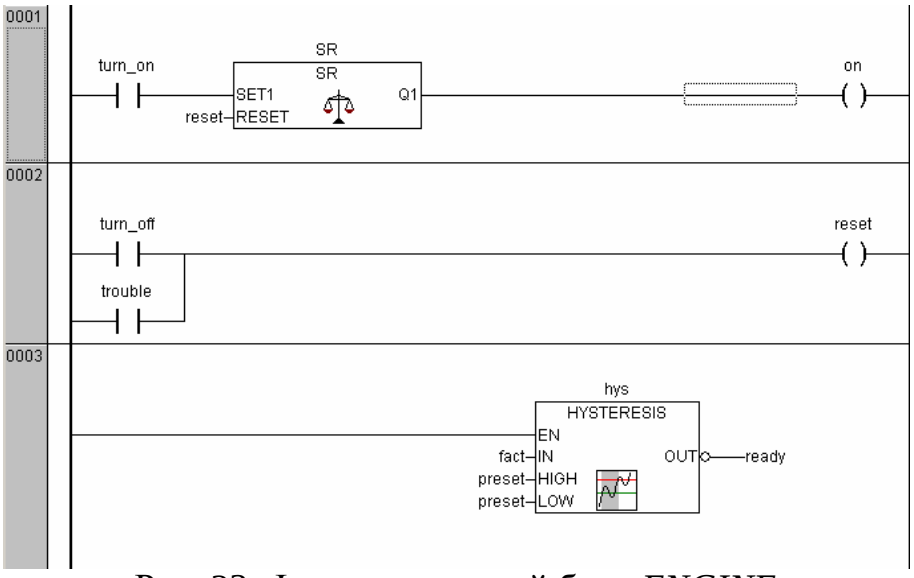


Рис. 23. Функциональный блок *ENGINE*

В поля напротив входов и выходов необходимо установить названия соответствующих переменных. Программный блок после этого примет вид, представленный на рис. 24б. Напротив внутренней переменной «*preset*» блока «*Gasoline*» необходимо установить значение 1500. Таким образом, определена максимальная скорость для бензинового двигателя. Аналогично установить значение 1200 напротив внутренней переменной «*preset*» блока «*Diesel*» (для дизельного двигателя).

6) Далее необходимо сохранить программу;

7) Функции, как и функциональные блоки, расположены в иерархии программы ниже программного блока. Однако в отличие от функционального блока, функции не нужен блок данных. У функций параметры также перечисляются в окне объявления переменных, но статические данные не разрешаются.

В рассматриваемой задаче предусматривается, что каждый двигатель как бензиновый, так и дизель имеет свой вентилятор. Вентилятор включается при работе двигателя и продолжает еще работать 4 с после отключения двигателя. Для управления этими двигателями программируется функция *VENT*.

Необходимо в менеджере проекта дважды щелкнуть на строке *VENT*, чтобы открыть ее. Открывается окно для программирования. Далее нужно объявить переменные:

```
FUNCTION VENT :
BOOL
VAR_INPUT
        turn_on: BOOL;
END_VAR
VAR
        tim: TON;
END_VAR
```

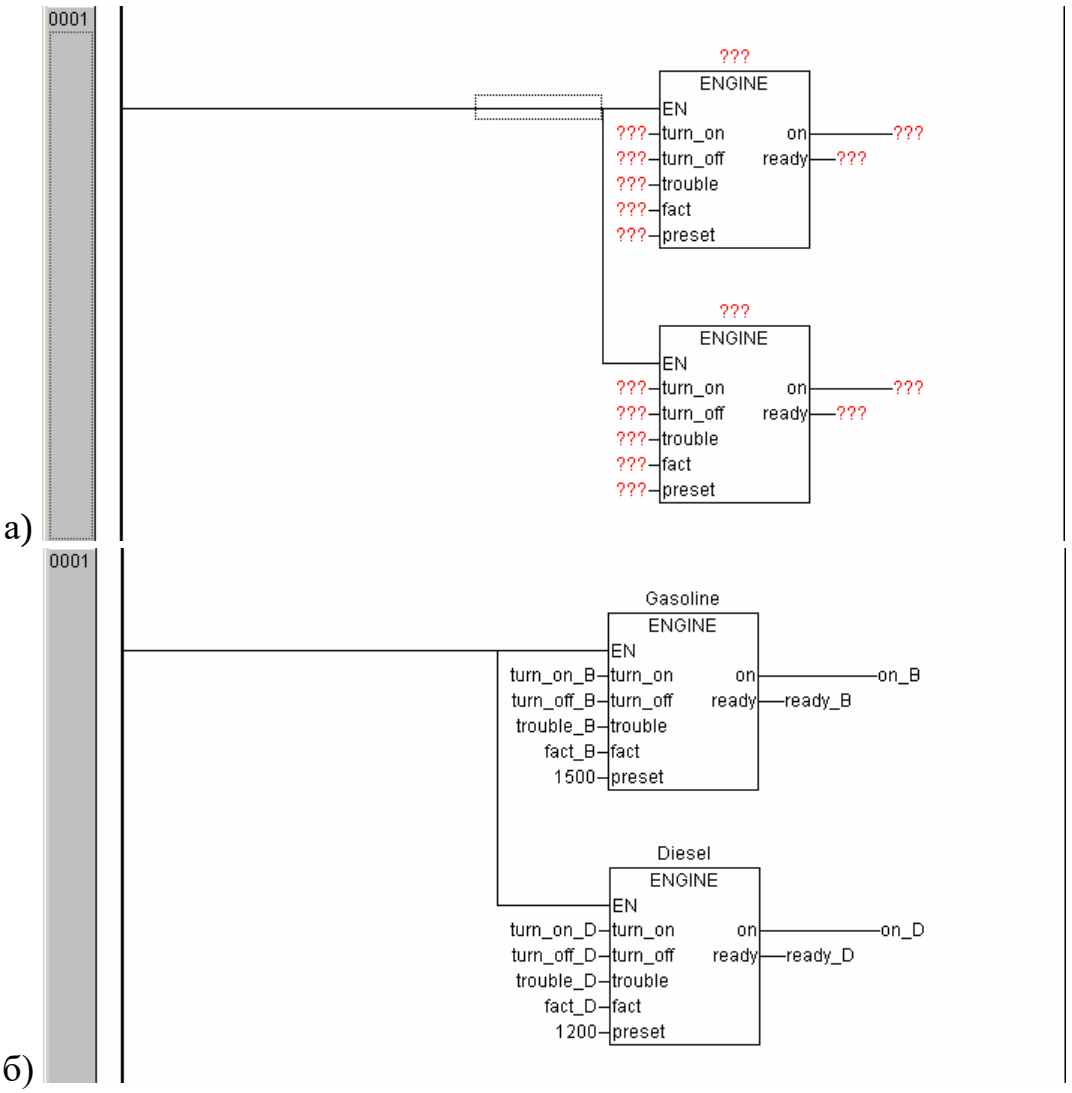


Рис. 24. Сегмент программы управления испытаниями двигателей

8) Затем необходимо запрограммировать управление вентилятором. Набранная программа на языке *FBD* имеет вид, представленный на рис. 25.

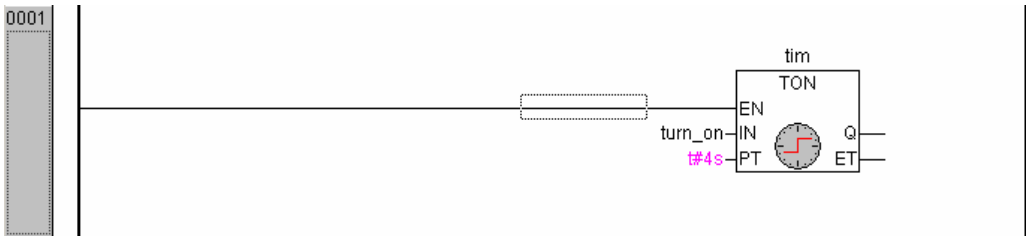


Рис. 25. Программирование функции *VENT*

9) Вызов функции *VENT* в программном блоке выполняется аналогично вызову функционального блока. Все переменные функции снабжаются в программном блоке соответствующими адресами бензинового или дизельного двигателя, которые уже отражены в табл. 9.

В программном блоке *PLC_PRG* вставить новый сегмент. Затем в этом сегменте необходимо установить курсор, на панели инструментов нажать пиктограмму и

установить 2 блока на поле сегмента. В поле названия блока необходимо списать название пользовательской функции (*VENT*). Одна функция будет отвечать за работу вентилятора бензинового двигателя, а вторая – за работу вентилятора дизельного двигателя (рис. 26а). Далее в соответствующих полях ввести символьные имена из табл. 9. Сохранить программу.

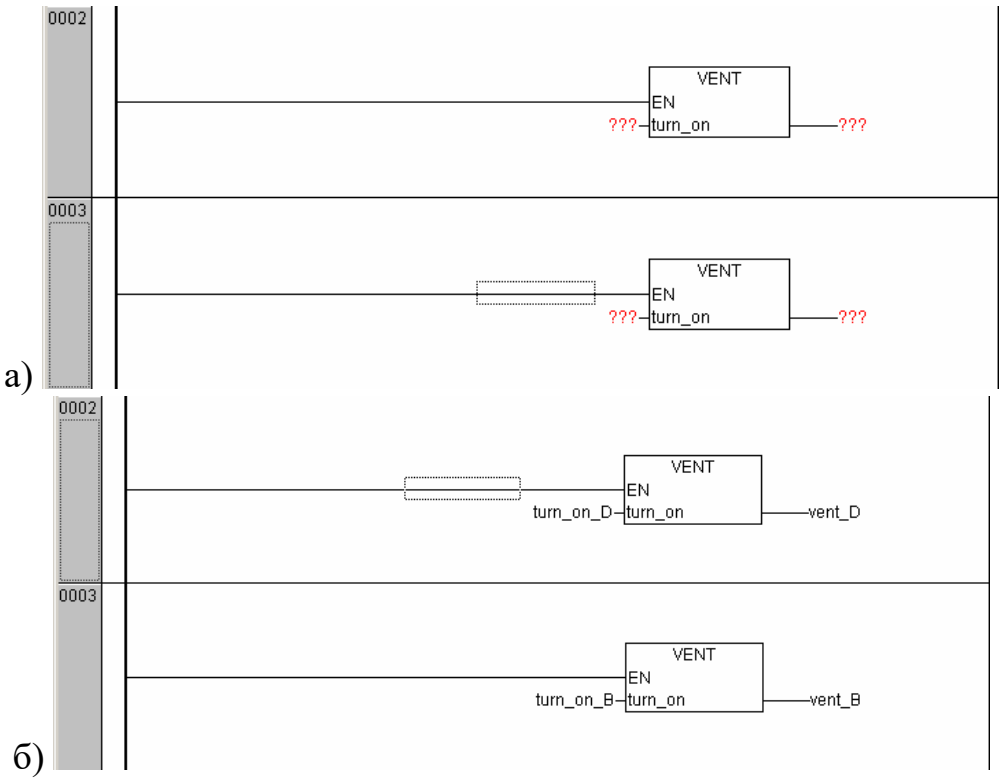


Рис. 26. Сегмент программы управления вентиляторами

7. Пример программирования контроллера ПЛК160. В качестве примера представлена программа управления движением тележки.

Тележка перемещается по прямолинейному пути. Имеется два фиксированных положения П0 и П1. Исходное положение тележки – П0.

При кратковременном нажатии на кнопку «Пуск» тележка движется вперед до положения П1, стоит в положении П1 5 с и возвращается назад в положение П0. В положении П0 немедленно возникает реверс привода тележки. Тележка вновь движется в положение П1, стоит в нем 5 с и возвращается в П0. В положении П0 вновь возникает команда на движение до положения П1 и т.д. после 10 циклов перемещения в положение П1 при возвращении тележки в положение П0 возникает сигнал «Конец цикла».

Для управления движением тележки следует предусмотреть счетчик (СЧ) со счетом до 10, задержку времени (таймер) для формирования задержанного сигнала $П1^{\uparrow}$ и память $Р_П$ о нажатии на кнопку «Пуск».

$$P_П = (Пуск + P_П) \cdot \overline{КЦ}$$

Команда на перемещение тележки вперед (В) возникает в положении П0, если отсутствует сигнал счетчика СЧ, и сохраняется при наличии сигнала памяти пуска

$Р_П$ до достижения положения П1. Этому описанию соответствует логическое уравнение

$$В = (П0 \cdot \overline{СЧ} + В) \cdot \overline{П1} \cdot Р_П$$

Команда на перемещение тележки назад (Н) возникает через 5 с нахождения в положении П1 и сохраняется при наличии переменной $Р_П$ до достижения положения П0. Тогда логическое уравнение для команды Н имеет вид

$$Н = (П1^{\uparrow} + Н) \cdot \overline{П0} \cdot Р_П$$

Сигнал конца цикла (КЦ) возникает в положении П0 при наличии сигнала счетчика СЧ о завершении 10 циклов перемещения в положение П1и сигнала $Р_П$. Сигнал КЦ сохраняется до очередного нажатия на кнопку “Пуск”. Тогда логическое уравнение для рассматриваемого сигнала имеет вид

$$КЦ = (П0 \cdot СЧ \cdot Р_П + КЦ) \cdot \overline{Пуск}$$

В ниже приведенной программе (рис. 49) использован счетчик на вычитание. При нажатии на кнопку «Пуск» в счетчик вводится уставка 10. Счетчик считает число циклов перемещения в положение П1, при достижении этого положения число в счетчике уменьшается на единицу. Счетчик сбрасывается по сигналу конца цикла КЦ. Признаком окончания цикла является число в счетчике равное нулю, при котором на выходе счетчика «0». Поэтому в уравнениях команд В и КЦ необходимо использовать инверсию сигнала СЧ по отношению к ранее записанным уравнениям:

$$В = (П0 \cdot СЧ + В) \cdot \overline{П1} \cdot Р_П$$

$$КЦ = (П0 \cdot \overline{СЧ} \cdot Р_П + КЦ) \cdot \overline{Пуск}\,.$$

Сброс счетчика производится сигналом конца цикла КЦ.

В табл. 10 представлена адресация команд и сигналов для ОВЕН ПЛК160. Соответственно, на рис. 27 представлена программа управления движением тележки.

Таблица 10

Команда, сигнал	**П0**	**П1**	**Пуск**	**В**	**Н**	**КЦ**	**$Р_П$**	**СЧ**	**$П1^{\uparrow}$**
Адрес на модуле	*I*1	*I*2	*I*3	*Q*1	*Q*2	*Q*3			
Адрес ПЛК	%*IX*0.0	%*IX*0.1	%*IX1*.0.0	%*QX*2.0	%*QX*2.1	%*QX*2.2	%*MX*0.0	%*MX*0.1	%*MX*0.2
Символьный адрес	*p*0	*p*1	*start*	*forw*	*rev*	*cycle*	*mem*	*count*	*tim*

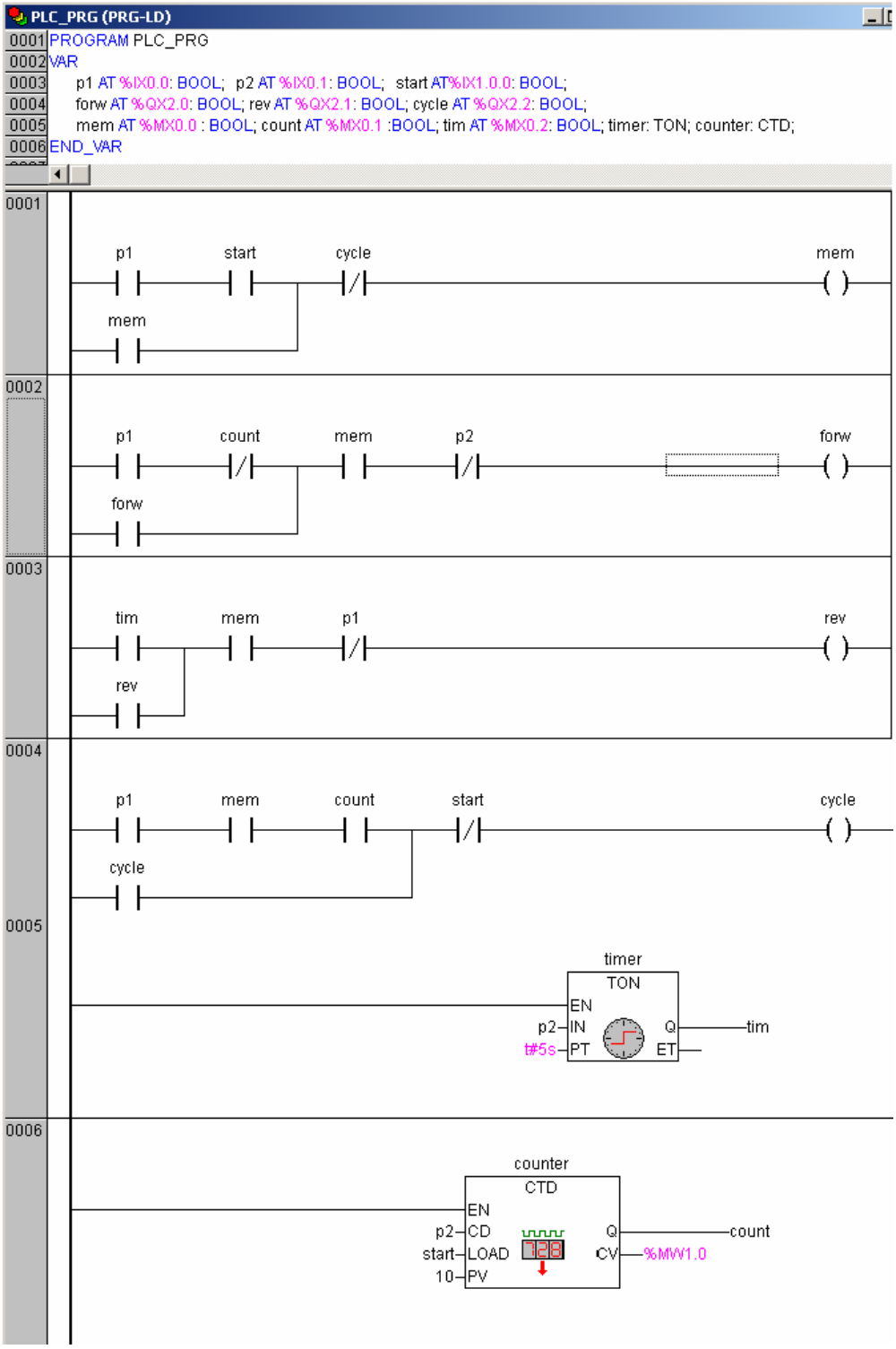


Рис. 27. Программа управления движением тележки

Загрузка программы в контроллер и запуск программы

Компиляция и загрузка программы в контроллер осуществляется в следующей последовательности:

– В выпадающем меню «Проект» выбрать пункт «Компилировать» либо воспользоваться «быстрой» клавишей *F11*. Пройдет компиляция проекта, по итогам

которой сформируется лог компиляции (см. рис. 16). Если ошибок в проекте нет, то весь текст будет серого цвета и в последней строке будет запись «0 ошибок, 0 предупреждений». В противном случае необходимо будет исправить все обозначенные ошибки.

– Настроить параметры порта связи с ПЛК160. Для этого в выпадающем меню «Онлайн» выбрать пункт «Параметры связи». В открывшемся окне нажать кнопку «New», в результате чего откроется окно создания нового канала связи (рис. 28а), в котором нужно выбрать строку *Serial* (*RS*232) и нажать «ОК».

– В открывшемся окне настроек порта связи (рис. 28б) указать следующие значащие параметры: ***Port* – *COM*2, *Baudrate* – 9600, *Parity* – *no*, *Stop bits* – 1**.

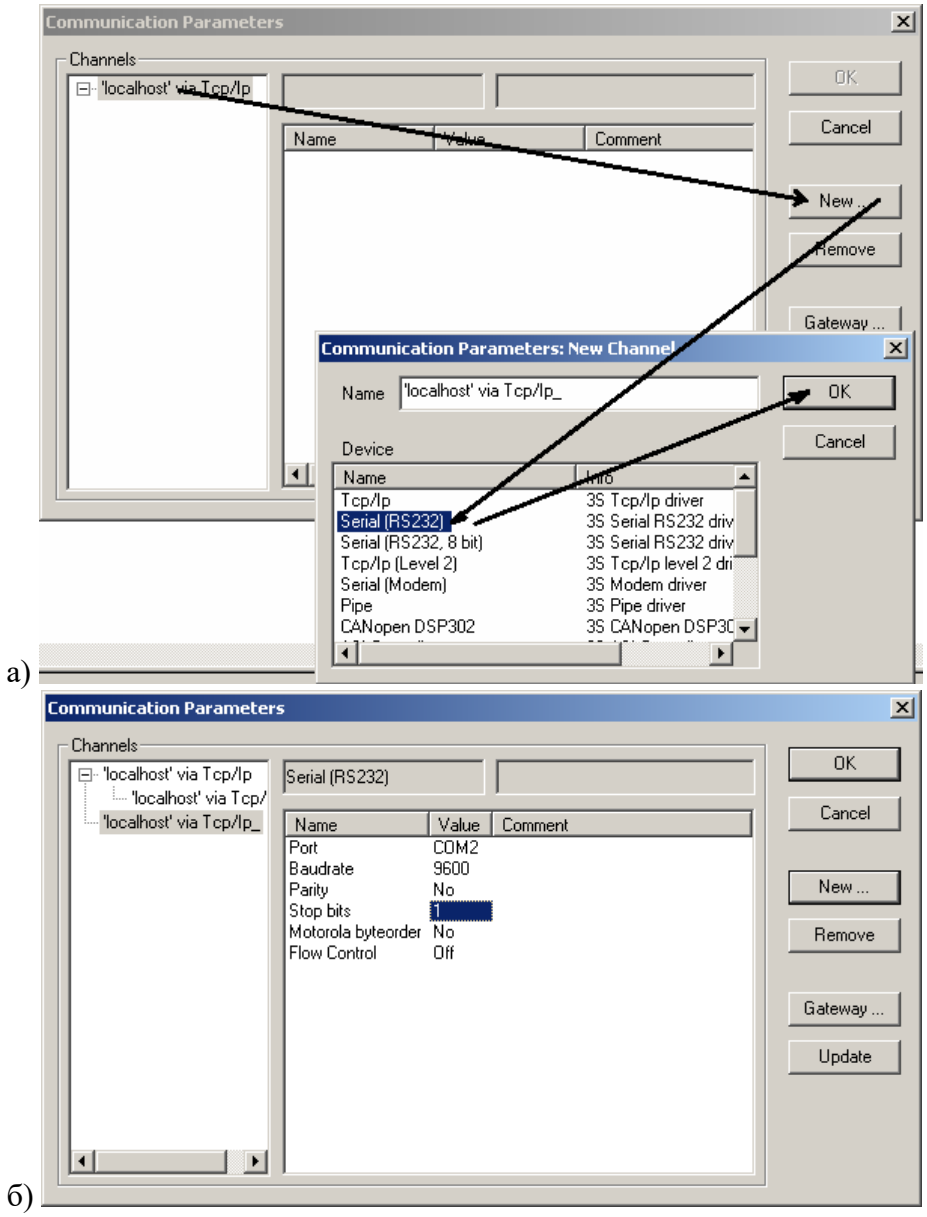
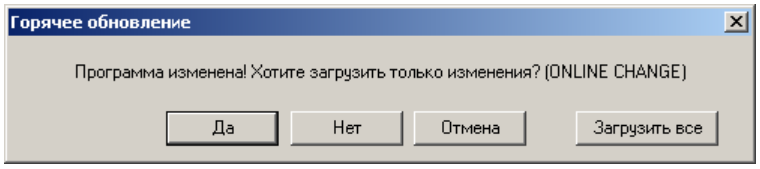


Рис. 28. Настройка параметров связи

– Создать загрузочный проект. Для этого в выпадающем меню «Онлайн» выбрать пункт «Создание загрузочного проекта». В итоге будут созданы файлы загрузочного проекта.

– Загрузить проект в память ПЛК. Для этого в выпадающем меню «Онлайн» выбрать пункт «Подключение», в появившемся окне (рис. 29а) выбрать «НЕТ». После этого в выпадающем меню «Онлайн» выбрать пункт «Загрузка». Прогресс процесса загрузки представлен на рис. 29б. В итоге проект полностью загружен в память ПЛК. Запуск контроллера осуществляется нажатием кнопки «СТАРТ/СТОП» либо выбором пункта «СТАРТ» в выпадающем меню «Онлайн»

а) 

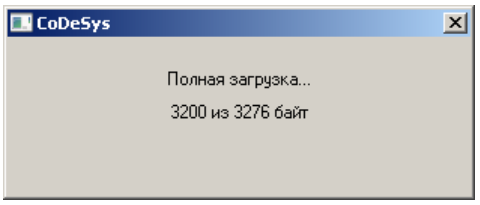
б) 

Рис. 29.

Во время работы контроллера доступен режим мониторинга хода выполнения программы. *CoDeSys* переходит в режим мониторинга сразу же после перехода в онлайн-режим работы. В этом режиме будут отображаться состояния контактов и обмоток, а также значения счетчиков, таймеров и других функции в реальном времени (рис. 30).

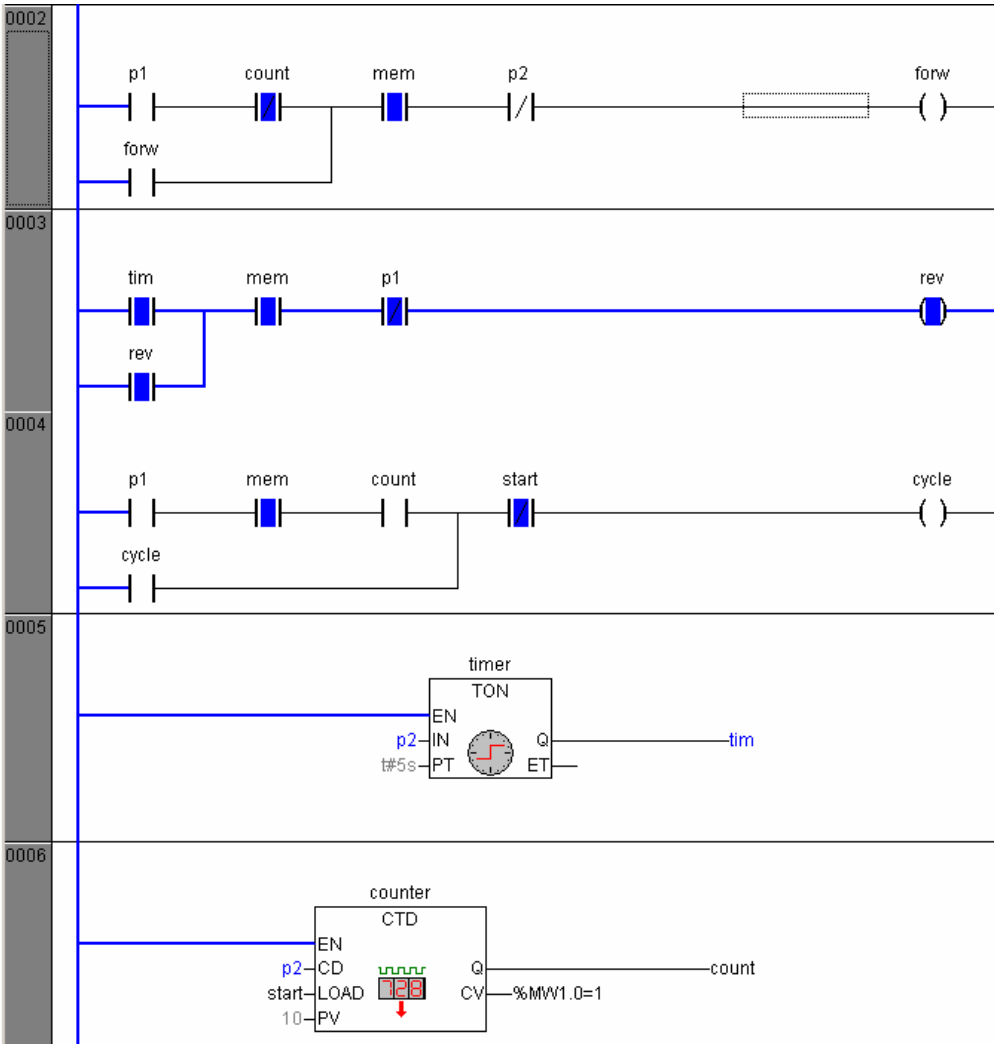


Рис. 30. Режим мониторинга

Варианты заданий

При подготовке к лабораторной работе студент должен в соответствии с табл. 11 выбрать свой вариант задания.

Для заданного варианта необходимо разработать алгоритм ее решения. В соответствии с заданием определиться с адресацией входных и выходных переменных. Затем определиться с адресацией вводимых промежуточных переменных и с адресацией используемых таймеров и счетчиков. Составить программу для контроллера ПЛК160.

Запустить программу в работу и убедиться в правильности ее работы. При наличии ошибок в работе устранить их и продемонстрировать преподавателю работу правильно функционирующей программы.

Таблица 11

Номер бригады	1 и 5			2 и 6			3 и 7			4 и 8		
Член бригады	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Вариант 1. Перекладыватель служит для перемещения листов со стола на постоянно вращающийся рольганг. Перекладыватель имеет подъемник листов, установленный на тележке. Подъемник представляет собой поперечину, перемещающуюся по вертикальным стойкам сверху вниз и обратно. Поперечина имеет на конце электромагнит для притягивания листов.

В исходном положении перекладыватель стоит в положении П0 над столом, а его подъемник в крайнем верхнем положении КВ. При поступлении листа на стол подается сигнал наличия листа, подъемник включается для движения вниз. При касании листа подъемник останавливается и включается электромагнит. Через 2 с включается подъемник на подъем, достигает положения КВ и останавливается. Включается тележка и перемещается в положение П1 над рольгангом, где останавливается и электромагнит отключается. Лист падает на рольганг. Через 2 с тележка движется в положение П0. Цикл повторяется при поступлении очередного сигнала наличия листа. Включение системы в работу – нажатием кнопки «Пуск».

Вариант 2. В контроллере программным путем необходимо реализовать генератор импульсов. Время наличия импульса 1 с, время его отсутствия 2 с. При нажатии на кнопку «Пуск» начинается счет импульсов. При прохождении 10 импульсов загорается лампа Л1, при прохождении следующих 10 импульсов – лампа Л2, аналогично включаются лампы Л3 и Л4. После загорания лампы Л4 (т.е. после прохождения 40 импульсов) счет прекращается, и все лампы горят до нажатия на кнопку «Стоп». Генератор импульсов реализовать программным путем.

Вариант 3. Автоматизировать перемещение пунсона штампованного пресса. Рабочий заправляет металлическую ленту (заготовку) и нажимает кнопку «Пуск». Пуансон из крайнего верхнего положения П0 движется вниз, при своем движении до положения п1 входит в матрицу, выбивая из ленты деталь необходимой формы, и возвращается в положение П0. чисто механическим устройством лента перемещается на один шаг и через 2 с пуансон совершает очередное движение.

Лента рассчитана на изготовление 10 деталей, поэтому через 10 ходов пуансона формируется сигнал «конец цикла». При подаче питания на систему автоматизации пуансон из любой точки должен прийти в положение П0.

Вариант 4. На программируемом контроллере реализовать систему управления толкателем с кривошипно-шатунным механизмом с реверсивным электродвигателем. Толкатель имеет два фиксированных положения П0 и П1. При подаче питания на систему толкатель из любого положения движется вперед медленно до положения П0. При появлении кратковременного сигнала «Пуск» толкатель из положения П0 медленно движется до положения П1, стоит там в течение 2 с, а затем электродвигатель включается для движения назад быстро и возвращается в положение П0, где формируется сигнал «Конец цикла». Цикл повторяется при нажатии кнопки «Пуск». При нажатии кнопки «Стоп» толкатель из любого положения на быстрой скорости возвращается в положение П0.

Вариант 5. Автоматизировать управление крышкой котла (типа большой кастрюли).При кратковременном нажатии кнопки «Открыть» крышка поднимается до крайнего верхнего положения, в котором поворачивается, открывая доступ к содержимому котла.При кратковременном нажатии на кнопку «Закрыть» крышка поворачивается в положение точно над котлом и затем опускается, закрывая котел. Для исключения ударов предусмотреть переход на пониженную скорость перед касанием крышкой котла при его закрывании.

Вариант 6. Автоматизировать управление дверью (воротами) въезда/выезда гаража. Нормальное (исходное) положение двери закрытое. При кратковременном нажатии кнопки «Открыть» включается звонок и через 5 с включается привод двери на открывание. При полном открытии двери привод двери отключается сразу, а звонок звенит еще 2 с. Закрывание дверей – аналогично: при кратковременном нажатии кнопки «Закрыть» включается звонок, через 5 с включается привод двери на закрывание. При полном закрытии двери привод двери отключается, а звонок звенит еще 2 с.

Вариант 7. Печь сопротивлений содержит три нагревательных элемента (НЭ), каждый из которых питается от собственного тиристорного преобразователя соответственно ТП1…ТП3. Сигнал «1» на входе ТП соответствует максимально допустимому току НЭ, сигнал «0» – минимально допустимому току НЭ. Синтезировать схему, обеспечивающую алгоритм работы группы ТП, представленный в табл. 12.

Таблица 12

Номер импульса генератора	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…
Состояние ТП1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	…
Состояние ТП2	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
Состояние ТП3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	

Начало работы осуществляется после нажатия на кнопку «Пуск». Цикл управления печью сопротивления состоит из 6 тактов. Переход с одного такта на другой осуществляется при поступлении очередного импульса от генератора импульсов. Циклы управления непрерывно следуют друг за другом. При

поступлении команды «Стоп» прекращается подача импульсов и все ТП отключаются. Для возобновления работы необходимо нажать на кнопку «Пуск». Генератор импульсов реализуется программным путем.

Вариант 8. Манипулятор (рука со схватом) служит для подачи заготовок из накопителя в пресс. Рука манипулятора может перемещаться вперед/назад из крайнего заднего КЗ в крайнее переднее КП положение и назад, а также поворачиваться из крайнего правого положения КПр в крайнее левое положение КЛ и обратно. Схват имеет электромагнитный механизм зажима/разжима заготовок. Исходное положение манипулятора перед накопителем (в положениях КЗ и КПр, схват под действием пружин зажат). При поступлении запроса со станка и наличии заготовки в накопителе включается электромагнит разжима схвата. Рука идет в крайнее переднее положение КП, через 2 с схват зажимает заготовку (электромагнит схвата отключается) и рука возвращается в положение КЗ. Рука поворачивается в положение КЛ и выдвигается вперед до КП. Схват разжимается (электромагнит схвата включается) и через 2 с рука идет в положение КЗ, затем поворачивается в положение КПР (исходное положение руки). Если есть запрос со станка, а накопитель пуст, то включается сигнальная лампа «Нет детали» и кратковременный звуковой сигнал (в течение 5 с). Световой сигнал снимается кнопкой «Сброс». Включение системы в работу – нажатием кнопки «Пуск».

Вариант 9. Автоматизировать процесс безупорной остановки длинномерного металла на рольганге Р1. На рольганг Р1 металл передается с предыдущего рольганга Р0, наличие металла на котором контролируется датчиком Д0. Вдоль рольганга Р1 расположены датчики, контролирующие наличие металла последовательно в положениях П1, П2 и П3. Нормальное положение рольганга Р1 – неподвижное. При наличии сигнала с датчика Д0 и отсутствии металла на рольганге Р1, рольганг Р1 включается, и металл перемещается по рольгангу Р1. При достижении передним концом металла положения П1 происходит снижение скорости Р1 до «ползучей» скорости, а в положении П2 привод рольганга Р1 отключается. Если по каким-либо причинам металл достиг положения П3, то привод рольганга Р1 реверсируется и работает на пониженной скорости, пока металл не уйдет из положения П3. При остановке переднего конца металла между положениями П2 и П3 формируется сигнал разрешения работы механизмов уборки металла с Р1. Включение системы в работу – при нажатии на кнопку «Пуск».

Вариант 10. Автоматизировать работу толкателя с кривошипно-шатунным механизмом с нереверсивным электродвигателем. При нажатии кнопки «Пуск» кривошип из положения $\alpha = 0^0$ движется до положения $\alpha = 120^0$. В этом положении происходит переход на пониженную (малую) скорость, кривошип идет до положения $\alpha = 180^0$ и останавливается. Через 3с электродвигатель автоматически вновь включается и на повышенной скорости шатун идет в положение $\alpha = 0^0$. Стоит в нем 3 с, включается и движется к положению $\alpha = 120^0$ и на пониженной скорости до $\alpha = 180^0$ и т.д. После 5 толканий толкатель останавливается в исходном положении (кривошип - в положении $\alpha = 0^0$) и формируется сигнал «Конец цикла».

Очередной цикл из пяти толканий – после очередного нажатия на кнопку «Пуск». При нажатии на кнопку «Стоп» толкатель из любого положения на повышенной скорости движется в положение $\alpha = 0^0$ и останавливается.

Вариант 11. Тележка движется по кольцевому пути, на котором есть 3 фиксированных положения П0, П1 и П2. Привод тележки – от нереверсивного электродвигателя. При подаче питания из любого положения тележка должна идти в положение П0. При нажатии на кнопку «Пуск» тележка без задержки движется в положение П1, стоит там в течение 3 с, затем движется в П2, стоит там в течение 4 с, движется в положение П0, стоит там в течение 5 с, движется в П1, стоит там в течение 3 с и т.д. То есть тележка непрерывно движется по кольцевому пути с остановками в фиксированных положениях. При нажатии на кнопку «Стоп» тележка должна без остановки идти в П0 и там ожидать очередного нажатия кнопки «Пуск».

Вариант 12. Автоматизировать линию сортировки изделий. По конвейеру движутся низкие изделия, но редко могут встречаться и высокие. По ходу конвейера установлены две фотоголовки на расстоянии друг от друга, равном половине ширины изделия. Первая по ходу конвейера фотоголовка настроена на низкие изделия (нижняя фотоголовка), вторая – на высокие изделия (верхняя фотоголовка). При прохождении низкой детали перекрывается только нижняя фотоголовка, а при высоких – вначале нижняя, а затем верхняя фотоголовки. На выходе конвейера детали ударяются о сортировочную планку, и высокие изделия поступают в правый накопитель (левое положение планки), низкие – в левый (правое положение планки). Планка перебрасывается пневмоприводом. Для переброски планки влево или вправо достаточно хотя бы кратковременно подать команду на ее перемещение влево или вправо. Включение системы в работу – нажатием кнопки «Пуск».

Требования к отчёту

Отчет должен содержать:

1. цель работы;
2. условия задачи по варианту, принятые обозначения переменных, логические функции для выходных и промежуточных переменных, при необходимости циклограмму работы оборудования;
3. логические функции в адресах программируемого контроллера;
4. программу для реализации системы управления;
5. методику экспериментальной проверки функционирования реализованной системы управления и результаты проверки;
6. выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что означает термин «конфигурирование проекта»?
2. Что означает термин «*target*-файл», где и как он используется в программной среде *CoDeSys*?
3. Что такое объявление переменных и это используется при программировании контроллера?
4. Можно ли в ПЛК160 реализовать таймер с уставкой времени 0,07 с?
5. При каких условиях на выходе таймеров контроллера формируется сигнал «0» и сигнал «1»?
6. При каких условиях на выходе счетчиков контроллера формируется сигнал «0» и сигнал «1»?
7. Что означает создание функционального блока (*FB*) при программировании контроллера?
8. Что означает создание и открытие функции (*FC*) при программировании контроллера?

2.2 Работа №2. Основы работы со SCADA-системой

Цель работы

Ознакомиться с основами работы *SCADA*-системы *TRACE MODE* и приобрести навыки разработки исполнительной среды для осуществления обмена данными. Разработать систему автоматизации на базе *SCADA*-системы *TRACE MODE*.

Содержание работы

а) Изучить назначение и технические характеристики устройств автоматизации, входящих в состав лабораторного комплекса.

б) Изучить принципы конфигурирования функций обмена данными между *SCADA*-системой *TRACE MODE* и устройствами автоматизации, а также принципы программирования задач управления технологическими процессами.

в) Дома при подготовке к работе:

– составить последовательность, в которой будет вестись настройка и конфигурирование изучаемых устройств автоматизации;

– составить программу управления для ПЛК160;

– разработать проект для исполнительной среды *SCADA*-системы *TRACE MODE*.

г) В лаборатории:

– пройти тестирование по функциональным возможностям, режимам работы и основам конфигурирования оборудования, участвующего в обмене данными со *SCADA*-системой;

– пройти тестирование по системе команд и принципу программирования на ПЛК160;

– учитывая установленную при конфигурировании адресацию, откорректировать подготовленные дома программы, записать их в программной среде *CoDeSys* 2.3 для ПЛК160/

Общие сведения

Краткие сведения о *SCADA*-системе *TRACE MODE*

SCADA (от англ. *Supervisory Control And Data Acquisition* – Диспетчерское управление и сбор данных) – программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.

SCADA-система может являться частью АСУТП (автоматизированная система управления технологическим процессом), АСКУЭ (автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии), системы экологического мониторинга, научного эксперимента, автоматизации здания и т. д. *SCADA*-системы используются

во всех отраслях хозяйства, где требуется обеспечивать операторский контроль за технологическими процессами в реальном времени.

Данное программное обеспечение устанавливается на компьютеры и, для связи с объектом, использует драйверы ввода-вывода или *OPC/DDE* серверы. Программный код может быть как написан на языке программирования (например, на *C++*), так и сгенерирован в среде разработки.

Иногда *SCADA*-системы комплектуются дополнительным ПО для программирования промышленных контроллеров. Такие *SCADA*-системы называются интегрированными и к ним добавляют термин *SoftLogic*.

Термин *SCADA* имеет двоякое толкование. Наиболее широко распространено понимание *SCADA* как приложения, то есть программного комплекса, обеспечивающего выполнение указанных функций, а также инструментальных средств для разработки этого программного обеспечения. Однако, часто под *SCADA*-системой подразумевают программно-аппаратный комплекс. Подобное понимание термина *SCADA* более характерно для раздела телеметрия.

Значение термина *SCADA* претерпело изменения вместе с развитием технологий автоматизации и управления технологическими процессами. В 80-е годы под *SCADA*-системами чаще понимали программно-аппаратные комплексы сбора данных реального времени. С 90-х годов термин *SCADA* больше используется для обозначения только программной части человеко-машинного интерфейса АСУ ТП.

Основные задачи, решаемые *SCADA*-системами:

– обмен данными с УСО (устройства связи с объектом, то есть с промышленными контроллерами и платами ввода/вывода) в реальном времени через драйверы;

– обработка информации в реальном времени;

– логическое управление;

– отображение информации на экране монитора в удобной и понятной для человека форме;

– ведение базы данных реального времени с технологической информацией;

– аварийная сигнализация и управление тревожными сообщениями;

– подготовка и генерирование отчетов о ходе технологического процесса;

– осуществление сетевого взаимодействия между *SCADA* и ПК;

– обеспечение связи с внешними приложениями (СУБД, электронные таблицы, текстовые процессоры и т. д.). В системе управления предприятием такими приложениями чаще всего являются приложения, относимые к уровню *MES*;

– *SCADA*-системы позволяют разрабатывать АСУ ТП в клиент-серверной или в распределенной архитектуре.

SCADA-система обычно содержит следующие подсистемы:

1) Драйверы или серверы ввода-вывода - программы, обеспечивающие связь *SCADA* с промышленными контроллерами, счётчиками, АЦП и другими устройствами ввода-вывода информации.

2) Система реального времени - программа, обеспечивающая обработку данных в пределах заданного временного цикла с учетом приоритетов.

3) Человеко-машинный интерфейс (*HMI*) - инструмент, который представляет данные о ходе процесса человеку оператору, что позволяет оператору контролировать процесс и управлять им. Программа-редактор для разработки человеко-машинного интерфейса.

4) Система логического управления - программа, обеспечивающая исполнение пользовательских программ (скриптов) логического управления в *SCADA*-системе. Набор редакторов для их разработки.

5) База данных реального времени - программа, обеспечивающая сохранение истории процесса в режиме реального времени.

6) Система управления тревогами - программа, обеспечивающая автоматический контроль технологических событий, отнесение их к категории нормальных, предупреждающих или аварийных, а также обработку событий оператором или компьютером.

7) Генератор отчетов - программа, обеспечивающая создание пользовательских отчетов о технологических событиях. Набор редакторов для их разработки.

8) Внешние интерфейсы - стандартные интерфейсы обмена данными между *SCADA* и другими приложениями. Обычно *OPC*, *DDE*, *ODBC, DLL* и т. д.

SCADA-система *TRACE MODE* 6 (*Adastra Research Group, LTD*) предназначена для автоматизации промышленных предприятий, энергетических объектов, интеллектуальных зданий, объектов транспорта, систем энергоучета и т.д. Масштаб систем автоматизации, создаваемых в *TRACE MODE,* может быть любым – от автономно работающих управляющих контроллеров и рабочих мест операторов (АРМ) до территориально распределенных систем управления, включающих десятки контроллеров и АРМ, обменивающихся данными с использованием различных коммуникаций – локальной сети, интранета/интернета, последовательных шин на основе *RS*232/485, выделенных и коммутируемых телефонных линий, радиоканалов и *GSM*/*GPRS*-сетей. Причем, благодаря наличию в составе *TRACE MODE* 6 компонентов *T-Factory.exe,* появляется возможность комплексной автоматизации управления как технологическими, так и бизнес-процессами производства для достижения высокой экономической эффективности и быстрого возврата инвестиций.

TRACE MODE 6 располагает встроенными драйверами, позволяющими подключать более 2500 наименований устройств ввода/вывода – программируемых логических контроллеров, удаленных УСО, плат ввода/вывода и промышленных сетей. Поддержка спецификаций *OPC DA* и *HDA,* протоколов *DDE* и *NetDDE,* а также открытый формат драйвера ввода/вывода и возможность прямого обращения к динамическим библиотекам (*DLL*) средствами языка программирования *ST* определяют широкие возможности по включению в состав систем автоматизации, разрабатываемых в *TRACE MODE*, разнообразного оборудования и обмену данными с внешними приложениями.

Системы, создаваемые в *TRACE MODE* 6, могут быть как информационно-измерительными (мониторинг), так и управляющими (НЦУ). Архитектура таких систем в свою очередь может быть как централизованной, так и распределенной, в зависимости от заданных требований.

Особое место отводится системам, использующим свободно-программируемые контроллеры *(PC-based* и/или *PAC*-контроллеры), поскольку в этом случае в *TRACE MODE* 6 применяется единый инструмент создания информационного и математического обеспечения, как для АРМ верхнего уровня, так и для контроллеров, реализующих нижний уровень в иерархии систем автоматизации. Использование технологии автопостроения и подход к разработке проекта распределенной системы автоматизации как единого проекта существенно повышают производительность труда разработчиков систем, значительно уменьшая долю рутинных ручных операций и снижая количество ошибок, неизбежных в больших проектах.

Надежный и высокопроизводительный обмен данными между контроллерами и АРМ в *TRACE MODE* 6 обусловлен использованием логического сетевого протокола *I-Net* (поверх *TCP/IP*), или *M-Link*. Хранение и доступ к накапливаемой информации реализуются через мощную систему архивирования технологических параметров СУБД РВ *SIAD* 6.

Динамические характеристики и надежность создаваемого в *TRACE MODE* программного обеспечения позволяют применять разработанные системы автоматизации в таких отраслях промышленности, как нефтехимия, металлургия, энергетика, машиностроение, коммунальное хозяйство, пищевая промышленность, транспорт, а также при проведении научных исследований.

Программная среда *TRACE MODE* 6 подразделяется на интегрированную среду разработки и исполнительные модули (исполнительную среду).

Инструментальная система *TRACE MODE* (среда разработки) устанавливается на рабочем месте инженера-разработчика АСУ и предназначена для создания системы автоматизации и отладки всех ее компонентов. Сохраняемое в файл с расширением **.prj* описание создаваемой системы автоматизации является проектом *TRACE MODE*.

Исполнительные модули TRACE MODE (среда исполнения) предназначены для запуска проекта в реальном времени, т.е. для эксплуатации на действующем объекте автоматизации. Основным исполнительным модулем *TRACE MODE* для АРМ является монитор реального времени (МРВ), реализующий такие основные функции, как непрерывный сбор данных, их математическую обработку и визуализацию. Для запуска проекта в контроллерах используются исполнительные модули МикроМРВ, которые различаются по типу контроллеров (разрядность процессора, операционная система, использование сетевого взаимодействия и др.).

Каждому компьютеру/контроллеру, запускаемому под управлением исполнительного модуля в проекте *TRACE MODE,* сопоставлен отдельный узел. Максимальное количество узлов в проекте – 255.

В рамках узла создаются каналы – основные информационные единицы для ввода и первичной обработки данных. Каналы в рамках узла могут объединяться в группы, группы могут содержать подгруппы, образуя иерархическую информационную структуру произвольной вложенности. Каналы разделяются на классы в зависимости от типа обрабатываемых данных, например, для целочисленных – *HEX*16 и *HEX*32, для вещественных – *FLOAT* и *DOUBLE FLOAT*.

Каналы содержат атрибуты. Атрибуты каналов могут быть вычисляемыми в реальном времени и не вычисляемыми, общими и специализированными, т.е. отражающими специфику класса канала.

Атрибуты канала, задаваемые при редактировании в ИС это Базовое имя, Комментарий, Кодировка. Они являются общими атрибутами каналов всех классов.

Атрибуты «Верхний предел», «Нижний предел» – не вычисляемые специализированные аргументы канала класса *FLOAT*, атрибут «Достоверность» является вычисляемым атрибутом, индицирующим в реальном времени состояние обмена данными с аппаратурой для каналов класса *HEX*16 и *FLOAT*. Значения не вычисляемых атрибутов можно изменять в реальном времени, например, варьировать параметры внутренней обработки в канале класса *FLOAT* с помощью атрибутов «Множитель» и «Смещение» для выполнения линейного преобразования – перехода от кодов АЦП к физическим величинам и т.д.

Различают два типа каналов – *INPUT* и *OUTPUT*. В общем случае каналы типа *INPUT* могут получать информацию от источников данных, каналы типа *OUTPUT* – посылать управляющие воздействия в приемники данных.

Источники и приемники данных представляют собой описатели точек ввода-вывода, то есть связей с контроллерами, платами УСО, интеллектуальными датчиками и т.д. Каждая точка ввода-вывода может быть одним аналоговым сигналом или группой (до 16-ти) дискретных сигналов.

Связи с тэгами во внешних *OPC*-серверах и программными компонентами по протоколам *DDE/NetDDE* также относятся к точкам ввода-вывода.

Такие компоненты проекта как экраны, программы, связи с внешними реляционными СУБД и документы разрабатываются как шаблоны. Для связи шаблонов с атрибутами каналов используются аргументы. Вызов шаблонов в узлах проекта осуществляется с помощью специализированных каналов класса *CALL* (Вызов). Один шаблон может быть вызван многократно на разных узлах с передачей в аргументы различных атрибутов различных каналов. Допустимы связи между аргументами вызываемых шаблонов, если они заданы в рамках одного узла.

Для повторного использования в последующих проектах любых компонентов проекта – шаблонов экранов, программ, связей с СУБД, документов, источников/приемников и узлов в целом предназначена пользовательская библиотека.

Количество проектов, разрабатываемых с помощью одной инструментальной системы *TRACE MODE*, как и время работы в ней не ограничены.

В состав инструментальной системы *TRACE MODE* 6 входят:

1) Интегрированная среда разработки *TRACE MODE* 6 *IDE* (файл *tmdevenv.exe*).

2) Профайлеры – отладочные МРВ (файл *rtc.exe* – с поддержкой графических экранов. Файл *rtmg*32.*exe* – без поддержки графических экранов).

3) Бесплатный набор драйверов устройств ввода\вывода.

4) Библиотека компонентов – файл *tmdevenv.tmul* и набор ресурсов – обои, логотипы, анимации в каталоге *\Lib* папки инструментальной системы.

5) Электронная документация (встроенная справочная система).

6) Демонстрационные проекты *TRACE MODE* (примеры систем автоматизации, основанные на имитации технологического процесса).

Создание проекта АСУ осуществляется в единой интегрированной среде разработки (ИС) *TRACE MODE* 6, работающей под управлением операционной системы *MS Windows*. Операции по созданию компонентов проекта, их редактированию и установлению взаимосвязей между ними выполняются в навигаторе проекта ИС. Разрабатываемый проект представляется в виде дерева компонентов. Создание дерева проекта облегчается применением различных технологий автопостроения.

При создании программ, экранов, связей с СУБД, документов и других компонентов вызываются соответствующие редакторы. Разработанные шаблоны могут быть применены для повторного использования, как в текущем проекте, так и в последующих при условии их сохранения в пользовательской библиотеке компонентов.

Конечным результатом работы инструментальной системы *TRACE MODE* 6 является набор файлов, предназначенных для исполнения задач АСУ в мониторах реального времени на АРМ и в контроллерах. В рассматриваемых далее случаях в качестве МРВ для АРМ будет использоваться профайлер с поддержкой графических экранов *rtc.exe*, а для контроллера – без поддержки графических экранов *rtmg*32.*exe*, расположенные в директории инструментальной системы *TRACE MODE* 6. Профайлер позволяет запускать на компьютере с установленной инструментальной системой один узел разработанного проекта. Узлы проекта, запущенные в отладчиках *TRACE MODE* 6 на разных компьютерах, могут обмениваться данными как по сети, так и по последовательным коммуникациям. На одном компьютере с несколькими сетевыми адаптерами, соединенными через *hub* или *switch*, можно одновременно запускать соответствующее количество узлов, обменивающихся данными по сети. На одном компьютере с несколькими последовательными портами, соединенными соответствующим образом (для двух – нуль-модемным кабелем), можно запускать также несколько узлов, обменивающихся данными по интерфейсам *RS*232/485.

Порядок выполнения лабораторной работы

В лабораторной работе студентам предлагается вариант системы автоматизации *SCADA*-система *TRACE MODE* + программируемый контроллер ПЛК160.

Порядок выполнения лабораторной работы заключается в следующем:

1) Конфигурирование устройства и разработка управляющей программы.

2) Разработка и настройка в инструментальной среде следующих компонентов:

- системы визуализации (экрана контроля и управления);
- области «Источники/приёмники»;
- области «Каналы»;
- привязка источников к каналам.

3) Создание исполнительного файла для среды исполнения.

4) Отладка.

Порядок разработки системы автоматизации на базе *SCADA*-системы *TRACE MODE* и программируемого контроллера ПЛК160:

1) Программирование ПЛК160 в программной среде *CoDeSys* 2.3. Выполняется в соответствии с методическими указаниями к лабораторной работе №5.

Так как в рассматриваемом варианте обмен информацией между *SCADA*-системой *TRACE MODE* и программируемым контроллером ПЛК160 осуществляется посредством использования *OPC*-сервера, то в программном блоке *POU* необходимо только определить переменные, которые будут участвовать в обмене данными (рис. 31).

2) Далее необходимо настроить конфигурацию проекта для совместной работы с *OPC*-сервером *CoDeSys* 2.3:

– на вкладке «Ресурсы» найдите пункт «Настройки целевой платформы» (рис. 32);

```
0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003     Din AT %IX0.0:BOOL;
0004     Dout AT %QX2.0:BOOL;
0005     Ain AT %IB1.0:BYTE;
0006     Aout AT %QB3.0:BYTE;
0007 END_VAR
```

Рис. 31. Определение переменных программы

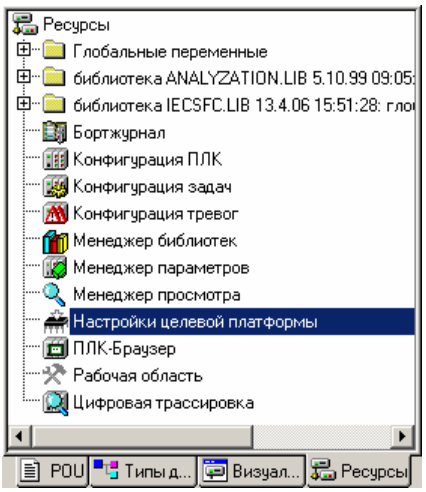


Рис. 32

– в появившемся окне в вкладке «Общие» установить галочку напротив пункта «Загружать символьный файл» (рис. 33);

– выбрать в меню «Проект» пункт «Опции». В разделе «Символьная конфигурация» установить галочку напротив пункта «Создавать описания»;

– нажать кнопку «Настроить символьный файл». В открывшемся окне «Установка атрибутов объекта» выделить те переменные, с которыми нужно будет работать в *SCADA*-системе, и нажать кнопку «ОК» (рис. 34);

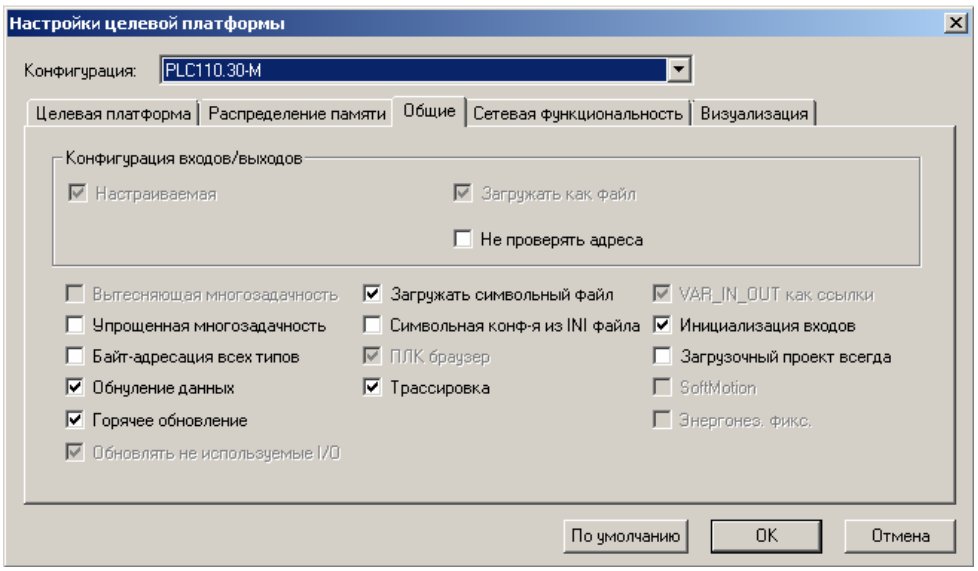


Рис. 33

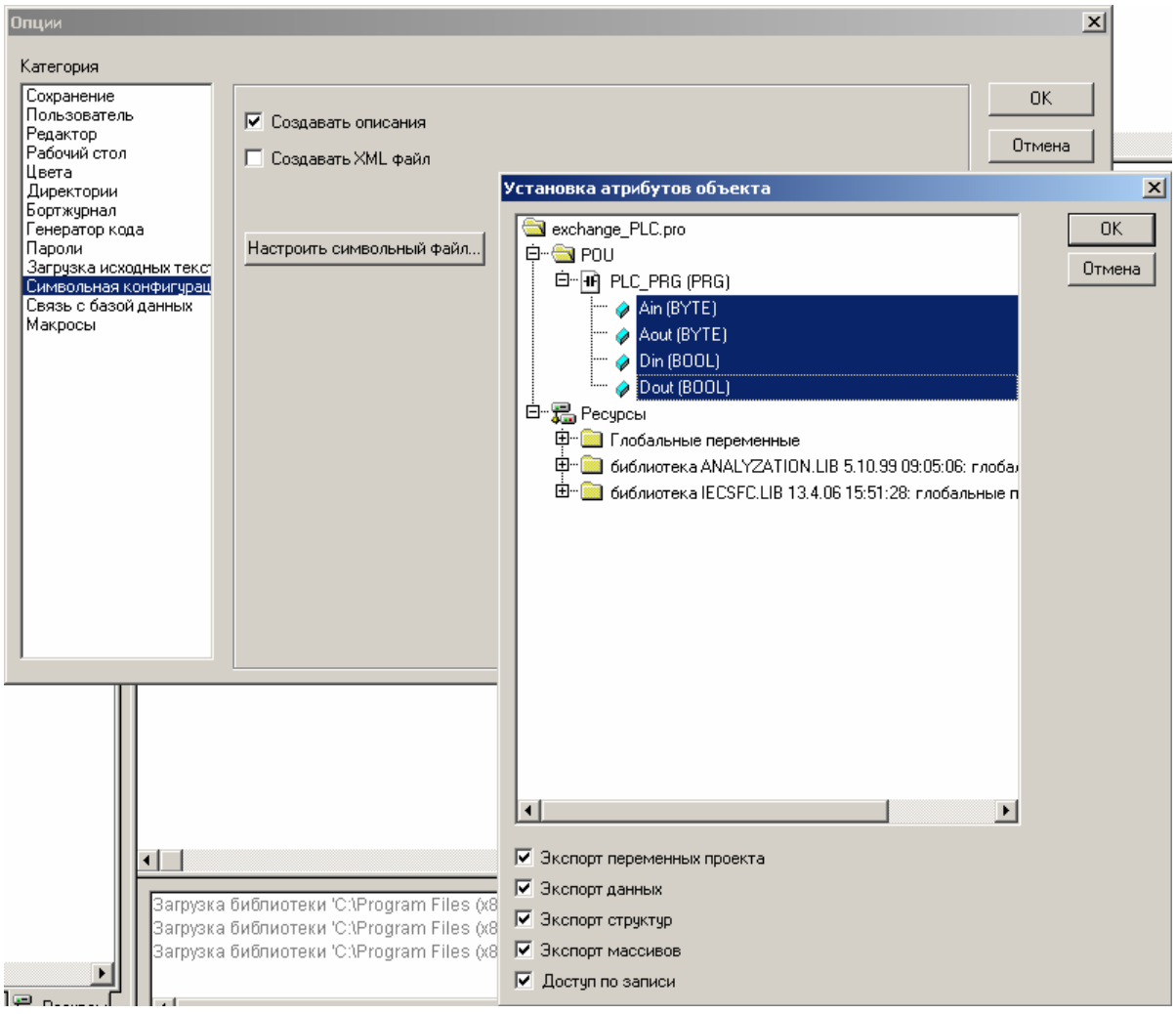


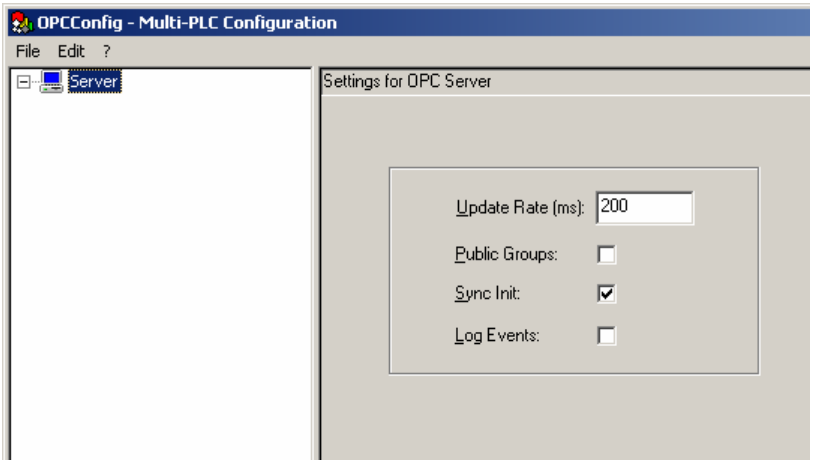
Рис. 34

– выполнить компиляцию проекта. Для этого выбрать в меню «Проекты» пункт «Компилировать все»;

– сохранить проект. Затем связаться с ПЛК, выбрав пункт «Подключение» в меню «Онлайн». После установки связи в меню «Онлайн» выбрать пункт «Создать загрузочный проект». Дождаться окончания загрузки проекта в ПЛК.

3) Конфигурирование *OPC*-сервера с помощью программы *OPC Configurator*:

– запустить программу *CoDeSys OPC Configurator* (рис. 35а). Это можно сделать через кнопку «Пуск» в Windows (Пуск → Программы → *3S Software* → *Communication* → *CoDeSys OPC Configurator*);

а) 

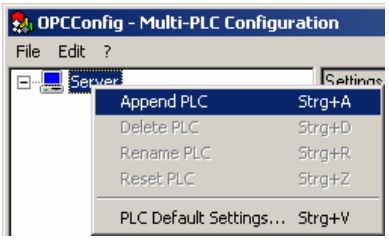
б) 

Рис. 35

– нажать правой кнопкой мыши на надписи «*Server*». В появившемся контекстном меню необходимо выбрать пункт «*Append PLC*» (рис. 35б). После этого в окне добавится значки PLC1 и Connection;

– выделить PLC1 и в появившемся поле ввода «*Project name*» ввести имя проекта, который был загружен в ПЛК (рис. 36);

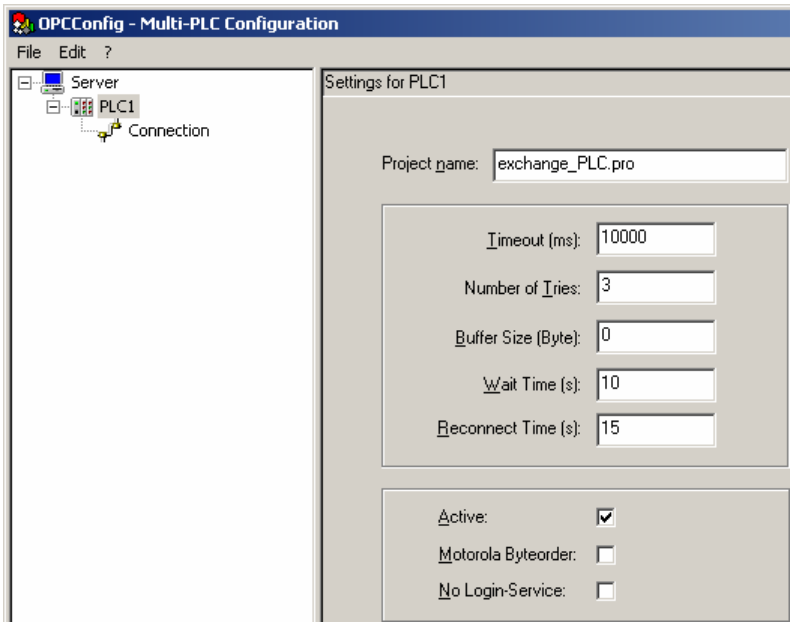


Рис. 36

– выделить значок Connection и нажать кнопку «*Edit*» (рис. 37). В появившемся окне необходимо выбрать интерфейс и параметры сетевого обмена между ПЛК и компьютером. Эта процедура аналогична настройке сетевого обмена с ПЛК, описанной в методических рекомендациях к лабораторной работе по изучению программируемого контроллера ПЛК160. После выполнения всех необходимых действий таблица, приведенная на рис. 37, будет заполнена значениями параметров сетевого обмена. После этого программу *CoDeSys OPC Configurator* можно закрыть. После выполнения всех этих действий данные из *OPC*-сервера можно использовать в *SCADA*-системе.

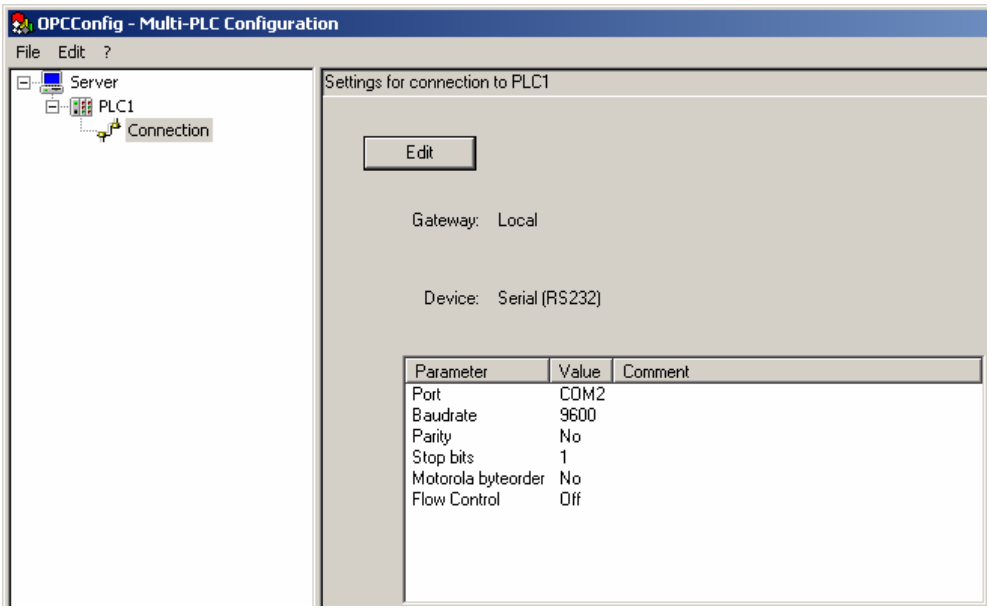


Рис. 37

4) Разработка исполнительной среды (исполнительного файла) *SCADA*-системы *TRACE MODE* выполняется в следующей последовательности:

– запустить инструментальную систему *TRACE MODE* 6 двойным щелчком левой кнопки мыши по иконке «*TRACE MODE*» рабочего стола *Windows* или из меню «Пуск»;

– в открывшемся окне выбрать *Файл* → *Новый*;

– в окне навигатора проекта представлены слои проекта. В слое «Система» создать новый узел *RTM*_1, нажав правую клавишу мыши и выбрав в открывшемся меню *Новый узел* → *RTM*;

– в созданном узле установить один экран. Для этого необходимо нажать правую клавишу мыши на узле *RTM*_1 и выбрать *Создать компонент* → *Экран*. Окно навигатора проекта примет вид, представленный на рис. 38;

Рис. 38. Внешний вид проекта

– дважды щелкнув левой клавишей мыши по элементу «Экран#1:1» открыть созданный экран. В нем, используя графические элементы «Кнопка» , выключатель , плоские фигуры и «Текст» , создать экран для визуализации обмена между *SCADA*-системой *TRACE MODE* и программируемым контроллером ПЛК160 (рис. 39);

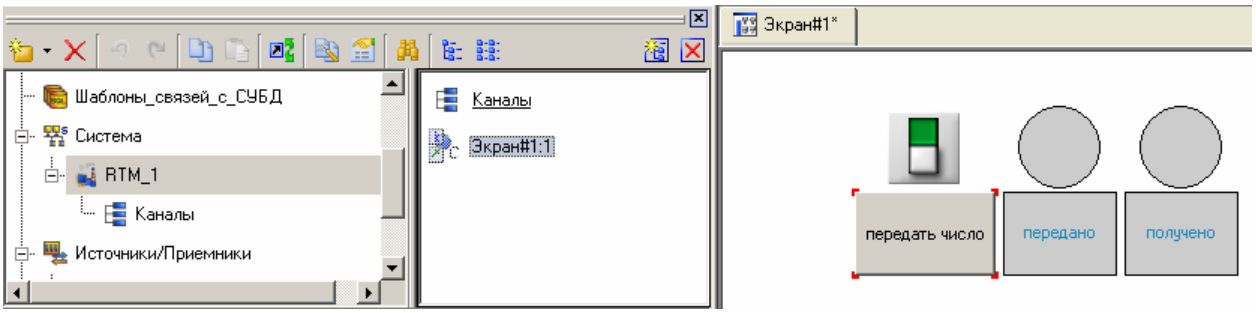
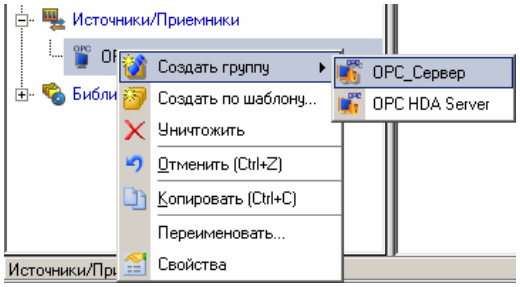


Рис. 39. Экран визуализации обмена между *SCADA*-системой и контроллером

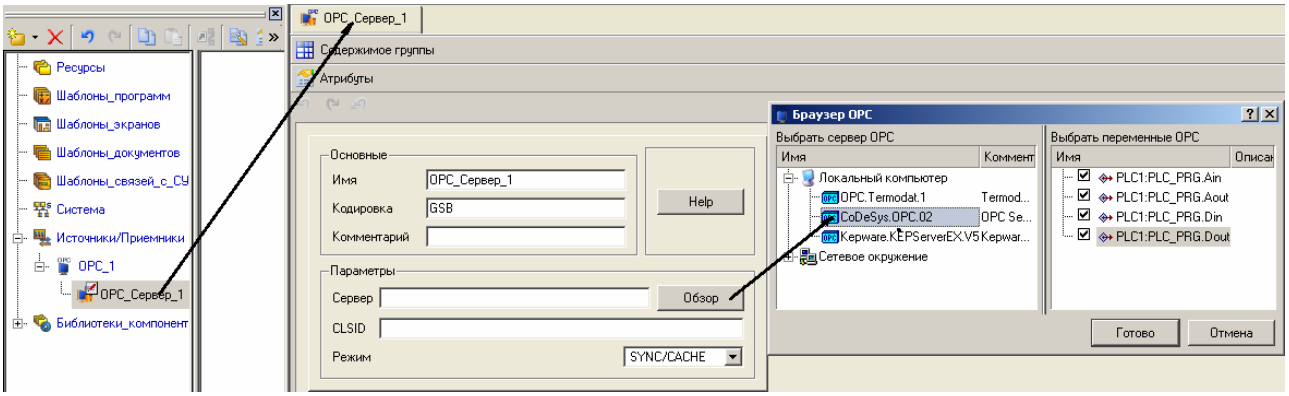
– в слое «Источники/приемники» создать группу «*OPC*_1», для чего необходимо выбрать «Источники/приемники» и, нажав правой клавишей мыши, в открывшемся окне выбрать *Создать группу* → *OPC*;

– в группе «*OPC*_1» создать группу «*OPC* Сервер» (рис. 40а). Для этого необходимо выбрать «*OPC*_1» и, нажав правой клавишей мыши, в открывшемся окне выбрать *Создать группу* → *OPC* Сервер;

а)



б)



в)

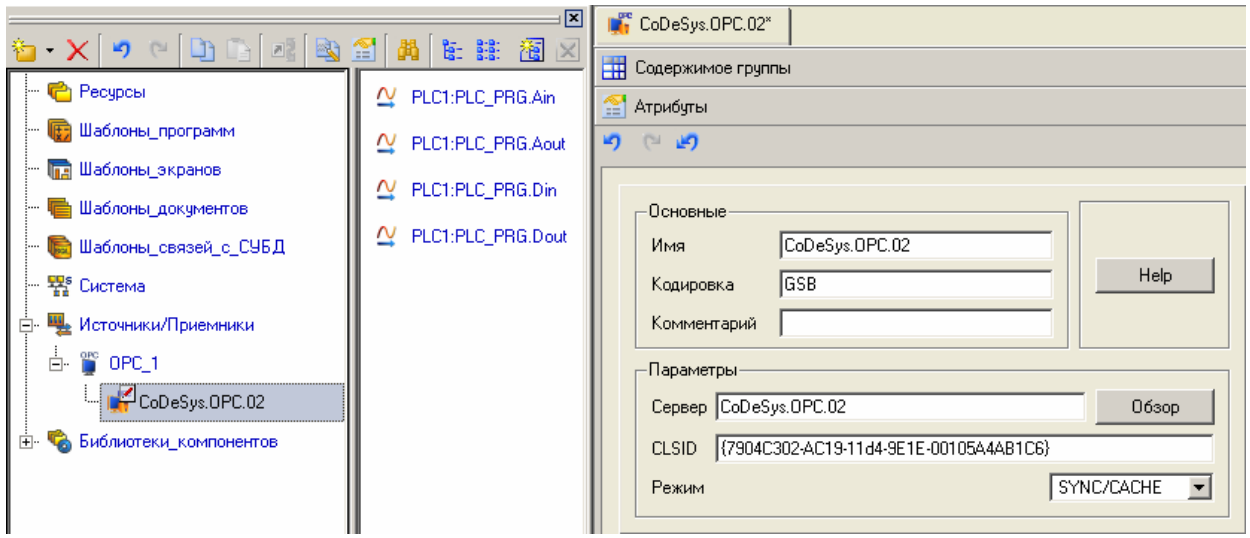


Рис. 40. Создание точек ввода/вывода в слое «Источники/приемники»

– правой клавишей мыши нажать на группе «*OPC*_Сервер_1» и в выпадающем меню выбрать пункт «Редактировать». В окне «Содержимое группы» (рис. 40б) в строке «Сервер» нажать кнопку «Обзор» и в открывшемся окне выбрать требуемый сервер *OPC – CoDeSys.OPC*.02. При выборе сервера в правой части окна отобразятся все созданные ранее переменные OPC. Необходимо установить галочку напротив требуемой переменной, после чего нажать «Готово». В результате этих действий в группе «*CoDeSys.OPC*.02» будет создано 4 точки ввода/вывода (рис. 40в);

– настроить свойства созданных точек ввода/вывода, для чего два раза щелкнуть левой клавишей мыши по необходимой точке ввода/вывода и в открывшемся окне задать настройки для точки в соответствии с табл. 13;

Таблица 13

№	Точка	Направление	Формат
1	*PLC*1:*PLC_PRG.Ain*	*Input*	Аналог
2	*PLC*1:*PLC_PRG.Aout*	*Output*	Аналог
3	*PLC*1:*PLC_PRG.Din*	*Input*	Дискрет
4	*PLC*1:*PLC_PRG.Dout*	*Output*	Дискрет

– создать каналы. Для этого для удобства необходимо открыть дополнительное окно навигатора, нажав кнопку «Открыть дополнительное окно навигатора» .

Используя указатель мыши последовательно перетащить созданные точки ввода/вывода в группу «Каналы» узла *RTM*_1 (рис. 41);

– открыв экран, в меню «Вид» выбрать «Аргументы экрана». В открывшееся окно последовательно перетащить созданные каналы (см. рис. 41), после чего созданные аргументы экрана привязать к элементам экрана, последовательно перетащив аргументы на изображения элементов в соответствии с табл. 14;

Таблица 14

№	Канал	Аргумент	Элементы экрана
1	*PLC*1:*PLC_PRG.Ain*	*PLC*1:*PLC_PRG.Ain_R*	Текст «получено»
2	*PLC*1:*PLC_PRG.Aout*	*PLC*1:*PLC_PRG.Aout_R*	Кнопка «передать число», текст «передано»
3	*PLC*1:*PLC_PRG.Din*	*PLC*1:*PLC_PRG.Din_R*	Объект «л2»
4	*PLC*1:*PLC_PRG.Dout*	*PLC*1:*PLC_PRG.Dout_R*	Выключатель, объект «л1»

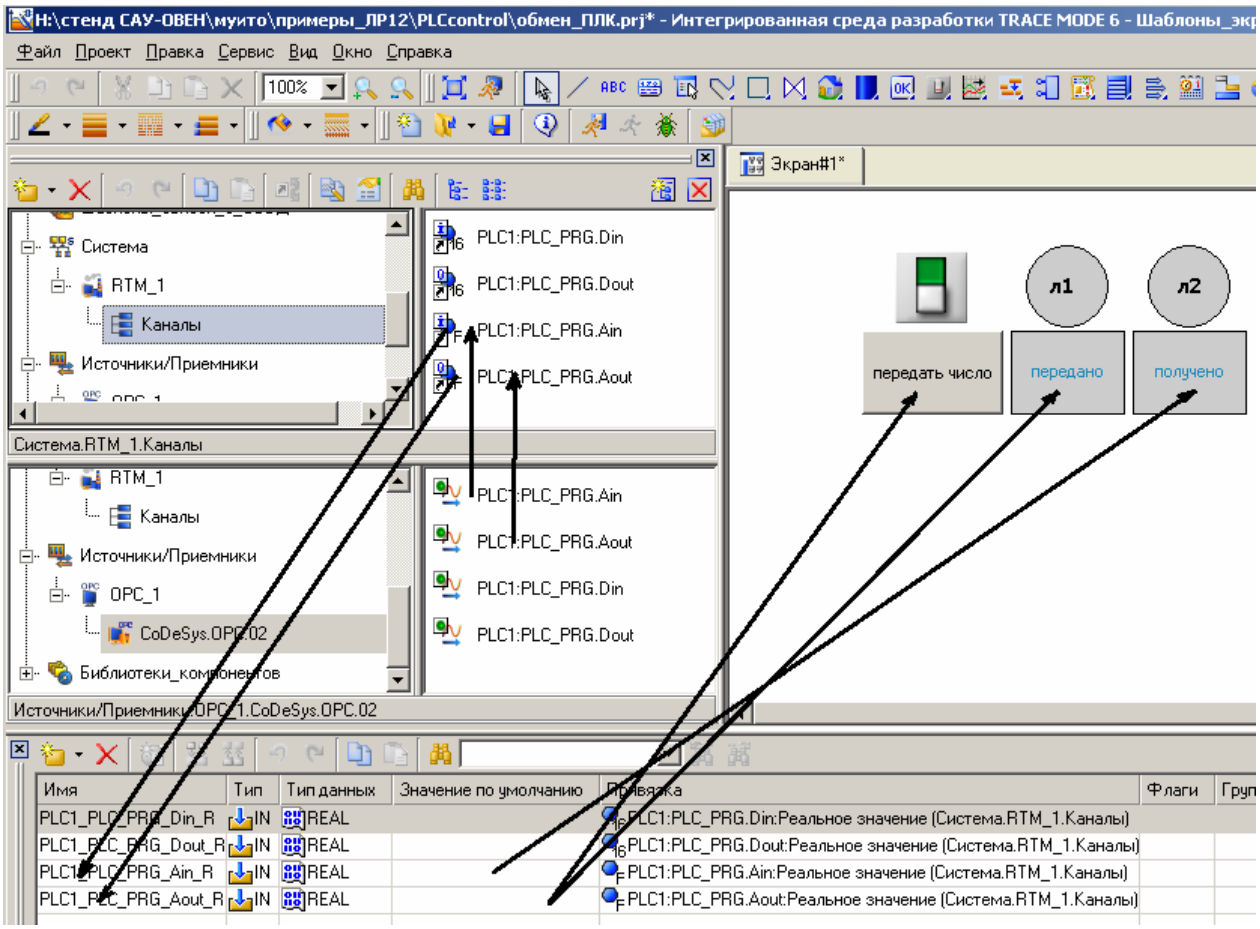


Рис. 41. Создание каналов и их привязка

– настроить свойства элементов экрана. Для этого дважды щелкнуть левой клавишей мыши по требуемому элементу. В открывшемся окне свойств для кнопки выбрать закладку «События» (рис. 42а), для выключателя, эллипса и текстового поля – «Общие свойства» (рис. 42б – 42г). Для кнопки необходимо настроить свойства передачи в закладке «Передать значение» в соответствии с табл. 14, для ламп – таблица 15, а для текстового поля в закладке «Текст» проверить правильность привязки элемента экрана и канала в соответствии с табл. 16;

Рис. 42. Настройка свойств графических элементов

Таблица 14

№	Графический элемент	Тип передачи	Результат	Значение
1	Кнопка «передать число»	Ввести и передать	*PLC1:PLC_PRG.Aout_R*	0

Таблица 15

№	Графический элемент	Функция	Вид индикации	Привязка	Константа
1	Объект «л1»	Заливка	*Arg = Const*	*PLC1:PLC_PRG.Dout_R*	1
2	Объект «л2»	Заливка	*Arg = Const*	*PLC1:PLC_PRG.Din_R*	1

Таблица 16

№	Графический элемент	Функция	Вид индикации	Привязка	Формат
1	Текст «передано»	Текст	Значение	*PLC*1:*PLC_PRG.Aout_R*	*generic, %g*
2	Текст «получено»	Текст	Значение	*PLC*1:*PLC_PRG.Din_R*	*generic, %g*

– выделить узел *RTM*_1 и нажать кнопку «Сохранить для МРВ» на панели меню для создания исполнительного файла для монитора реального времени (МРВ). В результате выполнения этой процедуры в папке с фалом проекта должна появиться папка с таким названием, в которой располагается папка «*RTM*_1». В этой папке находится исполнительный файл для профайлера (исполнительной среды), имеющий имя «*Имя файла_0*».

3) Проверка правильности работы системы выполняется в следующей последовательности:

– подать питание на лабораторный стенд и используемые в лабораторной работе модули. При необходимости перевести программируемый контроллер ПЛК160 в режим «РАБОТА», нажав соответствующую кнопку на лицевой панели контроллера;

– запустить исполнительный файл дважды щелкнув по названию файла. В открывшемся окне для запуска профайлера необходимо нажать кнопку «Запуск» ;

– используя кнопки на экране монитора, передать дискретное или числовое значение. На лицевой панели модуля должно отобразиться изменение состояний выходов контроллера. Аналогично проверить получение сигналов от контроллера: включая тумблеры на лицевой панели модуля, наблюдать изменение отображаемых значений в соответствующих числовых полях;

– при необходимости исправить ошибки, заново сохранить, нажав кнопку «Сохранить для МРВ» и проверить в профайлере.

Требования к отчёту

Отчет должен содержать:

1. цель работы;
2. описание технологической задачи по варианту, конфигурацию или технологическую схему автоматизированного объекта, обозначение переменных;
3. параметры программируемого контроллера введенные в него при конфигурировании;
4. проект для инструментальной среды SCADA-системы с коментариями.
5. описание методики и экспериментальной проверки работоспособности системы автоматизации;
6. выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что означает термин «конфигурирование контроллера»?
2. В какой последовательности осуществляется конфигурирование ПЛК160?
3. В какой последовательности осуществляется разработка *SCADA*-проекта?
4. Как осуществляется обмен информацией между программируемым контроллером и *SCADA*-системой?
5. Как осуществляется конфигурирование *OPC*-сервера?
6. Как в лабораторной работе проверить правильность работы разработанной системы автоматизации?

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

Методические указания к выполнению лабораторных работ Часть 2

Б1.В.09.08 МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА В МЕХАТРОНИКЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА 4
1.1 Назначение стенда 4
1.2 Состав 5
1.3 Технические характеристики стенда 5
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ 6
2.1 Работа №1. Изучение бесконтактных датчиков технологической информации 6
2.2 Работа №2. Изучение дискретной системы управления двигателем постоянного тока на основе программируемого логического контроллера 10
2.3 Работа №3. Синтез и анализ алгоритмов управления мехатронной станцией сборки деталей 14

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА

1.1 Назначение стенда

Лабораторный стенд предназначен для изучения программируемого логического контроллера с объектом управления в виде мехатронного модуля – сборки деталей. Стенд позволяет изучить основы построения систем цикловой автоматики. Элементная база мехатронного модуля состоит из ленточного конвейера с электроприводом постоянного тока, модуля подачи базовых деталей, модулей подачи крышек из различного материала, пневматических толкателей и датчиков различного типа.

Внешний вид учебного комплекта представлен ниже (см. Рисунок 1).

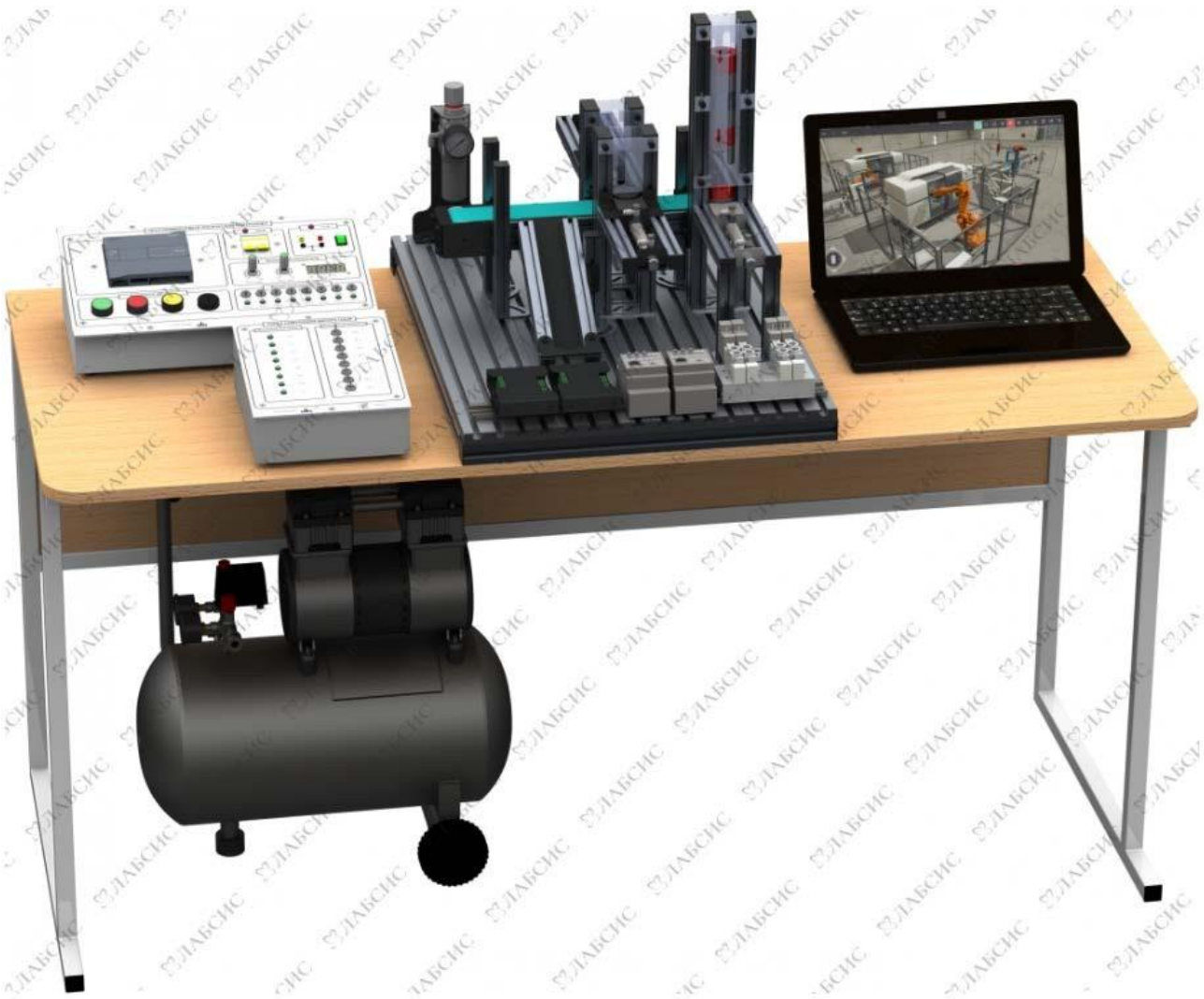


Рисунок 1 – Внешний вид стенда ММ-СБ-НН

1.2 Состав

Лабораторный стенд включает в себя следующие компоненты (см. Таблица 1).

Таблица 1 – Состав

№	Наименование	Кол-во
1	Моноблок, содержащий: источник питания, программируемый логический контроллер, элементы индикации и управления	1 шт.
2	Мехатронный модуль сборки деталей	1 шт.
3	Модуль пульта симуляции	1 шт.
4	Компрессор	1 шт.
5	Ноутбук	1 шт.
7	Комплект кабелей и принадлежностей для проведения лабораторных работ	1 шт.
8	Техническое описание	1 шт.
9	Методические указания к проведению лабораторных работ	1 шт.

1.3 Технические характеристики стенда

Общие технические характеристики типового комплекта учебного оборудования представлены ниже (см. Таблица 2).

Таблица 2 – Технические характеристики

Параметр	Значение
Напряжение электропитания, В	220
Частота питающего напряжения, Гц	50
Потребляемая мощность, ВА	1600
Габаритные размеры, мм	480x600x650
Масса, кг	60 кг
Диапазон рабочих температур	+10…+35 ˚С
Относительная влажность воздуха, не более	80%

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

2.1 Работа №1. Изучение бесконтактных датчиков технологической информации

Цель работы

Приобретение опыта работы с устройствами детектирования, идентификации и управления.

Содержание работы

Дома, при подготовке к работе:

– Изучить назначение, технические характеристики пульта управления, основные узлы и возможности лабораторного стенда;

– Изучить описание мехатронного модуля, ознакомиться с характеристиками всех его элементов;

– Уделить особое внимание датчикам, которые применяются в мехатронном модуле;

В лаборатории:

– Закрепить полученные при подготовке к лабораторной работе знания на практике;

Общие сведения

Мехатронный модуль представляет собой набор узлов, пневматических и электрических компонентов, объединенных в единое мехатронное устройство, имитирующее участок сборки деталей.

Модуль содержит следующие устройства детектирования и идентификации:

1. Датчик втянутого положения штока цилиндра узла выдачи заготовок – магнитный концевой выключатель B1 типа – D-A93 (характеристики представлены в техническом описании стенда);

2. Датчик выдвинутого положения штока цилиндра узла выдачи заготовок – магнитный концевой выключатель B2 типа – D-A93 (характеристики представлены в техническом описании стенда);

3. Датчик наличия заготовок в магазине узла выдачи заготовок – световой барьер BQ1, типа – BF3RX-P (характеристики представлены в техническом описании стенда);

4. Датчик типа материала заготовки – индуктивный концевой выключатель B3 типа – ВБИ-М18-34У-1111-3 (характеристики представлены в техническом описании стенда);

5. Датчик наличия заготовки в зоне выдачи крышек – световой барьер BQ2, типа – BF3RX-P (характеристики представлены в техническом описании стенда);

6. Датчик наличия заготовки в зоне накопительного узла – диффузионный оптический датчик B4, типа – BEN300-DDT (характеристики представлены в техническом описании стенда);

7. Датчик наличия крышек в магазине узла выдачи крышек 1 – световой барьер BQ3, типа – BF3RX-P (характеристики представлены в техническом описании стенда);

8. Датчик наличия крышек в магазине узла выдачи крышек 2 – световой барьер BQ4, типа – BF3RX-P (характеристики представлены в техническом описании стенда);

Модуль содержит следующие устройства управления:

1. Подача заготовки на ленту из магазина узла выдачи заготовок – пневматический цилиндр двухстороннего действия YA1, типа – CD85N16-60-B, на штоке которого закреплен пластиковый толкатель (характеристики представлены в техническом описании стенда);

Управление пневмоцилиндрами осуществляется с помощью пневмораспределителей с электроуправлением PYA1 типа – SY3120-5LOU-C4-Q, закрепленном на пневмоострове

2. Пуск/стоп двигателя постоянного тока узла конвейера – двигатель постоянного тока с редуктором A1, типа – RB3500090-30Y02R, управляемого контроллером UT-DrDPT-M01 имеющий возможность реверса A2 (характеристики представлены в техническом описании стенда);

3. Комплектовка заготовки крышкой из магазина узла выдачи крышек 1 – пневматический цилиндр двухстороннего действия YA2, типа – CD85N16-60-B, на штоке которого закреплен пластиковый толкатель (характеристики представлены в техническом описании стенда);

Управление пневмоцилиндрами осуществляется с помощью пневмораспределителей с электроуправлением PYA2 типа – SY3120-5LOU-C4-Q, закрепленном на пневмоострове

4. Комплектовка заготовки крышкой из магазина узла выдачи крышек 2 – пневматический цилиндр двухстороннего действия YA3, типа – CD85N16-60-B, на штоке которого закреплен пластиковый толкатель (характеристики представлены в техническом описании стенда);

Управление пневмоцилиндрами осуществляется с помощью пневмораспределителей с электроуправлением PYA3 типа – SY3120-5LOU-C4-Q, закрепленном на пневмоострове

Ход работы

Для проведения данной лабораторной работы необходимо использовать мехатронный модуль – сборка деталей (Рисунок 2) и пульт ручного управления модулем (Рисунок 3).

1. Подключить мехатронный модуль (Терминал подключения к ПЛК *UT-CRP-M01*) к Пульту ручного управления;
2. Подавая сигналы с тумблеров пульта ручного управления зафиксировать срабатывание всех устройств управления;
3. Произвести требуемые воздействия для срабатывания устройств детектирования и идентификации и зафиксировать индикацию соответствующих светодиодов пульта симуляции.
4. Выполнить отчет о проделанной работе

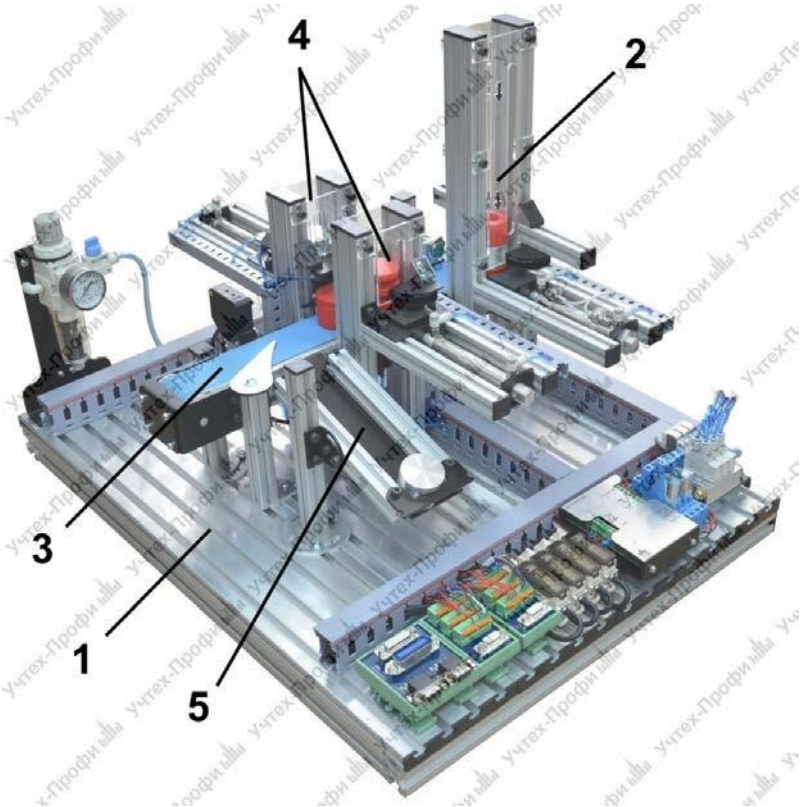


Рисунок 2 – Мехатронный модуль – сборка деталей

Рисунок 3 – Пульт ручного управления модулем

2.2 Работа №2. Изучение дискретной системы управления двигателем постоянного тока на основе программируемого логического контроллера

Цель работы

Ознакомиться с принципом работы дискретной системы управления, изучить назначение и технические характеристики датчиков и устройств управления, приобрести навыки разработки алгоритма управления, а также программирования данной системы с применением специализированного программного обеспечения.

Содержание работы

Дома, при подготовке к работе:

– Изучить назначение, технические характеристики логического моноблока ОВЕН ПЛК160, основные узлы и возможности лабораторного стенда;

– Изучить систему команд и принципы программирования ПЛК160;

– Изучить описание мехатронного модуля, ознакомиться с характеристиками всех его элементов;

– Выполнить синтез системы автоматизации согласно выданному варианту задания;

– Составить программу для ввода в контроллер;

В лаборатории:

– Закрепить полученные при подготовке к лабораторной работе знания на практике;

– Отладить мехатронный модуль в ручном режиме;

– С помощью разработанного алгоритма выполнить управление мехатронной станции.

Общие сведения

Текущую работу рекомендуется выполнять после успешного завершения лабораторной работы №1 текущих методических указаний, подробное описание устройств детектирования, идентификации и управления переведено в лабораторной работе №1 и в техническом описании стенда.

Для проведения данной лабораторной работы необходимо использовать мехатронный модуль – сборка деталей (Рисунок 4) и лабораторный моноблок «ОВЕН ПЛК 160» (Рисунок 5).

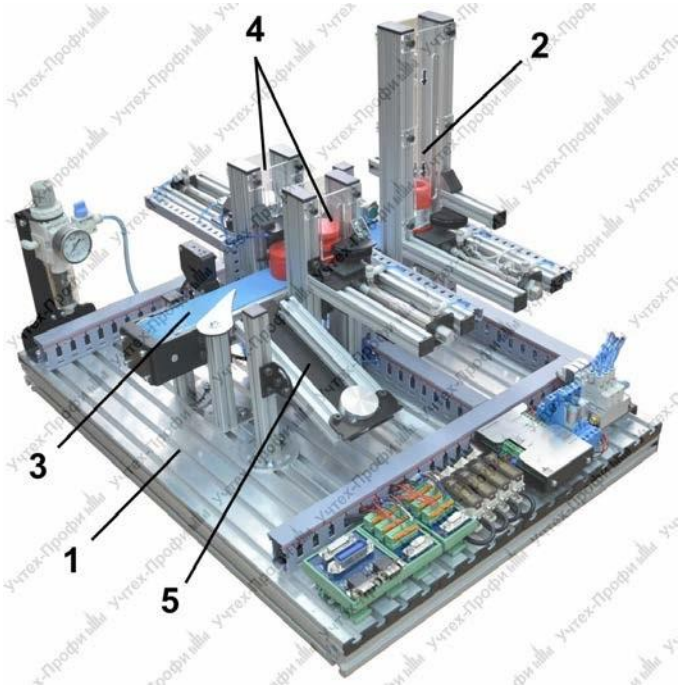


Рисунок 4 – Мехатронный модуль – сборка деталей

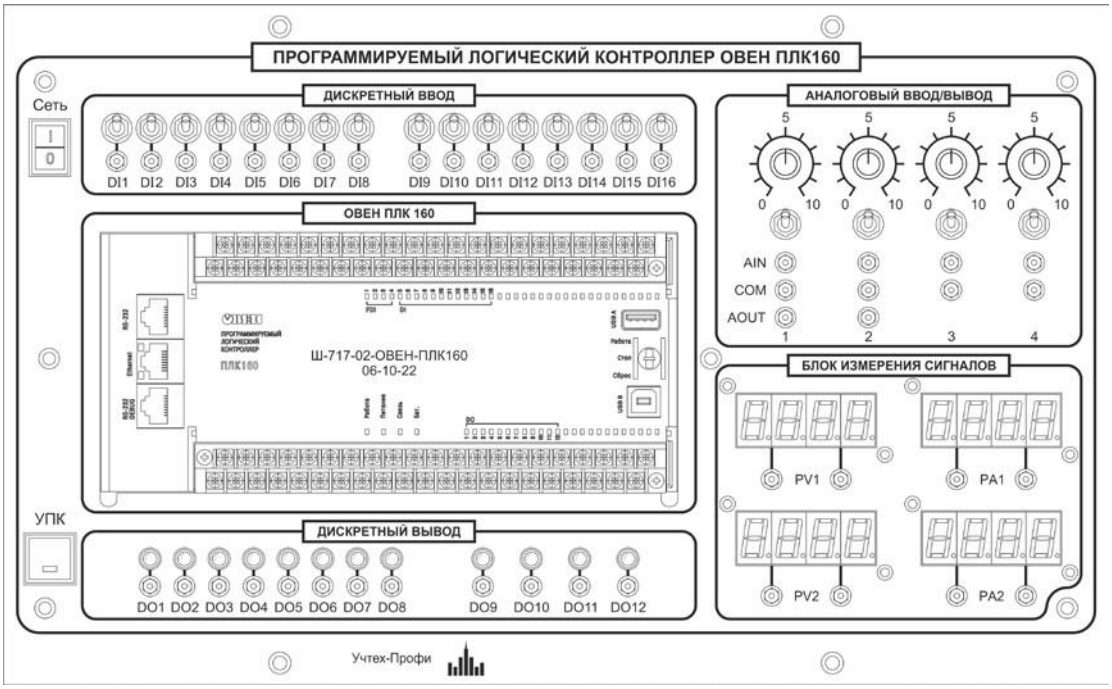


Рисунок 5 – Лабораторный моноблок «ОВЕН ПЛК 160»

Подключить мехатронный модуль (Терминал подключения к ПЛК *UT-CRP-M01*) к ПЛК (разъем X2, который находится на тыльной стороне кожуха моноблока «ОВЕН ПЛК 160»).

При подключении используется кабель 24Pin(M) – 24Pin(F).

В качестве датчика начального положения используется датчик типа материала заготовки – индуктивный концевой выключатель B3 типа – ВБИ-М18-34У-1111-3 (характеристики представлены в техническом описании стенда);

В качестве датчика конечного положения используется датчик наличия заготовки в зоне накопительного узла – диффузионный оптический датчик B4, типа – BEN300-DDT (характеристики представлены в техническом описании стенда);

Объект для перемещения – металлическая заготовка.

Ход работы

Выполнить подготовительные работы, установить металлическую деталь в начало конвейера и в соответствии со своим вариантом выполнить индивидуальное задание. Убедиться в правильности работы алгоритма.

Подготовить отчет о выполненной работе.

Таблица 3 – Варианты заданий

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Пуск автоматического режима управления	DI16	DI15	DI14	DI13
Останов автоматического режима управления	DI13	DI14	DI15	DI16
Индуктивный датчик B3 (правый)	DI4	DI4	DI4	DI4
Диффузионный датчик B4 (левый)	DI6	DI6	DI6	DI6
Пуск двигателя A1	DO2	DO2	DO2	DO2
Реверс двигателя A2	DO3	DO3	DO3	DO3
Задержка *t*, сек	3	4	2	5
Кол-во циклов *k*	3	2	4	5

Варианты заданий

При подготовке к лабораторной работе студент должен в соответствии с таблицей (см. Таблица 3) выбрать свой вариант задания и заполнить коммутационную таблицу подключения мехатронного объекта к ПЛК.

Для заданного варианта необходимо разработать алгоритм его решения и составить программу для контроллера ОВЕН ПЛК160.

Запустить программу в работу и убедиться в правильности ее работы. При наличии ошибок в работе устранить их и продемонстрировать преподавателю работу правильно функционирующей программы. Подготовить отчет о выполненной работе.

Вариант 1 и 2.

После включения тумблера «Пуск автоматического режима управления» программа переходит в режим ожидания заготовки правым датчиком. После появления заготовки в поле зрения датчика, лента конвейера перемещает её до левого датчика и ожидает t секунд. Затем конвейер возвращает заготовку в исходное место. Данный цикл повторяется k раз.

Вариант 3 и 4

После включения тумблера «Пуск автоматического режима управления» программа переходит в режим ожидания заготовки правым датчиком. После появления заготовки в поле зрения датчика, лента конвейера перемещает её до левого датчика и сразу же возвращает в исходное место. По истечении t секунд цикл повторяется. Данный цикл повторяется k раз.

2.3 Работа №3. Синтез и анализ алгоритмов управления мехатронной станцией сборки деталей

Цель работы

Ознакомиться с принципом работы дискретной системы управления, изучить назначение и технические характеристики датчиков, приобрести навыки разработки алгоритма управления, а также программирования данной системы с применением специализированного программного обеспечения.

Содержание работы

Дома, при подготовке к работе:

– Изучить назначение, технические характеристики логического моноблока ОВЕН ПЛК160, основные узлы и возможности лабораторного стенда;

– Изучить систему команд и принципы программирования ПЛК160;

– Изучить описание мехатронного модуля, ознакомиться с характеристиками всех его элементов;

– Выполнить синтез системы автоматизации согласно выданному варианту задания;

– Составить программу для ввода в контроллер;

В лаборатории:

– Закрепить полученные при подготовке к лабораторной работе знания на практике;

– Отладить мехатронный модуль в ручном режиме;

– С помощью разработанного алгоритма выполнить управление мехатронной станции.

Общие сведения

Лабораторную работу №3 рекомендуется выполнять после успешного завершения работ №1 и №2.

Для проведения данной лабораторной работы необходимо использовать лабораторный моноблок «ОВЕН ПЛК 160» (Рисунок 6), мехатронный модуль – сборка деталей (Рисунок 7), пульт ручного управления модулем (Рисунок 8).

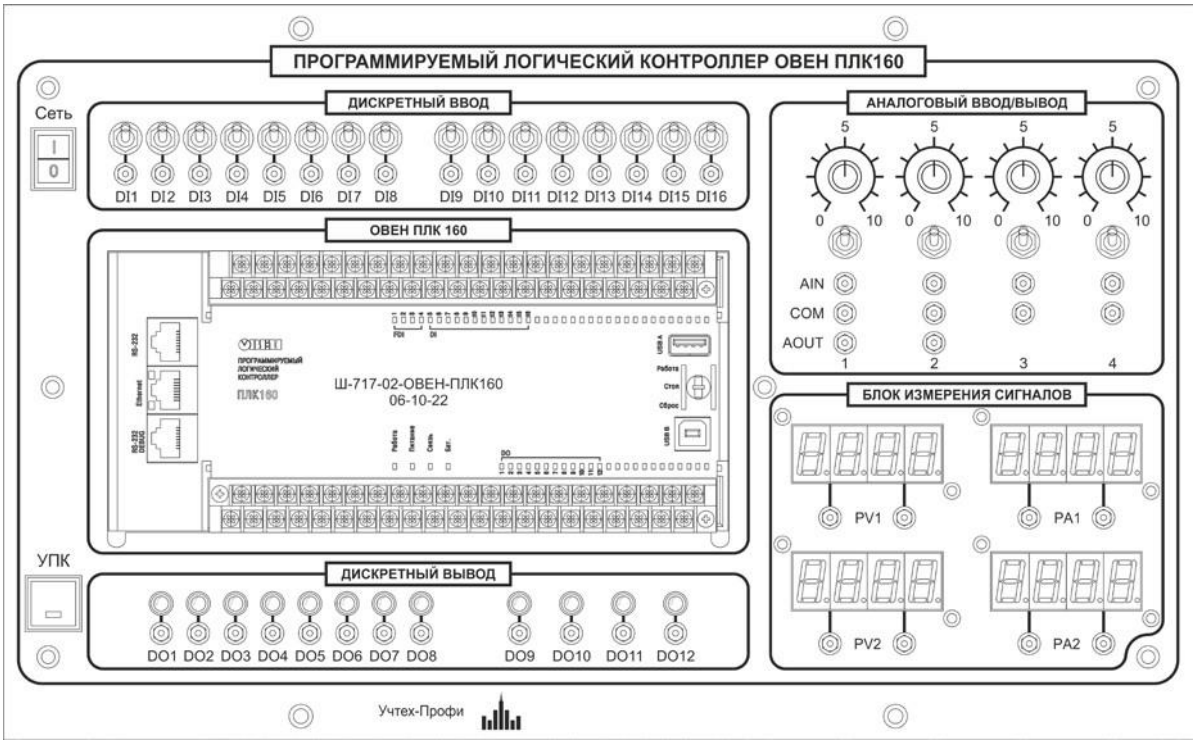


Рисунок 6 – Лабораторный моноблок «ОВЕН ПЛК 160»

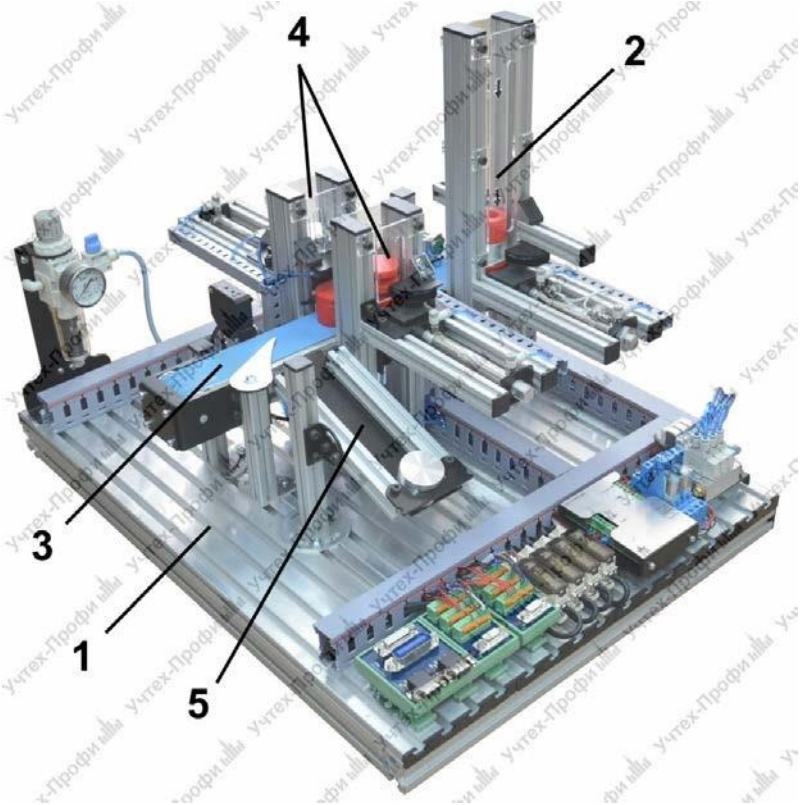


Рисунок 7 – Мехатронный модуль – сборка деталей

Рисунок 8 – Пульт ручного управления модулем

Для подключения мехатронного модуля (Терминал подключения к ПЛК *UT-CRP-M01*) к ПЛК используется разъем X2, который находится на тыльной стороне кожуха моноблока «ОВЕН ПЛК 160».

Для подключения мехатронного модуля (Терминал подключения к ПЛК *UT-CRP-M01*) к Пульту ручного управления используется разъем X1, который находится на тыльной стороне кожуха Пульта ручного управления.

При подключении используется кабель 24Pin(M) – 24Pin(F).

Порядок выполнения работы

Подключить питание к модулям, необходимым для выполнения лабораторной работы. После подключения питания следует выполнить отладку мехатронного модуля в ручном режиме, для этого:

– Подключить мехатронный модуль (Терминал подключения к ПЛК *UT-CRP-M01*) к Пульту ручного управления;

– Подавая сигналы с тумблеров пульта ручного управления (выходные сигналы) выполнить полный цикл в ручном режиме, убедиться в корректной работе датчиков в процессе работы (входные сигналы пульта ручного управления).

Полный цикл работы для мехатронного модуля сборка деталей: в узле выдачи заготовок находятся детали (металлические и пластмассовые красные/синие). При выдачи на конвейер металлической детали и при наличии крышки в узле накопления крышек 1 обеспечить выдачу крышки на деталь и ее последующий спуск в узел накопления деталей. При выдачи на конвейер

пластмассовой детали и при наличии крышки в узле накопления крышек 2 обеспечить выдачу крышки на деталь и ее последующий спуск в узел накопления деталей. При отсутствии необходимой крышки для детали – выполнить перемещение детали в узел накопления. Таблица датчиков и исполнительных элементов приведена в Приложении А технического описания стенда.

При успешном завершении полного цикла составить таблицу подключения устройств к терминалу подключения к ПЛК UT-CRP-M01 (Таблица 4).

Таблица 4 – Пример таблицы соответствия входных/выходных сигналов

Адрес	Комментарий
DI1	Датчик втянутого положения штока цилиндра УВЗ
….	….
DO1	Подача заготовки на ленту из магазина УВЗ
….	….

После проведения отладки мехатронного модуля в ручном режиме можно преступать к разработке алгоритма управления мехатронного модуля.

!В качестве примера будет рассмотрен процесс создания алгоритма управления ленточным конвейером. Разработка алгоритма для мехатронной станции – сборка деталей является самостоятельной задачей для подгруппы. (Вариации исполнения цикла работы уточняются у преподавателя).

Разработка алгоритма управления

Разработка алгоритма управления разделяется на следующие этапы:
– Словесное описание полного цикла работы;
– Разработка функциональной схемы процесса;
– Составление таблицы соответствия адресов;
– Составление логических уравнений;
– Составление программы на одном из языков программирования;
– Отладка и проверка проекта на работоспособность.

Словесное описание полного цикла работы

Конвейер начинает работать при появлении детали в области срабатывания щелевого оптического датчика. В зависимости от материала изделия следует

выполнить следующую сортировку – металлические детали поместить в приемный лоток с помощью электрического стоппера, пластмассовые детали – перемещаются до конца конвейера. Определение металлических деталей происходит с помощью, установленного вначале конвейера, индуктивного датчика.

Разработка функциональной схемы процесса

Функциональная схема системы представлена ниже (см. Рисунок 9).

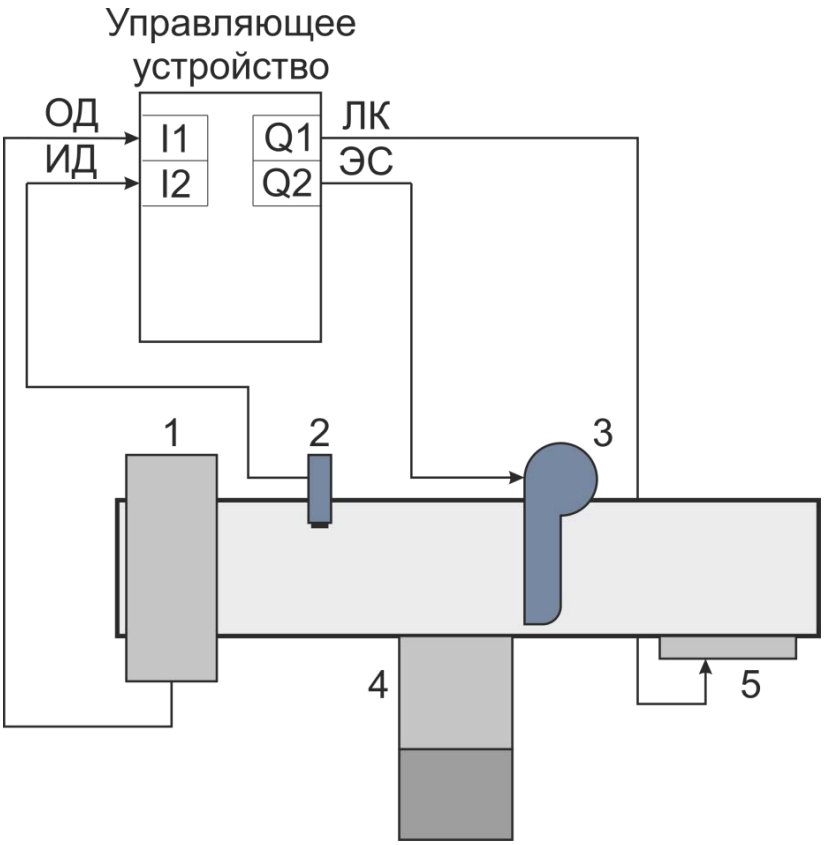


Рисунок 9 – Функциональная схема системы

На функциональной схеме изображается управляющее устройство и его выходные/выходные сигналы. Так же на схеме необходимо отобразить главные узлы технологического процесса, в данном случае: 1 – щелевой оптический датчик, 2 – индуктивный датчик, 3 – электрический стоппер, 4 – приемный лоток, 5 – двигатель ленточного конвейера.

Составление таблицы соответствия адресов

Для структурирования и удобности создания программы управления, необходимо составить таблицу соответствия адресов (Таблица 12).

Таблица 5 – Таблица соответствия адресов

Адрес переменной	Имя переменной	Комментарий
I1	ОД	Сигнал с щелевого оптического датчика о наличии заготовки
I2	ИД	Сигнал с индуктивного датчика о наличии металлического объекта на конвейере
Q1	ЛК	Управляющий сигнал на двигатель ленточного конвейера
Q2	ЭС	Управляющий сигнал на электрический стоппер

Составление логических уравнений

Для реализации системы управления технологическим процессом необходимо составить логические уравнения в адресах или в буквенных обозначениях переменных (по усмотрению преподавателя) которые обеспечат корректное выполнение полного цикла работы. В примере будут приведены уравнения в адресах управляющего устройства.

1. При наличии детали в области срабатывания щелевого оптического датчика конвейер начинает свое движение в течении следующих девяти секунд

$$Q1 = (I1 + Q1) \cdot \overline{Q1^{\uparrow 9c}}$$

↓ – Задержка сигнала по заднему фронту, ↑ – по переднему.

2. При наличии сигнала с индуктивного датчика подается управляющий сигнал на электрический стоппер для помещения металлической детали в накопительный лоток.

$$Q2 = (I2 + Q2) \cdot \overline{Q2^{\uparrow 9c}}$$

Составление программы на одном из языков программирования

После написания логических уравнений следует создать проект в программной среде CODESYS для ПЛК160. Подробное описание создания проекта представлено в методических указаниях часть 1 и написать программу для последующей загрузки ее в контроллер. Программа написанная на языке ST, для загрузки в управляющее устройство имеет следующий вид (Рисунок 10).

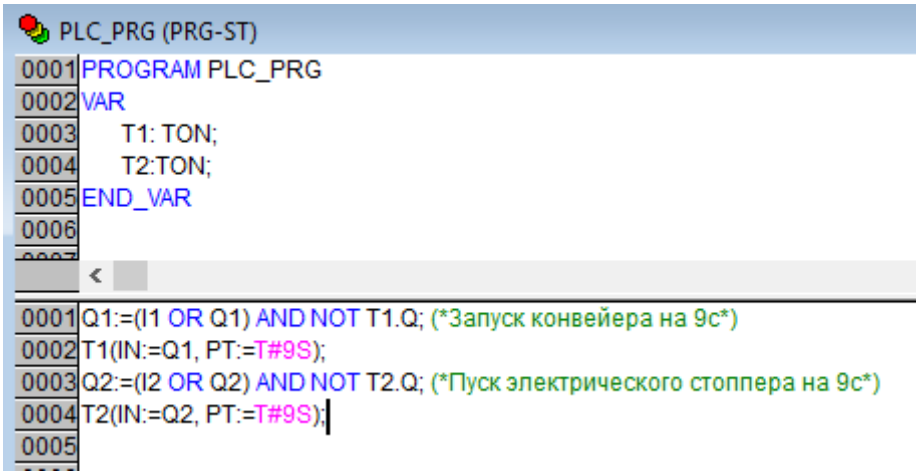


Рисунок 10 – Алгоритм на языке ST для реализации требуемого цикла работы

Отладка и проверка проекта на работоспособность

Последний этап разработки проекта автоматизации – отладка и проверка проекта на работоспособность. Провести тестирование системы в нескольких циклах, убедиться в её корректной работе, при наличии ошибок – провести корректировку проекта.

Задание

Подробно ознакомиться с разобранным примером создания алгоритма управления мехатронным объектом. Выполнить все этапы разработки алгоритма автоматизации технологического процесса для мехатронной станции – сборка деталей. Написать отчёт о проделанной работе.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.09.08 МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА В МЕХАТРОНИКЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

ЕКАТЕРИНБУРГ

ЛЕКЦИЯ 1. 4

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ КОМПЛЕКТОВ. 4

Микропроцессоры и микроконтроллеры 5

Микросхемы памяти 6

ЛЕКЦИЯ 2. 17

Программируемые логические интегральные схемы 17

Направление развития микроэлектронных компонентов вычислительных систем 21

ЛЕКЦИЯ 3. 21

АРХИТЕКТУРА И СТРУКТУРА МИКРОПРОЦЕССОРОВ. ЦИКЛ РАБОТЫ МИКРОПРОЦЕССОРА: ТИПЫ АДРЕСАЦИИ И СИСТЕМА КОМАНД. 21

Типы команд микропроцессоров. 21

Структурный параллелизм микропроцессоров 22

ЛЕКЦИЯ 4. 24

Структурные методы уменьшения времени доступа к памяти 24

CISC- и RISC- процессоры. 30

ЛЕКЦИЯ 5. 35

Методы ускорения переключения контекста процессора 35

Стандартизация архитектур микропроцессоров 36

ЛЕКЦИЯ 6. 38

ILP ПРОЦЕССОРЫ 38

Архитектура ILP- процессоров 38

Суперскалярные процессоры 40

VLIW-процессоры. 47

EPIC-процессоры. 48

Направления развития ILP архитектуры. 49

ЛЕКЦИЯ 7. 50

МУЛЬТИСКАЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ 50

Мультискалярная модель выполнения программы. 50

Мультискалярные программы. 54

Мультискалярные аппаратные средства. 56

Преимущества мультискалярной архитектуры. 57

ЛЕКЦИЯ 8. 58

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСА МП УСТРОЙСТВ С ВНЕШНИМИ УСТРОЙСТВАМИ И ПАМЯТЬЮ. ВСТРОЕННЫЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. 58

ЛЕКЦИЯ 9. 62

ОДНОКРИСТАЛЬНЫЕ МИКРО-ЭВМ. 62

Общие сведения об однокристальных микроЭВМ семейства МК48. 63

Однокристальные микро-ЭВМ семейства МК51. 65

Структура микроконтроллеров семейства MCS-x96. 74

Периферийные устройства микроконтроллеров семейства MCS-x96. 76

ЛЕКЦИЯ 10. 78

Преимущества регистр-регистровой архитектуры 78

Блок-схема микроконтроллера MCS-196. 80

Регистровый файл 83

Особенность организация памяти микроконтроллеров MCS-196 84

Возможности подключения внешней памяти и внешних устройств ввода/вывода 86

ЛЕКЦИЯ 11. 87

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ПРИВОДАХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ. ПРИМЕРЫ МП ПРИВОДОВ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ. 87

Пример МК-системы на основе ОМЭВМ семейства МК51. 87

Унифицированная структура силовой части статических преобразователей частоты для широкого класса приводов переменного тока. 89
Универсальный контроллер для встроенных применений 93
Выводы 97

ЛЕКЦИЯ 12. 98

МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. ТРАНСПЬЮТЕРЫ - ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ 98
Основные особенности транспьютеров 98
Архитектура и структура транспьютеров фирмы Inmos 99

ЛЕКЦИЯ 13. 109
Транспьютер T9000 109
Транспьютероподобные микропроцессоры серии "Квант" 110

Лекция 1.

Введение. Основные типы больших интегральных схем для микропроцессорных комплектов.

Особая роль в совершенствовании систем автоматического управления в настоящее время принадлежит микроэлектронике и микропроцессорной технике, использование которых в САУ обеспечивает не только улучшение точностных характеристик, повышение отказоустойчивости, обеспечение стабильности функционирования, но и придает САУ принципиально новых свойств, таких, как гибкость и перестраиваемость структуры, адаптивность, способность решать вычислительные и логические задачи, самоконтроль и т.д.

Использование микропроцессоров в САУ требует решения целого ряда задач, специфика которых обусловлена как распределенным управлением в реальном масштабе времени, так и цифровым характером обрабатываемой информации. В связи с этим требуется подготовка специалистов обладающими знаниями и опытом по разработке и эксплуатации микропроцессорных систем различного назначения: информационных, связанных, вычислительных, управляющих и т.д.

Изучение такой интенсивно развивающейся и наукоемкой предметной области, как микроэлектроника, и микропроцессорная техника в частности - задача весьма интересная и сложная, требующая постоянного совершенствования и пополнения получаемых знаний и знакомства со смежными научно-техническими областями. Для эффективного решения прикладных задач любой современный специалист, профессионально связанный с вычислительной техникой, должен иметь адекватное представление о состоянии и перспективах развития ее элементной базы.

Создание фирмой Intel первого микропроцессора в 1971 году положило начало эпохе компьютеризации. "Благодаря микропроцессорам компьютеры стали массовым, общедоступным продуктом", - заявил Тед Хофф (Ted Поп), один из изобретателей первого микропроцессора. Его имя, вместе с именами его коллег - Федерико Феджина (Federico Faggin) и Стена Мейзора (Stan Mazor), внесено в список лауреатов Национального зала славы изобретателей США, а само изобретение признано одним из величайших достижений XX века.

За чуть более чем четверть вековую историю микропроцессоры прошли поистине гигантский путь. Первый чип Intel 4004 работал на частоте 750 КГц, содержал 2300 транзисторов и стоил около $200. Производительность его оценивалась в 60 тыс. операций в секунду. На сегодняшний день рекордные показатели принадлежат микропроцессорам Pentium 4 и составляют: 3,46 ГГц, 55 млн. транзисторов, и около $650 соответственно.

Такое интенсивное развитие технологий в обществе, где основным предметом труда становится информация, является следствием растущего спроса на новые орудия труда - компьютеры. На сегодняшний день компьютеризация является одним из главных направлений научно-

технического прогресса и концентрированным его выражением. Количество и качество производимых в стране компьютеров, степень насыщенности вычислительной техникой самых разных отраслей становится одним из основных критериев ее экономического и военного потенциала.

В формируемом ежегодно в США группой экспертов перечне "критических технологий", охватывающем практически все направления производства, исследований и разработок, оказывающих влияние на военный и экономический статус страны, микроэлектронные технологии традиционно занимают первое место.

В микропроцессорах - наиболее сложных микроэлектронных устройствах - воплощены самые передовые достижения инженерной мысли. В условиях свойственной данной отрасли производства жесткой конкуренции и огромных капиталовложений, выпуск каждой новой модели микропроцессора - так или иначе связан с очередным научным, конструкторским, технологическим прорывом.

Современная элементная база - сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), характеризуется большим числом транзисторов на кристалле и относительно малым числом выводов у корпуса. Поэтому БИС адекватны построению логически законченных устройств.

Различные выполняемые функции и сферы применения обусловили специализацию СБИС. Достаточно условно их можно разделить на следующие классы:

1) СБИС с аппаратной реализацией алгоритмов обработки данных:

микропроцессоры универсальные и сигнальные, а также микроконтроллеры, включая интерфейсные схемы для образования мультипроцессорных систем;

2) микросхемы памяти: статические и динамические;

3) программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Микропроцессоры и микроконтроллеры

Универсальные микропроцессоры предназначаются для применения в вычислительных системах: персональных ЭВМ, рабочих станциях, а в последнее время и в массово-параллельных супер-ЭВМ. Основной их характеристикой является наличие развитых устройств для эффективной реализации операций с плавающей точкой над 64 разрядными и более длинными операндами. Предназначаются в основном для проведения научно-технических расчетов.

Цифровые сигнальные процессоры рассчитаны на обработку в реальном времени цифровых потоков, образованных путем оцифровывания аналоговых сигналов. Это обусловливает их сравнительно малую разрядность и преимущественно целочисленную обработку. Однако современные сигнальные процессоры способны проводить вычисления с плавающей точкой над 32 — 40-разрядными операндами. Кроме того, появился класс медийных процессоров,

представляющих собой законченные системы для обработки аудио- и видеоинформации.

Наибольшей специализацией и разнообразием функций обладают микроконтроллеры, используемые во встроенных системах управления, в том числе в бытовых приборах. Общее число типов кристаллов с различными системами команд превышает 500, и все они, в силу существования изделий с их использованием, имеют свою устойчивую долю рынка.

По прогнозам компаний-производителей дальнейшее развитие технологии производства микропроцессоров будет идти в направлении увеличения плотности транзисторов на кристалле, роста числа слоев металлизации и повышения тактовой частоты, наряду с уменьшением напряжения питания и удельной (на один транзистор) потребляемой электрической и выделяемой тепловой энергии.

Технологический предел линейных размеров транзисторов на кристалле, обусловленный физическими ограничениями, составляет около 0,05 мкм. На пути дальнейшей миниатюризации кроме физических ограничений имеются и экономические. Для каждого следующего поколения микросхем стоимость технологии удваивается (в 1986 г. Intel 80386 имел 250 тыс. транзисторов и выпускался на заводе стоимостью 200 млн. долларов. Завод, производящий микросхемы по технологии 0,25 мкм, стоил 10 млрд. долларов). Возрастают сроки изготовления микропроцессоров, так процессор Pentium производился за шесть месяцев, а более новый Pentium Pro - за девять. Во многом уже сейчас уровень технологии, используемой в массовом производстве, определяется экономическими соображениями. Увеличение числа слоев металлизации экспоненциально повышает процент брака при производстве, увеличение площади кристалла также приводит к снижению выхода годных кристаллов. Современный уровень технологии СБИС позволяет уверенно производить схемы с проектными нормами 0,13-0,09 мкм, 5-6 слоями металлизации, площадью кристалла менее 150 кв.мм и числом транзисторов порядка 55 млн. Смена поколений микропроцессоров происходит каждые 2 года. С каждым поколением линейные размеры элементов уменьшаются в 0,7 раза. В настоящее время ширина проводников составляет 0,13 мкм, а к 2004 г. достигнет 0,09 мкм. Тактовая частота будет составлять более 4 ГГц, что существенно усложнит проблему внутрикристальных, а еще более межкристальных соединений.

Основной технологической проблемой будет, по-видимому, отвод тепла от процессоров. Уже сейчас рассеиваемая мощность некоторых процессоров составляет до 70 Вт. И в дальнейшем, с увеличением тактовой частоты и числа транзисторов, ее рост будет продолжаться. Для снижения потребляемой энергии применяются разные технологические способы - уменьшение проектных норм и снижение питающего напряжения. Если мощность и впрямь будет расти, отвод тепла действительно станет непреодолимой преградой.

Микросхемы памяти

Как известно, производительность системы определяется скоростью работы

наиболее «медленного» её компонента. Поэтому для достижения оптимального быстродействия необходимо использовать сбалансированные конфигурации. Это означает, что наиболее важные узлы микропроцессорного устройства, к которым относится процессор, набор системной логики и подсистема памяти, должны обладать приблизительно равной производительностью.

Упрощённо работу микропроцессорного устройства можно представить как последовательность операций, совершаемых над различными данными. Задача процессора заключается в выполнении этих операций, а подсистемы памяти – в доставке данных и сохранении результатов. Взаимодействие процессора и памяти управляется чипсетом либо осуществляется напрямую.

Естественно, что для создания быстрого микропроцессорного устройства необходимо прежде всего обеспечить высокую скорость выполнения операций. Но даже самый совершенный процессор, работая в связке с памятью обладающей недостаточной пропускной способностью, окажется бесполезен, т.к. попросту будет простаивать в ожидании очередных порций информации. Поэтому для современных приложений большое значение имеет пропускная способность памяти, объём и сколько задержки в выдаче данных при каждом обращении (латентность).

Любой подсистеме памяти соответствует набор характеристик, которые более-менее полно будут описывать её возможности. К ним, в первую очередь относится частота работы памяти (частота передачи данных) и разрядность шины. Эти два показателя определяют теоретическую пропускную способность шины памяти, которая равна произведению разрядности и частоты. В действительности теоретическая пропускная способность не достижима из-за присутствия латентности (в среднем 60-80%).

В спецификациях модулей часто указывается время доступа (численно оно равно обратной величине рабочей частоты) и представляет собой длительность одного такта. Т.о., чем меньше время доступа, тем на большей частоте сможет работать модуль памяти.

В настоящее время в микропроцессорных устройствах широко применяется многоуровневая иерархическая архитектура памяти, где на верхнем уровне иерархии расположена более быстродействующая кэш-память, в которую в процессе вычислений помещаются интенсивно используемые фрагменты программного кода и обрабатываемых данных. В реальных системах используется до 3 уровней кэш-памяти. Разработчики используют более быстродействующую и, соответственно, более дорогую память в наиболее "ответственных" узлах системы.

Оперативная память (энергозависимая, т.е. теряющая запомненную информацию при снятии питания) случайного доступа RAM развивается уже довольно долгое время, и к настоящему моменту сформировались две основные её разновидности – статическая (SRAM) и динамическая (DRAM). Их отличие заключается в способе хранения данных. Динамическая память (память использует для запоминания бита информации состояния конденсатора "заряжен - не заряжен") требует постоянного обновления записанной

информации с периодом порядка десятков мсек, что сказывается на увеличении латентности. При этом она проста и дёшева в производстве. Статическая память, наоборот, достаточна дорога за счёт более сложного устройства ячеек (статические микросхемы памяти запоминают биты данных в триггерах, что требует 4-6 транзисторов для хранения бита), но обладает очень низкой латентностью. Тем не менее именно стоимость во многом определяет популярность продукции. Поэтому SRAM не получила большого распространения в модулях ОЗУ, зато активно применяется в процессорах в качестве кеша 2-го уровня.

В одной из первых разновидностей DRAM под названием EDO RAM применялся асинхронный режим доступа (процессор при считывании данных приостанавливает свою работу), что приводило к существенной потере производительности системы. Но несколько лет назад рынок стал заполняться новым типом DRAM – SDRAM с синхронным режимом работы.

Память SDRAM представляет собой набор элементарных ячеек, в каждой из которых может быть записан 1 бит информации. Они объединяются в матрицы, по номерам строк и столбцов которых производится адресация. Физически каждая ячейка DRAM состоит из конденсатора и транзистора. И в этом кроется основной недостаток DRAM. Дело в том, что конденсатор не может самостоятельно поддерживать электрический заряд, поэтому для функционирования ячейку необходимо периодически подзаряжать. Эта процедура должна повторяться и после каждой операции чтения, что в определенных случаях существенно увеличивает латентность.

Поиск ячейки в матрице осуществляется с помощью двух сигналов – RAS и CAS. Первый несёт информацию о номере строки, второй – о номере столбца.

Операцию считывания данных из ячейки можно разбить на несколько элементарных стадий:

пересылка запроса процессора набору системной логики (1 такт системной шины);

перенаправление запроса на банк памяти, соответствующий запрашиваемому адресу (1 цикл работы ОЗУ);

поиск необходимой строки в матрице (2-3 цикла) – “RAS-to-CAS delay” или “RAS-to-CAS latency”;

поиск необходимого столбца в найденной строке, т.е. ячейке, располагающейся на их пересечении (2-3 цикла) – CAS-латентность;

непосредственно считывание и помещение информации в выходной буфер (1 цикл);

передача считанной информации набору системной логики (1 цикл);

перенаправление её процессору (1 такт системной шины).

Т.о., простая на первый взгляд операция растягивается на 9-11 тактов системной шины и соответственно 45—55 тактов процессора при множителе 5. Но столь большая задержка имеет место лишь при считывании первых 8

байтов. Тогда как другие ячейки из той же строки будут доступны уже по истечении лишь времени CAS-латентности. Если же происходит последовательное чтение ячеек, то задержки будут отсутствовать вовсе. С другой стороны, возможен вариант, когда первая и вторая считываемые ячейки располагаются в одном банке, но на разных строках. В этом случае к выше перечисленным задержкам добавится ещё одна – “Precharge delay”, необходимая на подзарядку первой ячейки после операции считывания (2-3 цикла).

Три выше упомянутых параметра - CAS-латентность, RAS-to-CAS-латентность и “Precharge delay” – образуют набор таймингов модуля памяти.

Общая латентность системы складывается не только из задержек выдачи данных ОЗУ, но и времени их пересылки процессору.

Наименьшие потери при пересылке данных будут иметь место при синхронном обмене информацией, т.е. когда частоты системной шины и шины памяти совпадают. При использовании асинхронного режима появляется дополнительная латентность, вызванная необходимостью согласования двух шин.

DDR SDRAM является эволюционным шагом в развитии обычной памяти SDRAM. Основное отличие между ними заключается в способе передачи данных. В DDR SDRAM используется так называемая DDR (Double Data Rate) технология, при которой для кодирования информации используются как передний, так и задний фронт тактового импульса. В результате при той же частоте FSB эффективная частота шины памяти удваивается. При этом на удвоенной частоте передаются только данные, а пересылка адресов осуществляется на основной частоте. В остальном модули SDRAM и DDR SDRAM мало отличаются друг от друга.

Подобная схема передачи данных весьма чувствительна даже к самой незначительной задержке тактового сигнала, поэтому, в отличие от SDRAM, для синхронизации передачи данных помимо сигнала тактового генератора применяется дополнительный сигнал DQS. Этот сигнал передается параллельно с тактовым сигналом и корректирует процесс передачи данных для каждой линии шины данных. Для выдачи сигнала DQS, означающего доступность данных на выходе, используется специальный цикл с фиксированной задержкой DLL (Delay Locked Loop).

Для точной синхронизации сигналов DQS и передачи данных (DQ) соответствующие проводники имеют одинаковую длину и емкость. Таким образом, колебания напряжения и температуры одинаково отражаются на обоих сигналах, что обеспечивает отсутствие нарушения синхронизации между контроллером памяти и микросхемами модулей памяти. Дополнительный контроль синхронизации передачи данных обеспечивает более надежную и высокую скорость передачи данных, чем при использовании только сигнала тактового генератора. Чтение и запись данных производится не в соответствии с тактовым сигналом, а синхронизируется сигнал DQS (рис. 1).

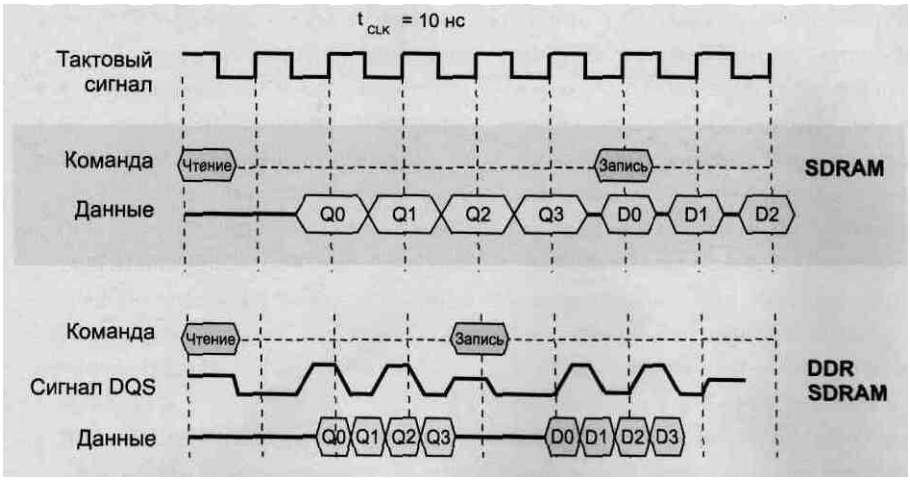


Рис. 1. Временная диаграмма DDR SDRAM

Архитектура микросхемы состоит из четырех независимых банков (рис. 2).

При тактовой частоте 100 и 133 МГц пропускная способность шины памяти DDR SDRAM составляет соответственно 1,6 и 2,1 Гбайт/с.

В настоящее время тактовая частота шины памяти с поддержкой DDR SDRAM составляет 100, 133, 166, 200 МГц, соответствующие микросхемы памяти называются соответственно DDR200, DDR266, DDR333 и DDR400, а модули памяти PC1600, PC2100, PC2700 и PC3200 (в названии модулей указана фактическая пропускная способности шины памяти в Гб/сек).

Дальнейшим развитием технологии DDR SDRAM является технология DDR II. Появление этого типа памяти ожидается в 2003 году. В отличие от DDR SDRAM в DDR П за один такт по каждой линии будет перерваться не 2, а 4 бита информации (при 64-разрядной шине — 32 байта), что вдвое увеличит пропускную способность шины памяти. Естественно, данный подход требует более совершенной системы синхронизации. Рабочие напряжения DDR П уменьшены с 2,5 до 1,8 В. Микросхемы выполнены в корпусе микро-BGA.

Первоначально модули DDR-II будут работать на эффективных частотах 400, 533 и 667 Мгц, что позволит говорить о теоретической пропускной способности 3,2, 4,2 и 5,3 Гб/сек.

Для уменьшения времени доступа к данным планируется использовать технологию Virtual Channel (разработанную компанией NEC), а также кэширование информации.

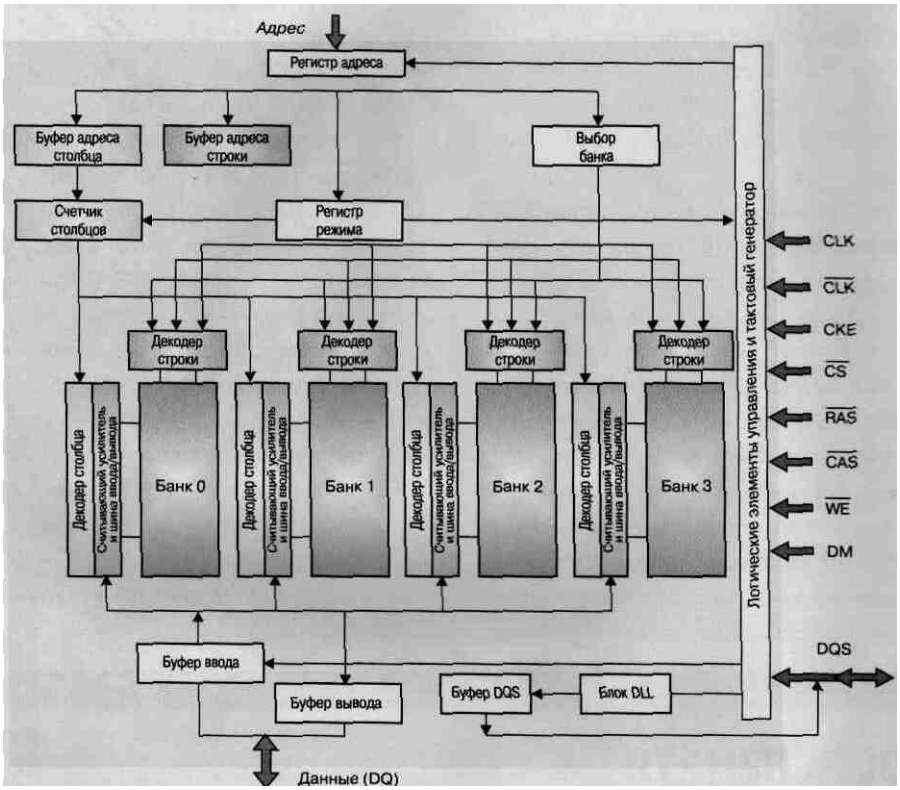


Рис. 2. Структурная схема DDR SDRAM

Следующий большой шаг в развитии DDR SDRAM должен будет произойти лишь 2007 году, когда планируется появление памяти следующего стандарта DDR-III. По предварительным данным, стартовая эффективная частота модулей составит 800 Мгц, которая впоследствии вырастет до 1,5 Ггц. Планируется дальнейшее понижение напряжения питания до 1,2 В. Будут приняты специальные меры по борьбе с возникающими на высоких частотах помехами.

В ближайшее время может появиться ещё один тип ОЗУ – QBM SDRAM. QBM (Quad Band Memory) фактически представляет собой слегка усовершенствованную память DDR, но с увеличенной вдвое теоретической пропускной способностью. При производстве модулей QBM используются те же самые чипы DDR SDRAM. Однако циклы работы половины из них смещены на четверть такта. В результате ширина шины как бы увеличивается до 128 бит, а модуль как бы превращается в двухканальный (для PC2100 пропускная способность составит 4,2 Гб/сек).

Повышение пропускной способности шины памяти может осуществляться либо за счёт увеличения тактовой частоты шины, либо её разрядности. К сожалению, внутреннее устройство SDRAM не позволяет существенно продвинуться в этой области. Дело в том, что каждая разрядная линия шины памяти при распространении по ней переменного сигнала неизбежно излучает электромагнитные волны. Чем выше частота сигнала и плотность расположения линий, тем сильнее влияние излучаемых помех на сигнал. Поэтому у памяти SDRAM существует предел пропускной способности. Чтобы как можно ближе к нему подобраться, можно увеличивать частоту шины при неизменном количестве разрядов. Но есть и альтернативное решение – заметно сократить количество линий в шине, что позволит существенно увеличить

частоты. Именно эта идея и была реализована в памяти Rambus DRAM.

Разрядность шины большинства модулей RDRAM составляет 16 бит, а рабочая частота 400 МГц. К тому же в памяти RDRAM используется DDR-технология. Поэтому эффективная частота шины равняется 800 Мгц. Модули RDRAM должны устанавливаться парами, т.к. предназначены для работы в двухканальной конфигурации. Т.о., суммарная теоретическая пропускная способность – 3,2 Гб/сек.

Несмотря на принципиально иной подход к организации памяти, ячейки RDRAM не отличаются от ячеек SDRAM – это та же совокупность транзистора и конденсатора. Тем не менее для реализации RDRAM потребовалось перестроить инфраструктуру модулей. Если у SDRAM один банк состоит из 8 чипов, то у RDRAM, наоборот, каждый чип является независимым и сам может состоять из нескольких десятков банков. В результате такого «распараллеливания» RDRAM способна производить гораздо больше, чем SDRAM, операций чтения за один и тот же промежуток времени. Причём латентность при считывании окажется незначительной как раз из-за того, что многие банки памяти могут постоянно держаться открытыми. С помощью подобных технических решений достигается высокая эффективность использования шины памяти – более 90%.

Обратная сторона медали заключается в усложнении модулей. В отличии от SDRAM чипы RDRAM необходимо оснащать управляющей логикой, что увеличивает их площадь, а высокая частота функционирования приводит к значительному тепловыделению. Более того, сложность в проектировании и производстве определила высокую конечную стоимость, что и сказалось в итоге на отсутствии популярности данного типа памяти среди массового потребителя.

Но у RDRAM есть ещё один серьёзный недостаток – высокая латентность при выдаче первых байтов информации, которая может в 2-3 раза превышать соответствующую латентность памяти SDRAM. В результате RDRAM показывает рекордную пропускную способность при считывании потоковых данных, располагающихся друг за другом. Но в задачах с хаотическим характером обращения к памяти эффективность использования шины памяти резко снижается.

Вся подсистема памяти Rambus состоит их следующих компонентов (рис. 3):

• контроллера памяти (RMC — Rambus Memory Controller);

• Rambus-канала (RC — Rambus Channel);

• генератора тактовых импульсов (DRCG — Direct Rambus Clock Generator);

• микросхемы памяти RDRAM (Rambus DRAM), которая установлена на модулях памяти RIMM (Rambus In-line Memory Module).

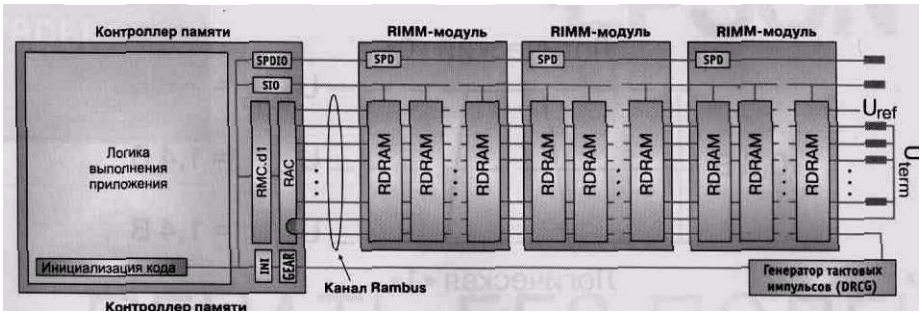


Рис.3 Подсистема памяти RambusDRAM.

Rambus-канал

Rambus-канал (рис. 4) предназначен для осуществления электрической связи между контроллером памяти и микросхемами RDRAM. Физически он представляет собой шину, которая состоит из 30 проводников, разведенных строго параллельно на материнской плате.

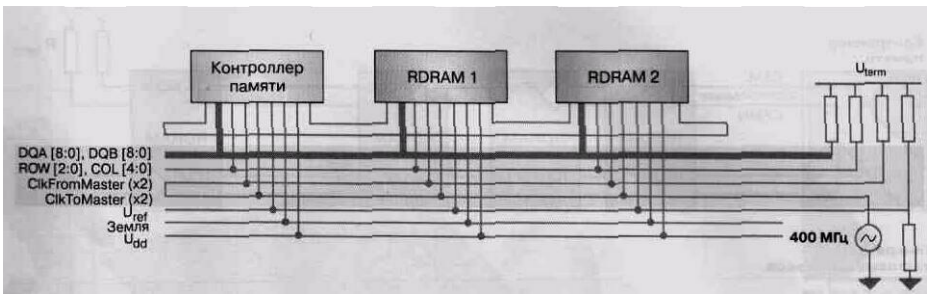


Рис.4 Схема Rambus-канала

Сигналы в Rambus-канале передаются в соответствии с высокоскоростным протоколом сигналов RSL (Rambus Signal Levels). Согласно данному протоколу осуществляется низковольтовый перенос номинальных напряжений логического «0» и логической «1» с разностью 800 мВ (рис. 5).

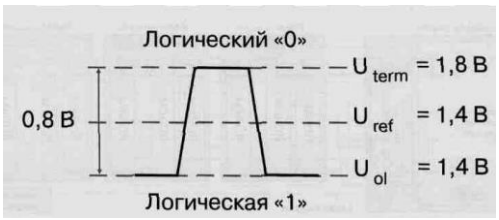


Рис.5

Генератор тактовых импульсов

Rambus-канал является синхронным. Команды и данные передаются параллельно по переднему и заднему фронту синхроимпульсов, создаваемых генератором тактовых импульсов (рис.6).

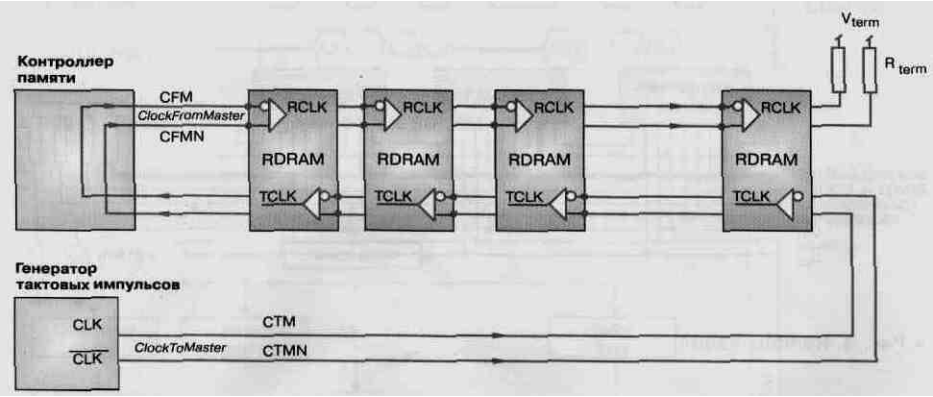


Рис.6 Схема генератора тактовых импульсов

Конструктивно генератор тактовых импульсов может быть интегрирован в контроллер памяти или установлен в виде отдельной микросхемы (в 24-контактном корпусе типа SSOP).

Передача данных

Данные и служебные биты передаются по каждому фронту тактового сигнала с частотой 800 МГц (1,25 нс), что соответствует скорости передачи 800 Мбит/с на линию. Таким образом, пропускная способность шины составляет 1,6 Гбайт/с. Передача данных осуществляется только между контроллером и микросхемами памяти, обмен только между микросхемами невозможен.

Вся информация передается по Rambus-каналу пакетами (пакеты строк, столбцов и данных). Каждый пакет передается за четы ре такта (10 нс).

Конвейеризация

Операция чтения/записи в Rambus-канале могут быть конвейеризированы. В этом случае время задержки первого пакета составляет 50 нс, далее операции чтения/записи осуществляются практически непрерывно.

При последовательном чередовании двух операций записи и двух операций чтения, адресованных к одной микросхеме, пропускная способность канала составляет 86% от предельной, а при адресации к разным микросхемам — 95%.

Контроллер памяти

Контроллер памяти Rambus осуществляет управление системой памяти RDRAM и основные функции мультиплексирования/демультиплексирования при преобразовании данных, передающихся по 16-разрядной последовательной шине Rambus-канала в 64-разрядную системную шину. Контроллер принадлежит к семейству специализированных интегрированных микросхем ASIC (Application Specific Integrated Circuits). Данные микросхемы способны объединить в себе функции, обычно реализуемые целым набором микросхем, но при этом оказываются существенно быстрее, компактнее и дешевле.

Основным элементом контроллера памяти Rambus (RMC — Rambus Memory Controller) является специализированная микросхема библиотеки макроядра (RAC — Rambus ASIC Cell). Здесь происходит преобразование высокоскоростных сигналов RSL канала Rambus в низкоскоростные сигналы CMOS-уровня.

Контроллер памяти осуществляет взаимодействие подсистемы памяти Rambus с другими компонентами персонального компьютера, взаимодействующими с памятью (центральным процессором, жестким диском, видеосистемой и др.).

Структурная схема микросхемы RDRAM представлена на рис. 7.

Внутреннее ядро RDRAM имеет 128/144-разрядную шину, работающую на частоте 100 МГц - 1/8 тактовой частоты Rambus-канала. Таким образом, каждые 10 нс в ядро (или из ядра) может быть передано 16 байт данных.

Компания Rambus планирует эволюционное развитие существующей линейки модулей RDRAM. В 2003-2004 годах ожидается выпуск как 32-, так и 64-битных чипов, работающих на эффективных частотах 1,2 и 1,33 Ггц (10,6 Гб/сек).

Параллельно Rambus представила новый сигнальный интерфейс памяти Yellowstone. Для реализации данного интерфейса планируется использовать три разработки: дифференциальный протокол передачи запросов, технологию ODR (Octal Data Rate), позволяющую за один такт передавать 8 бит данных, и технологию упрощающую привязку данных к тактовой частоте. По заявлению компании Rambus, технология Yellowstone позволит достичь тактовых частот 6,4 Ггц и пропускной способности до 100 Гб/сек.

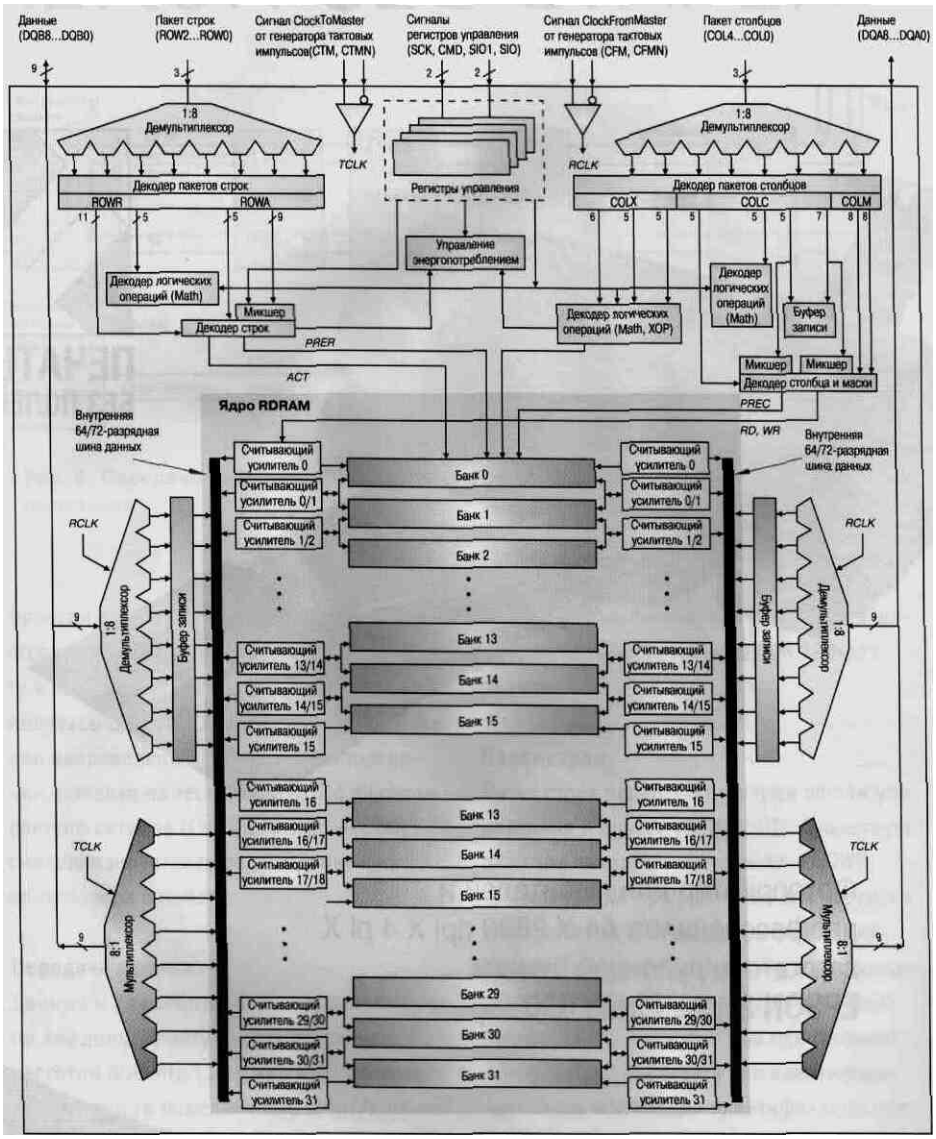


Рис.7 Структурная схема RDRAM

Год	Тип памяти	Частота шины, МГц	Разрядность шины памяти, бит	Максимальная пропускная способность, Мбайт/с	Пропускная способность линии памяти, Мбит/с/контакт
1987	FPM DRAM	25, 33	32	100, 132	24; 32
1995	EDO DRAM	40, 50	32	160, 200	40; 50
1997	PC 66 SDRAM	66	64	528	65,6
1998	PC 100 SDRAM	100	64	800	100
1999/2000	PC 133 SDRAM	133	64	1064	133
1999/2000	Direct RDRAM (один канал)	400, 600, 800*	16	800, 1200, 1600	400; 600; 800
2000	DDR200 SDRAM	200*	64	1600	200
2000	DDR266 SDRAM	266*	64	2100	256
2001	Direct RDRAM (два канала)	400, 600, 800*	16	1600, 2400, 3200	400; 600; 800
2001	Direct RDRAM	1066*	16	2132	1066
2001	DDR300	300*	64	2400	300
2002	DDR333	333*	64	2700	337
2003	DDR II	200; 400*	64	3200, 6400	400; 800

Лекция 2.

Программируемые логические интегральные схемы

ПЛИС - это матричные большие интегральные схемы, позволяющие программно скомпоновать в одном корпусе электронную схему, эквивалентную схеме, включающей от нескольких десятков до нескольких сотен ИС стандартной логики. По сравнению с другими микроэлектронными технологиями, в том числе базовыми матричными кристаллами (БМК), технология ПЛИС обеспечивает рекордно короткий проектно-технологический цикл (от нескольких часов до нескольких дней), минимальные затраты на проектирование, максимальную гибкость при необходимости модификации аппаратуры.

ПЛИС содержат программируемую матрицу элементов логического И, программируемую или фиксируемую матрицу элементов логического ИЛИ и так называемые макро ячейки. Макро ячейки как правило включают в себя триггер, тристабильный буфер и вентиль исключающее ИЛИ, управляющий уровнем активности сигнала. Размерность матриц и конфигурация макро ячеек определяют степень интеграции и логическую мощность ПЛИС. В сочетании с разнообразными обратными связями перечисленные элементы формируют завершённую автоматную структуру, ориентированную на реализацию как комбинационных (дешифраторов, мультиплексоров, сумматоров), так и последовательных схем (управляющих автоматов, контроллеров, счётчиков).

В ПЛИС заложены возможности, которые позволяют превратить её в ИС с любой функцией цифровой логики. Проектирование сводится к выявлению программируемых элементов (перемычек или запоминающих ячеек), после удаления которых в структуре схемы остаются только связи, которые необходимы для выполнения требуемых функций. На практике эта задача весьма не простая, т.к. современные ПЛИС содержат в среднем несколько десятков тысяч перемычек. Поэтому для проектирования применяют САПР ПЛИС. Каждая компания - производитель ПЛИС разрабатывает и выпускает свою САПР, обеспечивающую реализацию всех этапов проектирования для каждого типа программируемой логики. Благодаря различным САПР, а также структурным и технологическим особенностям, ПЛИС представляют технологию рекордно-короткого цикла разработки РЭА.

Если за рубежом ПЛИС уже заняли заметное место в арсенале разработчика РЭА, то в России эта технология только начинает по-настоящему развиваться.

В каких случаях целесообразно применять ПЛИС?

При разработке оригинальной аппаратуры, а также для замены обычных ИС. При этом значительно уменьшаются размеры устройства, снижается потребляемая мощность и повышается надёжность. (Наиболее эффективно использование ПЛИС в изделиях, требующих нестандартных схемотехнических решений. В этих случаях ПЛИС даже средней степени интеграции (24 вывода) заменяет, как правило, до 10-15 обычных ИС.)

При необходимости резко сократить сроки и затраты на проектирование, а также повысить возможность модификации и отладки аппаратуры. Поэтому ПЛИС широко применяется в стендовом оборудовании, на этапах разработки и производства опытной партии новых изделий, а также для эмуляции схем, подлежащих последующей реализации на другой элементной базе.

Отдельная область применения ПЛИС – проектирование на их основе устройств для защиты программного обеспечения и аппаратуры от несанкционированного доступа и копирования. ПЛИС обладают такой технологической особенностью, как «бит секретности», после программирования которого схема становится недоступной для чтения. Обычно применение 1-2 ПЛИС средней степени интеграции оказывается вполне достаточной для надёжной защиты информации.

Наиболее широко ПЛИС используются в микропроцессорной технике. На их основе разрабатываются контроллеры, адресные дешифраторы, логика обрамления микропроцессоров, формирователи управляющих сигналов и др. На ПЛИС часто изготавливают микропрограммные автоматы и другие специализированные устройства (цифровые фильтры, схемы обработки сигналов и изображений, процессоры быстрого преобразования Фурье, аппаратура уплотнения телефонных сигналов и т.д.).

Применение ПЛИС становится актуальным ещё и потому, что у разработчика зачастую нет необходимых стандартных микросхем.

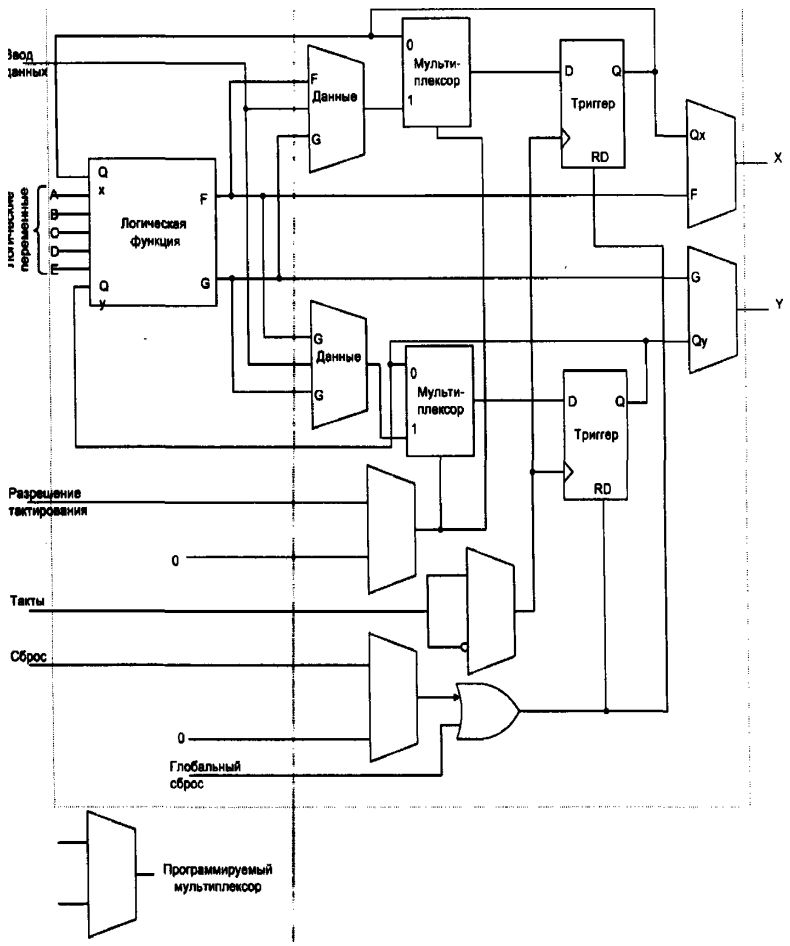


Рис. 8. Логический блок ПЛИС

В настоящее время на мировом рынке можно отметить несколько основных компаний-производителей — ПЛИС-XILINX, ALTERA, LATTICE, AT&T, INTEL, выпускающих микросхемы с архитектурой EPLD (EPROM technology bazed complex Programmable Logic Device) - многократно программируемые, и FPGA (Field Programmable Gate Array) - многократно реконфигурируемые.

В качестве памяти для хранения конфигурации в ПЛИС EPLD используется ППЗУ с ультрафиолетовым стиранием, а у ПЛИС FPGA - статическое ОЗУ.

Микросхема FPGA представляет собой матрицу логических ячеек, соединенных между собой логическими ключами. Содержащаяся в микросхемах FPGA статическая память, будучи заполненной определенной битовой последовательностью, воздействует на логические ячейки и соединяющие их ключи, позволяя получить требуемые электрические схемы (регистры, счетчики, логические схемы и т.д., соединенные друг с другом в требуемом порядке). Каждая микросхема FPGA имеет также вход для записи битовой последовательности, заполняющей статическую память, а также элементы "вход/выход" для связи с другими микросхемами.

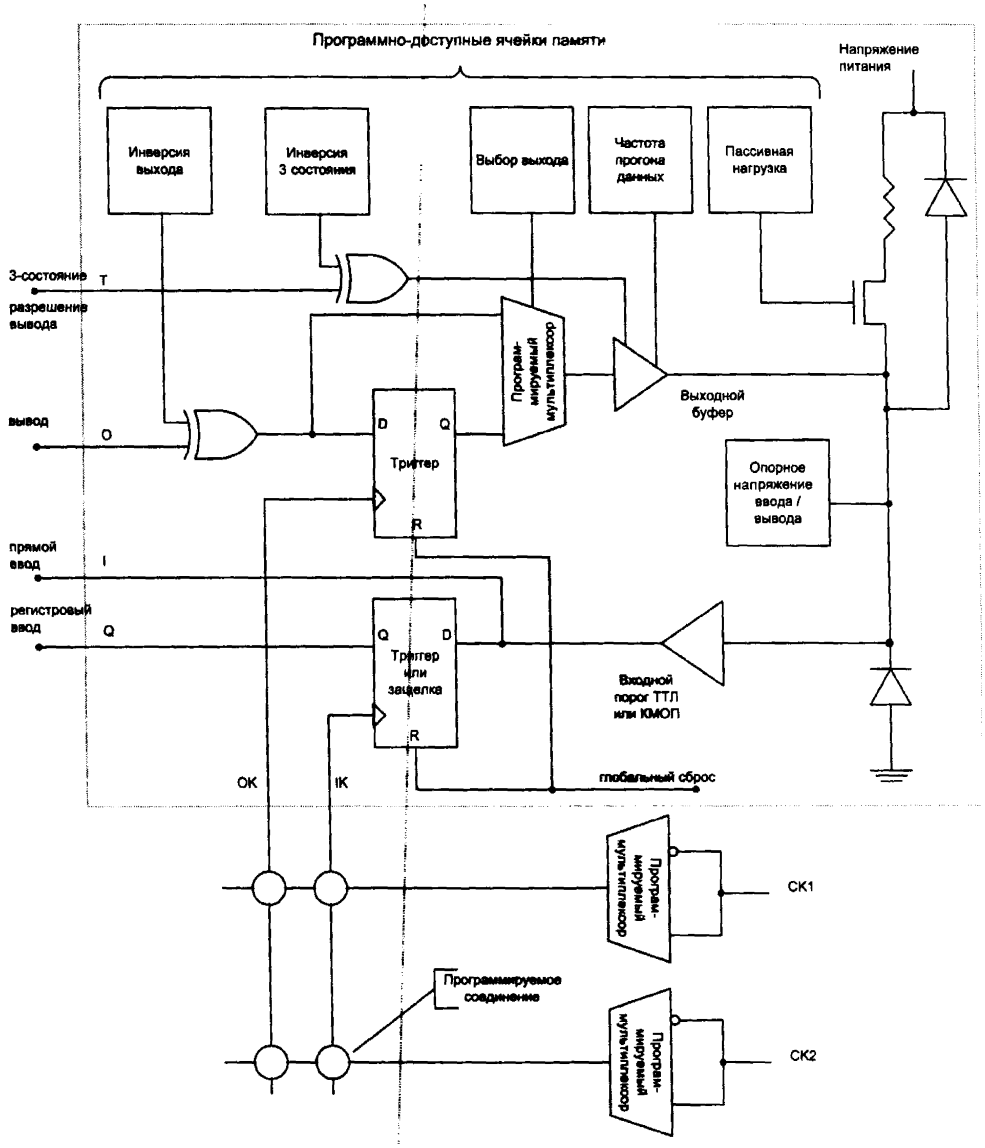


Рис. 9. Блок ввода/вывода ПЛИС

Существует крайняя точка зрения, что со временем ПЛИС вытеснят серийные микропроцессоры, так как пользователь сможет реализовать требуемую ему систему программными средствами, учитывая всю специфику своего приложения.

Таким образом, на основе одной или нескольких микросхем FPGA можно создать реконфигурируемый процессор, обладающий преимуществами спецпроцессора на "жесткой" логике, но способного путем изменения содержимого статической памяти решать любые задачи, подобно универсальному процессору.

Логический блок - один из базовых элементов архитектуры ПЛИС FPGA, может выполнять любую логическую функцию в соответствии с заданной битовой последовательностью (рис.8). Изменять выполняемую функцию можно неограниченное количество раз путем загрузки другой битовой последовательности.

Блок ввода/вывода (рис.9), так же как и логический блок, может быть настроен на выполнение любого электрического соединения реализованной внутри ПЛИС схемы с внешним миром через соответствующий контакт

микросхемы.

Направление развития микроэлектронных компонентов вычислительных систем

Для создания высокоэффективных вычислительных систем важно интегрировать на кристалле как можно больше функций по обработке и хранению данных, а также интерфейс с пользователем и другими вычислительными системами.

Стремление к интеграции совокупности функций обусловлено рядом факторов. Во-первых, при однокристальной реализации пропускная способность интерфейсов между подсистемами обработки и хранения данных не ограничивается количеством выводов корпуса кристалла и может достигать требуемого значения. Во-вторых, упрощается системная плата, на которую монтируется кристалл, уменьшается объем монтажных работ, повышаются показатели надежности и производительности вычислительной системы и уменьшается ее стоимость. В-третьих, снижаются требования к количеству выводов корпуса кристалла, так как минимизируется интерфейс с другими компонентами вычислительной системы, например с устройствами отображения информации. И, наконец, в четвертых, реализуются возможности миллионов транзисторов, которые могут быть размещены на кристалле. Эти транзисторы можно использовать как для построения специализированной системы, состоящей из совокупности проблемно-ориентированных блоков, так и для создания параллельных систем из нескольких процессоров.

Наряду с созданием однокристальных систем существует проблема организации быстрых интерфейсов между микросхемами в многокристальных системах, например между микросхемами процессора и памяти. В Pentium Pro эта проблема решается путем размещения в одном корпусе двух кристаллов: собственно микропроцессора и кэш-памяти второго уровня. Другое возможное решение этой проблемы заключается в создании многокристальных микросборок, в которых бескорпусные СБИС монтируются на кремниевой подложке с нанесенными, возможно несколькими, слоями межкристальных соединений.

Лекция 3.

Архитектура и структура микропроцессоров. Цикл работы микропроцессора: типы адресации и система команд.

Типы команд микропроцессоров.

В ходе эволюционного развития архитектур процессоров в состав системы команд вводились и, в силу преемственности программного обеспечения, закреплялись сложные команды, которые по мнению разработчиков соответствовали решаемым задачам. Мерой этого соответствия чаще всего был объем двоичного кода программы, так как минимизация длины программы

была равнозначна минимизации времени исполнения. Команды бывают разных типов: "регистр, регистр -> регистр", "память, память -> память", "регистр -> память" и др. Сложные команды модифицируют содержимое групп регистров и ячеек памяти, и для их реализации при приемлемых затратах оборудования, как правило, применяется микропрограммирование.

Команды называются скалярными, если входные операнды и результат являются числами (скалярами).

Команды называются векторными, если входные операнды и, возможно, результат являются вектором (массивом) чисел, а для преобразования данных массива (вектора) используется одна векторная команда. Примером векторной команды служит команда, при выполнении которой умножаются два очередных элемента двух массивов, далее произведение суммируется с содержимым некоторого заданного регистра, после чего модифицируются адреса памяти для доступа к двум очередным элементам массивов. Указанная последовательность действий повторяется заданное число раз по счетчику, определенному в теле команды.

Само появление векторных команд обусловлено стремлением ускорить обработку массивов данных за счет исключения затрат времени на выборку и дешифрацию команд обработки, одинаковых для всех компонент входных массивов.

Однако использование векторных команд требует подготовки программистом векторизованного кода программ, что, вообще говоря, эквивалентно разработке параллельных программ.

При сохранении последовательных программ для ускорения обработки применяются суперскалярные процессоры, в которых за счет параллельной работы функциональных устройств процессора в одном такте вырабатывается несколько скалярных результатов.

Структурный параллелизм микропроцессоров

Повышение производительности микропроцессоров достигается за счет увеличения тактовой частоты, совершенствования параллельной и конвейерной обработки данных, а также уменьшения времени доступа к памяти. Современные микропроцессоры содержат десять и более обрабатывающих устройств, каждое из которых представляет собой конвейер. Эффективная загрузка параллельно функционирующих конвейеров обеспечивается либо аппаратурой процессора, либо компилятором, на вход которого поступают программы на традиционном последовательном языке программирования, либо совместно аппаратурой и компилятором.

В компиляторах используется изощренная техника извлечения параллелизма из последовательных программ. Аппаратура микропроцессоров ориентирована на выделение более простых форм параллелизма, в том числе естественного. Стремление использовать присущий большинству программ естественный

параллелизм вычисления целочисленных адресных выражений и собственно обработки данных в формате с плавающей точкой привело к появлению разнесенных архитектур (decoupled architecture).

В первом приближении, микропроцессор с разнесенной архитектурой, как показано на рис.10, состоит из двух связанных подпроцессоров, каждый из которых управляется собственным потоком команд.

Условно эти подпроцессоры называются адресным A-процессором и исполнительным E-процессором. A- и E-процессоры имеют собственные наборы регистров A0,A1,... и X0,X1,..., соответственно и наборы команд. A-процессор выполняет все адресные вычисления и формирует обращения к памяти по чтению и записи. A-процессор является обыкновенным целочисленным процессором, поэтому он способен выполнять произвольные целочисленные преобразования, не связанные с вычислением адресов. E-процессор реализует вычисления с плавающей точкой.

Данные, извлекаемые из памяти, используются либо в A-процессоре, будучи помещенными в FIFO очередь AA, либо помещаются в FIFO очередь, называемую AE очередью, для отсылки в E-процессор. Когда E-процессору требуются данные из памяти, он берет их из очереди AE. Если очередь пуста, то E-процессор задерживается до поступления данных, что решает вопросы синхронизации работы A и E-процессоров. Если E-процессор выработал данное, которое должно быть отправлено в память, то он помещает его в FIFO очередь EA.

При записи данных в память после вычисления адреса A-процессор сразу отправляет адрес в FIFO очередь AW адресов записи в память, не дожидаясь, пока данные поступят в очередь EA. A-процессор группирует пары, выбирая первые элементы очередей EA и AW и отправляя эти пары в память. Естественно, если одна из очередей или обе пусты, то отсылка в память приостанавливается.

При чтении данных A-процессор отправляет адреса в память с указанием очередей AA или AE, в которые должны быть считаны данные из памяти.

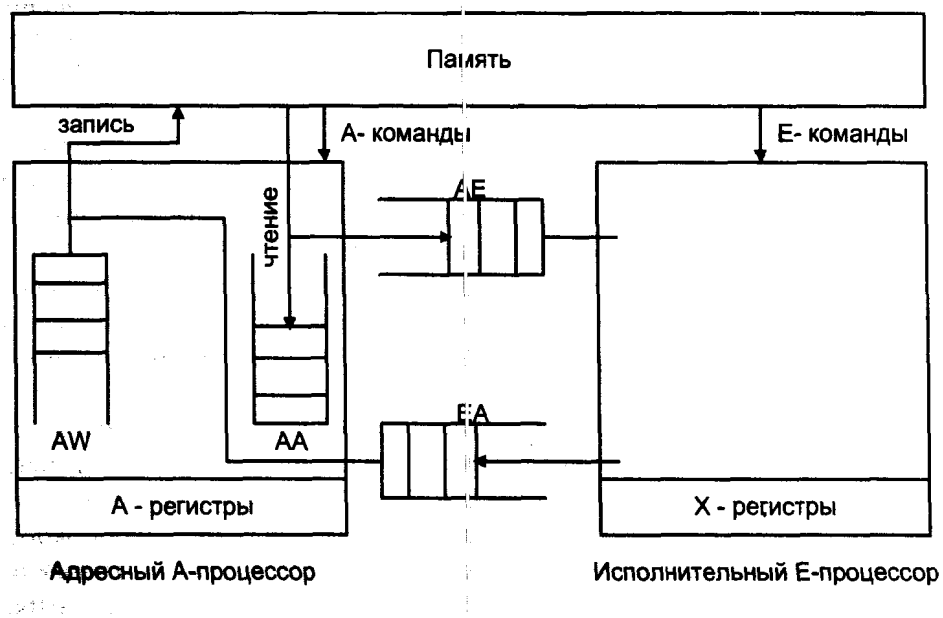


РИС.10. МИКРОПРОЦЕССОР С РАЗНЕСЕННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

Разнесенная архитектура позволяет достигать при скалярной обработке производительности, характерной для векторных процессоров, за счет предвыборки данных из памяти и автоматической развертки нескольких последовательных витков цикла в А-процессоре. Проблемы расщепления программы на программы для А- и Е-процессоров решаются на уровне компилятора или специальным блоком-расщепителем.

Важным системным аспектом разнесенной архитектуры служит интерфейс между процессором и памятью посредством транзакций чтения и записи. Это позволяет расположить между процессором и памятью произвольную коммутационную среду, что подводит логический базис под концепцию построения многопроцессорных систем.

Лекция 4.

Структурные методы уменьшения времени доступа к памяти

Совершенствование архитектуры микропроцессоров и механизмов доступа к памяти не может происходить без принятия совокупности соглашений о структуре программ и обрабатываемых данных. Это обусловлено, например, тем, что время доступа в основную память десять и более раз больше, чем время выполнения преобразований данных в регистрах процессора. Потому необходимо находить решения по уменьшению времени доступа, учитывающие этот факт.

Иерархическая структура памяти. Идеальная память должна обеспечивать процессор командами и данными так, чтобы не вызывать простоев процессора. При этом память должна иметь большую емкость. В современных условиях уменьшение времени доступа достигается введением многоуровневой иерархии памяти. Время доступа зависит от объема и типа используемой памяти.

Типовая современная иерархия памяти имеет следующую структуру:

• регистры 64 - 256 слов с временем доступа 1 такт процессора;

• кэш 1 уровня - 8к слов с временем доступа 1-2 такта;

• кэш 2 уровня - 256к слов с временем доступа 3-5 тактов;

• основная память - до 4 Гигаслов с временем доступа 12-55 тактов.

Используя помимо основной памяти небольшую и более быструю буферную память, можно значительно сократить количество обращений к основной памяти, за счет аккумуляции текущего фрагмента программного кода в буферной памяти. Создание иерархической многоуровневой памяти, пересылающей блоки программ и данных между уровнями памяти за время, пока предшествующие блоки обрабатываются процессором, позволяет существенно сократить простои процессора в ожидании данных. При этом эффект уменьшения времени доступа в память будет тем больше, чем больше время обработки данных в буферной памяти по сравнению с временем пересылки между буферной и основной памятью. Это достигается при локальности обрабатываемых данных, когда процессор многократно использует одни и те же данные для выработки некоторого результата. Например, такая ситуация имеет место при решении систем уравнений в научных и инженерных расчетах, когда короткие участки программного кода с большим количеством вложенных и зацепленных друг с другом циклов обрабатывают поочередно, переходя от точки к точке, небольшие порции данных, многократно используя одни и те же данные и внутренние результаты.

В связи с тем, что локально обрабатываемые данные могут возникать в динамике вычислений и не обязательно сконцентрированы в одной области при статическом размещении в основной памяти, буферную память организуют как ассоциативную, в которой данные содержатся в совокупности с их адресом в основной памяти. Такая буферная память получила название кэш-памяти. Кэш-память позволяет гибко согласовывать структуры данных, требуемые в динамике вычислений, со статическими структурами данных основной памяти.

Кэш имеет совокупность строк (cache-lines), каждая из которых состоит из фиксированного количества адресуемых единиц памяти (байтов, слов) с последовательными адресами. Типичный размер строки: 16, 64, 128, 256 байтов.

Наиболее часто используются три способа организации кэш-памяти, отличающиеся объемом аппаратуры, требуемой для их реализации. Это так называемые кэш-память с прямым отображением (direct-mapped cache), частично ассоциативная кэш-память (set-associative cache) и ассоциативная кэш-память (fully associative cache).

При использовании кэш-памяти с прямым отображением адрес представляется как набор трех компонент, составляющих группы старших, средних и младших разрядов адреса, соответственно тега, номера строки, смещения. Например, при 16-разрядном адресе старшие 5 разрядов могут представлять тег, следующие 7 разрядов - номер строки и последние 4 разряда - смещение в строке. В этом случае строка состоит из 6 адресуемых единиц памяти, всего

строк в кэше 128. Кэш-память с прямым отображением представляет собой набор строк, каждая из которых содержит компоненту тег и элементы памяти строки, адрес которых идентифицируется смещением относительно начала строки.

При этом устанавливается однозначное соответствие между адресом элемента памяти и возможным расположением этого элемента памяти в кэше, а именно: элемент памяти всегда располагается в строке, задаваемой компонентой "номер строки" адреса, и находится на позиции строки, задаваемой компонентой "смещение" адреса,

Наличие элемента данных по запрашиваемому адресу в кэше определяется значением тега. Если тег строки кэш-памяти равен компоненте "тег" адреса, то элемент данных содержится в кэш-памяти.

Иначе необходима подкачка в кэш-память строки, с заданным в адресе тегом.

Так как для определения наличия нужной строки данных в кэш-памяти требуется только одно сравнение тегов заданной строки и адреса, а само замещение строк выполняется по фиксированному местоположению, то объем оборудования, необходимый для реализации этого типа кэш-памяти, достаточно мал.

Недостатки этой организации - очевидны. Если программа использует поочередно элементы памяти из одной строки, но с различными значениями тегов, то это вызывает при каждом обращении замену строки с обращением к данным основной памяти.

Ассоциативная кэш-память использует двухкомпонентное представление адреса: группа старших разрядов трактуется как тег, а группа младших разрядов - как смещение в строке.

Нахождение строки в кэше определяется совпадением тега-строки со значением тега адреса. Количество строк в кэше может быть произвольным (естественное ограничение - количество возможных значений тегов). Поэтому при определении нахождения требуемой строки в кэш-памяти необходимо сравнение тега адреса с тегами всех строк кэша. Если выполнять это последовательно, строка за строкой, то время выполнения сравнений будет непозволительно большим. Поэтому сравнение выполняется параллельно во всех строках с использованием принципов построения ассоциативной памяти, что и дало название этому способу организации кэш-памяти.

При отсутствии необходимой строки в кэш-памяти одна из его строк должна быть заменена на требуемую. Используются разнообразные алгоритмы определения заменяемой строки, например циклический, замена наиболее редко используемой строки, замена строки, к которой дольше всего не было обращений, и другие.

Частично-ассоциативная кэш-память комбинирует оба вышеописанных подхода: кэш-память состоит из набора ассоциативных блоков кэш-памяти. Средняя компонента адреса задает в отличие от прямо адресуемой кэш-памяти

не номер строки, а номер одного из ассоциативных блоков. При поиске данных ассоциативное сравнение тегов выполняется только для набора блоков (возможна организация кэша, когда таких наборов несколько), номер которого совпадает со средней компонентой адреса. По количеству n строк в наборе кэш-память называется n-входовой.

Соответствие между данными в оперативной памяти и кэш-памяти обеспечивается внесением изменений в те области оперативной памяти, для которых данные в кэш-памяти подверглись модификации. Соответствие данных обеспечивается параллельно с основными вычислениями. Существует несколько способов его реализации (и, соответственно, несколько режимов работы кэш-памяти).

Один способ предполагает внесение изменений в оперативную память сразу после изменения данных в кэше. При этом процессор простаивает в ожидании завершения записи в основную память. В основной памяти поддерживается правильная копия данных кэша, и при замене строк не требуется никаких дополнительных действий. Кэш-память, работающая в таком режиме, называется памятью со сквозной записью (write- through).

Другой способ предполагает отображение изменений в основной памяти только в момент вытеснения строки данных из кэша. Если данные по адресу памяти, в который необходимо произвести запись, находятся в кэш-памяти, то идет запись только в кэш-память. При отсутствии данных в кэш-памяти производится запись в основную память. Такой режим работы кэша получил название обратной записи (write-back).

Существуют также промежуточные варианты (buffed write though), при которых запросы на изменение в основной памяти буферизуются и не задерживают процессор на время операции записи в память. Эта запись выполняется по мере возможности доступа контроллера кэш-памяти к основной памяти.

В процессорах, предусматривающих возможность использования в мультипроцессорных конфигурациях, применяется более сложный протокол MESI (Modified, Exclusive, Shared, Invalid) организации кэш-памяти с обратной записью, который предотвращает лишние передачи данных между кэш-памятью и основной памятью.

Для мультипроцессорных систем, в которых память физически распределена между процессорными модулями, идентичность данных в кэшах (когерентность кэшей) различных модулей поддерживается с помощью межмодульных пересылок. Существует несколько основных подходов.

Прямолинейный подход к поддержанию когерентности кэшей в мультипроцессорной системе заключается в том, что при каждом непопадании в кэш в любом процессоре инициируется запрос требуемой строки из того блока памяти, в котором эта строка размешена. В дальнейшем этот блок памяти будет по отношению к этой строке называться резидентным. Запрос передается через коммутатор в модуль с резидентным для строки блоком памяти, из которого

затем необходимая строка через коммутатор присылается в модуль, в котором произошло непопадание. Таким образом, в частности, обеспечивается начальное заполнение кэшей. При этом в каждом модуле для каждой резидентной строки ведется список модулей, в кэшах которых эта строка размещается. Строка, размещенная в кэше более чем одного модуля, в дальнейшем будет называться разделяемой.

Собственно когерентность кэшей обеспечивается следующим. При обращении к кэш-памяти в ходе операции записи данных, после самой записи, процессор приостанавливается до тех пор, пока не выполнится последовательность действий: измененная строка кэша пересылается в резидентную память модуля, затем, если строка была разделяемой, она пересылается из резидентной памяти во все модули, указанные в списке модулей, разделяющих эту строку. После получения подтверждений, что все копии изменены, резидентный модуль пересылает в процессор, приостановленный после записи, разрешение продолжать вычисления.

Изложенный алгоритм обеспечения когерентности хотя и является логически работоспособным, однако практически редко применяется из-за больших простоев процессоров при операциях записи в кэш строки. На практике применяют более сложные алгоритмы, обеспечивающие меньшие простои процессоров.

Для изложения одного из алгоритмов поддержки когерентности кэшей, известного как DASH, зададим некоторые начальные условия и введем определения.

Каждый модуль имеет для каждой строки, резидентной в модуле, список модулей, в кэшах которых размещены копии строк.

С каждой строкой в резидентном для нее модуле свяжем три ее возможных глобальных состояния:

1) "некэшированная", если копия строки не находится в кэше какого-либо другого модуля, кроме, возможно, резидентного для этой строки;

2) "удаленно-разделенная", если копии строки размещены в кэшах других модулей;

3) "удаленно-измененная", если строка изменена операцией записи в каком-либо модуле.

Кроме этого, каждая строка кэша может находиться в одном из трех локальных состояний:

1) "невозможная к использованию";

2) "разделяемая", если есть неизмененная копия, которая, возможно, размещается также в других кэшах;

3) "измененная", если копия изменена операцией записи,

Перейдем к изложению алгоритма. Каждый процессор может читать из своего кэша, если состояние читаемой строки "разделяемая" или "измененная".

Если строка отсутствует в кэше или находится в состоянии "невозможная к использованию", то посылается запрос "промах чтения", который направляется в модуль, резидентный для требуемой строки.

Бели глобальное состояние строки в резидентном модуле - "некэшированная" или "удаленно-разделенная", то копия строки посылается в запросивший модуль, а в список модулей, содержащих копии рассматриваемой строки, вносится модуль, запросивший копию.

Если состояние строки "удаленно-измененная", то запрос "промах чтения" перенаправляется в модуль, содержащий измененную строку. Этот модуль пересылает требуемую строку в запросивший модуль и в модуль, резидентный для этой строки, и устанавливает в резидентном модуле для этой строки состояние удаленно-распределенная .

Если процессор выполняет операцию записи и состояние строки, в которую производится запись, - "измененная", то запись выполняется и вычисления продолжаются. Если состояние строки - "невозможная к использованию" или "разделяемая", то модуль посылает в резидентный для строки модуль запрос на захват в исключительное использование этой строки и приостанавливает выполнение записи до получения подтверждений, что все остальные модули, разделяющие с ним рассматриваемую строку, перевели ее копии в состояние "невозможная к использованию".

Если глобальное состояние строки в резидентном модуле - "некэшированная", то строка отсылается запросившему модулю, и этот модуль продолжает приостановленные вычисления .

Если глобальное состояние строки - "удаленно-разделенная", то резидентный модуль рассылает по списку всем модулям, имеющим копию строки, запрос на переход этих строк в состояние "невозможная к использованию". По получении этого запроса каждый из модулей изменяет состояние своей копии строки на "невозможная к использованию" и посылает подтверждение исполнения в модуль, инициировавший операцию записи. При этом в приостановленном модуле строка после исполнения записи переходит в состояние "удаленно-измененная".

Предпринимаются попытки повысить эффективность реализации алгоритма когерентности, в частности, за счет учета специфики параллельных программ, в которых используются асинхронно одни и те же данные на каждом временном интервале исключительно одним процессором с последующим переходом обработки к другому процессору. Такого рода ситуации случаются, например, при определении условий окончания итераций, В этом случае возможна более эффективная схема передачи строки из кэша одного процессора в кэш другого процессора.

В системах, использующих коммутатор с временным разделением (шину), интерфейс с шиной каждого модуля "прослушивает" все передачи по шине, поэтому нет необходимости вести списки модулей, разделяющих строки.

Кэш-память с обратной записью создает меньшую нагрузку на шину

процессора и обеспечивает большую производительность, однако контроллер для write-back кэша значительно сложнее.

Контроллер кэша отслеживает адреса памяти, выдаваемые процессором, и если адрес соответствует данным, содержащимся в одной из строк кэша, то отмечается "попадание в кэш", и данные из кэша направляются в процессор. Если данных в кэше не оказывается, то фиксируется "промах", и инициируются действия по доставке в кэш из памяти требуемой строки. В ряде процессоров, выполняющих одновременно совокупность команд, допускается несколько промахов, прежде чем будет запущен механизм замены строк.

Рассуждения о том, какой способ организации кэш-памяти более предпочтителен, должны учитывать особенности генерации программ компилятором, а также использование программистом при подготовке программы сведений о работе компилятора и контроллера кэш-памяти. То есть более простой способ организации кэш-памяти, поддерживаемый компилятором, при исполнении программ, написанных в соответствии с некоторыми правилами, обусловленными особенностями компиляции и организации кэш-памяти, может дать лучший результат, чем сложный способ организации кэш-памяти.

Так как области памяти программ и данных различны и к ним происходит одновременный доступ, то для повышения параллелизма при работе с памятью делают отдельные кэши команд и данных.

Расслоение памяти. Другим структурным способом уменьшения времени доступа к памяти служит расслоение памяти. В предположении, что выборка из памяти выполняется по последовательным адресам возможно использование k блоков памяти с размещением в блоке i, где i=0,…, k-1, слов с адресами n=i+krrp mod k, где p=0,1,..., M. В этом случае возможно k параллельных обращений в память по адресам, принадлежащим различным блокам. Поэтому выборка команд программы за исключением команд, выбираемых как результат ветвления, может быть ускорена применением расслоения памяти. Аналогично может быть ускорена обработка массивов данных, последовательные элементы которых помещаются в разные блоки памяти.

Многоуровневая иерархия и расслоение памяти могут использоваться совместно.

CISC- и RISC- процессоры.

АППАРАТНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССОРОВ ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ УРОВНЕМ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ, КОТОРАЯ ОГРАНИЧИВАЕТ ЧИСЛО ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАЗМЕЩАЕМЫХ НА КРИСТАЛЛЕ. ФАКТИЧЕСКИ ЕГО РАЗМЕРЫ И ЧИСЛО РАЗМЕЩАЕМЫХ НА НЕМ ТРАНЗИСТОРОВ ПОЧТИ ЦЕЛИКОМ ОПРЕДЕЛЯЮТ ТОТ НАБОР АППАРАТНЫХ УСТРОЙСТВ, КОТОРЫЕ ВКЛЮЧАЮТСЯ В СОЗДАВАЕМЫЙ ПРОЦЕССОР. РАЗРАБОТЧИКИ СТРЕМЯТСЯ ВВЕСТИ В ЕГО СОСТАВ КАК МОЖНО БОЛЬШЕЕ ЧИСЛО РАЗЛИЧНЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ И ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, СОПРОЦЕССОРОВ И Т.Д., ПОСКОЛЬКУ ОЧЕВИДНО, ЧТО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КАКОЙ-ЛИБО ФУНКЦИИ ОБЕСПЕЧИВАЕТ БОЛЕЕ БЫСТРОЕ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЕ, ЧЕМ ПРОГРАММНАЯ. ДА И ДЛИНА КОДА ДЛЯ РЕАЛИЗУЕМЫХ АППАРАТНЫМ ПУТЕМ ФУНКЦИЙ СУЩЕСТВЕННО МЕНЬШЕ, ПОЭТОМУ В 80-Х ГОДАХ ПРОЦЕССОРЫ "РОСЛИ ВШИРЬ", ОСНАЩАЛИСЬ НОВЫМИ УЗЛАМИ, СОВЕРШЕНСТВУЯ УЖЕ ИМЕЮЩИЕСЯ. КРОМЕ ТОГО, РАЗРАБОТЧИКАМ

ПРОЦЕССОРОВ ПРИХОДИЛОСЬ ПОСТОЯННО ПОДСТРАИВАТЬСЯ ПОД СТРЕМЛЕНИЕ ПРОГРАММИСТОВ ИМЕТЬ ВОЗМОЖНО БОЛЕЕ МОЩНУЮ И ГИБКУЮ СИСТЕМУ КОМАНД. ТАКИЕ СИСТЕМЫ КОМАНД С РАЗНООБРАЗНЫМИ СПОСОБАМИ АДРЕСАЦИИ И НАБОРАМИ УСЛОВНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ВЫЗОВОВ ПОДПРОГРАММ, СТРОКОВЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ И ПРЕФИКСАЦИЯМИ ОБЕСПЕЧИВАЛИ СОЗДАНИЕ КОРОТКИХ ПРОГРАММ, ГАРАНТИРОВАЛИ МЕНЬШЕЕ ЧИСЛО ОШИБОК В НИХ. И РАЗРАБОТЧИКИ НЕ МОГЛИ НЕ СЧИТАТЬСЯ С ЭТИМ.

! ПОД АРХИТЕКТУРОЙ В ДАННОМ СЛУЧАЕ СЛЕДУЕТ ПОНИМАТЬ ТОЛЬКО СИСТЕМУ КОМАНД, ИГРАЮЩУЮ РОЛЬ ИНТЕРФЕЙСА МЕЖДУ АППАРАТНЫМ И ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ.

ПЕРВЫЕ РОСТКИ ПРОТИВОРЕЧИЙ, ПРИВЕДШИХ К ТОМУ, ЧТО ПУТИ ЗАНИМАЮЩИХСЯ РАЗРАБОТКОЙ И ПРОИЗВОДСТВОМ МП КОМПАНИЙ РАЗОШЛИСЬ В РАЗНЫЕ СТОРОНЫ, ОБНАРУЖИЛИСЬ ДАВНО. ЗА ПЕРВЫЕ 10 ЛЕТ СУЩЕСТВОВАНИЯ МП СФОРМИРОВАЛАСЬ АРХИТЕКТУРА CISC (COMPLEX INSTRUCTION SET COMPUTING — ВЫЧИСЛЕНИЯ СО СЛОЖНЫМ НАБОРОМ ИНСТРУКЦИЙ). В ПОСТРОЕННЫХ ПО ЕЁ ПРИНЦИПАМ ПРОЦЕССОРАХ БОЛЕЕ 2/3 КРИСТАЛЛА ЗАНИМАЮТ ЛОГИКА, РЕАЛИЗУЮЩАЯ ВЫБОРКУ И ДЕКОДИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ИНСТРУКЦИЙ, ПРЯМОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕ ТОЛЬКО С РЕГИСТРОВОЙ ПАМЯТЬЮ, НО И С ВНЕШНЕЙ, А ТАКЖЕ ИЗОЩРЁННЫЕ СХЕМЫ АДРЕСАЦИИ. ПРИ ЭТОМ БЛОКИ, НЕПОСРЕДСТВЕННО ЗАНЯТЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ ЗАНИМАЮТ ЛИШЬ 1/3 ПЛОЩАДИ КРИСТАЛЛА. НА ПРОТЯЖЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ СИСТЕМЫ КОМАНД ЭВОЛЮЦИОНИРОВАЛИ, НАХОДЯСЬ В СЛОЖНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТОИМОСТИ АППАРАТНЫХ РЕСУРСОВ, И ПРЕЖДЕ ВСЕГО САМОГО ДОРОГОГО ИЗ НИХ – ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ. ИНЖЕНЕРАМИ РУКОВОДИЛО СТРЕМЛЕНИЕ СОКРАТИТЬ РАЗМЕР ПРОГРАММ, ДЛЯ ЭТОГО ОНИ СТАРАЛИСЬ ВЛОЖИТЬ КАК МОЖНО БОЛЬШЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ В ОДНУ КОМАНДУ. К НАЧАЛУ 80-Х ЧИСЛО ТАКИХ КОМАНД ДОСТИГЛО ПОЧТИ 300 СОТЕН, И ПОЧТИ КАЖДАЯ ИЗ НИХ ИМЕЛА ДО 6 ТИПОВ АДРЕСАЦИИ. К ТОМУ ЖЕ КОМАНДЫ НЕ ИМЕЛИ ФИКСИРОВАННОЙ ДЛИНЫ.

ОДНАКО, НАЧИНАЯ С НЕКОТОРОГО МОМЕНТА CISC-ИДЕОЛОГИЯ СТАЛА НЕ УСКОРИТЕЛЕМ, А ТОРМОЗОМ РОСТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ. ДЕЛО В ТОМ, ЧТО БОЛЬШОЕ РАЗНООБРАЗИЕ КОМАНД И РАЗЛИЧНАЯ ИХ ДЛИНА СУЩЕСТВЕННО УСЛОЖНЯЮТ АППАРАТУРУ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИ ПРОЦЕССОРА. ТАК, НАПРИМЕР, ОНА ДОЛЖНА ОПРЕДЕЛИТЬ ДЛИНУ КОМАНДЫ (МОЖЕТ ВАРЬИРОВАТЬСЯ В ПРЕДЕЛАХ ОТ ОДНОГО ДО ПЯТИ-ШЕСТИ БАЙТ), ВЫДЕЛИТЬ КОД ОПЕРАЦИИ, ПОДГОТОВИТЬ ОПЕРАНДЫ, КОТОРЫЕ МОГУТ НАХОДИТЬСЯ КАК В РЕГИСТРАХ, ТАК И В ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ. РЕЗУЛЬТАТ ВЫЧИСЛЕНИЙ ТАКЖЕ НУЖНО ПЕРЕНЕСТИ ИЛИ В ПАМЯТЬ, ИЛИ В КАКОЙ-ЛИБО ИЗ РЕГИСТРОВ.

ОСОЗНАВ УКАЗАННЫЕ ФАКТЫ, МНОГИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛИ УЖЕ В 80-Е ГОДЫ НАЧАЛИ ПОИСКИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОРОВ. БЫЛО ЯСНО, ЧТО НУЖНО ПОПЫТАТЬСЯ УМЕНЬШИТЬ «НАКЛАДНЫЕ РАСХОДЫ», ОТЪЕДАЮЩИЕ ДО ДВУХ ТРЕТЕЙ ПОЛЕЗНОЙ ПЛОЩАДИ КРИСТАЛЛА, СНИЗИВ ЧИСЛО ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В НИХ ДО МИНИМУМА. ДЛЯ ЭТОГО БЫЛО НЕОБХОДИМО ПЕРЕНЕСТИ "ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ" НА ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА, ОСТАВИВ МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЕ ЧИСЛО КОМАНД, ИМЕЮЩИХ ПРОСТУЮ И РЕГУЛЯРНУЮ СТРУКТУРУ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, НАЧАЛА ФОРМИРОВАТЬСЯ СТРАТЕГИЯ "ДЛИННАЯ ПРОГРАММА — КОРОТКИЕ КОМАНДЫ" В ПРОТИВОВЕС ГОСПОДСТВУЮЩЕЙ «КОРОТКАЯ ПРОГРАММА — ДЛИННЫЕ КОМАНДЫ». ОСТАВАЛОСЬ ТОЛЬКО НАЙТИ РАЗУМНЫЙ КОМПРОМИСС МЕЖДУ РЕСУРСАМИ, ОТВОДИМЫМИ ОСНОВНЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ УЗЛАМ ПРОЦЕССОРА И УСТРОЙСТВАМ УПРАВЛЕНИЯ.

И ВСКОРЕ ЭТОТ КОМПРОМИСС БЫЛ НАЙДЕН. ВНАЧАЛЕ ДЖОН КУК ИЗ IBM RESEARCH LABS НА СВОЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ "MODEL 801" ПОКАЗАЛ, ЧТО ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ПРОГРАММЕ ЛИШЬ ПРОСТЕЙШИХ КОМАНД ФОРМАТА «РЕГИСТР—

РЕГИСТР» (ОПЕРАНДЫ ИЗВЛЕКАЮТСЯ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ИЗ РЕГИСТРОВ И ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ ПОМЕЩАЮТСЯ ТОЛЬКО В РЕГИСТРЫ) СКОРОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ БОЛЬШИНСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ ВОЗРАСТАЕТ В ДВА-ТРИ РАЗА. ЗАТЕМ УЧЕНЫМИ СТЕНФОРДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА БЫЛО ПОКАЗАНО, ЧТО ИСКЛЮЧЕНИЕ ИЗ НАБОРА КОМАНД СЛОЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ УМЕНЬШАЕТ ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССОРА НА ПОРЯДОК ЗА СЧЕТ УПРОЩЕНИЯ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРОЦЕССОРА (ПРИ ЭТОМ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ ОСТАЕТСЯ ПРАКТИЧЕСКИ НЕИЗМЕННОЙ).

ОПЫТ МНОГОЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОГРАММ ВЫЯВИЛ, ЧТО 80 % ПРОЦЕССОРНОГО ВРЕМЕНИ ОБЫЧНО ТРАТИТСЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВСЕГО 20 % ОТ ОБЩЕГО ЧИСЛА ИНСТРУКЦИЙ ОБЫЧНЫХ CISC-ПРОЦЕССОРОВ. ПРИЧЕМ ВСЕ ЭТИ 20 % ПРИХОДЯТСЯ НА КОМАНДЫ ТИПА "РЕГИСТР—РЕГИСТР".

И НАКОНЕЦ, В РАБОТАХ Д. ПАТТЕРСОНА И К. СЕКУИНА БЫЛИ СФОРМУЛИРОВАНЫ ЧЕТЫРЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПА, КОТОРЫЕ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ПОЛОЖЕНЫ В ОСНОВУ ПРОЦЕССОРОВ ГРУППЫ RISC (REDUCED INSTRUCTION SET COMPUTING – ВЫЧИСЛЕНИЯ С СОКРАЩЕННЫМ НАБОРОМ КОМАНД):

А) ЛЮБАЯ ОПЕРАЦИЯ, К КАКОМУ БЫ ТИПУ ОНА НИ ПРИНАДЛЕЖАЛА, ДОЛЖНА ВЫПОЛНЯТЬСЯ ЗА ОДИН ТАКТ;

Б) ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕАЛИЗУЮТСЯ ТОЛЬКО В ФОРМАТЕ “РЕГИСТР—РЕГИСТР”. ОБМЕН МЕЖДУ ПАМЯТЬЮ И РЕГИСТРАМИ (Т. Е. МОДИФИКАЦИЯ ПАМЯТИ И ЧТЕНИЕ ИЗ НЕЕ НЕОБХОДИМЫХ ДАННЫХ) ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ТОЛЬКО ЛИШЬ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОМАНД ЧТЕНИЯ/ЗАПИСИ;

В) СИСТЕМА КОМАНД ДОЛЖНА СОДЕРЖАТЬ МИНИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО НАИБОЛЕЕ ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРОСТЕЙШИХ КОМАНД ОДИНАКОВОЙ ДЛИНЫ:

Г) СОСТАВ СИСТЕМЫ КОМАНД ДОЛЖЕН БЫТЬ ОПТИМИЗИРОВАН С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ КОМПИЛЯТОРОВ ЯЗЫКОВ ВЫСОКОГО УРОВНЯ.

КСТАТИ, НАД ИДЕЯМИ, ВОШЕДШИМИ В КОНЦЕПЦИЮ RISC, ТРУДИЛИСЬ НЕ ТОЛЬКО НА ЗАПАДЕ. ЕЩЁ В 70-Х ГОДАХ, КОГДА АМЕРИКАНСКИЕ УЧЁНЫЕ ТОЛЬКО ПРИБЛИЗИЛИСЬ К ФОРМУЛИРОВКЕ ТОГО, ЧТО СТАЛО НАЗЫВАТЬСЯ RISC, В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ УЖЕ БЫЛИ ПОСТРОЕНЫ БОЛЬШИЕ ЭВМ, В КОТОРЫХ БЫЛИ РЕАЛИЗОВАНЫ РЕШЕНИЯ, ПОЗВОЛИВШИЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ RISC-АРХИТЕКТУРУ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ. НАПРИМЕР, СУПЕРСКАЛЯРНАЯ АРХИТЕКТУРА БЫЛА РЕАЛИЗОВАНА У НАС 1978 ГОДУ, В ТО ВРЕМЯ КАК АМЕРИКАНЦЫ ПОДОШЛИ К НЕЙ ЛИШЬ В НАЧАЛЕ 90-Х ГОДОВ. А ВЕДЬ ИМЕННО СУПЕРСКАЛЯРНОСТЬ НАЗЫВАЮТ СЕГОДНЯ 5-ЫМ КРИТЕРИЕМ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПРОЦЕССОРА К RISC-АРХИТЕКТУРЕ.

НАИБОЛЕЕ СЛОЖНО ВЫПОЛНИМОЕ ИЗ УПОМЯНУТЫХ ТРЕБОВАНИЙ — ПЕРВОЕ, В СООТВЕТСТВИИ С КОТОРЫМ, КАЖДАЯ КОМАНДА ДОЛЖНА ВЫПОЛНЯТЬСЯ НЕ БОЛЕЕ ЧЕМ ЗА ОДИН ТАКТ. ОДНАКО, НЕСМОТРЯ НА СУЩЕСТВЕННОЕ УПРОЩЕНИЕ, НЕОБХОДИМО, ЧТОБЫ УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ПО-ПРЕЖНЕМУ ВЫПОЛНЯЛО ОПЕРАЦИИ ПО ЧТЕНИЮ КОДА КОМАНДЫ, ДЕКОДИРОВАНИЮ, ПОДГОТОВКЕ ОПЕРАНДОВ, СОБСТВЕННО ВЫПОЛНЕНИЮ КОМАНДЫ И ПЕРЕМЕЩЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТА В СООТВЕТСТВУЮЩИЙ РЕГИСТР. ЕСЛИ УЧЕСТЬ, ЧТО КАЖДАЯ ИЗ ЭТИХ ОПЕРАЦИЙ ОБЯЗАНА СИНХРОНИЗИРОВАТЬСЯ С ФРОНТОМ (ИЛИ СПАДОМ) СИГНАЛА ТАКТОВОГО ГЕНЕРАТОРА, ТО ЕДИНСТВЕННО ВОЗМОЖНЫЙ ВАРИАНТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ - ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАК НАЗЫВАЕМОГО КОНВЕЙЕРА КОМАНД. ПРИ ЭТОМ ПО ПЕРВОМУ ПЕРЕПАДУ СИГНАЛА ТАКТОВОГО ГЕНЕРАТОРА В СООТВЕТСТВУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ВЫДЕЛЯЕТСЯ КОД ОПЕРАЦИИ, КОТОРЫЙ ЗАТЕМ ПЕРЕДАЕТСЯ В УСТРОЙСТВО ДЕКОДИРОВАНИЯ; ПО ВТОРОМУ - В УСТРОЙСТВЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВЫДЕЛЯЕТСЯ КОД ОПЕРАЦИИ СЛЕДУЮЩЕЙ КОМАНДЫ, А В УСТРОЙСТВЕ ДЕКОДИРОВАНИЯ ПРОИСХОДИТ

ДЕКОДИРОВАНИЕ ПЕРВОЙ КОМАНДЫ И ПЕРЕДАЧА ЕЕ В СООТВЕТСТВУЮЩЕЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО - АЛУ, СОПРОЦЕССОР И Т. Д. ТРЕТИЙ ПЕРЕПАД СОПРОВОЖДАЕТСЯ ИЗВЛЕЧЕНИЕМ КОДА ОПЕРАЦИИ ТРЕТЬЕЙ КОМАНДЫ, ДЕКОДИРОВАНИЕМ ВТОРОЙ И ПОДГОТОВКОЙ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРВОЙ.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ПО КАЖДОМУ ИЗ ТАКТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА КОНВЕЙЕР ВСТУПАЕТ НОВАЯ КОМАНДА, И НЕСКОЛЬКО УЖЕ ОБРАБАТЫВАЮТСЯ НА РАЗНЫХ ЕГО СТУПЕНЯХ. ОДНОВРЕМЕННО, ТАКЖЕ ПО КАЖДОМУ ИЗ ТАКТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ, ЕГО ПОКИДАЕТ ОДНА ВЫПОЛНЕННАЯ КОМАНДА. И ХОТЯ НА ВЫПОЛНЕНИЕ КАЖДОЙ ЗАТРАЧИВАЕТСЯ ПО-ПРЕЖНЕМУ ОТ ЧЕТЫРЕХ ДО СЕМИ-ВОСЬМИ ТАКТОВ (В РАССМОТРЕННОМ ВЫШЕ УСЛОВНОМ КОНВЕЙЕРЕ - ПЯТЬ), КАЖДЫЙ ИЗ НИХ СОПРОВОЖДАЕТСЯ, КАК ЭТО И ТРЕБОВАЛОСЬ, ВЫПОЛНЕНИЕМ ОДНОЙ КОМАНДЫ. СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ЕСЛИ ДЛЯ RISC - ПРОЦЕССОРОВ КОНВЕЙЕР КОМАНД ЯВЛЯЕТСЯ НЕОБЯЗАТЕЛЬНЫМ (ХОТЯ И ЖЕЛАТЕЛЬНЫМ) ЭЛЕМЕНТОМ, ТО ДЛЯ RISC-ПРОЦЕССОРОВ ОН ОБЯЗАТЕЛЕН. ОТМЕТИМ, ЧТО БОЛЬШИНСТВО RISC-ПРОЦЕССОРОВ ИМЕЮТ НЕ ОДИН, А НЕСКОЛЬКО (ОТ ДВУХ ДО ЧЕТЫРЕХ) КОНВЕЙЕРОВ, ЗА ЧТО ОНИ ПОЛУЧИЛИ НАЗВАНИЕ СУПЕРСКАЛЯРНЫХ (В ОТЛИЧИЕ ОТ СКАЛЯРНЫХ - ОДНОКОНВЕЙЕРНЫХ).

СЛЕДУЮЩАЯ ОСОБЕННОСТЬ RISC-ПРОЦЕССОРОВ - ВЫСОКАЯ СТЕПЕНЬ ДРОБЛЕНИЯ КОНВЕЙЕРА. В РАССМОТРЕННОМ ВЫШЕ ПРИМЕРЕ ОН СОСТОИТ ИЗ ПЯТИ СТУПЕНЕЙ: ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОДА ОПЕРАЦИИ, ДЕКОДИРОВАНИЯ, ПОДГОТОВКИ ОПЕРАНДОВ, ИСПОЛНЕНИЯ, СОХРАНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТА. РЕАЛЬНО RISC-ПРОЦЕССОРЫ ХАРАКТЕРИЗУЮТСЯ СЕМИДЕСЯТИ СТУПЕНЧАТЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ. С УВЕЛИЧЕНИЕМ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ ДЕЙСТВИЯ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ НА КАЖДОЙ ИЗ НИХ, ВСЕ БОЛЕЕ И БОЛЕЕ УПРОЩАЮТСЯ. ПОСЛЕДНЕЕ ОЗНАЧАЕТ, ЧТО УМЕНЬШАЕТСЯ ЧИСЛО НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ЭТОГО ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПОЯВЛЯЕТСЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫСИТЬ ТАКТОВУЮ ЧАСТОТУ ПРОЦЕССОРА.

ТРЕТЬЯ ОСОБЕННОСТЬ, ВЫТЕКАЮЩАЯ ИЗ ПРЕДЫДУЩЕЙ, - РАЗВИТЫЕ СРЕДСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕТВЛЕНИЙ И ПЕРЕХОДОВ. В ПРОГРАММАХ ДЛЯ СЕМЕЙСТВА X86 КОМАНДА ПЕРЕХОДА ВСТРЕЧАЕТСЯ В СРЕДНЕМ ЧЕРЕЗ КАЖДЫЕ ШЕСТЬ, В ПРОГРАММАХ ДЛЯ RISC-ПРОЦЕССОРОВ, КОМАНДЫ КОТОРЫХ ПРОЩЕ, - ЧЕРЕЗ КАЖДЫЕ 10... 12 КОМАНД. ВСТРЕТИВ КОМАНДУ УСЛОВНОГО ПЕРЕХОДА, ПРОЦЕССОР ДОЛЖЕН СДЕЛАТЬ ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ О ТОМ, ВЫПОЛНИТСЯ УСЛОВИЕ ИЛИ НЕТ, И В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭТОГО НАЧАТЬ ПРЕДВЫБОРКУ КОМАНД ЛИБО С АДРЕСА ПРЕДПОЛАГАЕМОГО ПЕРЕХОДА, ЛИБО С АДРЕСА, СЛЕДУЮЩЕГО ЗА ТЕКУЩИМ. ЕСЛИ ПЕРЕХОД ПРЕДСКАЗАН НЕПРАВИЛЬНО, ПРОЦЕССОРУ НЕОБХОДИМО УДАЛИТЬ СО ВСЕХ СТУПЕНЕЙ КОНВЕЙЕРА КОМАНДЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К НЕВЕРНО СДЕЛАННОМУ ПРЕДПОЛОЖЕНИЮ, И ПЕРЕЗАГРУЗИТЬ КОНВЕЙЕР. ЭТО ОСОБЕННО СКАЗЫВАЕТСЯ НА РАБОТЕ СУПЕРСКАЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ - НА РАЗНЫХ СТУПЕНЯХ ТРЕХ-ЧЕТЫРЕХ КОНВЕЙЕРОВ МОЖЕТ НАХОДИТЬСЯ ДОВОЛЬНО МНОГО КОМАНД. ИХ УДАЛЕНИЕ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЕРЕЗАГРУЗКОЙ ПРИВОДИТ К ТОМУ, ЧТО В ТЕЧЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ТАКТОВ КОНВЕЙЕР НЕ ПОКИДАЕТ НИ ОДНА КОМАНДА. ПРОЦЕССОР, В КОТОРОМ ЭТО СЛУЧАЕТСЯ ЧАСТО, ТЕРЯЕТ 20... 30 % СВОЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ. ПОЭТОМУ RISC-ПРОЦЕССОРЫ ХАРАКТЕРИЗУЮТСЯ ВЕСЬМА ЭФФЕКТИВНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ПРЕДСКАЗАНИЯ ВЕТВЛЕНИЙ. КРОМЕ ТОГО, ОНИ СОДЕРЖАТ УСТРОЙСТВА, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ВЫБРАТЬ ТЕ ИЗ КОМАНД В ПРЕДСКАЗАННОМ ПЕРЕХОДЕ, КОТОРЫЕ МОЖНО ВЫПОЛНИТЬ ПРЕЖДЕ, ЧЕМ СТАНЕТ ЯСНО, ПРАВИЛЬНО ЛИ БЫЛ ПРЕДСКАЗАН ПЕРЕХОД.

ЕЩЕ ОДНА ОСОБЕННОСТЬ RISC-ПРОЦЕССОРОВ - ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БОЛЬШОГО ЧИСЛА РЕГИСТРОВ. КАК ПРАВИЛО, В RISC-ПРОЦЕССОРАХ ИХ НЕ МЕНЕЕ 32. ПОДОБНАЯ СВОБОДА (СЕМЕЙСТВО X86 ИМЕЕТ ВСЕГО ВОСЕМЬ РЕГИСТРОВ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ) ПОЗВОЛЯЕТ СНИЗИТЬ ЧИСЛО ОБРАЩЕНИЙ К ОТНОСИТЕЛЬНО МЕДЛЕННОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ В ПОЛТОРА-ДВА РАЗА (В СРАВНЕНИИ С CISC-ПРОЦЕССОРАМИ), ЧТО ОПЯТЬ-ТАКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНО СКАЗЫВАЕТСЯ НА РОСТЕ РЕАЛЬНОЙ

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ. ДОБАВИМ К ЭТОМУ, ЧТО ВСЕ RISC-ПРОЦЕССОРЫ СОДЕРЖАТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КЭШ-ПАМЯТЬЮ ВТОРОГО УРОВНЯ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ РАБОТАТЬ С НЕЙ НА МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ (В RISC-ИЗДЕЛИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С КЭШ-ПАМЯТЬЮ ОБЫЧНО ПРОИСХОДИТ НА ЧАСТОТЕ, БОЛЕЕ НИЗКОЙ, ЧЕМ ЧАСТОТА САМОГО ПРОЦЕССОРА).

Очевидно, что RISC-процессоры эффективны в тех областях применения, в которых можно продуктивно использовать структурные способы уменьшения времени доступа к оперативной памяти. Если программа генерирует произвольные последовательности адресов обращения к памяти и каждая единица данных используется только для выполнения одной команды, то фактически производительность процессора определяется временем обращения к основной памяти. В этом случае использование сокращенного набора команд только ухудшает эффективность, так как требует пересылки операндов между памятью и регистром вместо выполнения команд "память, память - память". Программист должен учитывать необходимость локального размещения обрабатываемых данных, чтобы при пересылках между уровнями памяти по возможности все данные пересылаемых блоков данных принимали участие в обработке. Если программа будет написана так, что данные будут размещены хаотично и из каждого пересылаемого блока данных будет использоваться только небольшая их часть, то скорость обработки замедлится в несколько раз до скорости работы основной памяти.

Развитие микропроцессоров происходит при постоянном стремлении сохранения преемственности программного обеспечения (ПО) и повышения производительности за счет совершенствования архитектуры и увеличения тактовой частоты. Сохранение преемственности ПО и повышение производительности, вообще говоря, противоречат друг другу. Процессоры с системой команд x86, относящиеся к классу CISC-процессоров, имеют более низкие тактовые частоты по сравнению с микропроцессорами ведущих компаний-изготовителей RISC-процессоров. Существуют приложения, на которых производительность x86 микропроцессоров значительно ниже. чем у RISC-процессоров, реализованных на той же элементной базе. Однако возможность использования совместимого ПО для различных поколений x86 процессоров, выпущенных в течение последнего десятилетия, обеспечивает им устойчивое доминирующее положение на рынке.

В настоящее время на основе разработок компаний NexGen и AMD, подхваченных компанией Intel, предпринята попытка решить проблему повышения производительности в рамках архитектуры x86. Эти компании, сохраняя преемственность по системе команд с CISC-микропроцессорами семейства x86, создают новые устройства с использованием элементов RISC-архитектуры, использующие концепцию разделенной (decoupled) архитектуры и RISC ядра. В микропроцессор встраивается аппаратный транслятор, превращающий команды x86, в команды RISC-процессора. При этом одна команда x86 может порождать до четырех команд RISC-процессора. Исполнение команд происходит как в развитом суперскалярном процессоре.

Лекция 5.

Методы ускорения переключения контекста процессора

Современные операционные системы и системы программирования широко используют переключение контекста процессора (содержимого регистров и отдельных управляющих триггеров) при отработке входа в прерывание и выхода из него, входа и выхода из подпрограммы и в случае организации мультипрограммной работы. Время переключения контекста должно быть по возможности минимальным, так как затраты на переключение - это плата за организацию совместного протекания совокупности взаимодействующих вычислительных процессов.

Уменьшение времени переключения контекста процессора может быть достигнуто за счет, во-первых, сокращения количества регистров, содержимое которых сохраняется в памяти, во-вторых, аппаратной поддержки сохранения регистров и, в-третьих, введения специальных соглашений, регламентирующих использование регистров в программах, что позволяет перейти от полного сохранения контекста к частичному.

Уменьшение количества сохраняемых регистров ведет к снижению производительности и, вообще говоря, находится в противоречии со стремлением увеличения производительности за счет использования быстрой регистровой памяти и параллельного функционирования устройств процессора, каждое из которых содержит собственные регистры. Однако, этот прием применяется в ряде архитектур, например в транспьютерах компании INMOS и Java-процессорах. Это архитектуры, основанные на операциях со стеком. К числу сохраняемых регистров относятся указатели на текущую позицию стека, на используемую область памяти и т.д. Число таких указателей ограничено, например, в транспьютере их 8, что позволило переключать контекст за 2 микросекунды при тактовой частоте 10 МГц.

Аппаратная поддержка сохранения регистров может реализовываться по разному. С одной стороны, это может быть ускоренный аппаратный перенос содержимого регистров в память. С другой - возможно предоставление каждой вновь активизируемой программе своего множества регистров.

Например, в архитектуре SPARC микропроцессоров компании SUN используется 200 регистров, образующих 8 групп (окон) по 32 регистра с общими для двух соседних окон восемью регистрами. Перекрытие регистровых окон выполнено так, что регистры с номерами 24-31 предыдущего окна служат одновременно регистрами с номерами 0-7 последующего окна. Это, по мнению разработчиков, увеличивает эффективность передачи параметров подпрограммам.

Использование регистров обработки быстрых прерываний. Ряд функций, связанных с обработкой прерываний, выполняются специализированными программами, которые могут использовать ограниченное число регистров. Поэтому в ряде процессоров вводятся специальные регистры, используемые при обработке так называемых быстрых прерываний. Это, например,

прерывание по приему очередного символа сообщения, переносящее символ в память. Действия по началу приема, требующие запуска механизма распределения памяти, и завершению приема всего сообщения требуют, как правило, обычного прерывания, сохраняющего все регистры процессора. Но так как чаще происходит прием очередного символа, то быстрые прерывания дают существенное увеличение производительности.

Стандартизация архитектур микропроцессоров

На протяжении всей истории развития вычислительной техники предпринимались попытки (прежде всего со стороны разработчиков программных средств) стандартизировать архитектуру процессоров, что существенно расширило бы область применения создаваемого программного обеспечения. Осознав безуспешность попыток добиться совместимости на уровне системы машинных команд, разработчики пытались стандартизовать язык ассемблера, языки высокого уровня, языки интерфейса прикладных программ с операционными системами.

Стимулом к этому была и остается постоянно растущая сложность как самих процессоров, так и создаваемых с их использованием программных систем.

Создание сложных новых систем требует, помимо всего прочего, наличия двух обязательных этапов: адекватного описания системы и исчерпывающего тестирования на соответствие этому описанию. Тестирование должно быть доказательным. Не прибегая к примерам из области создания больших прикладных систем, укажем на широко известные ошибки в микропроцессорах известных компаний и на наличие не декларированных возможностей микропроцессоров и операционных систем.

Отсутствие стандартизации не позволяет создавать новые системы путем конструирования из существующих, прошедших апробацию в разнообразных условиях применения большим количеством независимых пользователей.

Попытка комплексного решения проблемы стандартизации - формулирование концепции Открытых систем. Открытые системы представляют совокупность интерфейсов, протоколов и форматов данных, базирующихся на общедоступных, общепринятых стандартах, обеспечивающих переносимость (мобильность) программного обеспечения, взаимодействие между системами, масштабируемость.

Переносимость - свойство, выражающееся в возможности исполнения программы в исходных кодах на различных аппаратных платформах в среде различных операционных систем.

Взаимодействие систем - свойство, выражающееся в способности систем обмениваться информацией с автоматическим восприятием форматов и семантики данных.

Масштабируемость - свойство, выражающееся в возможности исполнения программы на различных ресурсах (объем памяти, число и производительность процессоров) с пропорциональным изменению ресурсов значением показателей

эффективности. Важно понимать, что ресурсы могут не только возрастать, но и уменьшаться. Например, программа может выполняться на произвольном, выделенном для ее исполнения участке памяти.

В рамках концепции Открытых систем архитектура процессора должна поддаваться достаточно простому формальному описанию со спецификацией типов данных, регистров и выполняемых преобразований без "побочных эффектов".

Известны по крайней мере две попытки реализации этого подхода, рассмотренные ниже.

Архитектурно независимая спецификация программ. В настоящее время в рамках международной организации ISO/IEC в комитете по микропроцессорным системам ведется подготовка проекта стандарта ANDF на архитектурно независимый формат спецификации программ (Architecture Neutral Distribution Format). По мнению разработчика компании X/Open Company Ltd., этот формат спецификаций позволит решить проблему переносимости программ. Компиляция исходного кода предполагается двухэтапной. На первом этапе исходный код транслируется в обобщенные декларации интерфейсов прикладных программ (API) в совокупности с обобщенными описаниями типов данных. Фактически полученная оттранслированная программа представляет собой выражение абстрактной алгебры, определенной Architecture Neutral Distribution Format. В результате текст программы может быть подвергнут формальной проверке и преобразованию. На втором этапе генерируется программа для конкретной архитектуры.

Java-технология, предложенная компанией SUN. В основе данной технологии лежит понятие виртуальной Java-машины, спецификации которой включают следующие типы данных:

• byte - байт;

• short - двухбайтовое целое;

• integer - четырехбайтовое целое;

• long - восьмибайтовое вещественное;

• float - четырехбайтовое вещественное;

• double - восьмибайтовое вещественное;

• char - двухбайтовый символ;

• object - четырехбайтовая ссылка на объект;

• returnAddress - четырехбайтовый адрес возврата. В виртуальном Java-процессоре предусмотрены следующие регистры:

• PC - счетчик команд;

• Vars - регистр для доступа к локальным переменным;

• Optop - указатель на стек операндов;

• Frame - указатель на окружение времени выполнения. Большинство команд

Java-процессора имеют длину один байт, что согласуется со стековой архитектурой процессора, использующей небольшое число регистров и указателей на данные,

Использование байт-кода в процессоре Java позволяет уменьшить длину программ. Средняя длина команды составляет 1,8 байта, В последнее время ко всем ранее существовавшим доводам в пользу стандартизации архитектур добавилась практическая потребность работы в сетях типа Internet, что выдвигает требование короткого программного кода. Открытые системы, создаваемые в Internet, позволят накапливать программные продукты и конструировать системы из уже существующих.

Заметим, что архитектура виртуальной Java-машины достаточно похожа на архитектуру транспьютеров компании IMMOS, Отличие фактически состоит в добавлении элементов объектно-ориентированной технологии. Одним из препятствий на пути развития Java-технологии является низкая производительность исполнения Java-кода. Однако есть все предпосылки для преодоления этого препятствия. Например, современные процессоры с архитектурой компании Intel x86 содержат специальный блок, транслирующий сложные команды в совокупность простых команд RISC-процессора. Далее RISC-процессор исполняет эти команды, используя все преимущества RISC-подхода для достижения высокой производительности. Вполне мыслимое дело разработать подобный транслятор для Java-кода, когда байт-код будет транслироваться в команды реального процессора.

Другим возможным подходом к повышению производительности служит примененный в транспьютере T-9000. В нем предпринята попытка при сохранении байтовой системы команд транспьютеров семейств T-2xx, T-4xx, T-8xx повысить скорость исполнения за счет одновременной обработки большого числа команд при исполнении их на параллельно функционирующих обрабатывающих устройствах.

Лекция 6.

ILP процессоры

Архитектура ILP- процессоров

Более высокая производительность достигается как за счёт совершенствования полупроводниковой технологии, так и за счёт увеличения плотности микросхем. Дальнейшего увеличения скорости выполнения программ можно добиться в первую очередь благодаря реализации определённого вида параллелизма. Параллелизм на уровне команд (instruction-level parallelism, ILP) стал возможен благодаря созданию процессоров и методик компиляции, которые ускоряют работу за счёт параллельного выполнения отдельных RISC-операций. Системы на базе ILP используют программы, написанные на традиционных языках высокого уровня для последовательных процессоров, а обнаружение «скрытого параллелизма» автоматически выполняется благодаря применению соответствующей

компиляторной технологии и аппаратного обеспечения.

Тот факт, что эти методики не требуют от прикладных программистов дополнительных усилий, имеет крайне важное значение. Это решение резко отличается от традиционного микропроцессорного параллелизма (многопроцессорный и мультискалярный тип параллельной обработки), который предполагает, что программисты должны переписывать свои приложения. Поэтому сейчас, параллельная обработка на уровне команд, является единственным надёжным подходом, позволяющим добиться увеличения производительности без фундаментальной переработки приложений. Эти два типа параллельной обработки не исключают друг друга; самые эффективные многопроцессорные или мультискалярные системы, вероятнее всего, будут создаваться на базе процессоров ILP.

Компьютерная архитектура – это своего рода соглашение между классом программ, написанных для данной архитектуры, множеством реализаций процессора для неё. Как правило, это соглашение описывает формат и интерпретацию отдельных команд, но в случае с архитектурами ILP это соглашение может быть расширено: в него включается информация о возможном параллелизме между командами.

Есть два крайних подхода, при возможных промежуточных, к отображению присущего микропроцессору внутреннего параллелизма обработки данных на архитектурном уровне в системе команд. Первый подход более консервативен и состоит в том, что никакого указания на параллельную обработку внутри процессора система команд не содержит. Такие процессоры относятся к классу суперскалярных.

Второй подход - напротив полностью открывает все возможности параллельной обработки. В специально отведенных полях команды каждому из параллельно работающих обрабатывающих устройств предписывается действие, которое устройство должно совершить. Такие процессоры называются процессорами с длинным командным словом (VLIW). Предполагается, что существуют компиляторы с языков высокого уровня, которые готовят программы для загрузки их в микропроцессоры.

Основная идея, определяющая развитие ILP микропроцессоров, состоит в построении возможно большего количества параллельных структур при сохранении традиционных последовательных программ. Это означает, что компиляторы и аппаратура микропроцессора сами, без вмешательства программиста, обеспечивают загрузку параллельно работающих функциональных устройств микропроцессора.

Повысить степень параллелизма программы можно изменяя соответствующим образом ее статическую или динамическую структуру. Поскольку статическая структура программы однозначно соответствует ее исходному тексту (в предположении неизменности компилятора), то изменение статической структуры сводится к изменению исходного кода, что, в общем случае, не всегда возможно. Динамическая же структура программы может быть изменена при неизменной статической структуре. И главной целью такого

изменения должно быть повышение степени параллельного исполнения команд.

Суперскалярные процессоры

Суперскалярные процессоры – это реализация ILP-процессора для последовательных архитектур – архитектур, программа для которых не должна передавать и, фактически, не может передавать точную информацию о параллелизме. Поскольку программа не содержит точной информации о наличии ILP, то, задача обнаружения параллелизма должна решаться аппаратурой, которая, следовательно, должна создавать план действий для обнаружения «скрытого параллелизма». Код для суперскалярных процессоров содержит последовательность команд, которая порождает корректный результат, если выполняется в установленном порядке. Код указывает последовательный алгоритм и, за исключением того, что он использует конкретный набор команд, не представляет себе точную природу аппаратного обеспечения, на котором он будет работать или точный временной порядок, в котором будут выполняться команды. Такой подход увеличивает сложность аппаратного обеспечения, в то же время суперскалярный процессор создаёт план выполнения, используя преимущества тех факторов, которые могут быть определены только во время выполнения.

Допустимые границы преобразования динамической структуры программы задают существующие на множестве инструкций отношения: зависимость по управлению и зависимость по данным. При описании архитектур суперскалярных процессоров часто используется модель окна исполнения. При исполнении программы микропроцессор как бы продвигает по статической структуре программы окно исполнения. Команды в окне могут исполняться параллельно, если между ними нет зависимости.

Для устранения зависимостей, вызванных командами переходов, используется метод предсказания, позволяющий извлекать и условно исполнять команды предсказанного перехода. Если позднее обнаруживается, что предсказание было сделано верно, то результаты условно исполненных команд принимаются. Если предсказание было ошибочным, состояние процессора восстанавливается на момент принятия решения о выполнении перехода.

Команды, помещенные в окно исполнения, могут быть зависимы по данным. Эти зависимости обусловлены использованием одних и тех же ресурсов памяти (регистров, ячеек памяти) в разных командах. Поэтому для правильного исполнения программы необходимо использование этих ресурсов в предписываемом программой порядке.

Все виды зависимостей по данным могут быть классифицированы по типу ассоциаций: RAR - "чтение после чтения", WAR - "запись после чтения" и WAW - "запись после записи", RAW - "чтение после записи". Пример различных зависимостей команд по данным показан на рис.11. Некоторые из зависимостей по данным могут быть устранены. RAR, по сути дела,

соответствует отсутствию зависимостей, поскольку в данном случае порядок выполнения команд не имеет значения. Действительной зависимостью является только "чтение после записи" (RAW), так как необходимо прочитать предварительно записанные новые данные, а не старые.

Лишние зависимости по данным появляются в результате "записи после чтения" (WAR) и "записи после записи" (WAW).

После удаления лишних зависимостей по управлению и данным команды могут исполняться параллельно. Формирование расписания параллельного выполнения команд возлагается на аппаратные средства микропроцессора. Это расписание учитывает существующие зависимости между командами и имеющиеся функциональные модули процессора.

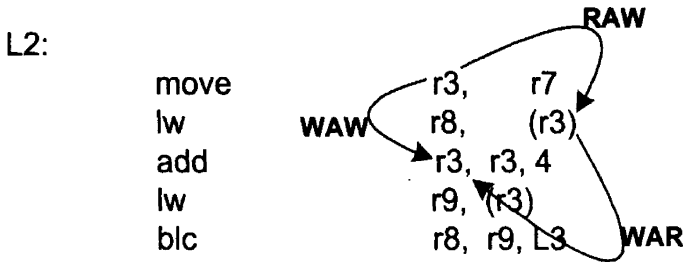


Рис.11. Зависимости команд по данным

Типовая архитектура суперскалярного микропроцессора представлена на рис.12.

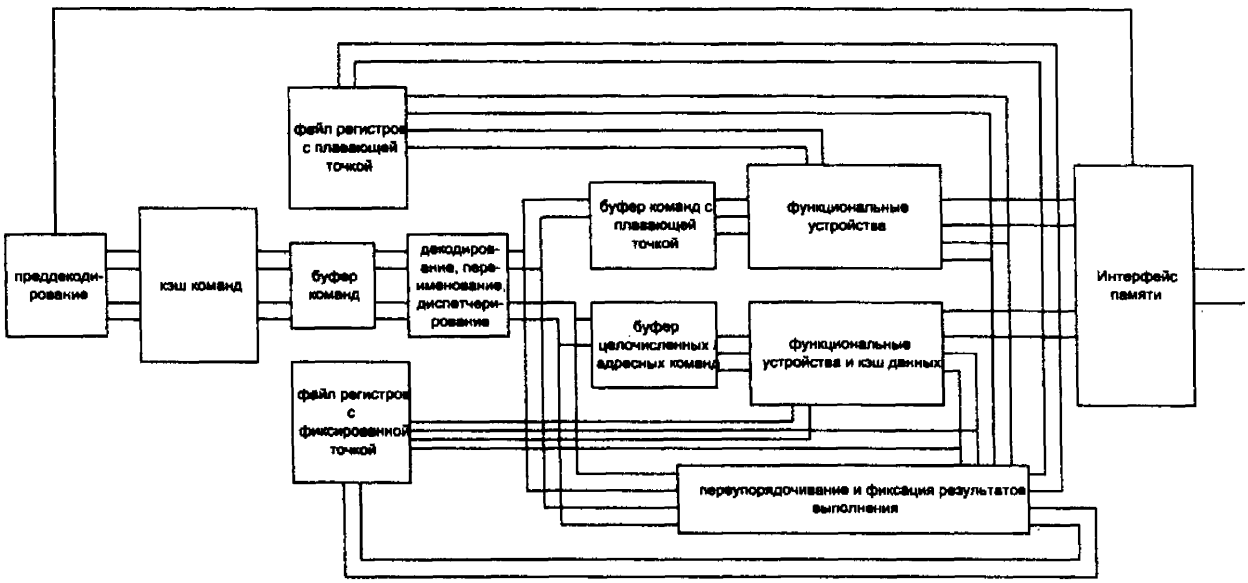


Рис.12. Архитектура суперскалярного микропроцессора

В число основных блоков суперскалярного микропроцессора входят: блок выборки команд и предсказания переходов, блок декодирования команд, анализа зависимостей между командами, переименования и диспетчеризации, блоки регистров и обрабатывающих устройств с плавающей и фиксированной

точками, блок управления памятью, а также блок упорядочения выполненных команд.

Рассмотрим основные приемы повышения быстродействия в суперскалярных микропроцессорах.

Предварительная выборка команд и предсказание переходов. Поскольку при суперскалярной обработке необходимо извлекать из памяти несколько команд за один такт для загрузки параллельно работающих функциональных модулей, повышенные требования предъявляются к пропускной способности интерфейса микропроцессор-память. В современных микропроцессорах применяются многоуровневые раздельные кэш-памяти данных и команд.

Для уменьшения потерь процессорных циклов, связанных с промахами при обращении к кэш-памяти в случае выполнения команд ветвления, в состав системы кэширования введены средства предсказания переходов, основное назначение которых - повысить вероятность наличия в кэш-памяти требуемой команды.

Исполнение условных ветвлений состоит из следующих этапов:

• распознание команды условного ветвления;

• проверка выполнения условия перехода;

• вычисление адреса перехода;

• передача управления, в случае перехода.

На каждом этапе используются специальные приемы повышения производительности:

1. Для быстрого декодирования используются либо дополнительные биты в поле команды, либо преддекодирование команд при выборе из кэш-памяти команд.

2. Часто, когда команда уже выбрана в кэш, условие перехода еще не вычислено и чтобы не задерживать поток команд в данном случае используется предсказание перехода по одной из нескольких возможных схем. Некоторые предсказатели используют статическую информацию из двоичного кода программы или специально выработанную компилятором. Например, определенные коды операций чаще вырабатывают ветвление, чем другие коды, или ветвление более вероятно (при организации циклов), или компилятор может устанавливать флаг, указывающий направления перехода. Может также использоваться статистическая информация, полученная при трассировке программы.

Другие предсказатели используют динамически формируемую информацию в процессе исполнения программы. Обычно это информация, касающаяся истории выполнения данного ветвления, сохраняемая в таблице ветвлений или в таблице предсказаний ветвлений. Таблица предсказания ветвлений организуется по ассоциативному принципу, подобно кэш-памяти, ее элементы доступны по адресу команды, ветвление которой предсказывается. В некоторых реализациях элемент таблицы предсказания ветвления является счетчиком,

значение которого увеличивается при правильном предсказании и уменьшается при неправильном. При этом значение счетчика определяет преобладающее направление ветвлений.

В момент определения действительного значения условия ветвления, вносится изменение в историю ветвления. Если предсказание было неверным, то должна инициироваться выборка правильных команд. Результаты команд, которые были условно выполнены, должны быть аннулированы.

3. Для определения адреса ветвления обычно требуется выполнить целочисленное сложение, прибавляющее к текущему значению счетчика команд смещение, заданное в поле команды ветвления. И хотя это не требует дополнительных циклов для обращения к регистрам, ускорение вычисления адреса может быть достигнуто благодаря использованию буфера, содержащего ранее использованные адреса переходов.

Если требуется осуществить смену значения счетчика команд, то необходим, по крайней мере, один такт для распознания команды ветвления, модификации счетчика команд и выборки команды по заданному значению счетчика команд. Эти задержки вызывают пустые такты в конвейерах процессора. Более сложные решения используют буферы, содержащие наборы команд для двух возможных результатов ветвлений.

Возможно также использование "отложенных переходов", когда одна или несколько команд после команды ветвления выполняются безусловно.

Декодирование команд, переименование ресурсов и диспетчеризация. На этой фазе определяются существенные зависимости (RAW) по данным между командами и преодолеваются несущественные (WAW, WAR), производится распределение команд по буферам команд функциональных устройств.

При декодировании команды создается одна или несколько упорядоченных троек, каждая из которых включает: 1) исполняемую операцию, 2) указатели на операнды, 3) указатель на место помещения результата.

Для преодоления лишних WAR и WAW зависимостей, возникающих в результате ограниченности логических ресурсов (ячеек памяти, регистров), используется механизм динамического отображения определяемых текстом программы логических ресурсов на физические ресурсы микропроцессора. При данном подходе с одним логическим ресурсом может быть связано несколько значений в различных физических ресурсах, каждое из которых соответствует значению логической величины в один из моментов времени последовательного выполнения программы.

Когда команда создает новое значение для логического регистра, физический ресурс, в который помещается это значение, получает имя. Последующие команды, использующие это значение, снабжаются именем физического ресурса. Данная процедура называется переименованием регистров. Используются два основных способа переименования.

В первом, физический файл регистров больше логического. При необходимости переименования из списка свободных физических регистров

берется один и ему сопоставляется соответствующее логическое имя. Если список свободных регистров пуст, диспетчеризация команд приостанавливается до момента появления свободных физических регистров.

Остается вопрос о возвращении физических регистров в список свободных после того, как из них считаны данные в последний раз. Один из способов связывает счетчик с каждым физическим регистром. Счетчик увеличивается при каждом переименовании операнда в командах, использующих этот физический регистр. Соответственно при использовании операнда значения счетчика уменьшается на 1. При достижении счетчиком нуля физический ресурс должен быть переведен в список свободных.

Второй способ переименования использует одинаковое число логических и физических регистров и поддерживает их однозначное соответствие. В дополнение имеется буфер с одним вхождением для каждой инициированной на исполнение команды. Этот буфер называется переупорядочивающим, так как он используется также для установления порядка команд при прерываниях. Данный буфер можно рассматривать в виде кольцевого буфера с указателями "начало" и "конец".

Команды помещаются в конец буфера. По завершению команды ее результат заносится в заранее предписанный ей элемент очереди, независимо от места в очереди, занимаемого этим элементом. К моменту достижения командой начала буфера, если она была исполнена, ее результат помещается в регистровый файл, а сама команда удаляется. Команда, находящаяся в буфере и не исполненная в виду отсутствия значения операнда, остается в нем вплоть до получения этого значения. Одновременно может выбираться из очереди или помещаться в нее несколько команд.

Исполнение команд. После формирования для каждой команды упорядоченных троек, состоящих из кода операции, физических операндов - источника и результата, и размещения их в буферах, наступает фаза динамической проверки готовности значений операндов для исполнения команды.

В идеале команда готова к исполнению как только готовы ее входные операнды. Однако есть ряд ограничений, связанных с доступностью физических ресурсов, таких как исполнительные устройства, коммутаторы и порты регистровых файлов (или переупорядочивающего буфера). Для организации окна исполнения используются различные методы: одной очереди, многих очередей или метод резервирующей станции.

Если имеется одна очередь, то переименование регистров не требуется, так как доступность значений операндов может отмечаться битом резервирования, сопоставленным каждому регистру. Регистр резервируется, когда модифицирующая его команда назначается на исполнение. И регистр освобождается, когда заканчивается исполнение команды. Если для команды ресурсы не были зарезервированы, то она приостанавливает свое исполнение.

В методе многих очередей каждая очередь организуется для команд одного

типа. Например, очередь команд с плавающей точкой или очередь команд работы с памятью.

Третий метод предполагает использование резервирующей станции, состоящей из совокупности элементов, каждый из которых содержит позиции для размещения кода операции, наименования первого операнда, самого первого операнда, признака доступности первого операнда, наименования второго операнда, самого второго операнда, признака доступности второго операнда и наименования регистра результата. Когда команда завершает исполнение и вырабатывает результат, то наименование результата сравнивается с наименованиями операндов в резервирующей станции.

Если в резервирующей станции обнаруживается команда, ждущая этого результата, то данные записываются в соответствующую позицию и устанавливается признак их доступности. Когда у команды доступны все операнды, инициируется ее исполнение. Резервирующая станция следит за доступностью операндов. Когда команда при диспетчеризации попадает в резервирующую станцию, все готовые операнды из регистрового файла переписываются в поля этой команды. Когда все операнды готовы, команда исполняется. Иногда резервирующая станция содержит не сами операнды, а указатели на них в регистровом файле или переупорядочивающем буфере.

Работа с памятью. Для вычисления адреса памяти, как правило, требуется, по крайней мере, одно сложение. После вычисления адреса может понадобиться его преобразование в физический адрес, осуществляемое буфером трансляции адресов (TLB).

Проблемы конфликтов при доступе к разделяемому ресурсу - ячейкам памяти, по сути те же, что и при доступе к регистрам.

Завершение выполнения команды. Завершающей фазой исполнения команды является фаза изменения состояния процессора в соответствии с выполненной командой. Назначение этой фазы - сохранение последовательной модели исполнения программы, при реальном параллельном выполнении отдельных команд и условном выполнении команд ветвления. Для изменения состояния процессора применяются два основных способа, причем оба основаны на использовании двух состояний: состояния, измененного в результате операции, и состояния, требуемого для восстановления.

При первом способе сохраняется состояние процессора в наборе контрольных точек или в буфере истории вычислений, которые, в случае необходимости, используются для восстановления состояния.

Второй способ предполагает рассмотрение логического (архитектурного) и физического состояния процессора. Физическое состояние изменяется немедленно по завершении очередной команды. Архитектурное состояние изменяется тогда, когда ясен результат условно выполненных команд. Для реализации этого способа используется переупорядочивающий буфер: результаты из буфера отправляются в файл архитектурных регистров и память.

В переупорядочивающем буфере для каждой команды содержится

соответствующее ей значение счетчика команд и значения других регистров, которые необходимы для корректного обслуживания прерываний.

На рис.13. показаны основные компоненты суперскалярного микропроцессора: функциональные модули - выполнения операций с плавающей (FPU) и фиксированной (ALU) точкой, устройство загрузки/сохранения, файлы регистров, раздельная кэш-память команд и данных, а также вспомогательные модули, обеспечивающие динамическое планирование вычислительного процесса " устройство связи с кэш-памятью 2-го уровня, блок переупорядочивания команд и блок предварительной дешифрации.

По крайней мере два обстоятельства ограничивают эффективность использования суперскалярных архитектур. Во-первых, есть ограничения на степень параллелизма на уровне команд, даже если применяется самая совершенная техника суперскалярных вычислений. Первое ограничение проистекает из условных переходов. Другое следует из того, что размер окна исполнения (число активных команд, могущих исполняться параллельно) ограничивает возможный присущий программе параллелизм, так как не рассматривается параллельное исполнение команд, находящихся на расстоянии, превышающем размер окна.

Во-вторых, сложность суперскалярного процессора возрастает как количество параллельно исполняемых команд и даже быстрее.

Вероятнее всего, что пределом распараллеливания при суперскалярной обработке является запуск одновременно на исполнение в каждом такте 7-8 команд.

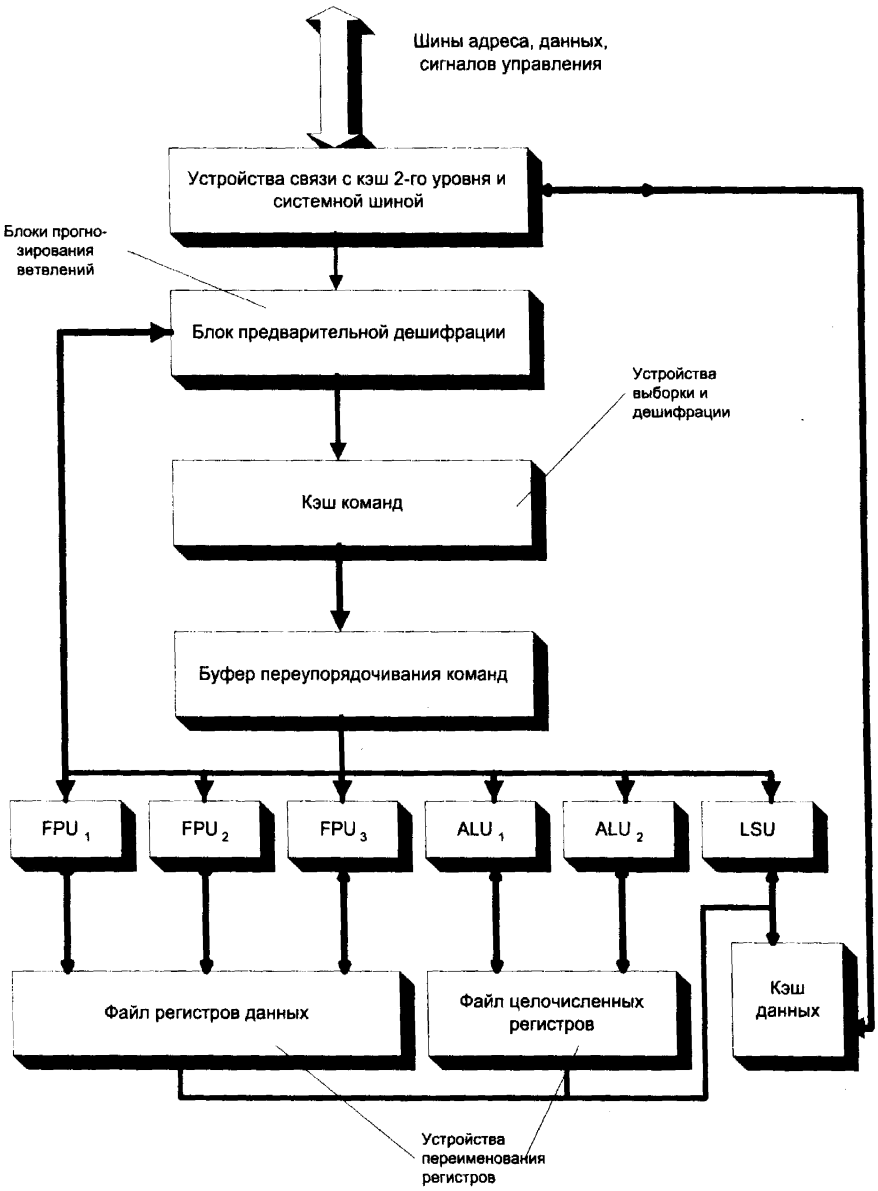


Рис. 13. Структура суперскалярного микропроцессора

VLIW-процессоры.

Альтернатива суперскалярной обработке – процессоры с длинным командным словом (VLIW). Использование этого метода предполагает задание в командном слове совокупности параллельно выполняемых команд. Подготовкой таких программ занимается компилятор.

В отличие от программ для суперскалярных процессоров, код VLIW предлагает точный план того, как процессор будет выполнять программу, план, которой компилятор создаёт статически во время компиляции. Код точно указывает, когда будет выполнена каждая операция, какие функциональные устройства будут работать и какие регистры будут содержать операнды. Компилятор VLIW создаёт такой план выполнения, имея полное представление о процессоре VLIW, причём создаёт этот план так, чтобы добиться требуемой

записи выполнения – последовательности событий, которые действительно происходят во время работы программы. Компилятор передаёт план выполнения (через архитектуру набора команд, которая точно описывает параллелизм) аппаратному обеспечению, которое, в свою очередь, выполняет этот план.

Процессоры VLIW представляют собой пример архитектуры, для которой программа представляет точную информацию о параллелизме. Компилятор выявляет параллелизм в программе и сообщает программному обеспечению, какие операции не зависят друг от друга. Эта информация имеет важное значение для аппаратного обеспечения, поскольку в этом случае оно «знает» без дальнейших проверок, какие операции можно начинать выполнять в одном и том же такте.

Достоинства VLIW заключаются в следующем:

Компилятор может эффективнее исследовать зависимости между командами и выбирать параллельно исполняемые команды, чем это делает аппаратура суперскалярного процессора, ограниченная размером окна исполнения.

VLIW процессор имеет более простое устройство управления и потенциально может иметь более высокую тактовую частоту.

Однако у VLIW процессоров есть серьёзный фактор, снижающий их производительность. Это команды ветвления, зависящие от данных, значения которых становятся известны только в динамике вычислений. Окно исполнения VLIW-процессора, не может быть очень большим в виду отсутствия у компилятора информации о зависимостях, формируемых динамически, в процессе выполнения. Этот недостаток препятствует возможности переупорядочивания операций в VLIW процессоре. Кроме того, VLIW реализация требует большого размера памяти имён, многовходовых регистровых файлов, большого числа перекрёстных связей.

EPIC-процессоры.

Тип архитектуры Explicitly Parallel Instruction Computing – это эволюция архитектуры VLIW, которая абсорбировала в себе многие концепции суперскалярной архитектуры, хотя и в форме, адаптированной к EPIC. По сути, EPIC – это «идеология», определяющая, как создавать ILP-процессоры, а также набор характеристик архитектуры, которые поддерживают данную идеологию. К архитектуре EPIC можно отнести множество различных архитектур набор команд (ISA). Помимо включения или исключения той или иной характеристики архитектуры, которые мы рассматриваем, проектировщики процессоров должны принимать традиционные решения по таким вопросам, как набор кодов операций, диапазон поддерживаемых типов данных и количество используемых регистров. Любая архитектура, относящаяся к классу EPIC должна реализовывать общую идеологию EPIC. В зависимости от того, какие из характеристик EPIC использует архитектура ISA, она может быть оптимизирована для различных приложений, например, для систем общего назначения или встроенных устройств. Из чего следует, что тип архитектуры

EPIC должен быть архитектурой общего назначения, то есть архитектурой, способной достигать высокой степени параллелизма на уровне команд как в числовых, так и в скалярных приложениях.

Одна из целей создания архитектуры EPIC, состоит в том, чтобы сохранить реализованный в VLIW принцип статического создания плана выполнения, но в то же время обогатить его возможностями суперскалярного процессора, которые позволили новой архитектуре лучше учитывать динамические факторы, традиционно ограничивающие параллелизм, свойственный VLIW. Чтобы добиться этих целей, «идеология» EPIC была построена на следующих основных принципах:

Компилятор должен играть ключевую роль в создании плана выполнения, а архитектура должна обеспечивать поддержку необходимых для этого компонентов.

Архитектура должна обеспечивать функции, которые помогают компилятору в использовании статических ILP.

Архитектура должна обеспечивать механизм для передачи плана выполнения компилятора аппаратному обеспечению.

Направления развития ILP архитектуры.

Как уже отмечалось ранее, в ILP процессорах предпринимается попытка в рамках модели последовательных программ реализовать параллельное исполнение команд этих программ. После извлечения последовательного потока команд между командами устанавливаются только действительно необходимые зависимости по данным. При этом сохраняется достаточно информации о порядке следования команд в исходной программе, чтобы сохранить их порядок при наступлении прерывания.

Типичный ILP процессор выбирает команды и исследует их по мере выполнения. Исследование проводится с целью выявления и обработки команд перехода, идентификации типа команды для ее дальнейшего направления на соответствующий исполнительный блок или в буфер памяти. Выполняются также некоторые действия для смягчения зависимостей по данным, например переименование регистров. VLIW процессор возлагает на компилятор статическую реализацию тех функций, которые в суперскалярном процессоре выполняются динамически.

За последние десять лет сравнение достоинств VLIW и суперскалярных архитектур было основной темой в дискуссиях специалистов по вопросам ILP. Сторонники той и другой концепции сводят обсуждение к противопоставлению простоты и ограниченных возможностей VLIW и сложности и динамическим возможностям суперскалярных систем. При этом ясно, что оба подхода имеют свои достоинства и говорить об их альтернативности не уместно. Очевидно, что создание плана выполнения во время компиляции существенно для обеспечения высокой степени распараллеливания на уровне команд, даже для

суперскалярного процессора. Так же ясно и то, что во время компиляции существует неоднозначность, которую можно разрешить только во время выполнения, и для решения этой задачи процессор требует наличия динамических механизмов. Сторонники EPIC согласны с обеими позициями. Различие только в том, что компилятор может управлять такими динамическими механизмами, применяя их выборочно там, где это возможно. Столь широкие функции управления дают компилятору возможность использовать правила управления этими механизмами более оптимально, чем это позволяют аппаратные возможности.

Основные принципы EPIC, наряду с возможностями архитектуры, которые их поддерживают, обеспечивают средства определения ILP-архитектур и процессоров, позволяющих добиться более высокой степени ILP при меньшей сложности аппаратуры в самых разных прикладных областях. IA-64 – пример того, как принципы EPIC могут применятся к вычислительным системам общего назначения - области, где совместимость кода, имеет критически важное значение. EPIC даёт надежды на устойчивый рост производительности микропроцессоров общего назначения на наших приложениях без кардинального переписывания этих приложений. Однако можно быть уверенным в том, что EPIC будет играть столь же важную роль и на рынке высокопроизводительных встроенных систем. В этой области более жёсткие требования к соотношению цена/производительность и при этом более низкие требования к совместимости на уровне объектных модулей, что заставляет использовать более настраиваемые архитектуры.

Дальнейшее повышение производительности микропроцессоров связывается в настоящее время со статическим и динамическим анализом кода с целью выявления резервов параллелизма уровня отдельных команд и программных сегментов с использованием информации, предоставляемой компилятором языка высокого уровня. Исследования в данном направлении привели к разработке мультискалярной архитектуры процессоров, которые являются дальнейшим развитием ILP архитектуры.

Лекция 7.

Мультискалярные процессоры

Мультискалярная модель выполнения программы.

Мультискалярные процессоры используют агрессивную парадигму выполнения кода с целью извлечения параллелизма уровня команд из последовательной программы, представленной на языке высокого уровня. В соответствии с данной парадигмой программа разбивается на совокупность задач с помощью программных и аппаратных средств. Задача - часть программы, выполнению которой соответствует непрерывная область динамической последовательности команд (например, часть базисного блока, базисный блок, множество базисных блоков, одиночная итерация цикла, полный цикл, обращение к функции, и т.д.). Задачи программы статически

разграничиваются аннотациями. Зависимости между операторами программы по управлению представляются как граф управляющих зависимостей (ГУЗ), в котором вершинами являются задачи, а дугами задается порядок их выполнения. Динамика выполнения программы может рассматриваться как обход ГУЗ программы. На каждом шаге обхода мультискалярный процессор назначает одну задачу на один из процессорных элементов (ПЭ) для выполнения, без учета фактического содержания задачи, и продолжает обход ГУЗ от рассматриваемой вершины до следующей.

Задача назначается для выполнения некоторому процессорному элементу, передачей ему начального значения программного счетчика. Множество инициированных таким образом задач выполняется параллельно на процессорных элементах, результатом чего является выполнение множества команд за один процессорный такт.

Каждый из процессорных элементов выбирает и выполняет команды, принадлежащие выделенной ему задаче. Значения разделяемых процессорными элементами регистров копируются в каждый ПЭ. Результат модификации содержимого регистров динамически направляется множеству параллельных ПЭ в соответствии с генерируемыми компилятором масками.

Доступ к памяти осуществляется спекулятивно (условно, по предположению) без знания последовательности предшествующих команд загрузки или сохранения. Обращение к данным осуществляется параллельно многим ПЭ, обработка приостанавливается только в случае истинной зависимости данных.

Пример архитектуры мультискалярного процессора показан на рис.14.

В общих чертах мультискалярный процессор можно рассматривать как параллельную вычислительную систему, состоящую из совокупности ПЭ с программой-планировщиком, которая назначает задачи на ПЭ. Как только задача назначена на ПЭ, он выбирает и выполняет команды задачи, пока она не завершится. Множество ПЭ, каждый с собственным внутренним механизмом последовательного выполнения команд, поддерживают выполнение множества задач. Команды, содержащиеся внутри динамического окна исполнения, ограничены первой командой в самой ранней выполняемой задаче и последней командой в последней выполняемой задаче. При условии, что каждая задача может содержать циклы и обращения к функциям, эффективный размер окна может быть чрезвычайно большим. Существенным является то, что не все команды внутри этого широкого диапазона одновременно рассматриваются для выполнения, а только ограниченный набор внутри каждого из ПЭ.

Важно заметить, что задачи, хотя и разделены на группы команд, но не являются независимыми. Так как задачи являются частями последовательного потока команд, то отношения по данным и управлению между индивидуальными командами должны поддерживаться в процессе выполнения. Ключевым вопросом в мультискалярной реализации является обеспечение связи по данным и управлению между параллельными процессорами. То есть как обеспечить выполнение последовательного обхода ГУЗ, если фактически

выполняется непоследовательный обход.

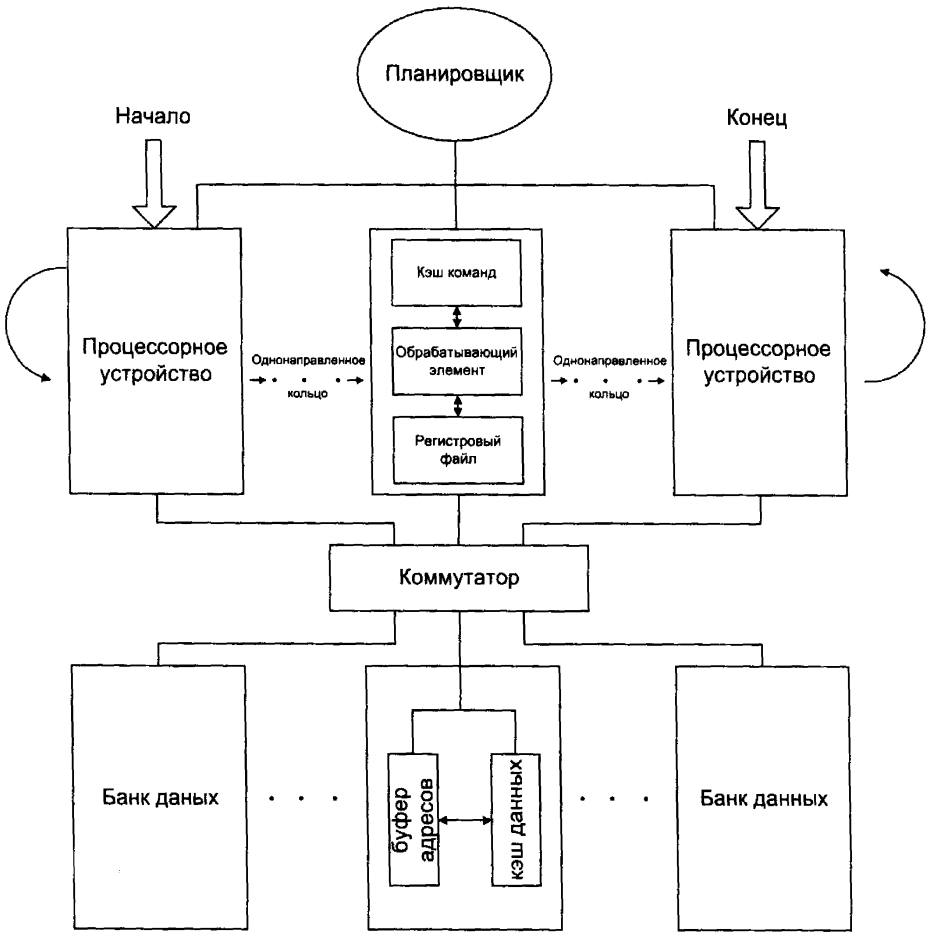


Рис 14. Микроархитектура мультискалярного процессора.

Последовательный обход поддерживается следующим образом. Во-первых, для каждого процессора обеспечивается последовательная модель выполнения назначенной ему задачи. Во-вторых, предписывается последовательный порядок выполнения для совокупности процессоров, который поддерживается с помощью организации циклической очереди ПЭ. Указатели начала и конца очереди идентифицируют ПЭ, которые выполняют самую раннюю и самую позднюю из назначенных текущих задач соответственно.

По мере выполнения команд задачи производятся и потребляются значения переменных программы. Эти значения связаны с местом хранения, а именно с регистрами и с памятью. Так как при последовательном выполнении область хранения переменных рассматривается как единый набор регистров и памяти, мультискалярное выполнение должно поддерживать такую же модель. Кроме того, мультискалярное выполнение должно гарантировать, что значения используются и производятся также, как и при последовательном выполнении. Чтобы обеспечить это, необходимо синхронизировать обмен между задачами.

В случае использования регистровой памяти логика управления

синхронизирует создание значений регистров в задачах-предшественниках с потреблением этих значений в задачах-преемниках. Производимые задачей регистровые значения могут быть определены статически и отмечены в маске создания задачи. В момент выработки соответствующего регистрового значения, если есть необходимая отметка в маске создания, это значение посылается через однонаправленный кольцевой канал (см. рис.14.) последующим задачам, т.е. в ПЭ, которые являются логическими преемниками ПЭ, выработавшего значение. Загружаемые из кольцевого канала в регистры значения, предназначенные для задач-преемников, определяются в маске накопления, которая является объединением масок создания активных в настоящее время задач-предшественников. Как только значения получены из модулей предшественников, очищаются признаки сохранения в модулях преемниках. Если задача использует одно из этих значений, потребляющая команда может быть исполнена только в том случае, если значение было получено, иначе она ждет получения требуемого значения.

В отличие от значений регистров, для значений, хранимых в памяти, в силу динамического вычисления адресов, нельзя заранее точно определить, какие из них используются или производятся задачей. Если известно, что задача потребляет значение из памяти (используя команду загрузки), которое произведено (с помощью команды сохранения) в более ранней задаче, возможно синхронизировать потребление и производство этого значения. То есть загрузка в задаче-преемнице может быть отложена до тех пор, пока в задаче-предшественнице не будет выполнена команда сохранения (похоже на ситуацию с регистрами, однако механизм синхронизации все же другой, в виду несоизмеримости размеров пространства имен).

В более общем случае, когда такое знание недоступно, может быть предпринят консервативный или агрессивный подход. Консервативный подход подразумевает необходимость ожидания до тех пор, пока не возникнет уверенность, что команда загрузки прочтет правильное значение. Этот подход обычно подразумевает задержку выполнения команд загрузки внутри задачи, до тех пор пока не завершили операции записи в память все задачи-предшественницы, результат которых может быть использован последующей командой. При агрессивном подходе загрузки из памяти в регистры ПЭ должны выполняться спекулятивно, в предположении, что задача-предшественница позже не будет сохранять значения в ту же самую ячейку памяти. Чтобы гарантировать, что никакая задача-предшественница не записывает значение в ячейку памяти, предварительно считанную задачей-преемником, должна проводиться проверка в процессе выполнения вычислений. Если эта проверка идентифицирует загрузку и сохранение, которые находятся в противоречии (не происходят в соответствующем порядке), более поздняя задача должна быть прервана и должна быть инициализирована соответствующая процедура восстановления. В мультискалярных процессорах используется агрессивный подход.

Из-за спекулятивного характера мультискалярное выполнение должно иметь как средства подтверждения правильности выполнения, так и средства

исправления в случае неправильного выполнения. Выполнение команд внутри задач может рассматриваться как спекулятивное с двух точек зрения:

• спекулятивное по управлению;

• спекулятивное по данным.

Если в результате спекулятивного управления предсказание следующей задачи оказалось неверным, то следующая задача (задачи) должна быть отменена и восстановлена правильная последовательность задач. Аналогично задача, использующая неправильные данные, должна быть отменена и должно быть восстановлено правильное значение данных. В любом случае отмена задачи приводит к отмене всех задач, выполняемых после отмененной (иначе поддержание последовательной семантики оказывается сложным).

Для упрощения сохранения последовательной семантики исполнения программы мультискалярный процессор удаляет задачи из циклической очереди в том же порядке, в каком их помещал в очередь. В процессе спекулятивного выполнения задача производит значения, которые могут быть как правильными, так и неправильными. Только безусловно правильные результаты задачи могут быть безопасно использованы другими задачами. Тем не менее, в мультискалярном процессоре значения оптимистично посылаются для спекулятивного использования в процессе выполнения других задач. Поскольку задача посылает значения предварительно другим задачам, как только их вырабатывает, большая часть, если не все значения, будут посланы к моменту, когда задача становится головной в очереди. Таким образом, отмена задачи для освобождения процессора и назначения новой задачи может быть выполнена просто путем модифицирования указателя начала очереди.

Мультискалярные программы.

Мультискалярная программа должна обеспечить возможность быстрого обхода ее ГУЗ, в результате которого производится распределение множества задач по множеству процессоров.

Спецификация кода для каждой задачи стандартна. Задача определяется как фрагмент программы для последовательной машины. Хотя система команд, в которой представляется код, оказывает влияние на конструкцию каждого индивидуального процессора, это не оказывает влияния на остальную часть конструкции мультискалярного процессора.

Для ускорения обхода ГУЗ планировщику мультискалярного процессора требуется информация о структуре потока управления программы. В частности, требуется знать, какие задачи являются возможными преемниками любой данной задачи в ГУЗ. Планировщик мультискалярного процессора использует эту информацию для предсказания одной из возможных задач-преемников и продолжения обхода ГУЗ, начиная с текущей отметки. Такая информация может быть определена статически и помещена в описатель задачи. Описатели задачи могут быть расположены внутри текста программы (например, перед кодом задачи) или помещены отдельно, рядом с текстом программы (например,

в конце).

Для согласованного выполнения различных задач необходимо характеризовать каждую задачу в соответствии с набором используемых и производимых задачей значений.

Процедура обработки регистровых значений проста. В результате статического анализа ГУЗ компилятором формируется маска создания. Потребляя значения, задача ожидает их только в том случае, если они еще не были произведены задачей-предшественником. Иначе она находит требуемые значения внутри локальной памяти, переданные по кольцу задачей-предшественницей.

Естественным является расположение маски создания внутри описателя задачи. Так как задача может содержать множество базисных блоков, выполнение которых зависит от обрабатываемых данных, не представляется возможным определить статически, какие регистровые значения будут созданы динамике вычислений. Маска создания должна быть консервативной и вследствие этого включать все возможные регистровые значения, которые могут быть произведены.

По мере выполнения процессором команд задачи производимые значения регистров пересылаются последующим задачам. Так как ПЭ не может определять априорно, какие команды содержит назначенная ему задача, он не может знать, какие из команд выполняют модификацию регистров, чье значение должно быть послано другим задачам. В соответствии с последовательной семантикой другим задачам должен быть послан только результат последней модификации регистра в задаче. Стратегия, связанная с ожиданием выполнения всех команд в задаче (тогда никакие дальнейшие модификации регистров невозможны), нецелесообразна, так как это часто приводит к ожиданию другими задачами значения, которое уже является доступным.

Не все созданные задачей значения должны быть переданы задачам-приемникам. Достаточно передавать лишь те значения, которые будут использованы вне создавшей их задачи.

Компилятор имеет возможность определения последней команды в задаче, которая модифицирует соответствующий регистр. Он может отметить эту команду как специальную (выполнить-и-переслать) команду, которая в дополнение к выполнению определенной операции направляет результат следующим ПЭ. Кроме того, поскольку ПЭ выполняет команды задачи, он может идентифицировать те регистры, для которых значения не будут произведены.

По тем же самым причинам процессор не может определить, какие команды в действительности выполняет назначенная ему задача, так же как не может определять априорно, на какой команде задача завершится, т.е., в какой точке управление передается вне задачи. Во время разбиения компилятором ГУЗ на задачи определяются границы задачи и узлы передачи управления. Команда в

одном из этих узлов передачи управления может быть отмечена специальными условиями остановки так, чтобы соответствующие условия могли быть оценены к моменту выборки такой команды процессором. Если связанные с командой условия останова выполнены, то задача завершена.

Спецификация пересылки и останова может быть задана с помощью добавления тэговой битовой отметки (битов пересылки и стоповых битов) к каждой команде в задаче. Возможно также другое введение битовых отметок. Например, с каждой статической командой может быть ассоциирована таблица тэговых битов. Аппаратные средства выбирают команды из текста программы и соответствующие битовые отметки из таблицы, объединяют эту пару в новую команду и помещают в кэш-память команд. Освобождение регистра может быть задано добавлением специальной команды освобождения базовой системе команд.

Мультискалярная программа может быть сгенерирована из существующей двоичной, путем добавления описателей задачи и битовых отметок. Эта мультискалярная информация может быть размещена внутри кода программы, а также до или после кода.

Разделение исполнительного кода и описателей позволяет упростить процедуру перенесения программы на другие аппаратные средства.

Мультискалярные аппаратные средства.

На мультискалярные аппаратные средства возлагаются функции обхода ГУЗ, назначения задач на ПЭ и выполнения этих задач при сохранении последовательной семантики программы. Работа по определению порядка назначения задач на выполнение возлагается на программу-планировщик. По адресу описателя задачи программа-планировщик выбирает описатель задачи и назначает задачу на ПЭ, выдает адрес первой команды, устанавливает маски создания и накопления для задачи. Планировщик, используя статическую или динамическую схему предсказания, на основе информации из описателя задачи, предсказывает задачу-преемницу. Каждый ПЭ независимо выбирает и выполняет команды задачи до тех пор, пока не сталкивается с командой останова, идентифицирующей завершение задачи.

Основной целью распределения задач по ПЭ мультискалярного процессора является создание возможности выполнения нескольких команд в одном такте. Потери производительности мультискалярного процессора возможны из-за наличия у ПЭ тактов бесполезных вычислений, тактов ожидания и свободных тактов.

Бесполезные такты вычисления представляют работу, которая в последующем будет отменена в виду использования неправильных значений данных или неправильного предсказания. Такты ожидания связаны с ожиданием получения значения, созданного командой в задаче-предшественнице, или значения, созданного командой в той же самой задаче (например, в случае операции с большим временем выполнения или в виду неудачного обращения в кэш), а также с ожиданием при выполнении действий

по перепланированию задач. Неактивные такты составляют время, в течение которого ПЭ не имеет назначенной задачи. Основной причиной их возникновения является несбалансированность загрузки ПЭ.

Для уменьшения потерь, связанных с бесполезными тактами, следует снижать вероятность отмены результатов предыдущих вычислений, обеспечивая синхронизацию ПЭ по данным, а также устанавливать факт необходимости отмены (если он имеет место быть) как можно раньше.

Преимущества мультискалярной архитектуры.

Мультискалярный процессор имеет некоторые свойства, выгодно отличающие его от традиционных суперскалярных микропроцессоров.

При стандартном подходе точность предсказания ветвлений ограничивает степень параллелизма. Если средняя вероятность правильного предсказания перехода - 0,9, то вероятность правильного предсказание на пять ветвлений вперед только 0,6.

Мультискалярный процессор имеет большую глубину предсказания при обеспечении высокой вероятности выбора правильного направления вычислений. Это свойство обусловлено избирательностью предсказания ветвей. Мультискалярный процессор разбивает последовательный поток команд на задачи. Хотя задачи могут содержать внутренние ветви, планировщик должен предсказывать только ветви, которые отделяют задачи. Ветви, содержащиеся внутри задачи, не предсказываются (если они не предсказаны отдельно внутри ПЭ).

Для суперскалярных процессоров наличие широкого окна выполнения приводит к увеличению числа отложенных команд и усложняет контроль результатов выполнения всех команд в этом окне.

В мультискалярной реализации окно может быть очень широким, однако в любой момент времени только несколько команд должны быть рассмотрены на предмет выдачи результатов (только одна для каждого ПЭ). Границы окна отложенных команд могут быть идентифицированы первой и последней командами в очереди на исполнение.

Для одновременной выдачи n результатов в процессоре должна использоваться логика со сложностью n^2, чтобы выполнить перекрестную проверку зависимостей среди команд. В суперскалярном процессоре, это ограничивает пропускную способность логики выдачи. В мультискалярном процессоре каждый ПЭ выдает команды независимо, т.е. используется сложность логики порядка n.

Прежде чем переупорядочить доступ к памяти, необходимо идентифицировать и вычислить все адреса загрузки и записи значений.

В суперскалярной реализации команды загрузки и записи упорядочиваются (или сохраняются в первоначальной последовательности) и помещаются в буфер вместе с адресом доступа к памяти. При выполнении команды загрузки проверяется буфер, чтобы гарантировать, что не отложена никакая более

ранняя команда записи по тому же самому или еще не определенному адресу. При выборке значения из памяти буфер проверяется, чтобы гарантировать, что не отложена никакая более ранняя команда загрузки или записи по тому же самому или еще не определенному адресу. В мультискалярной реализации команды загрузки и записи могут быть выполнены независимо, без знания последовательности выполнения команд загрузки и записи в задачах преемнице или предшественнице.

В суперскалярном процессоре возможна генерация достаточно широкого окна выполнения с большой глубиной предсказания ветвлений. Кроме того, возможно генерировать очень гибкий план выполнения команд. Например, загрузка в вызываемой функции может выполняться параллельно с запоминанием в вызывающей функции. Однако суперскалярный процессор не имеет представления о ГУЗ программы. Поэтому и возникает необходимость предсказания каждого перехода, что, в конечном счете, приводит к снижению точности предсказания и производительности.

Мультискалярный процессор во многом похож на многопроцессорную систему с общей памятью и очень низким уровнем непроизводительных затрат на планирование. Главное их отличие заключается в том, что многопроцессорная система требует, чтобы компилятор делил программу на задачи, где все соотношения зависимостей между задачами известны (предусмотрены программистом путем использования операторов синхронизации и межпроцессорных коммуникаций), а мультискалярный процессор не требует никакого априорного знания относительно связей команд по управлению и данным.

Мультискалярная архитектура объединяет принципы низко- и высокоуровневого распараллеливания, методы анализа статической и динамической структур программы, благодаря чему позволяет добиться более высоких значений эффективности использования вычислительных ресурсов процессора, чем другие типы архитектур. Фактически в мультискалярных процессорах реализован симбиоз автоматически распараллеливающего компилятора, дающего указания аппаратуре процессора в виде отметок команд и специальных команд, и аппаратных средств, воспринимающих эти указания.

Изложенный выше подход не является единственно возможным при реализации этой плодотворной идеи - привлечения компилятора к распределению заданий по ПЭ и балансировке загрузки процессоров в многопроцессорных системах.

Лекция 8.

Организация интерфейса МП устройств с внешними устройствами и памятью. Встроенные микропроцессорные системы управления.

Появление в 1971 году первого микропроцессора ознаменовало собой начало новой эры не только в вычислительной технике, но и в области *систем встроенного управления оборудованием* — эры высокопроизводительных и

надежных цифровых, микропроцессорных систем управления, интегрированных в рабочую машину, механизм, прибор, изделие — станок, робот, стиральную машину, принтер, плоттер, радиотелефон, автомобиль и т.д.

Компьютерная и связанная с ней микропроцессорная техника развиваются столь стремительно, что производительность процессоров удваивается каждые 8-10 месяцев при значительном росте степени интеграции, снижении габаритов, энергопотребления и цены.

Революция в управляющей электронике сопровождается революцией и в силовой электронике, что позволяет создавать *интегрально-гибридные интеллектуальные электронные модули,* а также конструктивно интегрировать в одном изделии рабочий орган механизма, силовой преобразователь, устройство управления, источник питания и датчики.

Вместо традиционного термина «электромеханика» постепенно начинают применять термин «мехатроника», означающий конструктивное объединение механики и электроники на принципиально новом уровне, когда рост управляющих вычислительных ресурсов при использовании *больших интегральных схем* (БИС) сопровождается значительным повышением надежности оборудования, главным образом, за счет резкого уменьшения монтажных соединений и расширением функциональных возможностей изделия в сторону автоматической адаптации к условиям эксплуатации и интерактивного обучения в процессе диалога с оператором.

Встроенной системой управления будем называть систему управления, конструктивно интегрированную в оборудование. Так, система управления, встроенная в статический преобразователь частоты для асинхронных двигателей, может представлять собой одно- или многоплатную микроЭВМ с необходимым набором интерфейсов для обеспечения как непосредственного управления инвертором и приводом в целом, так и взаимодействия с человеком-оператором, включая, например пульт оперативного управления с дисплеем и клавиатурой. Обязательным компонентом такой системы является интерфейс с системой управления более высокого уровня (промышленным программируемым контроллером или компьютером в промышленном исполнении), что позволяет решать задачи комплексной автоматизации с использованием заданного числа единиц технологического оборудования, объединяя это оборудование в единую *распределенную систему управления.*

В зависимости от сложности решаемой задачи встроенная система управления может быть *однопроцессорной* или многопроцессорной *(мультимикропроцессорной), одноуровневой* или *многоуровневой.* В последнем случае на *нижнем уровне управления* решаются задачи *непосредственного управления* отдельными компонентами оборудования (например отдельными осями привода, узлами автомобиля), а на следующем, более высоком, - задачи совместного управления в реальном времени, связи с оператором, системой верхнего уровня и т.д. Типичными примерами являются станки с числовым программным управлением, роботы-манипуляторы, изделия автомобильной и авиационной электроники, системы связи.

Для многоуровневых систем управления в настоящее время четко прослеживается тенденция оформления систем управления *среднего уровня* в самостоятельном конструктиве для монтажа в стойки или в панели управления. Возможен также вариант настольного или настенного монтажа. Такие устройства управления получили название *индустриальных рабочих станций, индустриальных компьютеров, панельных компьютеров, промышленных программируемых контроллеров.* При этом контроллеры нижнего уровня управления могут подключаться к системе среднего уровня управления несколькими способами: через стандартные последовательные или параллельные интерфейсы; путем установки на системную шину в качестве специализированных *устройств сопряжения с объектом (модулей УСО).*

Индустриальные компьютеры имеют, как правило, развитый набор стандартных устройств сопряжения с объектом (УСО), делающий их универсальными средствами управления для широкого круга применений. Тем не менее на нижнем уровне управления двигателями, статическими преобразователями и др. требуется в большинстве случаев разработка *встроенных специализированных контроллеров,* причем эту разработку могут выполнить только специалисты в данной предметной области, хорошо разбирающиеся в особенностях объекта управления, способные предложить и реализовать весь комплекс необходимых алгоритмов оптимального управления объектом.

Главное отличие *промышленного контроллера* от *промышленного компьютера* состоит в адаптации языка программирования под конкретную область применения. Так, большинство промышленных контроллеров, выпускаемых такими известными фирмами как Allen Bredley, Simens, Fanuc, ABB и др. являются *программируемыми логическими контроллерами (PLC)* и имеют встроенные интерпретаторы с языка релейной автоматики или языка Булевой алгебры, что позволяет неспециалисту программирование системы управления. Таким образом, одноуровневые системы встроенного управления выполняются преимущественно на *базе однокристальных микроЭВМ - микроконтроллеров,* а двух- и более -уровневые предполагают использование на среднем уровне управления многоплатных микроЭВМ типа промышленного программируемого контроллера или компьютера в промышленном исполнении.

Встраиваемое управляющее устройство является *микропроцессорной системой управления,* в состав которой кроме центрального процессора на базе однокристального микропроцессора и микроконтроллера входят необходимые дополнительные элементы памяти и периферийные интерфейсные БИС для организации сопряжения с датчиками, объектом управления и системой управления более высокого уровня.

С точки зрения производителей микропроцессорной техники все задачи, решаемые системами встроенного управления делятся на два больших класса: *управление событиями в реальном времени и управление потоками данных.* Каждый класс задач предъявляет свои специфические требования к микропроцессору или микроконтроллеру, что отражается прежде всего в наборе функций, реализуемых на кристалле, а также в системе команд.

К первому классу относятся задачи, требующие быстрой реакции микропроцессорной системы на изменение внешних условий (на срабатывание технологических датчиков, изменение параметров и т.д.). Как правило, системы управления приводами, энергетическими установками, роботами, а также системы распределенной автоматизации относятся к системам первого класса. Эти задачи требуют применения микроконтроллеров с большим объемом интегрированной на кристалл периферии, включая реализацию на кристалле памяти программ, памяти данных и устройств ввода-вывода, что сокращает аппаратные затраты и удешевляет изделие со встроенной системой управления. Чаще всего в системах управления этого класса для реализации алгоритма управления требуется память относительно небольшого объема (до 32 Кбайт).

Ко второму классу задач относятся задачи, требующие быстрой обработки значительных объемов информации, например в микропроцессорных системах поддержки компьютерных сетей, в системах управления летательными аппаратами, подвижным составом, в системах обработки видеоизображений, когда встроенный процессор должен выполнять множество различных вычислительных операций, в том числе операций с плавающей запятой. Как правило, для решения таких задач требуется уже высокопроизводительный 32- или 64-разрядный процессор.

В соответствии с упомянутыми выше классами задач, продукция фирмы Intel для встроенных применений может быть разделена на следующие группы:

• 8-битовые микроконтроллеры первого поколения (семейство MCSR-48).

• Современные 8-разрядные микроконтроллеры (MCSR-51, MCSR-51, MCSR-251).

• Современные 16-разрядные микроконтроллеры для управления в реальном времени (MCSR-96, MCSR-196, MCSR.-296).

• Встраиваемые 16-разрядные и 32-разрядные микропроцессоры PC-подобной архитектуры (80C186, 386EX и др.).

• Высокопроизводительные микропроцессоры, построенные по RISC-технологии (1960).

Первые три группы изделий ориентированы на управление событиями в реальном времени. Две последние группы предназначены преимущественно для управления процессами. Из изделий, предназначенных для управления событиями, группа 16-разрядных микроконтроллеров MCSR-96 является наиболее производительной и имеет богатейший выбор интегрированных на кристалл специализированных периферийных устройств. Основной базой для построения встроенных систем управления нижнего уровня являются именно *однокристальные микроЭВМ и микроконтроллеры,* могут применяться также и законченные одноплатные системы управления на их основе, выпускаемые рядом фирм в качестве *контроллеров-прототипов.* Долгое время в нашей стране были доступны в основном только освоенные отечественной промышленностью младшие модели 8-разрядных микропроцессоров и микроконтроллеров фирмы Intel, совместимые с изделиями MCS-80, MCS-48,

MCS-51, а также 16-разрядные процессоры собственной разработки, система команд которые совместимы с процессорами фирмы DEC (1816ВМ1, 1816ВМ2). В настоящее время ситуация резко изменилась, и вся самая передовая продукция ведущих фирм мира стала доступна отечественному разработчику и производителю.

Сегодня разработчики встроенных систем управления стоят перед непростым выбором: какое изделие и какой фирмы использовать в проекте.

Разработка мощной микропроцессорной системы управления является сложным делом. Для этого необходим штат высококвалифицированных инженеров-схемотехников и программистов, а также соответствующее оборудование, а именно комплект аппаратных и программных средств разработки (кстати, для каждого набора микропроцессорных БИС-свой). Современные микропроцессоры и микроконтроллеры имеют высокие тактовые частоты и требуют исключительной тщательности как при проектировании печатной платы, включая разводку, так и при ее изготовлении.

На сегодняшний день общемировая потребность в микроконтроллерах составляет более 600 млн. штук в год и быстро возрастает. Это говорит о массовом освоении промышленностью изделий с высокопроизводительными встроенными системами управления в самых разнообразных отраслях техники. Эти системы находят применение в автомобильной промышленности, станко- и роботостроении, в самолетной индустрии, в производстве периферийных устройств компьютеров (приводы дисковых накопителей, скоростные принтеры, плоттеры и т.д.), в бытовой технике (стиральные машины, видеомагнитофоны и т.д.) и, разумеется, в энергетике и электромеханике, где 16-разрядные устройства управления появились даже в относительно несложных приводах бытовых кондиционеров. Особенно широкие возможности по применению этих контроллеров открываются перед разработчиками систем автоматизированного привода, стабилизированных источников питания, промышленных контроллеров и других средств автоматизации производственных процессов.

Лекция 9.

Однокристальные микро-ЭВМ.

В микропроцессорной технике выделился самостоятельный класс больших интегральных схем (БИС) - однокристальные микроЭВМ (микроконтроллеры), которые предназначены для "интеллектуализации" оборудования различного технологического назначения. Архитектура однокристальных микроЭВМ - результат эволюции архитектуры микропроцессоров и микропроцессорных систем, обусловленный стремлением существенно снизить их аппаратные затраты и стоимость.

Однокристальные микроЭВМ представляют собой приборы, конструктивно выполненные в виде одной БИС и включающие в себя все устройства, необходимые для реализации цифровой системы управления минимальной конфигурации: процессор, запоминающее устройства

данных, запоминающее устройство команд, внутренний генератор тактовых сигналов, а также программируемые схемы для связи с внешней средой.

Использование однокристальных микроЭВМ в системах управления обеспечивает достижение исключительно высоких показателей эффективности при столь низкой стоимости, что им, видимо, нет в ближайшем времени альтернативной элементной базы для построения управляющих и/или регулирующих систем.

Отечественная микроэлектронная промышленность освоила широкомасштабный выпуск однокристальных микроЭВМ, к числу которых можно отнести 4-битные микроконтроллеры серий 1814, 1820, 1829 и 1013; 8-битные микроЭВМ серии 1816; микроконтроллеры сигнальные (аналоговые микропроцессоры) серии 1813. В данном курсе в качестве базовых выбраны однокристальные микроЭВМ (ОМЭВМ) серии 1816. В настоящее время в состав этой серии входят два семейства ОМЭВМ МК48 и МК51.

Общие сведения об однокристальных микроЭВМ семейства МК48.

Семейство МК48 включает ряд моделей ОМЭВМ, функциональный состав и технические характеристики которых отражают как различные в идеологическом подходе к применению ОМЭВМ, так и прогрессе технологии СБИС. Все модели, входящие в семейство МК48, являются полностью совместимыми по системе команд. назначению и разводке выводов, совокупности основных функциональных устройств из базового набора семейств.

Первое поколение отечественных ОМЭВМ семейства МК48 - БИС КР1816ВЕ48 и КР1816ВЕ35 являются функционально-конструктивными аналогами БИС соответственно 8748 и 8035 фирмы Intel (США), выполнены по n-канальной МОП-технологии, что обусловило следующие ограничения: уровень интеграции до 18 тыс. транзисторов на кристалле, частота следования тактовых сигналов - 6.0 МГц, объем внутренней памяти ОЗУ - 64 байта, ППЗУ - 1 кбайт и минимальное время цикла - 2,5 мкс.

Второе поколение - БИС КР1816ВЕ49, КР1816ВЕ39 (аналоги БИС 8049 и 8039 фирмы Intel) выполнено по n-канальной МОП-технологии с пропорциональным масштабированием, что позволило повысить уровень интеграции до 36 тыс. транзисторов на кристалле, частоту следования тактовых сигналов до 11МГц, увеличить объем ОЗУ до 128 байт, ПЗУ до 2 кбайт и снизить минимальное время цикла до 1,36 мкс.

Третье поколение семейства МК48 - БИС ОМЭВМ серии КР1830: КР1830ВЕ48, КР1830ВЕ35 (аналоги БИС 80С48, 80С35 фирмы Intel) выполнено по КМОП-технологии, что позволило на порядок уменьшить ток потребления по сравнению с БИС КР1816 ВЕ48, КР1816ВЕ35 при сохранении остальных параметров.

ОМЭВМ КР1816ВЕ48, КР1816ВЕ35, КР1830ВЕ48 и КР1830ВЕ35 полностью идентичны в части структурной реализации. При этом в БИС

КМ1816ВЕ48 программная память размещается во внутреннем ППЗУ с ультрафиолетовым (УФ) стиранием, а в БИС КР1830ВЕ48 - во внутреннем ПЗУ масочного типа. Таким образом, оперативность программирования ППЗУ позволяет использовать ОМЭВМ КР1816ВЕ48 при создании контроллеров единичных экземпляров или мелкосерийных изделий. Потребители БИС КР1830ВЕ48 лишены такой возможности, так как программирование ПЗУ осуществляется в процессе изготовления БИС по данным "прошивки" заказа потребителя.

В микросхемах КР1816ВЕ35 и КР1830ВЕ35 в отличие от БИС КМ1816ВЕ48, КР1830ВЕ48 память программ реализуется только за счет подключения внешней памяти любого типа (ОЗУ, ППЗУ, ПЗУ) общим объемом до 4 кбайт. Эта особенность позволяет использовать их в качестве отладочного варианта, когда память программ реализуется в ОЗУ, что позволяет легко модифицировать отлаживание программ.

ОМЭВМ КР1816ВЕ49 и КР1816ВЕ39 имеют одну и ту же структуру, одинаковые схемотехнические решения и технические характеристики, за исключением памяти программ: ОМЭВМ КР1816ВЕ49 имеет внутреннюю память программы объемом 2 кбайт, выполненную в виде масочного ПЗУ, а ОМЭВМ КР1816ВЕ39 может использоваться только с внешним ЗУ программ.

Реализация программной памяти КР1816ВЕ49 в виде ПЗУ обуславливает целесообразность применения этих ОМЭВМ только для изделий средне- и крупносерийного производства, что обеспечивает в этом случае низкую стоимость ОМЭВМ. В качестве отладочной модели, а также при разработке единичных экземпляров изделий целесообразно использовать ОМЭВМ КР1816ВЕ39 с внешней памятью программ.

В общем виде основные отличительные особенности ОМЭВМ семейства МК48 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Микро-схемы	Аналог	Объем внутр. памяти	Тип памяти программ	Объем Памяти Данных	Макс. частота след.тактовых сигналов	еб я
				байт	МГц	
КР1826ВЕ35 КР1816ВЕ48	8035 8748	НЕТ 1К НЕ	ВНЕШН. УФППЗУ	64 64 128 128	6.0 6.0 11.0 11.0	0 0

КР1816ВЕ39	8039	Т 1К	ВНЕШН. ПЗУ	64 64	64 64	0
КР1816ВЕ49	8049	НЕТ 1К	ВНЕШН. ПЗУ			0
КР1830ВЕ35	80С35					
КР1830ВЕ48	80С48					

В ОМЭВМ предусмотрена возможность расширения памяти программ до 4 кбайт, памяти данных до 384 байт и увеличения числа линий ввода вывода за счет подключения внешних кристаллов памяти программ, ОЗУ и БИС интерфейсов.

Однокристальные микро-ЭВМ семейства МК51.

8-разрядные высокопроизводительные однокристальные микроЭВМ семейства МК51 выполнены по высококачественной n-МОП-технологии (серия 1816) и КМОП-технологии (серия 1830).

Использование ОМЭВМ семейства МК51 по сравнению с МК48 обеспечивает увеличение объема памяти программ и памяти данных. Новые возможности ввода-вывода и периферийных устройств расширяют диапазон применения и снижают общие затраты системы. В зависимости от условий использования, быстродействие системы увеличивается минимум в два с половиной раза и максимум на порядок.

Семейство МК51 включает пять модификаций ОМЭВМ (имеющих идентичные основные характеристики), различающиеся реализацией памяти программ и мощностью энергопотребления.

ОМЭВМ КР1816ВЕ51 и КР1830ВЕ57 содержат масочно-программируемое в процессе изготовления кристалла ПЗУ памяти программ емкостью 4 кбайт и рассчитаны на применение в массовой продукции. За счет использования внешних микросхем памяти общий объем памяти программ может быть расширен до 64 кбайт.

ОМЭВМ КМ1816ВЕ751 содержит ППЗУ емкостью 4 кбайт с УФ стиранием и удобна на этапе разработки системы при отладке программ, а также при производстве небольшими партиями или при создании систем, требующих в процессе эксплуатации периодической подстройки. За счет использования внешних микросхем памяти общий объем памяти программ может быть расширен до 64 кбайт.

ОМЭВМ КР1816ВЕ31 и КР1830ВЕ31 не содержат встроенной памяти программ, однако могут использовать до 64 кбайт внешней постоянной или перепрограммируемой памяти программ и эффективно использоваться в системах, требующих существенно большего по объему (более чем 4 кбайт на

кристалле) ПЗУ памяти программ.

Каждая из перечисленных выше микросхем является соответственно аналогом БИС 8051, 80С51, 8751, 8031, 80С31 семейства MCS-51 фирмы Intel (США).

Сравнительные данные микросхем МК51 приведены в таблице 2.

Таблица 2

МИКРО-СХЕМЫ	АНАЛОГ	ОБЪЕМ ВНУТР. ПАМЯТИ	ТИП ПАМЯТИ ПРОГРАММ	ОБЪЕМ ПАМЯТИ ДАННЫХ	МАКС. ЧАСТОТА СЛЕД. ТАКТОВ. СИГНАЛОВ	ТОК ПОТРЕБ-ЛЕНИЯ
		БАЙТ		БАЙТ	МГЦ	МА
КР1826ВЕ31	8031АН	НЕТ	ВНЕШН.	128	12.0	150.0
КР1816ВЕ51	8051АН	4К	ПЗУ	128	12.0	150.0
КР1816ВЕ751	8751Н	4К	ППЗУ	128	12.0	220.0
КР1830ВЕ31	80С31ВН	НЕТ	ВНЕШН.	128	12.0	18.0
КР1830ВЕ51	80С51ВН	4К	ПЗУ	128	12.0	18.0

Каждая ОМЭВМ рассматриваемого семейства содержит встроенное ОЗУ памяти данных емкостью 128 байт с возможностью расширения общего объема оперативной памяти данных до 64 Кбайт за счет использования внешних микросхем ЗУПВ.

Общий объем памяти ОМЭВМ семейства МК51 может достигать 128 Кбайт: 64 Кбайт памяти программ и 64 Кбайт памяти данных.

ОМЭВМ МК51 выполнены на основе высокоуровневой n-МОП-технологии и выпускаются в корпусе типа DIP, имеющем 40 внешних выводов. ОМЭВМ данного семейства содержат следующие основные узлы:

1. центральный 8-разрядный процессор;
2. память программ объемом 4 Кбайт;
3. память данных объемом 128 байт;
4. четыре 8-разрядных программируемых канала ввода-вывода;
5. два 16-битовых многорежимных таймера/счетчика;
6. систему прерываний с пятью векторами и двумя уровнями;
7. последовательный интерфейс;
8. тактовый генератор.

Система команд ОМЭВМ содержит 111 базовых команд с форматом 1,2 или 3 байта.

ОМЭВМ имеет: 32 РОН; 128 определяемых пользователем программно-управляемых флагов; набор регистров специальных функций.

РОН и определяемые пользователем программно-управляемые флаги расположены в адресном пространстве внутреннего ОЗУ данных.

Структурная схема ОМЭВМ представлена на рис.10. Основу

структурной схемы МК51 составляет внутренняя двунаправленная 8-битовая шина, которая связывает между собой все основные узлы и устройства: арифметико-логическое устройство (АЛУ), резидентную память, блок регистров специальных функций, устройство управления и порты ввода-вывода.

Устройство управления МК51 на основе сигналов синхронизации формирует машинный цикл фиксированной длительности, равной 12 периодам кварцевого резонатора или шести состояниям первичного управляющего автомата (S1-S6). Каждое состояние управляющего автомата содержит две фазы (P1, P2) сигналов резонатора. В фазе P1, как правило, выполняется операция в АЛУ, а в фазе P2 осуществляется межрегистровая передача. Весь машинный цикл состоит из 12 фаз, начиная с фазы S1P1 и кончая фазой S6P2.

Арифметико-логическое устройство. 8-битное АЛУ может выполнять арифметические операции сложения, вычитания, умножения и деления, логические операции И, ИЛИ, исключающее ИЛИ, а также операции циклического сдвига, сброса, инвертирования и т.п. В АЛУ имеются программно-недоступные регистры T1 и T2, предназначенные для временного хранения операндов, схема десятичной коррекции и схема формирования признаков.

Важной особенностью АЛУ является его способность оперировать не только байтами, но и битами. Отдельные программно-доступные биты могут быть установлены, сброшены, инвертированы, переданы, проверены и использованы в логических операциях. Вследствие этого, МК51 иногда называют "булевским процессором".

Таким образом, АЛУ может оперировать четырьмя типами объектов: булевскими (1 бит), цифровыми (4 бита), байтовыми (8 бит), адресными (16 бит).

Резидентная память. Резидентная память МК51 включает в себя память программ (РПП) и память данных (РПД). РПП и РПД физически и логически разделены, имеют различные механизмы адресации, работают под управлением различных сигналов и выполняют разные функции.

РПП имеет емкость 4Кбайта и предназначена для хранения команд, констант, управляющих слов инициализации и т.п. Она имеет 16-битную шину адреса, по которой обеспечивается доступ из счетчика команд (PC) или из регистра указателя данных (DPER). Последний выполняет функции базового регистра при косвенных переходах.

РПД (ОЗУ) предназначена для хранения переменных в процессе выполнения прикладной программы, адресуется одним байтом и имеет емкость 128 байт. Кроме того, к адресному пространству РПД примыкают адреса регистров специальных функций (SFR).

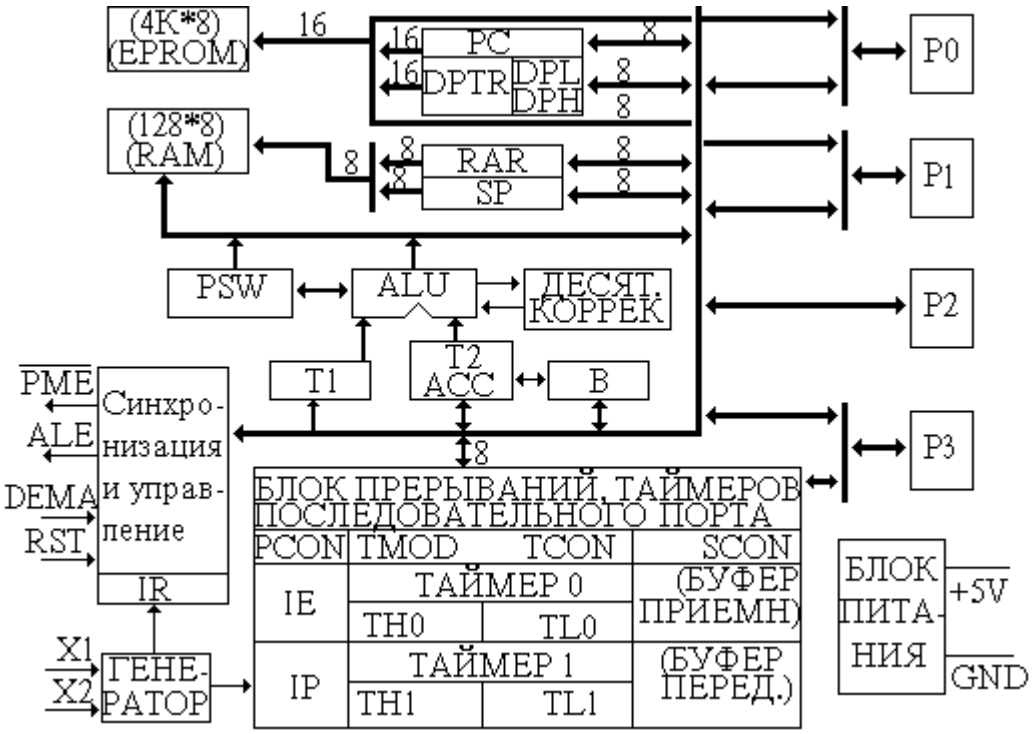


РИС.10. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОМЭВМ

На рис. 10. приняты следующие обозначения для управляющих сигналов:

/PME- разрешение внешней памяти программ, сигнал выдается только при обращении к внешней памяти программ;

ALE - строб адреса внешней памяти, сигнал используется для приема и фиксации адреса внешней памяти на внешнем регистре;

DEMA - блокирование работы с внутренней памятью, отключение резидентной памяти программ;

RST - сигнал общего сброса, служит также выводом резервного питания ОЗУ от внешнего источника;

X1, X2 - выводы для подключения кварцевого резонатора.

РПП и РПД могут быть расширены до 64 Кбайт путем подключения внешних БИС.

Регистры аккумулятора и PSW (регистр признаков операций). Аккумулятор является источником операнда и местом фиксации результата при выполнении арифметических, логических операций и ряда операций передачи данных.

При выполнении многих команд в АЛУ формируется ряд признаков операций (флагов), которые фиксируются в регистре PSW.

Регистры указатели. 8-битный указатель стека (SP) может адресовать любую область РПД. Его содержимое инкрементируется прежде, чем данные будут запомнены в стеке в ходе выполнения команды PUSH и CALL. Содержимое SP декрементируется после выполнения команд RET и POP. Подобный способ адресации элементов стека называют прединкрементным/постинкрементным.

Двухбайтовый регистр указатель данных (DPTR) обычно используется для фиксации 16-битного адреса в операциях с обращением к внешней памяти. DPTR может быть использован или как 16-битный регистр, или как два независимых 8-битных регистра (DPH и DPL).

Буфер последовательного порта. Регистр с символическим именем SBUF представляет собой два независимых регистра - буфер приемника и буфер передатчика. Загрузка байта в SBUF автоматически вызывает начало процесса передачи через последовательный порт.

Когда байт считывается из SBUF, это значит, что его источником является приемник последовательного порта.

Блок таймеров/счетчиков. В составе средств МК51 имеются регистровые пары с символическими именами TH0, TL0 и TH1, TL1, на основе которых функционируют два независимых программно-управляемых 16-битных таймера/счетчика событий. Таймеры/счетчики (Т/С) предназначены для подсчета внешних событий, для получения программно-управляемых временных задержек и выполнения время-задающих функций ОМЭВМ.

В состав блока Т/С входят: два 16-разрядных регистра Т/С0 и Т/С1; 8-разрядный регистр режимов Т/С (TMOD); 8-разрядный регистр управления (TCON); схема инкремента; схема фиксации INT0, INT1, T0, T1; схема управления флагами.

16-разрядные регистры Т/С выполняют функцию хранения содержимого счета. Код начального счета заносится в указанные регистры программно. В процессе счета содержимое регистров инкрементируется. Признаком окончания счета является переполнение регистров.

Регистр TMOD хранит код, определяющий:

- один из 4-х возможных режимов работы каждого Т/С;

- работу в качестве таймеров или счетчиков;

- управление Т/С от внешнего вывода.

Регистр TCON предназначен для приема и хранения кода управляющего слова

При работе в качестве таймера содержимое Т/С инкрементируется в каждом машинном цикле, т.е. через каждые 12 периодов резонатора. При работе в качестве счетчика содержимое Т/С инкрементируется под воздействием перехода из 1 в 0 внешнего входного сигнала, подаваемого на соответствующий (T0, T1) выводы МК51. Опрос значения внешнего входного сигнала выполняется в момент времени S5P2 каждого машинного цикла. Содержимое счетчика будет увеличено на 1 в том случае, если в предыдущем цикле был считан входной сигнал высокого уровня (1), а в следующем - сигнал низкого уровня (0). Новое (инкрементированное) значение счетчика будет сформировано в момент S3P1 в цикле, следующем за тем, в котором был обнаружен переход сигнала из 1 в 0. Так как на распознавание перехода требуется два машинных цикла, то максимальная

частота подсчета входных сигналов равна 1/24 частоты резонатора. На длительность периода входных сигналов ограничений сверху нет. Для гарантированного прочтения входного считываемого сигнала он должен удерживать значение 1 как минимум в течении одного машинного цикла МК51.

Режим работы 0,1 и 2 для обоих Т/С одинаковы. Режим 3 для Т/С0 и Т/С1 различны.

Рассмотрим кратко работу Т/С во всех режимах.

В режиме 0 таймерный регистр имеет разрядность 13 бит. При переходе из состояния "все единицы" в состояние "все нули" устанавливается флаг прерывания от таймера TF. Входной синхросигнал таймера разрешен (поступает на вход Т/С), когда управляющий бит TR установлен в 1 и либо управляющий бит GATE (блокировка) равен 0, либо на внешний вывод запроса прерывания INT поступает уровень 1.

Отметим попутно, что установка бита GATE в 1 позволяет использовать таймер для измерения длительности импульсного сигнала, подаваемого на вход запроса прерывания.

Работа любого Т/С в режиме 1 такая же, как и в режиме 0, за исключением того, что таймерный регистр имеет разрядность 16 бит.

В режиме 2 работа организована таким образом, что переполнение 8-битного счетчика TL приводит не только к установке флага TF, но и автоматически перезагружает в TL содержимое старшего байта TH таймерного регистра, которое предварительно было задано программным путем.

Т/С1 в режиме 3 заблокирован и просто сохраняет значение кода в регистре Т/С.

Т/С0 в режиме 3 представляет собой два независимых устройства на основе 8-ми разрядных регистров TL0 и TH0. Устройство на основе TL0 может работать в режиме таймера и в режиме счетчика, за ним сохраняются все биты управления Т/С0, оно реагирует на воздействия по входам T0, INT0. При переполнении TL0 устанавливается флаг TF0. Устройство на основе регистра TH0 может работать только в режиме таймера. Оно использует бит включения TR1, при переполнении TH0 выставляет флаг TF1.

Порты. Порты P0, P1, P2, P3 являются двунаправленными портами ввода-вывода и предназначены для обмена информацией ОМЭВМ с внешними устройствами, образуя 32 линии ввода-вывода. Каждый из портов содержит фиксатор-защелку, который представляет собой 8-ми разрядный регистр, имеющий байтовую и битовую адресацию для установки (сброса) разрядов с помощью программного обеспечения.

Помимо работы в качестве обычных портов ввода-вывода линии портов P0-P3 могут выполнять ряд дополнительных функций.

Через порт P0:

- выводится младший байт адреса A0-A7 при работе с внешней памятью

программ и внешней памятью данных;

- выдается и принимается байт данных при работе с внешней памятью (при этом обмен байтом данных и вывод младшего байта адреса внешней памяти мультиплексируются по времени);

- задаются данные при программировании внутреннего ППЗУ и читается содержимое внутренней памяти программ.

Через порт P1:

- задается младший байт адреса при программировании внутреннего ППЗУ и при чтении внутренней памяти программ.

Через порт P2:

- выводится старший байт адреса A8-A15 при работе с ВПП и ВПД;

- задается старший байт адреса (A8-A14) при программировании внутреннего ППЗУ и при чтении внутренней памяти программ.

Каждая линия порта P3 имеет индивидуальную альтернативную функцию. Альтернативная функция любой из линий порта P3 реализуется только в том случае, если в соответствующем этой линии разряде фиксатора защелки содержится "1". В противном случае на линии порта будет присутствовать "0".

Организация обращения к ВПД. В ОМЭВМ предусмотрена возможность расширения памяти данных путем подключения внешних устройств емкостью до 64 Кбайт. Команды ОМЭВМ могут формировать 8-разрядный адрес ВПД, который выдается через порт P0, либо 16-разрядный адрес, младший байт которого выдается через порт P0, а старший - через порт P2. Байт адреса, выдаваемый через порт P0, должен быть зафиксирован во внешнем регистре по спаду сигнала ALE, т.к. в дальнейшем линии порта P0 используются как шина данных, через которую байт данных принимается из памяти при чтении или выдается в память данных при записи. При этом чтение стробируется сигналом RD, а запись - сигналом WR. Схема подключения внешней памяти данных к ОМЭВМ показана на рис.11.

Пространства внутренней и внешней памяти данных не пересекаются, т.к. доступ к ним осуществляется с помощью разных команд. Т.о. в системе могут одновременно присутствовать внутренняя память данных с адресом 00H-FFH и внешняя память данных с адресом 0000H-FFFFH. Обращение к ячейкам ВПД осуществляется только с использованием косвенной адресации по регистрам R0 и R1 активного банка регистров внутреннего ОЗУ или по регистру специальных функций DPTR. Соответственно в первом случае будет формироваться 8-разрядный адрес ВПД.

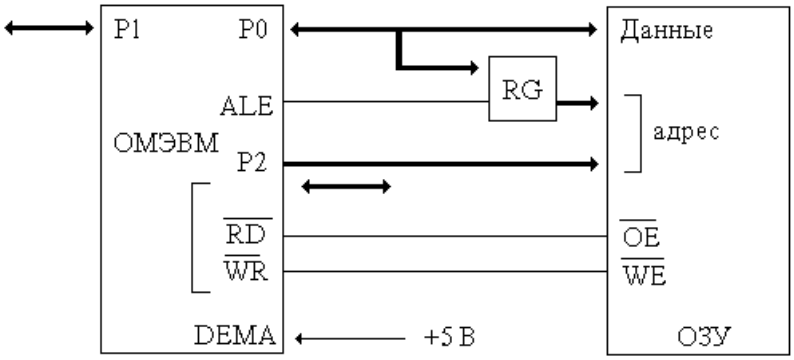


Рис.11. Схема подключения внешней памяти данных к ОМЭВМ

На рис.12а, 12б, соответственно, приведены диаграммы циклов чтения и записи при работе ОМЭВМ с внешней памятью данных.

DPL, DPH - соответственно младший и старший байты регистра указателя данных DPTR, который используется в качестве регистра косвенного адреса. R0 - регистр R 0 текущего банка, который используется в качестве регистра косвенного адреса.

P2SFR - защелка порта P2.

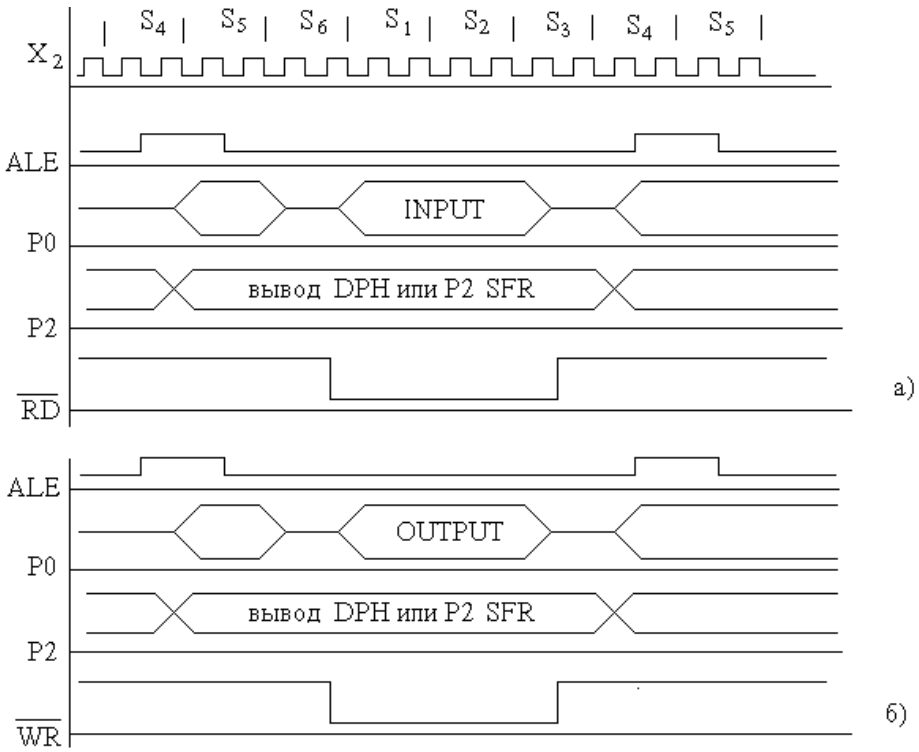


Рис.12. Диаграммы циклов чтения и записи при работе ОМЭВМ с внешней памятью данных

Память программ. Память программ предназначена для хранения кодов программ и имеет отдельное от памяти данных адресное пространство объемом до 64 Кбайт, причем для БИС 1816ВЕ51, 1816ВЕ75 и 1830ВЕ51 часть памяти программ с адресами 0000H-0FFFH расположена на кристалле ОМЭВМ. Если на вывод DEMA подано напряжение Ucc , то обращение к ВПП происходит автоматически при выработке счетчиком команд адреса,

превышающего 0FFFH.

Если на вывод DEMA подан "0", внутренняя память программ отключается и начиная с адреса 0000H все обращения выполняются только к внешней памяти программ.

Чтение из внешней памяти программ стробируется сигналом ОМЭВМ XOR(PME). При работе с внутренней памятью программ сигнал XOR(PME) не формируется.

При обращении к ВПП всегда формируется 16-разрядный адрес, младший байт которого выдается через порт P0, а старший - через порт P2. При этом байт адреса, выдаваемый через порт P0, должен быть зафиксирован во внешнем регистре по спаду сигнала ALE, т.к. в дальнейшем линии порта P0 используются в качестве шины данных, по которой байт из внешней памяти программ вводится в ОМЭВМ.

Функциональная схема включения ОМЭВМ МК51 с ВПП показана на рис.13.

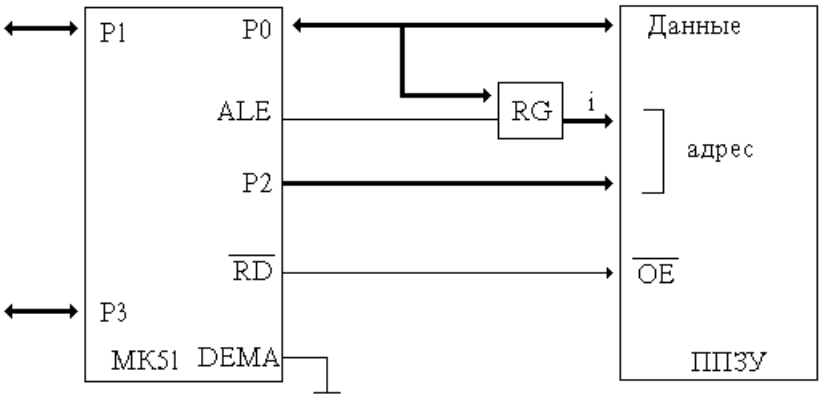


Рис.13. Функциональная схема включения ОМЭВМ МК51 с ВПП

Порт P0 работает как мультиплексированная шина адрес/данные: выдает младший байт счетчика команд, а затем переходит в высокоимпедансное состояние и ожидает прихода байта из ППЗУ программ. Когда младший байт адреса находится на выходах порта P0, сигнал ALE защелкивает его в адресном режиме RG. Старший байт адреса находится на выходах порта P2 в течение всего времени обращения к ППЗУ.

Сигнал XOR(PME) разрешает выборку байта из ППЗУ, после чего выбранный байт поступает на порт P0 МК51 и вводится в ОМЭВМ.

Диаграммы, показывающие формирование соответствующих сигналов при работе ОМЭВМ с ВПП, приведены на рис.14.

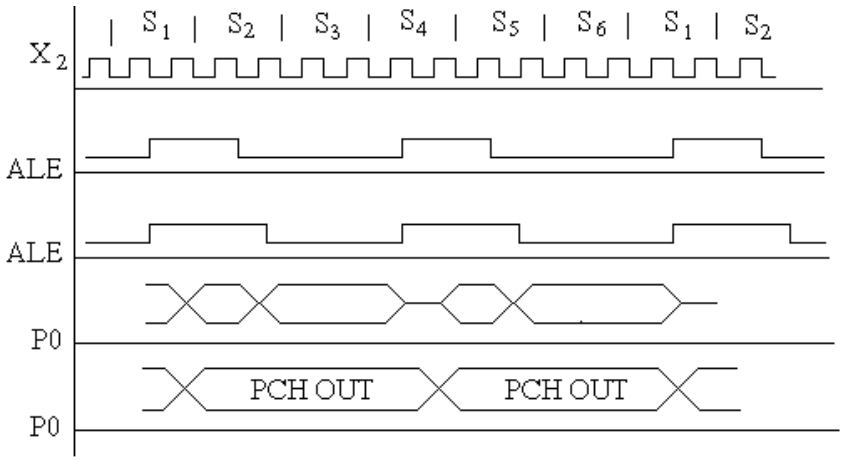


Рис.14. Диаграммы, показывающие формирование соответствующих сигналов при работе ОМЭВМ с ВПП

На рис.14. использованы следующие обозначения:

- PCL OUT - выдача младшего байта PC;

- PCH OUT - выдача старшего байта PC;

-INPUT - данные на шине P0.

Как видно из диаграмм, при работе с ВПП сигнал PME формируется дважды в каждом машинном цикле независимо от количества байт в команде. Если второй выбираемый байт в текущей команде не используется, он игнорируется ОМЭВМ. В дальнейшем, при переходе к выполнению следующей команды этот байт будет введен вторично.

Структура микроконтроллеров семейства MCS-x96.

Семейство микроконтроллеров MCS-x96 предназначено специально для построения высокопроизводительных контроллеров, реализующих алгоритмы управления исполнительными двигателями постоянного и переменного тока.

Обобщенная структурная схема микроконтроллера семейства MCS-x96 изображена на рис. 16. В его состав входят процессор, память, набор периферийных устройств и контроллер памяти. К микроконтроллеру можно подключить внешнюю память.

Процессор содержит арифметико-логическое устройство (ALU) и регистровое оперативное запоминающее устройство (RRAM). Отличительная особенность ALU - отсутствие регистра-аккумулятора. При выполнении арифметических и логических операций в качестве источника первого операнда и приемника результата может использоваться любой регистр в RRAM , при этом операнд и результат могут иметь разные адреса. ALU обращается к RRAM непосредственно или через контроллер памяти.

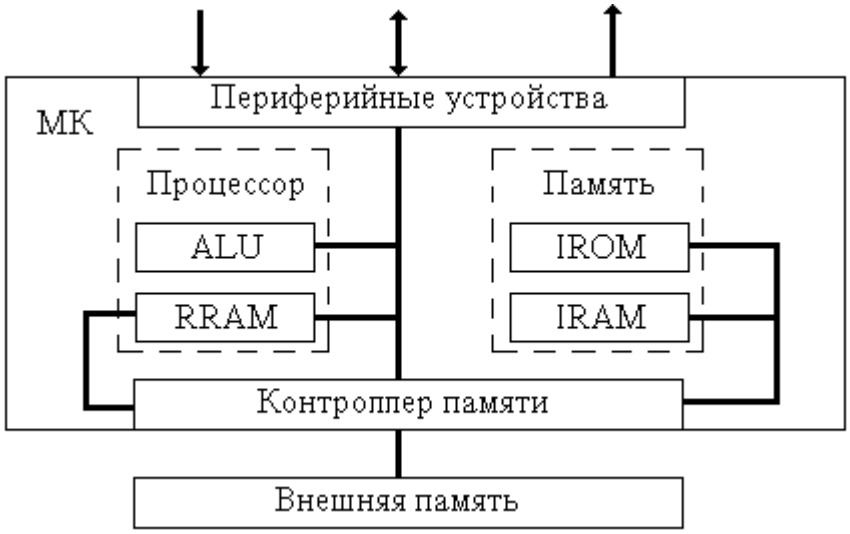


РИС.18. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МИКРОКОНТРОЛЛЕРА СЕМЕЙСТВА MCS-X96

Внутренняя (Internal) память микроконтроллера содержит постоянное (IROM) и оперативное (IRAM) запоминающие устройства. Первое из них используется для хранения команд программы, констант и специальных данных. Выпускаются микроконтроллеры, в которых IROM отсутствует (в этом случае его функции возлагают на запоминающее устройство, входящее в состав внешней памяти).

IRAM используется для хранения данных и команд программы. При этом открывается возможность модифицировать команды в процессе выполнения программы. В микроконтроллерах некоторых типов IRAM отсутствует.

Общее число адресов в адресном пространстве микроконтроллера равно 64К, а у микроконтрллеров подсемейства NT может быть увеличено до 1М.

Контроллер памяти управляет процессом обращения к внутренней и внешней памяти, при этом обеспечивается опережающая выборка кодов команд с образованием их очереди.

В таблице 3. указана емкость RRAM, IROM и IRAM микроконтроллеров разных типов, а также указаны интегрированные на кристалле микроконтроллера периферийные устройства. Буква X в обозначении типа заменяется цифрой 0, если микроконтроллер не имеет IROM, цифрой 3, если он имеет IROM масочного типа, и цифрой 7, если микроконтроллер содержит программируемое постоянное запоминающее устройство с возможностью стирания записи путем ультрафиолетового облучения (EPROM). При отсутствии окна в корпусе микросхемы возможно лишь однократное программирование IROM (OTPROM).

Таблица 3

МИКРОКОНТРОЛЛЕР	**8XC196KB**	**8XL196KD**	**8XC196NT**	**8XC196MC**	**8XC196MD**
RRAM БАЙТ	**232**	**1000**	**1000**	**488**	**488**

IROM КБАЙТ	8	32	32	16	16
IRAM БАЙТ	-	-	512	-	-
P	5	5	8	7	8
I/O	40	40	56	53	64
SLP	-	-	+	-	-
SP	+	+	+	-	-
SSIO	-	-	+	-	-
HSIO	+	+	-	-	-
EPA	-	-	+	+	+
ADC	8	8	4	13	14
PWM	1	3	-	2	2
WG	-	-	-	+	+
FG	-	-	-	-	+
PTS	-	+	+	+	+
OFD	-	-	+	-	-

Периферийные устройства микроконтроллеров семейства MCS-x96.

Расположенные на кристалле микроконтроллера периферийные устройства предназначены для приема и выдачи данных, ввода и вывода событий и аналоговых сигналов, обслуживания запросов прерывания и контроля правильности работы микроконтроллера. В таблице 3 приведены данные о наличии определенных периферийных устройств у микроконтроллеров разных типов и даны некоторые характеристики этих устройств.

Для приема и выдачи данных в параллельном коде используются параллельные порты. Микроконтроллеры разных типов имеют разное число таких портов, при этом разные порты могут иметь разное число разрядов. В графе P таблицы указано число параллельных портов у микроконтроллеров разных типов, а в графе I/O - суммарное число их разрядов.

Для обмена данными между микроконтроллером и центральным процессором в иерархической микропроцессорной системе предназначен процессорный порт (SLP - Slave Port), который подключают непосредственно к системной магистрали центрального процессора. В качестве SLP используется один из параллельных портов, который переводится в соответствующий режим путем программирования.

Для приема и выдачи данных в последовательном коде используется последовательный порт (SP). Он позволяет увеличивать число параллельных портов микроконтроллера путем подключения внешних сдвигающих регистров, обмениваться данными с другими устройствами по последовательному каналу связи (например, по интерфейсу RS - 232) и создавать простейшие локальные сети микроконтроллеров.

Для обмена данными в последовательном коде между двумя микроконтроллерами предназначен синхронный последовательный порт (SSIO). При этом могут использоваться две, три или четыре соединительные линии.

Все микроконтроллеры семейства MCS-x96 оснащены специальным периферийным устройством, предназначенным для приема и регистрации входных событий и формирования и выдачи выходных. Событием является изменение значения сигнала. Различают единичные события (замена нулевого значения единичным) и нулевые (замена единичного значения нулевым). Прием и регистрация входного события заключается в запоминании времени появления события определенного типа на определенном входе микроконтроллера. Это позволяет определять временные параметры входных импульсных последовательностей (период следования и длительность импульсов и т.д.).

При формировании и выдаче выходного события в определенное, заранее заданное время появляется событие определенного типа на определенном выходе микроконтроллера (внешнее выходное событие) или в определенной точке внутри микроконтроллера (внутреннее выходное событие). Это позволяет формировать импульсные последовательности заданной формы (например, широтно-модулированный сигнал) и реализовывать временные задержки.

Для работы с событиями в микроконтроллерах подсемейств KB и KC используется блок быстрого ввода-вывода (HSIO), а в микроконтроллерах подсемейств KR, NT, MC - блок процессоров событий (EPA). В HSIO имеется определенное число входных и выходных каналов, в EPA - универсальные модули, каждый из которых может быть запрограммирован для работы с входными или выходными событиями.

Для ввода аналоговых сигналов используется многоканальный аналогово-цифровой преобразователь (ADC). Значение аналогового сигнала представляется восьми- или десятиразрядным двоичным кодом. Число каналов в преобразователе указано в графе ADC.

Микроконтроллеры подсемейств KB, KC, MC имеют широтно-импульсный модулятор (PWM) с программируемым значением скважности импульсной последовательности. Использование этого модулятора совместно с внешним интегрирующим устройством позволяет осуществлять цифроаналоговое преобразование.

Микроконтроллеры подсемейства MC содержат трехфазный генератор (WG - Waveform Generator), который может быть использован для управления трехфазными электродвигателями переменного тока, вентильными электродвигателями постоянного тока, шаговыми двигателями, а также для преобразования постоянного тока в переменный.

В микроконтроллерах 8XC196MD имеется генератор меандра (FG-Frequency Generator) с программируемой длительностью импульсов и периодом их следования.

Все микроконтроллеры семейства MCS-x96 имеют систему управления прерываниями. С ее помощью осуществляется переход от выполнения текущей программы к выполнению прерывающей, составленной программистом и записанной в память микроконтроллера. Для обслуживания прерываний

микроконтроллеры подсемейств KC, KR, NT, MC имеют, кроме того, периферийный сервер транзакций (PTS - блок обслуживания групповых операций).

Обслуживание запроса прерывания с использованием PTS заключается в выполнении вместо очередной команды текущей программы определенной микропрограммы, заложенной в специальную память микроконтроллера при его изготовлении. Программист выбирает для обслуживания запроса прерывания подходящую микропрограмму из набора имеющихся и настраивает ее для выполнения в каждом конкретном случае путем записи группы кодов в RRAM.

В число операций, которые могут быть выполнены под управлением PTS при обслуживании запроса прерывания, входят одиночная и групповая пересылки и чтение результатов аналого-цифрового преобразования. Кроме того, микроконтроллеры подсемейства KC могут выполнять операции, связанные с регистрацией входных и формированием выходных событий, микроконтроллеры подсемейств KR, NT-операции, связанные с формированием широтно-модулированных сигналов, а подсемейства MC - операции, реализующие функции последовательного порта.

Для контроля правильности работы все микроконтроллеры оснащены сторожевым таймером, сбрасывающим их в исходное состояние при появлении сбоя в ходе программы. Микроконтроллеры подсемейств KR, NT, кроме того, содержат детектор падения частоты (OFD), который переводит их в состояние сброса при катастрофическом снижении тактовой частоты.

Лекция 10.

Преимущества регистр-регистровой архитектуры

При построении большинства микропроцессоров и микроконтроллеров (например, серии 8-разрядных микроконтроллеров MCS-51) используется традиционная, так называемая *аккумуляторная архитектура,* когда один из регистров специального назначения *аккумулятор* по умолчанию является источником одного из двух операндов и одновременно приемником результата операции, выполняемой в *арифметико-логическом устройстве* (АЛУ). Такой подход позволяет существенно уменьшить формат команды за счет адресации в поле операндов только одного из операндов.

Для выполнения какого-либо действия в процессорах «классической» аккумуляторной архитектуры в общем случае кроме собственно команды, пример, сложения, требуются по крайней мере еще две операции пересылки данных: загрузка первого операнда в аккумулятор и через него в один из портов арифметико-логического устройства (АЛУ), а также пересылка результата операции из аккумулятора по месту назначения уже после завершения операции (рис.17) при этом второй операнд извлекается из оперативной памяти непосредственно в процессе выполнения операции. Также в процессе

выполнения операции результат помещается в аккумулятор.

По мере развития микропроцессорной техники аккумуляторная архитектура стала тормозом в повышении производительности центрального процессора и уступила место *т*ак называемой *регистр-регистровой архитектуре.* Основным отличием регистр-регистровой архитектуры от аккумуляторной является то, что любые ячейки интегрированной на кристалл микроконтроллера сверхбыстродействующей оперативной памяти, *регистрового ОЗУ,* могут рассматриваться либо как операнды-источники, либо как аккумулятор для приема результата операции. При таком подходе любая из команд процессора может быть трехоперандной и необходимость в дополнительных операциях пересылки данных из аккумулятора и обратно отпадает. Естественно, что регистр-регистровая архитектура требует более сложного формата команды. Наряду с полем кода операции в формате команды будут присутствовать поля адресов операндов-источников и операнда-приемника.

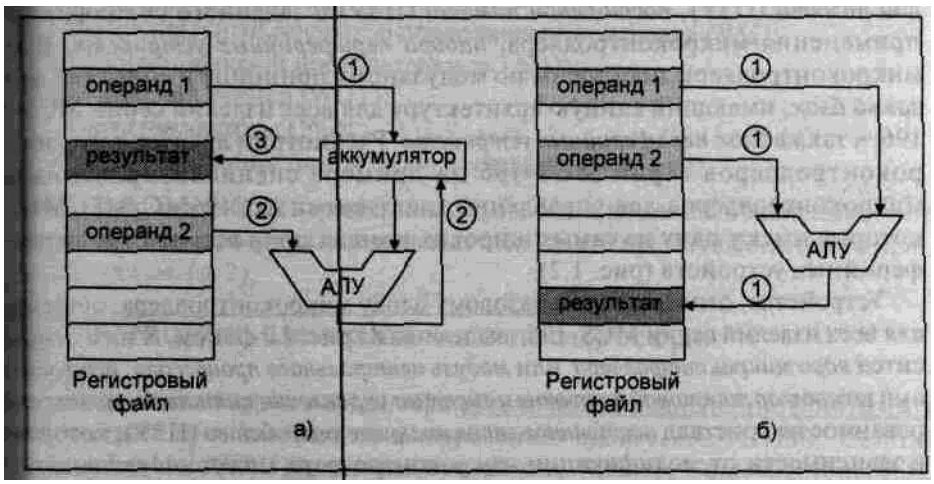


РИС. 17. СРАВНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРНОЙ (А) И РЕГИСТР-РЕГИСТРОВОЙ АРХИТЕКТУРЫ (Б)

Таким образом, любая *ячейка регистрового файла,* внутренней сверхоперативной памяти, может выполнять функцию как источника данных, так и приемника данных.

Главные преимущества регистр-регистровой архитектуры:

• Отсутствует необходимость в предварительной загрузке одного из, операндов в аккумулятор перед выполнением операции.

• Содержимое источников данных в результате выполнения операции может оставаться неизменным, либо модернизироваться по желанию программиста. В последнем случае источник данных одновременно будет и приемником результата операции.

• Резко уменьшается число операций по пересылке данных и возрастает скорость вычислений.

• Появляется возможность расширения системы команд трехоперандными высокопроизводительными командами.

Совокупность перечисленных выше факторов вместе с главным преимуществом - возможностью выполнения операций непосредственно над 16-разрядными операндами, приводит к повышению производительности 16-разрядных микроконтроллеров *в несколько раз* по сравнению с 8-разрядными контроллерами, работающими на тех же тактовых частотах.

Блок-схема микроконтроллера MCS-196.

Микроконтроллеры семейства MCS-196 являются однокристальными микроЭВМ с интеграцией на кристалл центрального процессора, оперативной памяти (ОЗУ), постоянной памяти (ПЗУ) и заданного спецификой применения микроконтроллера, набора периферийных устройств. Все микроконтроллеры построены по модульному принципу и содержат базовый блок, имеющий единую архитектуру для всех изделий серии MCS-196, а также блок периферийных устройств. Рассмотрим архитектуру микроконтроллеров серии MCS-196 на примере специализированных микроконтроллеров для управления двигателями 8xC196MC/MD/MH. которые имеют одну из самых широких номенклатур встроенных периферийных устройств (рис. 18).

Устройства, относящиеся к базовому блоку микроконтроллера, общему для всех изделий серии MCS-196, выделены на рис. 18 фоном. К ним относится ядро микроконтроллера или модуль центрального процессора, встроенный генератор тактовой частоты и система управления питанием, интегрированное на кристалл постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), которое в зависимости от модификации микроконтроллера может отсутствовать. контроллер прерываний (Interrupt Controller), а также сервер периферийных транзакций (PTS) — специализированный контроллер прерываний, обеспечивающий быстрый обмен данными между периферийными устройствами и памятью практически без участия центрального процессора.

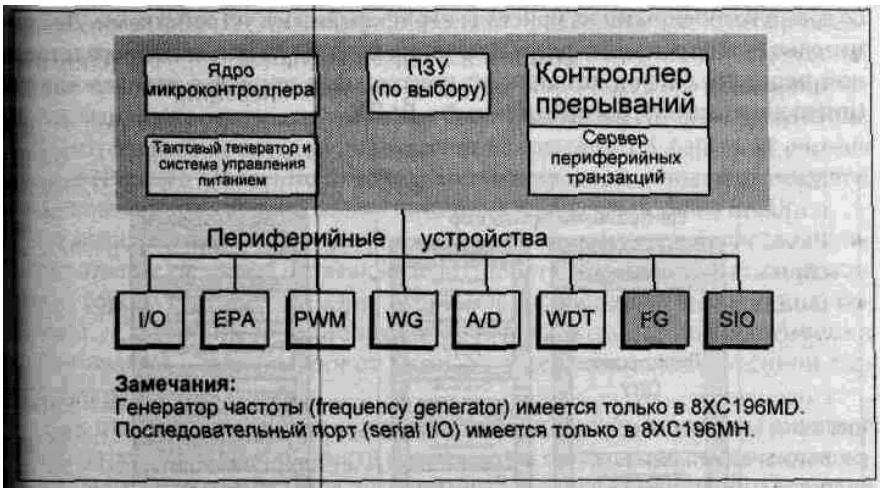


Рис. 18. Типовая архитектура микроконтроллеров семейства MCS-196 на примере микроконтроллеров для управления двигателями 8xC196MC/MD/MH.

В набор интегрированных на кристалл периферийных устройств для микроконтроллеров 8xC196MC/MD/MH входят:

порты ввода/вывода (I/O);

процессор событий (EPA);

генератор широтно-импульсных сигналов (PWM);

многоканальный генератор периодических сигналов (WG);

аналого-цифровой преобразователь (A/D);

сторожевой таймер (WDT);

генератор частоты (FG1;

последовательные порты ввода/вывода данных (SIO).

Набор встроенных периферийных устройств меняется в зависимости от типа микроконтроллера и определяет область его преимущественного применения.

Модуль центрального процессора. *Модуль центрального процессора* обеспечивает выполнение программы пользователя и состоит из *центрального процессора* (ЦПУ) Central Processing Unit (CPU) и *контроллера памяти* Memory Controller (рис. 19). В состав центрального процессора входят *регистровый файл* Register File и *регистровое арифметико-логическое устройство* (Register Arithmetic-Logic Unit) или сокращенно РАЛУ (RALU).

Внутренняя 16-разрядн4я шина связывает центральный процессор с контроллером памяти и *контроллером прерываний* (interrupt controller), а также со всеми встроенными на кристалл периферийными устройствами. Дополнительная внутренняя 8-разрядная шина используется для непосредственной передачи байтов команды из контроллера памяти в *регистр команд* (instruction register), расположенный в РАЛУ.

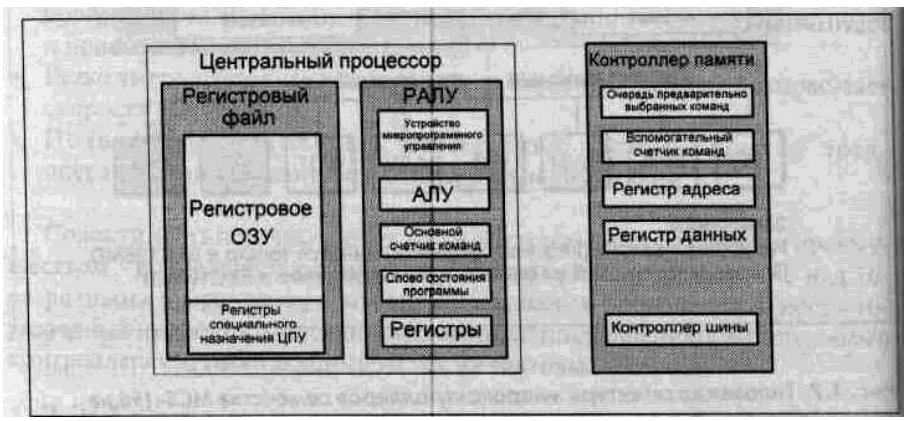


РИС. 19. СТРУКТУРА МОДУЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА

В состав центрального процессора входит *устройство микропрограммного управления* (microcode engine), предназначенное для приема от контроллера памяти кода очередной команды, *дешифрации кода* и генерации последовательности управляющих команд, подаваемых на регистровое арифметико-логическое устройство, и необходимых для выполнения операций над байтами, словами и длинными словами, расположенными в 256-байтовом *нижнем регистровом файле.* Использование механизма адресации операндов через *вертикальное окно* в нижнем регистровом файле, позволяет выполнять в РАЛУ также и операции с данными, расположенными в верхнем регистровом файле, а в новейшей серии микроконтроллеров MCS-296 — даже во внешней памяти.

Центральный процессор связывается с внутренней кодовой и внешней памятью (программ и данных) через *контроллер памяти.* Исключение составляет регистровый файл, доступ к которому обеспечивается непосредственно. В состав контроллера памяти входят несколько устройств: *вспомогательный счетчик команд* (Slave PC), 4-байтовая *очередь* из предварительно выбранных из памяти и готовых для выполнения кодов команд (Queue), *контроллер шины* (Bus Controller), *регистры адреса* (Adress Register) и *данных* (Data Register).

Запрос на доступ к памяти может поступить как от центрального процессора при выполнении текущей команды, например, для получения операнда из внешней памяти по косвенному адресу, расположенному в одном из регистров-слов внутреннего ОЗУ, так и от диспетчера очереди предварительно выбранных кодов команд. Механизм предварительной выборки команд существенно повышает производительность центрального процессора так как к моменту завершения выполнения текущей команды следующая команда уже считана из памяти и готова для немедленного выполнения. Центральный процессор получает коды команд из 4-байтовой *очереди команд* (Prefetch Queue по специальной 8-разрядной шине. Код текущей исполняемой инструкции всегда находится в *регистре команд* РАЛУ. За выполнение программы пользователя в правильной последовательности отвечает *основной счетчик команд* (Master Program Counter), содержимое которого указывает на адрес очередной, подлежащей выполнению команды. Содержимое основного счетчика команд автоматически увеличивается в зависимости от длины текущей команды встроенной схемы инкрементирования.

Как отмечено выше для ускорения выборки кодов команд из внешней или внутренней кодовой памяти используется *вспомогательный счетчик команд* (Slave PC), содержимое которого задает адрес команды, подлежащей выборке из памяти. Выбранная команда поступает в очередь на выполнение. Как только очередная команда считывается из очереди и передается на дешифрирование в устройство микропрограммного управления центрального процессора, диспетчер очереди формирует запрос в *контроллер шины Bu*s Controller) на считывание очередной команды. Контроллер шины входит в состав контроллера памяти и обеспечивает формирование необходимых управляющих сигналов как для считывания данных из внешней, внутренней памяти или внешнего периферийного устройства, так и для записи данных во внешнее ОЗУ или в периферийное устройство. Таким образом, контроллер шины обеспечивает считывание кодов машинных команд и запись/считывание данных. Запрос на считывание очередной инструкции поступает от диспетчера очереди, а запрос на запись/считывание данных (операндов) - от центрального процессора. Запрос от диспетчера очереди имеет более высокий приоритет.

Если линейная последовательность выполнения команд программы нарушается, например, вследствие выполнения команды условного или безусловного перехода или вызова подпрограммы, значение вспомогательного счетчика команд перезагружается текущим значением основного счетчика команд и очередь ранее выбранных команд аннулируется (очищается). Перезагрузка вспомогательного счетчика команд и извлечение первого байта

кода инструкции из памяти занимает 4 машинных такта.

Замечание. Если при отладке микропроцессорной системы Вы пользуетесь логическим анализатором, то имейте в виду, что команды из памяти выбираются с опережением. В данный момент выполняется команда, которая уже была считана ранее

Регистровое АЛУ имеет достаточно сложную внутреннюю структуру. В его состав помимо собственно 16-разрядного арифметико-логического устройства, регистра команд и устройства микропрограммного управления входят несколько вспомогательных регистров:

• Регистры старшего и младшего слова, предназначенные для использования в командах с 32-разрядными операндами в качестве регистров временного хранения данных. Они имеют собственные устройства сдвига, что ускоряет выполнение команд сдвига, нормализации, умножения и деления.

• Регистр второго операнда АЛУ, используемый в двухоперандных командах. в частности, для хранения множителя или делителя в операциях умножения, деления, соответственно.

• 6-разрядный счетчик числа циклов для организации сдвига операнда на заданное число разрядов со схемой автоматического декрементирования.

• Регистр селектирования заданного бита, который позволяет автоматически генерировать необходимую маску при выполнении команд тестирования бита по номеру бита, указанному в команде.

• Регистры констант (0, 1, 2), необходимых для ускорения типовых операций в АЛУ.

После завершения любой операции в АЛУ результат анализируется и соответствующие *признаки результата* (нуля, переноса, переполнения и т.д.) выставляются в *слове состояния программы* Program Status Ward (PSW). Признаки результата операции используются в командах условной передачи управления для организации ветвлений в программе.

Регистровый файл

Различные типы микроконтроллеров отличаются количеством ячеек памяти в регистровом файле, так называемом *регистровом* ОЗУ (РОЗУ). Естественно, что чем больше объем сверхоперативной регистровой памяти, тем более сложные вычисления и с большим быстродействием могут быть организованы в микропроцессорной системе на базе данного микроконтроллера.

Первые 256 ячеек регистрового файла имеют короткие байтовые адреса и относятся к *нижнему регистровому файлу,* а все остальные — 16-разрядные адреса и относятся к *верхнему регистровому файлу.* Наибольшим быстродействием обладают команды с прямой регистровой адресацией операндов в нижнем регистровом файле. При этом используются байтовые адресные поля и команды имеют предельно короткий формат и наименьшее время выполнения. Для доступа к операндам за пределами нижнего

регистрового файла (в том числе и к внешней памяти) используются специальные способы адресации, в частности косвенная, базово-индексная, а также адресация через специальные вертикальные окна.

Младшие 24 байта нижнего регистрового файла относятся к *регистрам специального назначения центрального процессора* (CPU special-function registers - SFRs). Здесь расположен также *указатель стека* (Stack Pointer SP). Вся остальная область регистрового ОЗУ, в том числе область верхнего регистрового файла, является оперативной памятью общего назначения и может использоваться программистом по своему усмотрению. Доступ производится к байтам, словам или двойным словам. Набор регистров специального назначения отличается в микроконтроллерах разных типов. Эти регистры позволяют управлять системой прерываний, селектировать вертикальные окна и выполнять целый ряд дополнительных функций.

Особенность организация памяти микроконтроллеров MCS-196

Типичная схема организации памяти 16-разрядных микроконтроллеров Intel на примере 8XC196KC и 8XC196KD приведена на рис. 20.

Нижняя область встроенного регистрового ОЗУ (OOOOH-0017H) жестко закреплена за *регистрами специального назначения центрального процессора (CPU SFRs),* через которые осуществляется управление системой прерываний, механизмом селектирования горизонтальных и вертикальных окон, а также встроенными периферийными устройствами (для некоторых типов микроконтроллеров).

Начиная с адреса 0018H располагается *область регистрового* 03У (Register RAM), объем которой различен для разных контроллеров и варьируется как правило, в диапазоне от 232 байт до 1 Кбайта.

Следующий сектор памяти объемом несколько меньше 8 Кбайт используется для адресации *внешней памяти и/или внешних периферийных устройств* В конце этой области памяти располагается еще одна область регистров специального назначения - *регистров специального назначения периферийных устройств* SFR (в данном случае регистров портов ввода/вывод 10PORT3 и 10PORT4). Размер этой области определяется объемом интегрированной на кристалл периферии и, например, у контроллеров 8XC196MC/MD/MH достигает 256 байт (1FEOH-1FFFH).

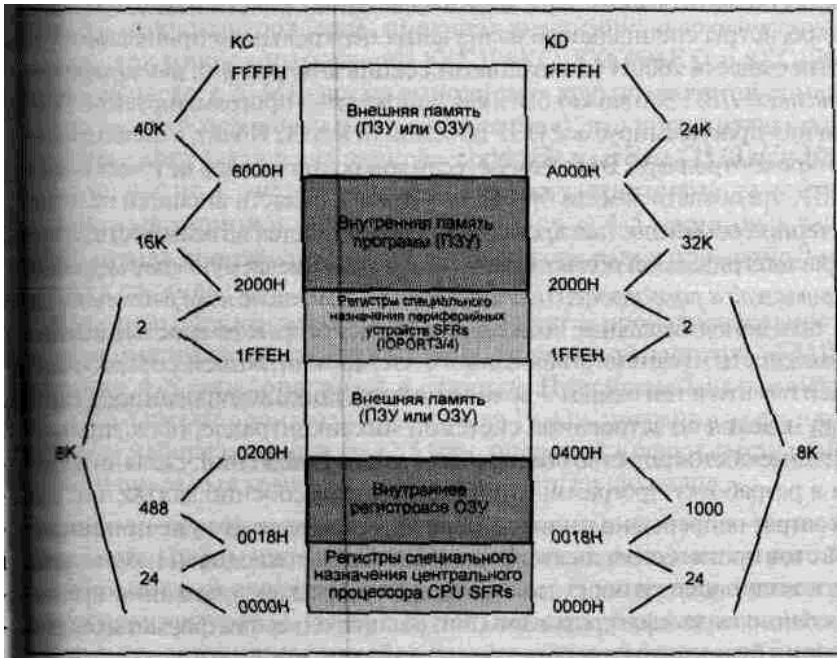


Рис 20. Карта распределения памяти для микроконтроллеров 8xC196KC/KD

Дело в том, что в микроконтроллерах с большим количеством интегрированных на кристалл периферийных устройств начальной области памяти 24 байта оказывается недостаточно для размещения всех регистров специального назначения периферийных устройства для их размещения отведена специальная область памяти. При этом в начальной области памяти остаются только регистры специального назначения центрального процессора.

Начиная с адреса 2000H располагается секция *внутреннего, интегрированного на кристалл ПЗУ.* Это может быть как однократно-программируемое ПЗУ так и масочно-программируемое ПЗУ объемом от 8 до 32 Кбайт, в зависимости от типа микроконтроллера. В том случае, если микроконтроллер не имеет встроенного ПЗУ, эта область памяти будет относиться к области внешней памяти.

Характерной особенностью процессоров Intel является возможность задать в начале рассматриваемой области памяти не только желаемую *конфигурацию микроконтроллера и микропроцессорной системы,* в том числе *цикл работы внешней шины,* но и дополнительные *коды секретности,* которые полностью исключают возможность несанкционированного чтения или записи содержимого внутренней памяти и тем самым — возможность несанкционированного тиражирования изделия со встроенной системой микроконтроллерного управления. Последнее обстоятельство обеспечивает защиту вложений, сделанных заказчиком в разработку программного продукта, что особенно важно, так как доля этих затрат непрерывно растает и по некоторым оценкам уже приближается к 80% стоимости всего проекта. В начальной области кодовой памяти располагаются также вектора переходов на подпрограммы обслуживания прерываний.

Первым адресом, по которому процессор обращается для выполнения программы пользователя, является адрес 2080H. Сюда передается управления и

после сброса системы по сигналу RESET. Расположенная вслед за внутренним ПЗУ память, вплоть до адреса FFFFH может рассматриваться как *внешняя память программ и/или данных и/или о*бласть адресации *внешних устройств ввода/вывода пользователя. Неко*торые самые современные микроконтроллеры, например, 8XC196NP, 8XC196NU, 80C296SA, предназначенные для высокопроизводительной обработки больших массивов информации в реальном времени имеют 'возможности *расширенной адресации памяти.* В этом случае *объем прямоадресуемой памяти* возрастает до 1 Мбайта, 6 Мбайт и даже до 16 Мбайт. При этом внутренняя шина адреса микроконтроллера вместо 16-разрядной становится 24-разрядной, а во вне выводятся дополнительно 4 или 8 старших разрядов адресной шины.

Возможности подключения внешней памяти и внешних устройств ввода/вывода

На стадии разработки и отладки микропроцессорной системы приходится использовать *внешнюю память программ* и только затем, когда алгоритмы и программное обеспечение полностью оттестированы и начинается серийный выпуск изделия , программное обеспечение «прошивается» в внутреннюю память микроконтроллера. Кроме того, в ряде применений требуется *внешняя память данных,* часто энергонезависимая, для хранения промежуточных массивов информации, результатов тестирования работоспособности оборудования, текущих настроек системы управления, циклограмм управления оборудованием в функции времени и т.д.

В системах встроенного управления, где часто приходится изменять алгоритмы управления и программное обеспечение, единственной альтернативой оказывается применение в качестве внешней памяти программ так называемой *флэш-памяти.* Эта память, впервые анонсированная фирмой Intel в 1988 г., бурно развивается и на сегодняшний день сочетает в себе достоинства ОЗУ и ПЗУ, являясь энергонезависимой памятью с высокой плотностью хранения информации, высоким быстродействием, малым потреблением энергии, исключительной надежностью и помехоустойчивостью. Она допускает более 100 тысяч циклов перезаписи.

Вместе с тем, несмотря на большое количество интегрированных на кристалл периферийных устройств, их часто оказывается недостаточно для решения конкретной задачи. В этом случае приходится дополнительно использовать *внешние периферийные устройства:* программируемые порты ввода/вывода данных, контроллеры прерываний, контроллеры последовательного ввода/вывода данных и т.д.

Встроенный контроллер внешней шины обеспечивает корректное подключение к микроконтроллеру внешней памяти и внешних периферийных устройств, а также формирование необходимых сигналов управления ими. Большинство микроконтроллеров MCS-196 имеют *мультиплицированную шину* адреса/данных, а самые совершенные из них могут работать и с *мультиплицированной шиной адреса/данных,* что повышает

производительность системы и упрощает интерфейс с внешней памятью и периферией.

В зависимости от разрядности используемой внешней памяти и периферии шина может работать в нескольких режимах:

Стандартном — как 16-разрядная мультиплицированная шина (вся внешняя память и периферия 16-разрядные). *8-разрядном* — когда вся внешняя память и периферия 8-разрядные. *Динамически переключаемом* между 8- и 16-разрядным режимами в зависимости от типа внешнего устройства, к которому в данный момент происходит обращение.

Кроме того, наличие специального входа готовности Ready допускает расширение сигналов чтения RD# и записи WR# для подключения медленно-действующей памяти и устройств ввода/вывода (например, жидкокристаллического дисплея). Более того, изменяя программно *байты конфигурации микроконтроллера,* можно задать требуемое число тактов ожидания для оптимального сопряжения микроконтроллера с внешними устройствами.

Лекция 11.

Применение микропроцессоров в приводах мехатронных систем. Примеры МП приводов современных систем.

Пример МК-системы на основе ОМЭВМ семейства МК51.

В данном разделе рассматривается пример построения МК-системы на основе ОМЭВМ МК51, который может быть использован для приобретения навыков программирования и отладки программ для МК51, а также рассматриваться в качестве макета реальной системы управления для отладки ее прикладного программного обеспечивания совместно с объектом управления в реальном масштабе времени.

Проектируемый отладочный модуль должен содержать следующие средства:

- постоянную память с программой Монитор, обеспечивающей управление всей системой и прежде всего взаимодействие с оператором;

- оперативную память для занесения программ, данных и создания буферов Монитора;

- простейшую клавиатуру для загрузки кодов и взаимодействия с оператором: 16 цифровых клавиш (цифры от 0 до F), 8 управляющих клавиш, в том числе и клавиша "сброс" - системного сброса;

- простой дисплей, обычно однострочный (на основе семисегментных индикаторов), который используется для визуального контроля вводимой информации и отображения данных;

- расширитель ввода-вывода на основе ППА КР580ВВ55.

Кроме того, отладочный модуль может иметь собственный источник

электропитания и (в некоторых случаях) дополнительное место на печатной плате ("слот") для монтажа пользовательских средств связи с объектом управления. Функциональная схема отладочного модуля, удовлетворяющего поставленным требованиям, приведена на рис.15. Как видно из приведенной схемы, память МКС имеет две физически- разделенные области для хранения данных и программ: ВПД и ВПП.

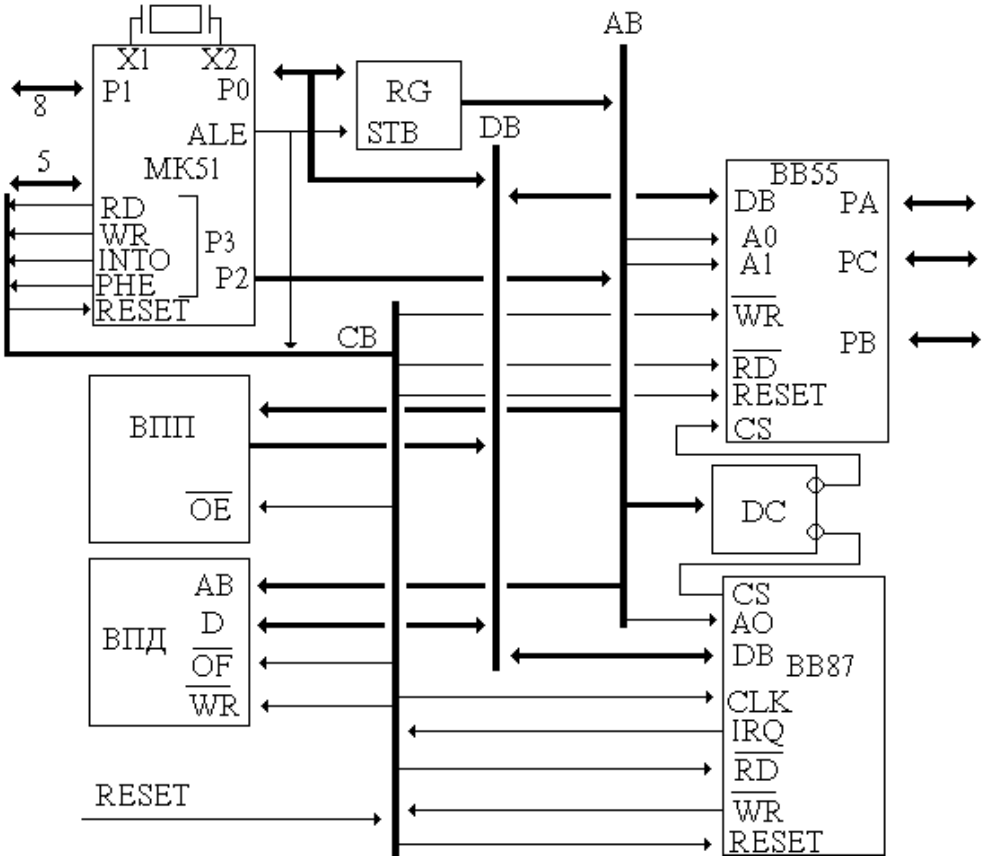


Рис.15. Функциональная схема отладочного модуля

Обращение к ним стробируется сигналами RD, WR и PSEN, соответственно. Программа Монитор расположена в ВПП. Адресное пространство ВПД включает в себя следующие области: буферную область Монитора; память данных; область, отведенную для подключения интерфейсных БИС (ППА, ККД).

Контроллер клавиатуры - дисплея (ККД) закрывает адресные пространства ВПД размером в 4 ячейки. Выбор кристалла ККД осуществляется дешифратором ДС, при установке соответствующих адресов (указанных 4-х ячеек).

Обмен данными МК с ККД осуществляется через порт P0. Для синхронизации работы ККД используется сигнал с выхода ALE. Выход сигнала прерывания из ККД (IRQ) соединен со входом запроса прерываний МК. Это позволяет достаточно просто обнаруживать факт нажатия клавиш, а также выполнять переход из программы пользователя в Монитор по прерыванию от клавиатуры.

Для управления внешним объектом от МК используется порт P1 и

оставшиеся не задействованными 5 линий порта Р3. Для сопряжения МК с объектом, имеющим большое число входов/выходов, можно расширить резидентную систему ввода/вывода, подключив к МК необходимое количество внешних портов. Такое расширение может быть выполнено двумя способами: с использованием стандартного расширителя ввода/вывода (КР580ВР43) или интерфейсных БИС (КР580ВВ55, КР580ВВ51). На приведенной схеме показан вариант расширения ввода/вывода с использованием параллельного периферийного адаптера (ППА) КР580ВВ55. Порты адаптера адресуются как ячейки ВПД, при этом младшие разряды (А0, А1) шины адреса используются для выбора порта, а старшие (А10 ÷ А3) с помощью дешифратора DC формируют сигнал выбора микросхемы ППА.

Ввод/вывод данных стробируется сигналами WR/RD - записи/чтения ВПД. Системный сброс МКС осуществляется нажатием на клавишу "сброс".

Унифицированная структура силовой части статических преобразователей частоты для широкого класса приводов переменного тока.

Современный этап технической революции характеризуется бурным развитием не только управляющей, но и силовой электроники. успехи которой позволяют по новому взглянуть на ряд проблем, которые раньше не решались либо ввиду непомерной стоимости проекта либо сложности его реализации на имеющейся элементной базе.

Известно, что в большинстве промышленно развитых стран около 70-80% всей вырабатываемой электроэнергии используется для преобразования в механическую работу с помощью различных электродвигателей. При этом до последнего времени наиболее массовым типом электропривода был нерегулируемый привод с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Это объясняется простотой двигателя и возможностью его непосредственного подключения к трехфазной сети переменного тока с помощью так называемых пускателей - простейшей коммутационной и защитной аппаратуры.

Применение нерегулируемых электроприводов сопровождается значительными непроизводительными затратами электроэнергии и в условиях резкого подорожания энергоносителей и, соответственно, электроэнергии, экономически невыгодно. Поэтому, доля регулируемых электроприводов, в том числе частотно-регулируемых электроприводов переменного тока постоянно растет. При этом в ряде стран приняты специальные государственные программы ускоренного развития энерго- и ресурсосберегающих технологий на базе экономичного регулируемого электропривода с широкими интерфейсными возможностями, дозволяющими одновременно с экономией электроэнергии решать и задачи комплексной автоматизации производства в целях оптимизации параметров технологических процессов и улучшения качества выпускаемой продукции.

Увеличение стоимости энергоносителей привело к еще одной проблеме - удорожанию цветных металлов и к увеличению стоим ости электрических машин традиционных конструкций. Эта проблема способствовала быстрому прогрессу электрических машин новых типов с малыми затратами меди и

алюминия («малообмоточных»): реактивных и индукторных, которые к тому же более технологичны, так как имеют не распределенные, а более простые в изготовлении сосредоточенные обмотки.

В отличие от асинхронных двигателей эти двигатели не могут работать непосредственно от сети переменного тока и требуют питания от *инвертора напряжения или тока* с регулируемой выходной частотой. Особенно эффективна работа таких машин в режиме *автокоммутации,* когда переключение фаз выполняется по сигналам установленного на вал двигателя (встроенного) датчика положения. Такой двигатель называется *вентильным* или *бесконтактным двигателем постоянного тока* и допускает управление по двум каналам: каналу напряжения на якоре и каналу угла коммутации. По прогнозам специалистов вентильные двигатели в начале следующего века вытеснят с рынка как традиционные коллекторные двигатели постоянного тока, так и асинхронные двигатели.

Большинство современных систем привода переменного тока со статическими преобразователями частоты строится по хорошо известной классической схеме: «Неуправляемый выпрямитель - Звено постоянного тока - Автономный инвертор напряжения с ШИМ-модуляцией - Двигатель» (рис.16). Для трехфазных двигателей (асинхронных, синхронных, вентильных или вентильных индукторных) инвертор напряжения выполняется по стандартной 6-и ключевой схеме. Для двигателей с другим числом фаз, например, для четырехфазных индукторных двигателей инвертор строится на базе полумостовых или мостовых схем.

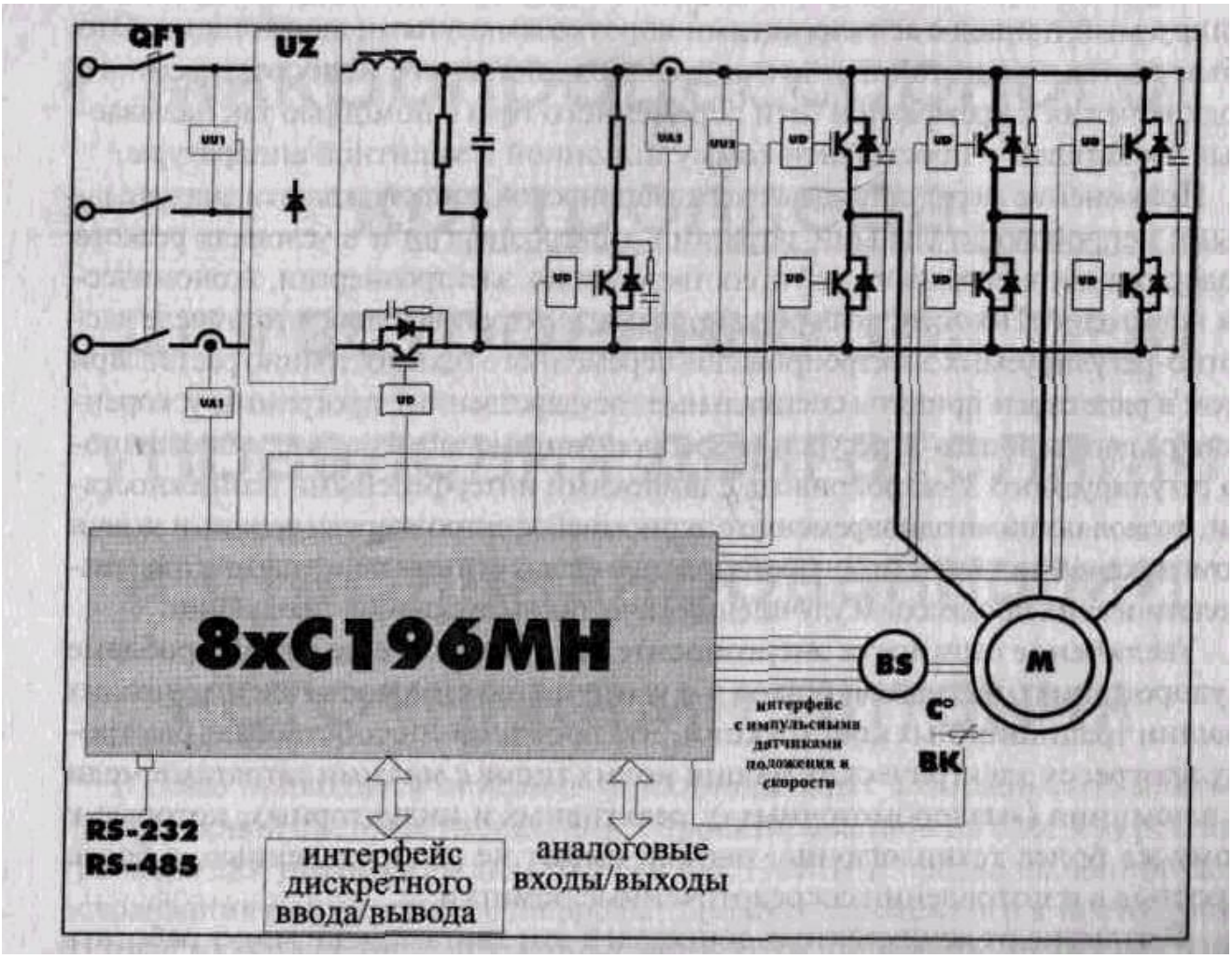


РИС. 16. ТИПОВАЯ СТРУКТУРА ПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Силовой преобразователь состоит из неуправляемого выпрямителя UZ, подключаемого к однофазной или трехфазной сети переменного тока и автономного инвертора напряжения, работающего, как правило, в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции. К выходу инвертора подключен двигатель М (асинхронный или вентильный постоянного тока). В последнем случае на вал двигателя дополнительно устанавливается датчик положения BS.

Инвертор может быть построен с использованием *биполярных транзисторов с изолированным затвором* IGBT. В широком диапазоне токов и напряжений рядом фирм выпускаются как отдельные силовые транзисторы, так и стойки, моду; и и даже интеллектуальные модули, имеющие встроенные драйверы и элементы защиты, а также интерфейсы, допускающие непосредственное подключение микропроцессорных систем управления. Имеются также и другие необходимые для построения привода компоненты: электролитические конденсаторы на высокие напряжения и токи, диодные модули для построения выпрямителей и т.д.

Мощная, встроенная в преобразователь микропроцессорная система управления должна выполнять функции не только прямого цифрового управления инвертором напряжения, но и всеми дополнительными элементами преобразователя, а именно:

• Цепью возбуждения для синхронных и вентильных двигателей с независимым контуром возбуждения (который физически может располагаться как на роторе, так и на статоре).

• Цепью зашиты преобразователя от перенапряжений при рекуперации энергии (путем управляемого «слива» энергии в дополнительный балластный резистор) для приводов с активной нагрузкой на валу или приводов с высокими требованиями по динамике переходных процессов.

• Цепью заряда батареи конденсаторов в контуре постоянного тока при включении преобразователя в работу.

• Цепью питания электромагнитного тормоза (если он необходим).

Кроме того, встроенная система микропроцессорного управления должна напрямую обрабатывать сигналы ряда датчиков обратных связей, среди которых типовыми являются датчики напряжения и тока в цепи постоянного тока, тока возбуждения двигателя, температуры двигателя и (или) преобразователя, а также датчики положения ротора различных типов (на базе чувствительных элементов Холла, оптических импульсных датчиков положения и т.д.), необходимые для выполнения функций автокоммутации в приводах с вентильными двигателями. Датчики положения или скорости, например, импульсные, могут потребоваться также в приводах с асинхронными двигателями целях более точной компенсации скольжения в функции нагрузки для расширения диапазона регулирования. Таким образом, встроенная микропроцессорная система управления должна иметь развитый интерфейс как с источниками аналоговых сигналов, так и с источниками импульсных сигналов.

Отметим, что современная встроенная система управления преобразователем частоты не будет конкурентоспособной без интерфейса с системами более высокого уровня управления (последовательного интерфейса RS-232 или 485), а также интерфейса с пультом оперативного управления, предназначенным для организации интерактивного взаимодействия с оператором для настройки параметров преобразователя, выбора нужного режима работы, наблюдения за координатами привода и технологическими переменными и тJ.

Сотни различных фирм, среди них такие известные как ABB, Siemens, Alien Bradley, Dan bss и др., выпускают преобразователи частоты и комплектные электропривода на их основе в диапазоне мощностей от 100 ВА до 100 кВА, работающие с высоким коэффициентом полезного действия до 96% и коэффициентом мощности до 0.9.

Серьезный научный потенциал, накопленный в России в области теории автоматического управления и теории электропривода, теории синхронных, шаговых и вентильных двигателей, вместе с доступностью современных микроэлектронных компонент (как силовых, так и управляющих), позволяет быстро выполнять необходимые разработки и запускать в производство отечественные серии преобразователей, основные технические характеристики которых соответствуют мировому уровню.

Приведем результаты проектирования универсального микропроцессорного контроллера для систем встроенного управления широкой гаммой приводов переменного тока со статическими преобразователями частоты, а также стабилизированными источниками питания.

Универсальный контроллер для встроенных применений

На рис. 17. показана блок-схема системы управления для использования в частотно-регулируемых электроприводах с асинхронными, синхронными, вентильными и шаговыми двигателями, а также в системах вторичного стабилизированного питания. Диапазон применений системы управления широк: от приводов насосов-дозаторов жидких сред до двухпроцессорных систем векторного управления приводами стержней ядерных реакторов.

При проектировании система управления была принята концепция совмещения функций прямого цифрового управления элементами преобразователя частоты и технологическими переменными, значение которых изменяется при регулировании скорости привода. Таким образом, в систему непосредственного управления встроены функции промышленного программируемого контроллера средней производительности, реализующего заданный алгоритм управления технологическим процессом (ПИД-регулятор). Такой подход позволяет отказаться от дополнительных устройств, создавая своеобразные узлы автоматизации, способные самостоятельно управлять как двигателями, так и технологическими переменными (давлением, расходом, подачей и т.д.).

Концепция интеллектуальных распределенных систем управления с каждым годом завоевывает все больше сторонников. Это связано с общей тенденцией переноса все больших вычислительных ресурсов непосредственно к месту, где установлено исполнительное устройство и соответствующий рабочий орган.

В состав системы управления входят следующие изделия.

• Одноплатный универсальный контроллер (в формате Е2).

• Пульт оперативного управления с двухстрочным жидкокристаллическим дисплеем и клавиатуре ft 4x4, выпускаемый как в виде встраиваемого изделия, так и виде автономного изделия, подключаемого к контроллеру плоским кабелем.

• Интерфейсная плата релейного ввода/вывода дискретных сигналов «сухим» контактом (8 входов и 8 выходов).

• Интерфейсная плата ввода/вывода импульсных сигналов, обеспечивающая сопряжение с 2-,3 -, 4-, 6-фазными датчиками положения, а также ввод реперных сигналов идентификации начальной позиции. Для работы контроллера необходим внешний источник питания 5 В (1А). Встроенная схема мониторинга питания обеспечивает постоянный контроль уровня внешнего питания и формирование запроса на прерывание процессора при раннем обнаружении падения напряжения ниже допустимого уровня.

В качестве центрального процессора выбран один из самых современных и

высокопроизводительных 16-разрядных микроконтроллеров для управления двигателями Inte 18xC196MH, обеспечивающий функции прямого цифрового управления инверторами напряжения в режиме центрированной синусоидальной ШИМ-модуляции на частотах несущей до 20 кГц с возможностями программного регулирования «мертвого времени» для защиты инвертора от сквозного тока в диапазоне от 0 до 125 мкс.

Все выходы ШИМ-генератора могут дополнительно буферироваться преобразователями уровня TTL-MOS (опция), что позволяет применять в силовой части привода драйверы различных фирм, в том числе с изолированными источниками питания ключей. Допускается подключение внешних источников питания для преобразователей уровня с диапазоном напряжений от 5 до 24 В. Предусмотрены программно-аппаратные средства безопасной инициализации при подаче напряжения питания на контроллер или при сбросе системы, исключающие случайное формирование отпирающих управляющих сигналов на драйверы силовых ключей в течение переходных процессов в цепях питания.

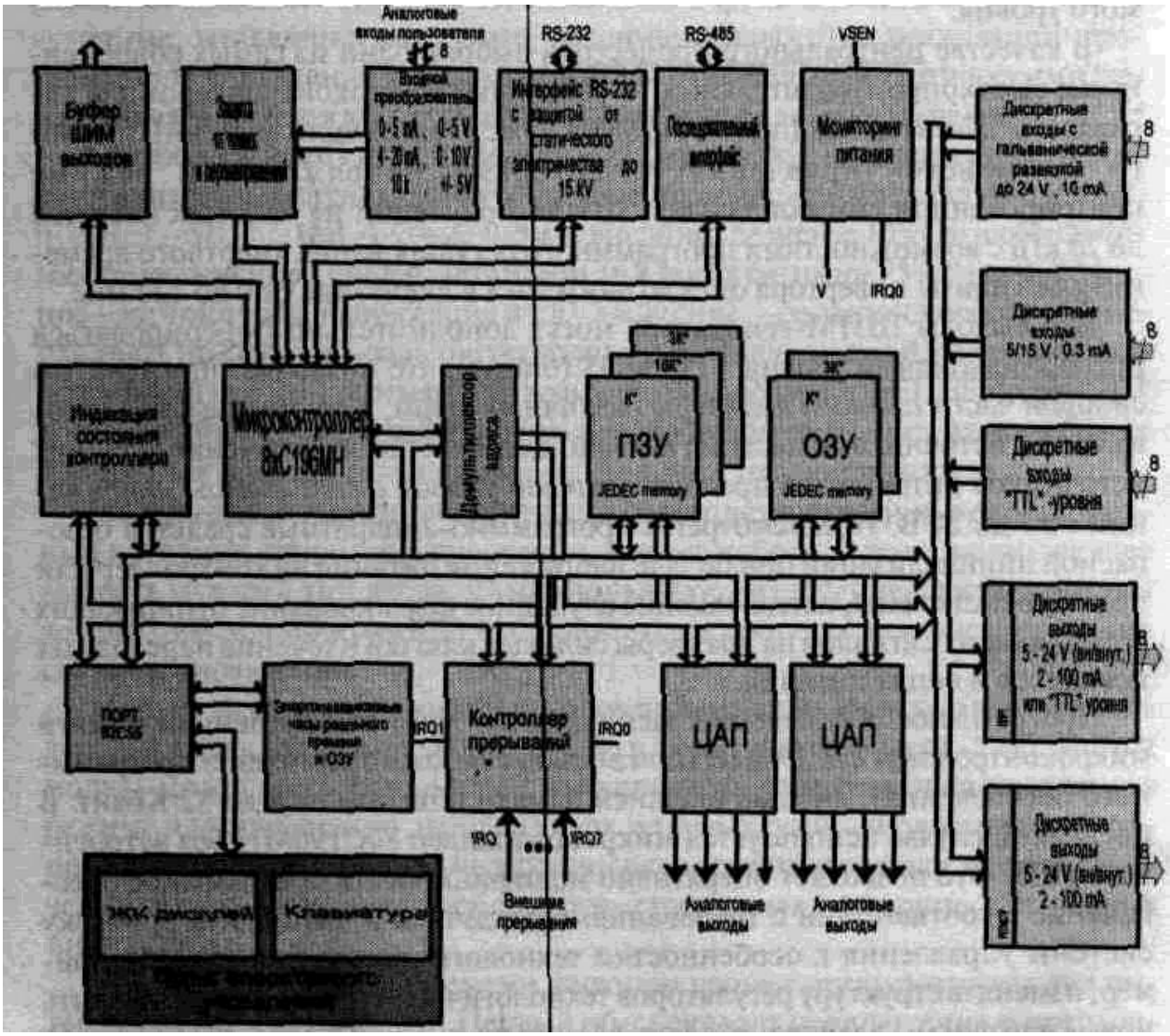


РИС. 17. БЛОК-СХЕМА УНИВЕРСАЛЬНОГО КОНТРОЛЛЕРА

Программное обеспечение располагается либо во внутренней памяти микроконтроллера 87С196МН (при поставке базового комплекта программного обеспечения), либо но внешней памяти объемом от 8 до 32 Кбайт. В последнем случае исполняется микроконтроллер 80С196МН без встроенного ПЗУ. Это позволяет оперативно модифицировать программное обеспечение в соответствии с требованиями заказчика и выполнять привязку системы управления к особенностям технологического процесса, например, изменять структуру регуляторов технологических переменных, вводить новые алгоритмы адаптивного управления и т.д.

Имеется также встроенная защита программного обеспечения от несанкционированного доступа.

Модуль памяти комплектуется различными типами внешней оперативной памяти:

• Статическим ОЗУ объемом от 8 до 32 Кбайт.

• Энергонезависимым ОЗУ объемом от 8 до 32 Кбайт с гарантированных сроком хранения данных до 10 лет.

Статическое ОЗУ используется исключительно для временного хранения промежуточных результатов, а также для ведения оперативного протокола с целью наблюдения за текущими значениями регулируемых переменных в приводе (мощность, ток и т.д.), а также за параметрами технологического процесса (давление в магистрали, расход, концентрация и т.д.).

Энергонезависимой ОЗУ используется для хранения параметров привода, преобразователя, Заводских уставок, а также заданных циклограмм управления технологическими переменными в функции времени (часовые, суточные, недельные, месячные, годовые циклы). Для реализации программного управления координатами привода или технологическими переменными в состав контроллера включены *часы реального времени.*

Контроллер имеет Унифицированный интерфейс с различными источниками аналоговых сигналов в большинстве промышленных стандартов: 0-5В, 0-10В, +/-5В,+/-10В,4-20мА,0-5мА, внешний резистор 10 кОм и обеспечивает подключение в общей сложности до 8 таких сигналов (5 из них внутренние - датчики тока, напряжения и т.д., 3 внешние, — задание скорости, обратная связь по скорости, Задание технологической переменной, обратная связь по технологической переменной, возмущающее воздействие). Точность АЦП составит 10 разрядов, время одного преобразования 10 мкс, максимальная абсолютная погрешность не более +/-3 единиц младшего разряда.

Модуль ввода аналоговых сигналов имеет встроенный высокостабильный источник опорного напряжения, а также наборное поле, позволяющее выбрать нужный тип входа. Функциональное назначение каждого из аналоговых входов программно настраивается в процессе конфигурирования системы управления.

Модуль вывода аналоговых сигналов позволяет выводить во вне до 8 аналоговых сигналов с разрешением 1/256 в диапазоне 0-5 В или -5,+5 В. Этот модуль может быть использован для управления шаговыми двигателями в

режиме электрического дробления шага (до 4-х осей одновременно от одного контроллера) или для индикации скорости привода или текущих значений технологических переменных на стрелочных или других аналоговых индикаторах.

Для сопряжения с системами верхнего уровня предусмотрены два интерфейса RS-232 и RS-485. Первый обеспечивает подключение к преобразователю любого компьютера или промконтроллера, в том числе «на ходу».

Эта возможность позволяет выполнить настройку преобразователя или диагностику оборудования с использованием портативных компьютеров в качестве переносных пультов оперативного управления. Второй позволяет подключить к одному каналу связи до 32-х преобразователей частоты и организовать не только управление преобразователями в реальном времени от системы верхнего уровня, но и сбор информации о состоянии привода и локально-контролируемого технологического оборудования.

Последовательные каналы связи дополнительно могут использоваться для подключения удаленных датчиков технологических переменных: температуры, уровня жидкости и т.д.

Контроллер имеет мощную встроенную систему ввода/вывода дискретных сигналов. что позволяет подключать кнопочные станции, командо-аппараты, датчики состояния технологического оборудования и т.д., а также выводить управляющие воздействия дискретного типа и информационные сигналы о состоянии привода.

Входные дискретные сигналы могут быть трех типов: ТТЛ-уровня, 15В и 24 В. Для входных сигналов напряжением 15 В предусмотрена дополнительная защита от помех триггерами Шмитта. Дискретные входы 24 В имеют встроенную гальваническую развязку. Выходные дискретные сигналы могут быть нескольких типов: ТТЛ, с регулируемым выходным напряжением в диапазоне от 5 до 24 В за счет подсоединения внешнего источника питания.

Если по условиям эксплуатации необходимо использовать релейные входы или выходы, те к контроллеру подключается дополнительная интерфейсная плата на 8 входов, 8 выходов.

Система прерываний микроконтроллера 8xC196MH расширена с помощью дополнительной БИС контроллера прерываний, что позволяет вводить по прерываниям ряд дискретных сигналов с датчиков, например, теплового перегрева инвертора, двигателя и т.д.

Возможности системы управления позволяют вводить (и выводить) также импульсные сигналы, например с импульсных датчиков положения, причем с автоматической идентификацией процессором скорости двигателя в широком диапазоне (вплоть до 10000 об/мин.). Измерение скорости производится с автоматическим программным переключением диапазонов с целью получения максимальной точности в каждом диапазоне. Это позволяет применять частотно-регулируемые асинхронные привода в точных замкнутых системах управления. Имеется также ряд дополнительных возможностей по организации

синхронной работы нескольких приводов, по организации управления группой шаговых двигателей (до четырех осей) с автоматическим контролем выпадения двигателей из синхронизма.

Набор программного обеспечения зависит от типа привода. Комплект программного обеспечения для асинхронного привода реализует функции автоматического регулирования выходного напряжения в функции текущей выходной частоты, задатчика интенсивности, блока ограничения резонансных частот, выбора заданного типа торможения, технологического регулятора и т.д. Разумеется реализованы и функции защиты двигателя и преобразователя: максимально-токовая, время-токовая, от сквозных токов, от обрыва и перекоса фаз, от недопустимого отклонения напряжения сети и другие.

В состав программного обеспечения входят драйверы дисплея и клавиатуры пульта оперативного управления, драйверы последовательных каналов связи, программе -монитор и другое системное программное обеспечение.

Выводы

• Рассматриваемая в качестве примера версия системы управления преобразователями частоты открывает богатейшие возможности по автоматизированной настройке параметров преобразователя в процессе пусконаладочных работ, по автоматической адаптации режима работы привода к условиям эксплуатации, по решению различных задач оптимального управления. Она сочетает в себе возможности качественного прямого цифрового управления инвертором с возможностями управления те отологическими переменными.

• Пользователь вместе с преобразователем получает и встроенный промконтроллер средней производительности, приобретая возможность создавать узлы локальной автоматизации, которые затем, при необходимости, можно легко подключить по каналу связи к системе управления более высокого уровня, с целью как удалённого управления, так и наблюдения за регулируемыми переменными и состоянием привода.

• Унифицированные интерфейсы позволяют использовать одну и ту же систему управление для приводов различных типов: постоянного тока, синхронных, шаговых, асинхронных и вентильных.

• Управляющие воздействия можно вводить через аналоговые входы, дискретные входы; или по одному из каналов последовательной связи. Гибкая система настройки конфигурации системы управления позволяет выполнять программную перенастройку функционального назначения входов системы управления оптимальным образом.

• Русифицированный дисплей пульта оперативного управления позволяет создавать дружественное программное обеспечение с интуитивно понятной мнемоникой. Возможно конфигурирование системы управления, настройка и местное управление с использованием портативного компьютера, подключенного к системе по последовательному каналу связи.

• При переходе к массовому производству изделий с встроенными системами управления аппаратная часть унифицированного контроллера может быть легко минимизирована в соответствии с требованиями конкретной задачи.

• Использование перспективных систем встроенного управления преобразователями частоты насосов холодного и горячего водоснабжения жилых и промышленных зданий позволяет экономить до 50% электроэнергии и до 15% воды. При этом срок окупаемости преобразователя не превышает одного года. В условиях начавшейся в России коммунальной реформы, актуальность работ в этом направлении не вызывает сомнений.

Лекция 12.

Мультипроцессорные системы управления. Транспьютеры - элементная база мультипроцессорных систем

Основные особенности транспьютеров

Концепция параллелизма давно привлекала внимание специалистов своими потенциальными возможностями повышения производительности и надежности вычислительных систем. В нашей стране с 60-х годов выполнялись теоретические, экспериментальные и промышленные разработки в этом направлении. Именно с подобными системами связывается в настоящее время перспектива дальнейшего наращивания производительности. Исторически первой промышленной разработкой, ориентированной на массово-параллельные системы стали транспьютеры.

Транспьютер - это микрокомпьютер с собственной внутренней памятью и линками (каналами) для соединения с другими транспьютерами. Термин "транспьютер", произошедший в результате объединения слов "транзистор" и "компьютер", отражает основную область его применения - массово-параллельные вычислительные системы, в которых он играет роль базового вычислительного элемента. Некоторые специалисты понимают термин "транспьютер" как название конкретного продукта фирмы Inmos, другие трактуют его как обобщенное наименование микропроцессоров со встроенными межпроцессорными интерфейсами. Используется также термин "транспьютеро-подобный микропроцессор", чтобы, с одной стороны, подчеркнуть, что речь идет не о продукте фирмы Inmos, а, с другой стороны, указать, что микропроцессор имеет встроенные линки для образования параллельных систем. Вполне возможно, что стремительное развитие микроэлектроники не позволит термину "транспьютер" устояться, и он будет поглощен более общим -микропроцессор, так как отличительный признак транспьютера - встроенные межпроцессорные интерфейсы - появятся в том или ином виде у всех микропроцессоров.

Первый транспьютер - Т414 - был представлен фирмой Inmos, Inc. (Бристоль, Великобритания) в 1983 г. Его основные характеристики:

• разрядность - 32 бит;

• объем внутренней памяти - 2 Кбайта;

• число коммуникационных каналов (линков)- 4;

• скорость обмена по линку - 5, 10, 20 Мбит/с;

• тактовая частота - внешняя - 5МГц, внутренняя - 15 МГц;

• производительность - 10 MIPS.

Широкую доступность и известность транспьютеры получили с 1985 г. Были выпущены модификации с большим объемом памяти (4 Кбайт) и более высокой тактовой частотой - семейство Т-4: Т424, Т425 - 20, 25 и 30 МГц, 16-разрядные модификации - семейство Т-2: Т212, Т222, транспьютеры со встроенным устройством выполнения операций с плавающей точкой - семейство Т-8: Т800, Т801, Т805. Производительность этих микропроцессоров достигает 30 MIPS и 4,3 MFLOPS. Выпускается ряд периферийных устройств транспьютерных семейств, к числу которых относятся микросхемы: М212 - контроллер НЖМД стандарта ST506, G412 - графический RGB-контроллер, С004 - программируемые 32-канальные коммутаторы и др.

Высокая степень "функциональной самостоятельности" транспьютера, простота интеграции и наличие периферийных устройств позволяют в короткие сроки создавать системы на их основе. Коммуникационные каналы транспьютера могут осуществлять обмен данными одновременно с вычислениями, практически не снижая производительности процессора. Благодаря этому качеству транспьютеров системы на их основе обладают хорошей масштабируемостью и высоким значением показателя эффективности - производительность/стоимость.

Архитектура и структура транспьютеров фирмы Inmos

Архитектура семейств Т-2, Т-4, Т-8

Транспьютеры относятся к классу RISC- процессоров. Система команд транспьютеров ориентирована на поддержку языка высокого уровня -ОККАМ (OCCAM). Это язык параллельного программирования, позволяющий задавать параллельные вычисления в соответствии с моделью взаимодействующих последовательных процессов (CSP). Программа на языке ОККАМ представляет собой совокупность асинхронных совместно протекающих взаимодействующих процессов, выполняющихся асинхронно и параллельно. Под процессом понимается ход исполнения программного кода некоторой программы или фрагмента программы. Взаимодействие между процессами реализуется путем обмена данными по принципу "рандеву". В транспьютере данная модель параллельных вычислений поддерживается благодаря наличию аппаратно-реализованного диспетчера, обеспечивающего выполнение параллельных процессов в режиме квантования времени. Причем количество одновременно выполняемых процессов не ограничено.

Мультипроцессорная система на базе транспьютеров представляет собой совокупность транспьютеров, соединенных линиями связи (непосредственно или через коммутатор).

Существенно упростить программирование мультипроцессорных ВС на базе транспьютеров позволяет тот факт, что одинаковая модель параллельных вычислений поддерживается как внутри отдельного транспьютера, так и в рамках мультитранспьютерной системы в целом. Благодаря этому программа, разрабатываемая для мультипроцессорной системы, может быть создана и отлажена на одном единственном процессоре, а затем перенесена на сеть транспьютеров без существенных преобразований. Исключение составляет ограничение числа каналов связи процесса с процессами, протекающими на другом транспьютере. Это ограничение преодолено в транспьютере Т-9000.

Обобщенная структура транспьютера Т800 приведена на рис. 76. На этом же рисунке показаны архитектурные регистры процессора, управляющие структуры процессов и распределение их рабочих областей памяти.

В зависимости от модели, транспьютер состоит из 32- или 16-разрядного центрального процессора, интерфейса внешней памяти, 2 или 4 дву-направленных каналов - линков, программируемого блока событий (Event), таймера, внутреннего ОЗУ емкостью 2 или 4 Кбайт, блока режимов работы линков, блока системных функций. Некоторые модели могут содержать 64-разрядное устройство операций с плавающей точкой и (или) интерфейсные схемы внешних устройств, такие как НЖМД, ЭЛТ, сетевой адаптер. (Контроллеры внешних устройств обычно выполняются на кристалле вместо двух линков).

Центральный процессор

32-разрядный центральный процессор транспьютера работает на тактовой частоте до 30 МГц, формируемой из опорной внешней тактовой частоты 5 МГц внутренней схемой умножения. Внутренняя структура центрального процессора показана на рис. 77.

Аппаратный планировщик (диспетчер) центрального процессора организует одновременное (в режиме разделения времени) выполнение нескольких процессов. Каждому процессу в момент его создания в адресном пространстве транспьютера выделяется выровненная по границе слова рабочая область памяти и устанавливается приоритет. В транспьютере реализована двухуровневая схема приоритетов: 0 - высокий приоритет процесса, 1 - низкий приоритет. Объединение адреса рабочей области и приоритета образует дескриптор процесса.

Центральный процессор содержит два регистра-таймера, для низко- и высокоприоритетных процессов. Высокоприоритетный регистр инкрими-нируется каждую 1 мкс, низкоприоритетный - каждые 64 мкс.

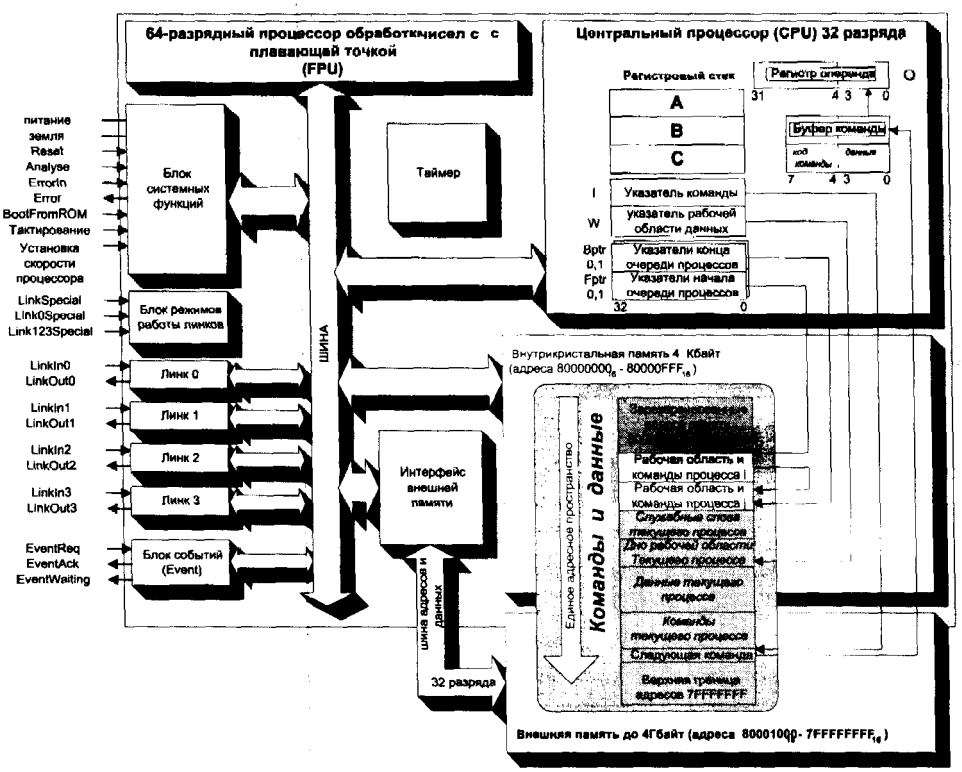


РИС. 76. СТРУКТУРА ТРАНСПЬЮТЕРА T800

Регистр W транспьютера указывает на рабочую область процесса, а в регистре указателе команды находится адрес следующей выполняемой команды.

Регистры общего назначения A, B, C, образуют регистровый стек ss память с дисциплиной доступа FIFO. АЛУ выполняет логические и арифметические операции над операндами, содержащимися в регистровом стеке. Операнды помещаются в стек через его вершину - регистр A. При загрузке данных в A его содержимое переносится в B, содержимое B в C, а содержимое последнего теряется. Результаты операций также формируются в регистре A, при этом содержимое регистра C "выталкивается" в регистр B и становится неопределенным.

Система команд транспьютера

Все команды транспьютера однобайтовые и выполняются за один такт процессора. Структура команды показана на рис. 76. Старшие 4 разряда -код команды, младшие *4* разряда используются для формирования операнда команды или кода команды в регистре операнда - O.

Операции, реализуемые командами транспьютера, подразделяются на первичные и вторичные. 13 наиболее употребительных первичных операций, такие, например, как сложение с константой со значением в диапазоне 0 -15, безусловный переход, загрузка (запись) слова и т.п. Еще 3 команды (мнемокоды pfix, nfix, opr) используются для реализации вторичных операций. Код вторичной операции формируется командами pfix, nfix и opr в регистре O, а операнды содержатся в регистрах.

Выполнение команд

Команды выбираются из памяти транспьютера и помещаются в буфер команд центрального процессора. За один такт выбирается 2 команды в Т-414 и 4 команды в Т-800.

Выполнение большинства команд осуществляется в три этапа:

1. Операнд команды помещается в младшие 4 разряда регистра операнда- О;

2. Выполняется операция, задаваемая кодом команды. Содержимое регистра О интерпретируется как операнд.

3. Очищается регистр операнда - О.

Исключение составляют команды pfix, nfix и opr.

Команда pfix на этапе 2 осуществляет сдвиг содержимого О на 4 разряда влево и не очищает регистр О на этапе 3. Команда nfix выполняется так же, как и pfix, но перед сдвигом О помещает туда арифметическое дополнение его содержимого.

Поскольку после выполнения команд pfix и nfix содержимое О не очищается, последовательность команд pfix и nfix позволяет формировать в регистре О операнды с разрядностью до 32. Требуемая последовательность команд минимальной длины формируется компилятором.

Команда opr интерпретирует содержимое О как код вторичной операции. В этом случае операнды содержатся в регистрах процессора. Код вторичной операции, таким образом, задается как операнд первичной операции opr и может иметь до 2^{32} различных значений. В существующих на сегодняшний день моделях транспьютеров используется около сотни вторичных операций.

Использование сопроцессора

В случае наличия у транспьютера встроенного сопроцессора, выполняющего операции с плавающей точкой, распознавание команд и передача их на выполнение осуществляются аппаратно в центральном процессоре, там же выполняется вычисление адреса операндов и их загрузка в регистры FPU.

Модуль операций с плавающей точкой, как показано на рис. 77, состоит из двух блоков: блока мантиссы и блока порядка со своим набором регистров (два регистровых стека). Все команды с плавающей точкой подразделяются на два класса: полностью самостоятельные команды, никак не влияющие на состояние центрального процессора, и команды, пересылающие результаты выполнения операции в центральный процессор.

После передачи команды на исполнение в сопроцессор центральный процессор продолжает выполнение потока команд, если это команда относится к первому классу, или ожидает получения результата, если это команда второго класса.

Распределение памяти транспьютера

Транспьютер может адресовать до 2^{32} байт (4 Гбайт). Особенностью транспьютера является начало адресов в области отрицательных значений. Младший адрес в дополнительном коде соответствует значению (80000000…).

Структурно (конструктивно) вся оперативная память подразделяется на внутрикристальную и внешнюю. Объем внутрикристальной памяти составляет 4 (2) Кбайт (в зависимости от модели транспьютера). Архитектурно (с точки зрения программиста) вся память транспьютера, как внешняя, так и внутрикристальная, равнодоступна и имеет единую адресацию. Внутрикристальной памяти соответствуют младшие адреса, а внешней памяти - старшие.

Поскольку внутрикристальная память имеет меньшее время доступа (один такт процессора), в нее обычно помещаются программистом часто используемые данные и подпрограммы. Пример распределения памяти показан на рис 76.

Несколько слов в младших адресах памяти используется для специальных целей: для слов состояния аппаратных каналов - линков, блока Event, регистров таймера, в качестве рабочих областей памяти диспетчера.

Диспетчеризация процессов

Каждый из процессов в конкретный момент времени может быть выполняемым, активным (готовым к выполнению в очереди соответствующего приоритета), ожидающим сигнала таймера (в очереди к таймеру соответствующего приоритета), ожидающим ввода-вывода.

Для выполняемого процесса регистр I содержит адрес следующей команды, регистр W содержит его дескриптор.

Для организации очереди процессов на выполнение (очередь активных процессов) в диспетчере используются пары регистров FptrO, BptrO, Fptrl, Bptrl, указывающие на начало и конец очереди высоко- и низкоприоритетных процессов соответственно. В качестве элементов очередей используются рабочие области процессов, содержащие помимо данных процесса, управляющую информацию, требующуюся для сохранения и восстановления состояния процессов на этапе диспетчеризации (в том числе ссылку на рабочую область следующего процесса в очереди).

Низкоприоритетные процессы выполняются в течение не более чем 32 периодов низкоприоритетного таймера, после чего процесс (если он еще способен к выполнению) помешается в конец очереди активных низкоприоритетных процессов, а диспетчер планирует выполнение следующего процесса. Сначала просматривается очередь высокоприоритетных процессов, затем - низкоприоритетных.

Высокоприоритетный процесс не прерывается и выполняется до тех пор, пока это возможно (до завершения или до момента ожидания ввода-вывода, сигнала таймера или сигнала внешнего события, выдаваемого блоком Event). Если высокоприоритетный процесс становится активным (например, получает сигнал таймера) в момент выполнения процесса с низким приоритетом, последний прерывается, его состояние сохраняется в области зарезервированных адресов памяти транспьютера и инициируется выполнение прервавшего высокоприоритетного процесса. После его выполнения

возобновляется прерванный низкоприоритетный процесс.

Ввод-вывод

Ввод-вывод для процессов в транспьютере организуется одинаковым образом как в случае использования аппаратных линков (внешний ввод-вывод), так и в случае использования виртуального линка (обмен между процессами одного транспьютера). В обмене всегда участвуют только два процесса: один вводит данные, другой выводит.

В момент выполнения команды описания канала и после завершения каждого обмена слово состояния канала (ССК) инициализируется константой Minint. Процесс, первым выполняющий команду обмена, приостанавливается и проверяется содержимое канала. Если оно Minint, то в ССК заносится дескриптор процесса, а в рабочую область процесса помещаются значение W и адрес передаваемых данных, после чего управление передается диспетчеру для планирования выполнения других процессов.

Если содержимое ССК не Minint, значит данный процесс "пришел" на "рандеву" вторым. В этом случае содержимое ССК - дескриптор процесса, используя который находятся данные в случае ввода или буфер для данных в случае вывода.

Обмен по линкам осуществляется аналогично, с той разницей, что **ССК** имеют фиксированные адреса в памяти 80000000 - 8000001C,g, и в процессе обмена данные не пересылаются между областями памяти, а передаются по линии связи в стартстопном режиме с квитированием байтов.

При выполнении ввода-вывода от центрального процессора требуется лишь инициализация обмена. По команде ввода-вывода вся требуемая информация об операции обмена - адрес и длина данных - помещается во внутренние регистры линка, после чего центральный процессор освобождается для дальнейших вычислений, а линк транспьютера самостоятельно управляет обменом данными.

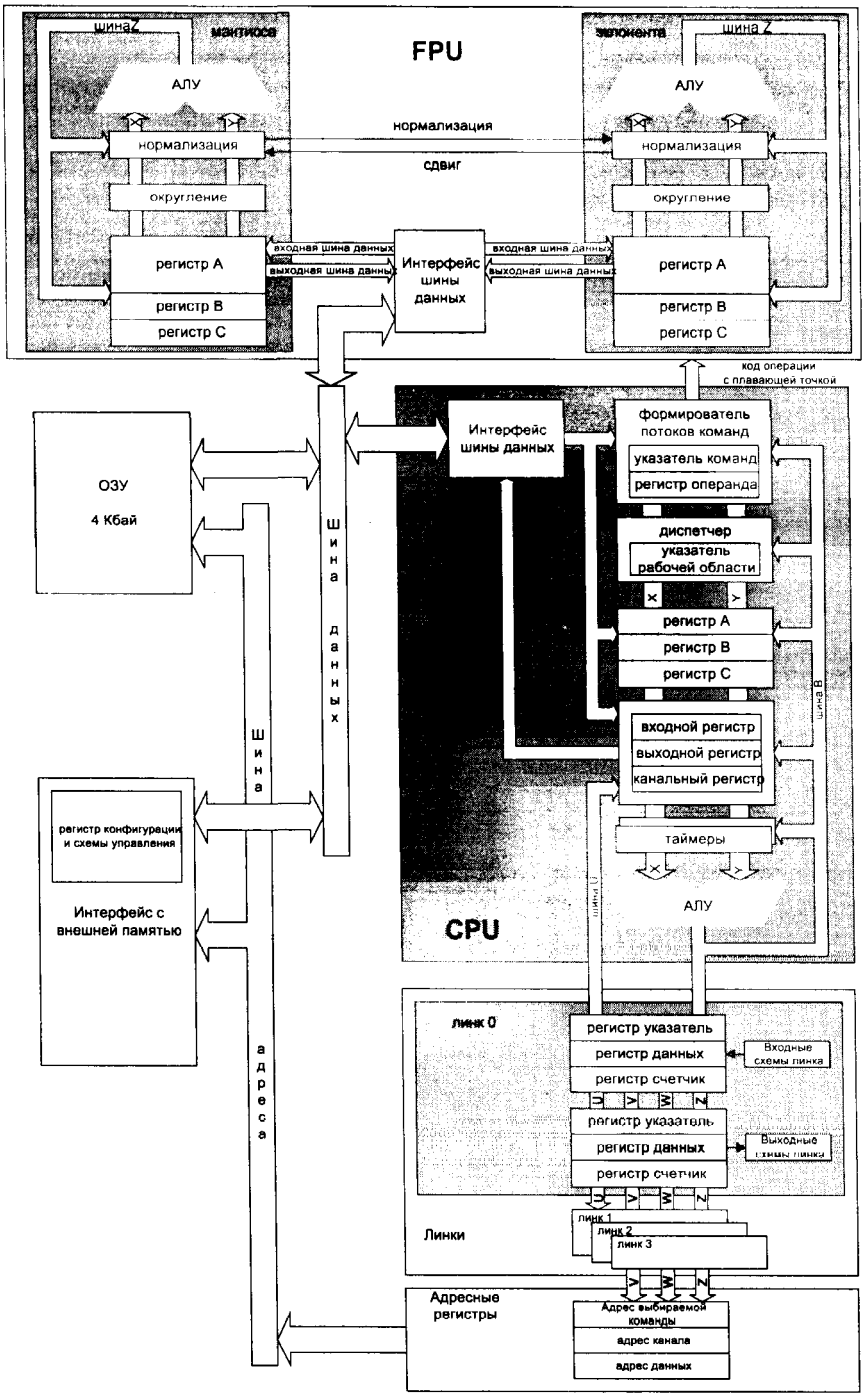


РИС. 77. ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ТРАНСПЬЮТЕРА

Передача данных по линку

Все семейства транспьютеров Т-2 (Т-212, Т-222, Т-225), Т-4 (Т-414, Т-400, Т-425), Т-8 (Т-800, Т-801. Т-805) используют один и тот же протокол передачи данных по линкам. Взаимодействие между транспьютерами осуществляется посредством обмена сообщениями, состоящими из последовательности байтов. Данные передаются по одному проводу из пары проводов. По другому проводу пары передаются подтверждения приема каждого байта.

Байт передается в обрамлении служебных битов, начиная со стартового бита, далее следует управляющий бит, а затем 8 информационных битов и столовый бит. Таким образом, на 8 информационных битов приходится 3 управляющих,

поддерживающих протокол передачи. На рис. 78. показан пример передачи по линку.

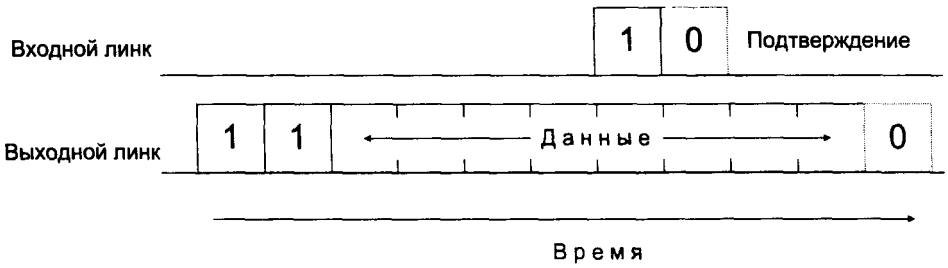


РИС. 78. ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО ЛИНКУ ТРАНСПЬЮТЕРА

После передачи байта отправитель ждет подтверждения, которое состоит из стартового и управляющего бита. Причем если при передаче информационного байта управляющий бит равен 1, то в подтверждении он равен 0. При этом байты данных и подтверждения для переданных в противоположном направлении байтов данных передаются по одному проводнику. Подтверждения имеют приоритет перед байтами данных. Можно установить режим, при котором подтверждения начинают передаваться сразу после получения стартового и управляющего битов, что приводит к передаче байтов без задержки между ними.

Если один из обменивающихся через линк процессов не готов к приему данных, байты накапливаются в регистре данных линка. При заполнении регистра подтверждение после получения очередного байта не выдается, и передающий линк приостанавливает передачу до приема данных процессом и освобождения регистра линка.

При инициации передачи первого байта сообщения существует задержка на настройку каналов прямого доступа в передающем и приемном транспьютерах, что обусловливает разную скорость при передаче коротких (от единиц до нескольких десятков байтов) и длинных (несколько тысяч байтов) сообщений. В первом случае скорость составляет 2-4 Мбит/с, во втором - максимально возможную 10-20 Мбит/с, в зависимости от настройки передающего и принимающего транспьютеров.

Передача по линку асинхронна, приемный транспьютер не чувствителен к фазе принимаемых сигналов. Единственное, что требуется - точный кварцевый генератор 5 МГц для задания тактовых сигналов транспьютеров.

Блок режимов работы линков позволяет задавать скорость передачи по линкам транспьютера (5, 10, 20 Мбит/с), причем для нулевого линка скорость устанавливается независимо от остальных. Установка осуществляется подачей соответствующих уровней на входы LinkSpecial, LinkOSpecial, Linkl23Special.

Обмены по линку программируются раздельно в передающем и принимающем транспьютерах. В передающем транспьютере программируется команда передачи по линку заданного числа байтов. В принимающем транспьютере программируется команда приема из линка задаваемого числа байтов. Реализация обмена происходит, если программы в передающем и принимающем транспьютерах выходят на команды передачи и приема. Если один транспью-

тер вышел на соответствующую команду, то он ждет, пока другой выйдет на свою команду обмена. Неправильно запрограммированный обмен ведет к бесконечному ожиданию. Кроме того, бесконечное ожидание возможно, если заданы разные значения количества передаваемых и принимаемых байтов.

Ожидание сигнала от блока событий

Блок событий (Event) выполняет преобразование внешних логических уровней на входе блока в байтовое сообщение со значением 0 или 1, передаваемое по внутреннему каналу. Поэтому программно блок Event воспринимается как специальный канал, отличием которого от обычного канала является то, что из этого канала можно только "читать". ССК для блока Event имеет фиксированный адрес 80000020 Ожидать ввода из канала Event может одновременно только один процесс в транспьютере.

Обычно Event используется для регистрации внешних прерывании в транспьютерной системе. Сигнал прерывания подается на вход транспьютера EventReq. Подтверждение приема сигнала прерывания (чтение из канала Event) выдается в виде уровня 1 по линии EventAck.

Ожидание сигнала от таймера

Программно таймер воспринимается как канал только для чтения, выдающий либо содержимое регистра таймера с соответствующим приоритетом, либо сигнал наступления ожидаемого момента времени.

Все процессы, ожидающие наступления некоторого момента времени (истечения временного интервала) помещаются в очередь к таймеру, соответствующему их приоритету. Очередь процессов отсортирована в порядке наступления ожидаемого момента времени и организована с помощью ссылок между служебными словами в рабочей области процессов. Адрес первого процесса в очереди соответствующего приоритета содержится в служебных словах транспьютера (TPtrLocO, TPtrLocI), в младших адресах памяти. При достижении ожидаемого момента времени диспетчеру передается дескриптор соответствующего процесса для его перевода в конец очереди активных процессов.

Инициализация системы после включения питания

Транспьютер и его ОЗУ построены по КМОП-технологии и не сохраняют своего состояния после отключения питания. Поэтому после включения питания для начала функционирования в транспьютер необходимо загрузить некоторый минимум программного обеспечения. Транспьютер может быть загружен как из внешнего ПЗУ, так и из любого линка. Для указания режима начальной загрузки используется вывод BootFromROM. Если уровень BootFromROM равен 1, то управление передается по адресу FFFFFFFE, по которому обычно содержится команда безусловного перехода на программу начальной загрузки.

Если BootFromROM равен 0, то производится загрузка из линка. После включения питания транспьютер переходит в состояние ожидания приема данных по линкам. Первый байт, принятый по любому из линков, управляет

дальнейшим режимом работы транспьютера. Если его значение больше 1, то он интерпретируется как длина кода программы, принимаемой следом за ним. Принимаемые данные записываются в память транспьютера начиная с адреса MemStart, с него же и начинается выполнение программы. Как правило, первой загружается программа начальной загрузки транспьютера, которая обеспечивает загрузку остального программного обеспечения.

Если первый принятый управляющий байт равен 0 или 1, то транспьютер переходит в режим управления памятью.

Управляющий байт, равный 0, заставляет транспьютер интерпретировать следующие 4 байта как адрес памяти, по которому в память будет записано слово, поступившее как следующие 4 байта. После этого транспьютер снова переходит в режим управления памятью, из которого его может вывести лишь прием управляющего байта со значением, большим 1.

Если управляющий байт равен 1, следующие 4 байта задают адрес слова памяти, которое будет считано и передано как 4 байта по тому же линку, из которого поступили в противоположном направлении предыдущие 4 байта. После этого транспьютер остается в режиме управления памятью.

Режим управления памятью используется обычно для целей отладки.

Управление системой

Появление уровня 1 на входе Analyze переводит транспьютер, работающий по программе, в режим управления памятью. Как уже было сказано выше, в этом режиме может быть считано и изменено состояние памяти транспьютера.

Обработка ошибок

Программные ошибки, такие как арифметическое переполнение, деление на 0, выход за границы массива, вызывают установку в транспьютере флага error и появление сигнала на выходе Error. Флаг режима обработки ошибок транспьютера - HaltOnError - позволяет определять поведение транспьютера в случае ошибки (установки флага error): если был задан режим остановки (HaltOnError 1), то в случае возникновения ошибки устанавливается еденица на выходе Error и транспьютер останавливается; если была выполнена установка HaltOnError=0, то в случае ошибки устанавливается в еденицу флаг error, однако транспьютер продолжает работать.

В мультипроцессорных системах выводы Analyze, Reset, Error, Errorin всех транспьютеров обычно соединены согласно схеме, представленной на рис. 79. При такой схеме соединения появление сигнала Error на выводе любого транспьютера переводит всю систему в режим управления памятью. Соответствующие программы в хост-машине позволят определить состояние системы и пути преодоления ошибочной ситуации.

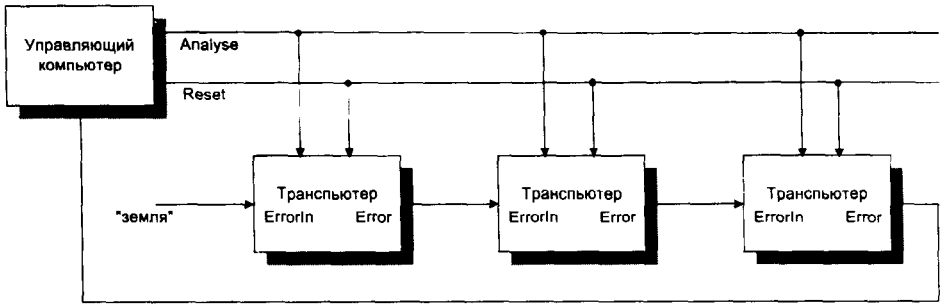


РИС. 79. СХЕМА СОЕДИНЕНИЯ ЛИНИЙ СИСТЕМНОГО СЕРВИСА В МУЛЬТИТРАНСПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Лекция 13.

Транспьютер Т9000

Архитектурные и структурные особенности

На момент своего появления транспьютеры семейства Т-8 были самыми быстродействующими 32-разрядными микропроцессорами. Попытка фирмы Inmos сохранить лидерство перед американскими производителями микропроцессоров воплотилась в разработку транспьютера Т9000. Его основные технические характеристики:

- производительность - 200 MIPS, 25 MFLOPS;
- объем внутрикристальной памяти - 16 Кбайт;
- число коммуникационных каналов - 4;
- скорость обмена по линку - 100 Мбит/с.

Основными особенностями архитектуры данного транспьютера являются аппаратная поддержка механизма виртуальных каналов и аппаратный группировщик команд, повышающий загрузку параллельно функционирующих устройств процессора.

Однако фирма Inmos не смогла выдержать обещанные сроки поставки Т-9000, а также достичь объявленной производительности. Поэтому, хотя образцы Т-9000, работающие на пониженной, по сравнению с объявленной, тактовой частоте были выпущены, коммерческого успеха они не имели.

Виртуальные линки

Механизм виртуальных линков позволяет вести по одному физическому линку обмен между произвольным числом пар процессов, протекающих в разных транспьютерах.

Управляет обменом встроенный в Т-9000 процессор виртуального канала (VCP). Сообщение, передаваемое от процесса-отправителя к процессу-получателю, VCP делит на пакеты, каждый из которых содержит 32 байта данных (последний пакет - от 1 до 32 байт), заголовок пакета и концевик (дам последнего пакета - признак конца сообщения, для остальных - признак конца

пакета). При получении пакета, VCP в принимающем транспьютере передает подтверждение в виде пустого пакета содержащего только заголовок и признак конца пакета. VCP, используя информацию, содержащуюся в заголовке пакета, осуществляет маршрутизацию пакетов и сшивку сообщения. Таким образом, обмен данными для процессов выглядит так же, как и в случае транспьютеров прежних поколений, что способствует преемственности программного обеспечения.

"Прозрачность" для процессов маршрутизации сообщений в сети транспьютеров T9000 полностью устраняет различие между обменом в рамках одного транспьютера и обменом в транспьютерной сети. Этот свойство существенно упрощает разработку программы для мультитранспьютерной системы и повышает ее эффективность, поскольку не требуется дополнительных расходов на организацию маршрутизации и коммутации.

В целях увеличения числа физических связей транспьютера T9000 разработан программируемый коммутатор C 104, осуществляющий передачу сообщения с любого из 32 входов на любой из 32 выходов в соответствии с их заголовком.

Для возможности использования в системе T9000 совместно с транспьютерами предшествующих поколений разработана микросхема C 100, выполняющая согласование электрических характеристик и преобразование формата передаваемых по линкам данных.

Группировщик команд

В T-9000 полностью сохранена система команд предыдущих поколений транспьютеров. Увеличение производительности достигается за счет одновременного исполнения группы, в которую входит до 8 команд.

В T-9000 реализован аппаратный группировщик команд. Образование групп команд преследует цель достижения высокой загрузки устройств процессора.

Процессор за один такт извлекает из памяти 4 команды. В силу того, что некоторые команды требуют для исполнения более чем 1 такт, в процессоре может быть накоплено количество команд, достаточное для формирования 5 групп по 8 команд каждая, что соответствует полной загрузке устройств процессора.

Транспьютероподобные микропроцессоры серии "Квант"

Примером отечественной разработки транспьютероподобных процессоров являются микропроцессоры серии "Квант". Это семейство 32-разрядных микропроцессоров с оригинальной архитектурой, сочетающей RISC-подход с методикой длинного командного слова. Семейство характеризуется высокой степенью внутреннего параллелизма процессов обработки, конвейерным выполнением команд, Гарвардской архитектурой памяти, наличием последовательных коммуникационных каналов -линков. Были выпущены две модификации микропроцессора:

- "Квант-10" по технологии 2,5 мкм на трех полузаказных матричных

кристаллах 1537 ХМ2, спроектированных в НИИ "Квант" и изготовленных в НИИ точной технологии, г. Зеленоград;

• "Квант-20" по технологии 1,5 мкм на одном кристалле типа U1700 фирмы ZMD (ФРГ, Дрезден), спроектированном в НИИ "Квант" и изготовленном фирмой ZMD. Структура микропроцессора показана на рис. 80. Микропроцессор работает с внешними раздельными кэш-памятями команд и данных и может использовать сопроцессор. Память данных микропроцессора содержит только данные, тогда как память команд может содержать как команды, так и данные (такая архитектура памяти получила название модифицированной Гарвардской).

Устройство управления

Процессор выбирает из памяти команд 32-разрялные команды и помещает их сначала в первый, а затем во второй регистры команд, далее декодирует команды и формирует управляющие сигналы для всех функциональных блоков процессора. Блок управления прерываниями обеспечивает приоритетную схему обработки 10 типов внешних и внутренних прерываний. Блок ПДП прямого доступа в память позволяет выполнять вычисления одновременно с обменом данными по 4 коммуникационным каналам. Блок защиты данных предназначен для защиты фрагментов памятей команд и данных, выделяемых под операционную систему.

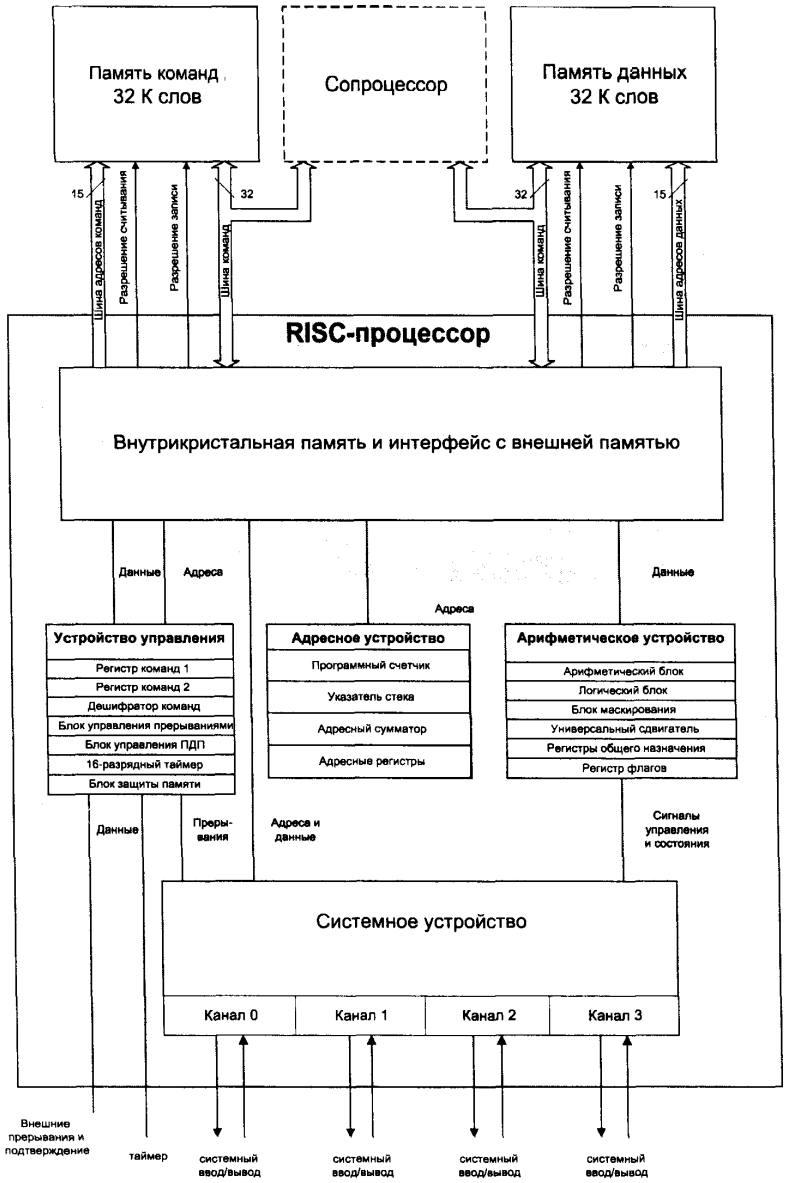


Рис. 80. Структура микропроцессора "Квант"

Адресное устройство

В процессоре реализована концепция разнесенной" (decoupled) архитектуры, в соответствии с которой все вычисления адресов выполняются отдельным адресным устройством, что предоставляет возможность одновременной обработки данных в арифметическом устройстве и вычисления адресов в адресном устройстве.

Адресное устройство содержит в программном счетчике адрес следующей команды, поддерживает в памяти стек адресов возврата из подпрограмм (обработчиков прерываний), выполняет все вычисления адреса в 16-разрядном адресном сумматоре. Файл адресных регистров (АР) содержит 8 16-разрядных АР для МП "Квант-10" и 4 16-разрядных АР для МП "Квант-20".

Арифметическое устройство

Арифметический блок способен выполнять 16 логических и 14 арифметических операции, в том числе байтовые, пошаговое умножение 32-

разрядного множимого на два разряда множителя. Логический блок может выполнять логические операции параллельно с арифметическими. Все операции выполняются над 32- разрядными операндами за один такт.

Универсальный сдвигатель способен выполнять за один такт логический, арифметический или циклический сдвиг 32-разрядного слова влево или вправо на 0 - 31 разряд, а также осуществлять циклические сдвиги внутри байтов, тетрад, пар. Схема маскирования арифметического устройства позволяет маскировать результаты любой операции содержимым одного из регистров общего назначения. Файл регистров общего назначения (РОН) используется для хранения операндов, результатов, масок, адресов данных. В регистр флагов заносятся признаки по результатам выполнения операций в арифметическом устройстве.

Системное устройство

Системное устройство обеспечивает связь с 4 аналогичными процессорами по независимым каналам. Обмен осуществляется побитно блоками слов. В начале каждого блока задается количество передаваемых слов и адрес в памяти, в который будет записываться сообщение. В процессе передачи осуществляется контроль по четности для каждого передаваемого байта данных. В случае ошибки при передаче вырабатывается соответствующее прерывание.

Регистр зашиты памяти позволяет запрещать запись в любой блок памяти длиной 4 Кслов.

Конвейер процессора

В процессоре реализован трехстадийный конвейер выполнения команд. На первой стадии осуществляется выборка команды из памяти команд, на второй стадии производится формирование адреса данных для последующего обращения в память и модификация регистров адреса, на третьей стадии выполняются ввод-вывод данных из памяти по предварительно вычисленному адресу и операции арифметики. Действия на каждом этапе выполняются за один такт, что позволяет при обеспечении высокой степени загруженности конвейера выполнять команды в среднем за один такт.

Система команд

Команды процессора подразделяются на простые и комплексные. Первые выполняют одно действие, тогда как вторые задают трехадресную арифметическую операцию над данными в регистрах одновременно с операцией обмена данными с памятью и (или) модификацией адресных регистров.

При обращении к памяти используются следующие виды адресации:

базовая по содержимому АР, базовая по содержимому РОНа, автоинкрементная или автодекрементная адресация по любому АР, базово-индексная адресация по двум АР. В МП "Квант-20" добавлена базово-индексная адресация с 8-разрядным смещением, задаваемым в поле команды.

Для упрощения устройства управления и обеспечения большей гибкости в программах в микропроцессоре реализована следующая схема выполнения

условных и безусловных переходов. В случае условного перехода специальная команда проверяет соответствие флага признаков результата арифметической операции одному из 16 возможных условий перехода. Если имеет место соответствие, то следующая команда не выполняется, а как бы подменяется пустой операцией (NOP). Причем проверка условия осуществляется на фоне выполнения арифметических операций.

Чтобы не нарушить работу конвейера (избежать пропуска конвейерных циклов), безусловный переход выполняется но принципу "отложенного перехода". В конвейере сначала отрабатывается команда следующая за командой перехода, а затем выполняется переход, Так же выполняется и обращение к подпрограммам.

Конвейеризация внутренних процессов в осуществляется во времени выполнения операций в различных функциональных устройствах микропроцессора позволяют выполнять до четырех команд за один такт.

Производительность микропроцессора.

Гибкая система команд микропроцессор способствует его эффективному применению как на задачах счётного характера, так и на задачах логической и символьной обработки. Коммуникационные возможности процессора позволяют строить на его базе масштабируемые системы с MPP-архитектурой.

Уникальная архитектура процессора серии "Квант" позволила обеспечить лучшее значение производительности по сравнению с транспьютерами фирмы Inmos. Производительность микропроцессора "Квант-10" с тактовой частотой 4 МГц соответствует производительности транспьютера Т-800 с частотой 20 МГц. Производительность микропроцессоров "Квант-10" и "Квант-20" может быть оценена как 12-15 Моп/с и 25-30 Моп/с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры эксплуатации горного оборудования
(протокол № 1 от 18.09.2025)
Заведующий кафедрой

_____Д. И. Симисинов

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания по дисциплине

Б1.В.09.09 ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Специальность -

21.05.04 Горное дело

Специализация -

Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Автор: Зубов В.В., к.т.н., Адас В.Е.

Екатеринбург

ВЕДЕНИЕ 3
ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА 4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ 4
Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса 4
Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам 5
Подготовка и написание контрольной работы 6
Подготовка к выполнению и написанию курсовой работы (проекта) 7
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ 8
Подготовка к зачёту 8
Подготовка к экзамену 8

Самостоятельная работа студентов — это разнообразные виды деятельности студентов, осуществляемые под руководством, но без непосредственного участия преподавателя в аудиторное и/или внеаудиторное время.

Это особая форма обучения по заданиям преподавателя, выполнение которых требует активной мыслительной, поисково-исследовательской и аналитической деятельности.

Методологическую основу самостоятельной работы студентов составляет деятельностный подход, когда цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, то есть на реальные ситуации, где студентам надо проявить знание конкретной дисциплины, использовать внутрипредметные и межпредметные связи.

Цель самостоятельной работы - закрепление знаний, полученных на аудиторных занятиях, формирование способности принимать на себя ответственность, решать проблему, находить конструктивные выходы из сложных ситуаций, развивать творческие способности, приобретение навыка организовывать своё время

Кроме того, самостоятельная работа направлена на обучение студента осмысленно и самостоятельно работать сначала с учебным материалом, затем с научной информацией, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свой профессиональный уровень.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирование практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитие исследовательских умений;
- получение навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

В соответствии с реализацией рабочей программы дисциплины в рамках самостоятельной работы студенту необходимо выполнить следующие виды работ:

для подготовки ко всем видам текущего контроля:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение курса;
- подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам;
- подготовка к контрольной работе, написание контрольной работы;
- выполнение и написание курсовой работы (проекта);

для подготовки ко всем видам промежуточной аттестации:

- подготовка к зачёту;
- подготовка к экзамену.

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов как вне, так и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита контрольных и курсовых работ (проектов), защита зачётных работ в виде доклада с презентацией и др.

Текущий контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

Промежуточный контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного для сдачи экзамена / зачёта.

В методических указаниях по каждому виду контроля представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса

Лекционный материал по дисциплине излагается в виде устных лекций преподавателя во время аудиторных занятий. Самостоятельная работа студента во время лекционных аудиторных занятий заключается в ведении записей (конспекта лекций).

Конспект лекций, выполняемый во время аудиторных занятий, дополняется студентом при самостоятельном внеаудиторном изучении некоторых тем курса. Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и дополнительной литературы к дисциплине.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины приведён в рабочей программе дисциплины.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на повторение материала лекций и самостоятельное изучение тем курса: *для овладения знаниями:*

- конспектирование текста;
- чтение основной и дополнительной литературы;
- составление плана текста;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- *просмотр обучающих видеозаписей. для закрепления и систематизации знаний:*
- работа с конспектом лекций;
- повторная работа над учебным материалом;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- изучение нормативных материалов;
- составление плана и тезисов ответа на вопросы для самопроверки;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- составление библиографических списков по изучаемым темам. *для формирования навыков и умений:*
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Вопросы для самопроверки приведены учебной литературе по дисциплине или могут быть предложены преподавателем на лекционных аудиторных занятиях после изучения каждой темы.

Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам

Практические занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций, а также умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач.

На практических занятиях происходит закрепление теоретических знаний, полученных в ходе лекций, осваиваются методики и алгоритмы решения типовых задач по образцу и вариантных задач, разбираются примеры применения теоретических знаний для практического использования, выполняются доклады с презентацией по определенным учебно-практическим, учебно-исследовательским или научным темам с последующим их обсуждением.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к практическим занятиям: *для овладения знаниями:*

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- *просмотр обучающих видеозаписей. для закрепления и систематизации знаний:*
- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- подготовка публичных выступлений;
- составление библиографических списков по изучаемым темам. *для формирования навыков и умений:*
- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;

- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Лабораторные занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов навыков работы с использованием лабораторного оборудования, планирования и выполнения экспериментов, оформления отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к лабораторным занятиям: *для овладения знаниями:*

- изучение методик работы с использованием различных видов и типов лабораторного оборудования;
- изучение правил безопасной эксплуатации лабораторного оборудования;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами. *для закрепления и систематизации знаний:*
- составление плана проведения эксперимента;
- составление отчётной документации по результатам экспериментирования;
- аналитическая обработка результатов экспериментов. *для формирования навыков и умений:*
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- оформление отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Подготовка и написание контрольной работы

Контрольная работа - индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся. Контрольная работа является средством проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к контрольной работе: *для овладения знаниями:*

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами. *для закрепления и систематизации знаний:*
- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки. *для формирования навыков и умений:*
- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- оформление отчётной документации по выполнению контрольной работы.

Контрольная работа может быть выполнена в виде доклада с презентацией.

Доклад с презентацией — это публичное выступление по представлению полученных результатов знаний по определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной теме.

При подготовке доклада с презентацией обучающийся должен продемонстрировать умение самостоятельного изучения отдельных вопросов, структурирования основных положений рассматриваемых проблем, публичного выступления, позиционирования себя перед коллективом, навыки работы с библиографическими источниками и оформления научных текстов.

В ходе подготовки к докладу с презентацией обучающемуся необходимо:

- выбрать тему и определить цель выступления;
- осуществить сбор материала к выступлению;
- организовать работу с источниками;
- -во время изучения источников следует записывать вопросы, возникающие по мере ознакомления, ключевые слова, мысли, суждения; представлять наглядные примеры из практики;
- сформулировать возможные вопросы по теме доклада, подготовить тезисы ответов на них;
- обработать материал и представить его в виде законченного доклада и презентации.

При выполнении контрольной работы в виде доклада с презентацией самостоятельная работа студента включает в себя: *для овладения знаниями:*

- чтение основное и дополнительной литературы по заданной теме доклада;
- составление плана доклада;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей по теме доклада

для закрепления и систематизации знаний:

- составление плана и тезисов презентации по теме доклада;
- составление презентации;
- составление библиографического списка по теме доклада;
- подготовка к публичному выступлению;
- составление возможных вопросов по теме доклада и ответов на них. *для формирования навыков и умений:*
- публичное выступление;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Варианты контрольных работ и темы докладов приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

Подготовка к выполнению и написанию курсовой работы (проекта)

Курсовая работа (проект) - форма контроля для демонстрации обучающимся умений работать с объектами изучения, критическими источниками, справочной и энциклопедической литературой, логично и грамотно излагать собственные умозаключения и выводы, обосновывать и строить априорную модель изучаемого объекта или процесса, создавать содержательную презентацию выполненной работы.

При выполнении и защите курсовой работы (проекта) оценивается умение самостоятельной работы с объектами изучения, справочной литературой, логично и грамотно излагать собственные умозаключения и выводы, обосновывать выбранную технологическую схему и принятый тип и количество оборудования, создавать содержательную презентацию выполненной работы (пояснительную записку и графический материал).

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к курсовой работе (проекту): *для овладения знаниями:*

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- составление плана выполнения курсовой работы (проекта);
- составление списка использованных источников.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа учебно-методическими материалами по выполнению курсовой работы (проекта);
- изучение основных методик расчёта технологических схем, выбора и расчёта оборудования;
- подготовка тезисов ответов на вопросы по тематике курсовой работы (проекта).

для формирования навыков и умений:

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, компоновочных чертежей;
- оформление текстовой и графической документации.

Тематика курсовых работ (проектов) приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Подготовка к зачёту

Зачёт по дисциплине может быть проведён в виде теста или включать в себя защиту контрольной работы (доклад с презентацией).

Тест — это система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

При самостоятельной подготовке к зачёту, проводимому в виде теста, студенту необходимо:

- проработать информационный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора дополнительной учебной литературы;
- выяснить условия проведения теста: количество вопросов в тесте, продолжительность выполнения теста, систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с тестом, нужно внимательно и до конца прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов, выбрать правильные (их может быть несколько), на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам.

В процессе выполнения теста рекомендуется применять несколько подходов в решении заданий. Такая стратегия позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант. Не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, а сразу переходить к другим тестовым заданиям, к трудному вопросу можно обратиться в конце. Необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

Зачёт также может проходить в виде защиты контрольной работы (доклад с презентацией). Методические рекомендации по подготовке и выполнению доклада с презентацией приведены в п. «Подготовка и написание контрольной работы».

Подготовка к экзамену

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины проводится в форме экзамена.

Билет на экзамен включает в себя теоретические вопросы и практик ориентированные задания.

Теоретический вопрос - индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность

одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся.

Практико-ориентированное задание - средство проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по определенной теме.

При самостоятельной подготовке к экзамену студенту необходимо:

- получить перечень теоретических вопросов к экзамену;
- проработать пройденный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине, при необходимости изучить дополнительные источники;
- составить планы и тезисы ответов на вопросы;
- проработать все типы практико-ориентированных заданий;
- составить алгоритм решения основных типов задач;
- выяснить условия проведения экзамена: количество теоретических вопросов и практико-ориентированных заданий в экзаменационном билете, продолжительность и форму проведения экзамена (устный или письменный), систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с экзаменационным билетом, нужно внимательно прочитать теоретические вопросы и условия практико-ориентированного задания;
- при условии проведения устного экзамена составить план и тезисы ответов на теоретические вопросы, кратко изложить ход решения практикоориентированного задания;
- при условии проведения письменного экзамена дать полные письменные ответы на теоретические вопросы; изложить ход решения практико-ориентированного задания с численным расчётом искомых величин.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры информатики
(протокол № 1 от 12.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ А. В. Дружинин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.09.10 ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Специальность -
21.05.04 Горное дело
Специализация -
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. АБСТРАКТНЫЕ ТИПЫ ДАННЫХ И ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ 6

2.ПРИМЕРЫ АБСТРАКТНЫХ ТИПОВ ДАННЫХ 9

3. ОБЗОР СРЕДСТВ ОПИСАНИЯ КЛАССОВ 11

3.1. Классы и члены 11

3.2. Конструктор и деструктор 12

3.3. Встроенные (inline) функции 14

3.4. Класс vector 17

3.5. Перегрузка операторов 19

3.6. Указатель this 21

3.7.Дружественные функции-операции 22

3.8. Класс очередь que. Шаблон класса 22

3.9. Наследование. Производные классы 24

4. ОБРАБОТКА ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ 27

4.1. Необходимость обработки исключений 27

4.2. Общие принципы обработки исключительных ситуаций в C++ 29

4.3. Возбуждение ситуации 30

4.4. Обработка исключений 32

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИМЕРОВ 34

5.1. Класс полином 34

5.2. Класс таблица 36

6. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ 39

ЛИТЕРАТУРА 41

ВВЕДЕНИЕ

Язык С++ предоставляет гибкие и эффективные средства определения новых типов. Используя определения новых типов, отвечающих понятиям проблемной области (приложениям), программист может разбивать разрабатываемую программу на части, легко поддающиеся контролю.

Новый тип создается пользователем для определения понятия, которому среди встроенных типов нет соответствия. Гораздо легче понять программу, в которой создаются типы, отвечающие понятиям проблемной области. Хорошо определенные типы делают программу ясной и короткой. Кроме того, компилятор может обнаружить недопустимое использование данных.

Такой метод построения программ называют абстракцией данных. Информация о типах содержится в объектах, тип которых определяется пользователем. Программирование с применением объектов называют объектно-ориентированным [1,2].

Язык С++ является языком объектно-ориентированного программирования (ООП). Автор языка создавал его с целью поддержки абстракции данных и объектно-ориентированного программирования. Родоначальниками языков такого типа являются языки Smalltalk и Simula 67.

Объектно-ориентированный язык – это язык программирования, на котором программа задается описанием поведения совокупности взаимосвязанных объектов. Объектно-ориентированное программирование имеет дело с объектами.

Объектно-ориентированные языки включают следующие основные черты: инкапсуляция данных, полиморфизм, наследование.

Объекты могут включать закрытые (private) данные и правила их обработки, доступные только объекту, защищенные (protected), доступные объекту и его наследникам, а также общие (public) данные и правила, которые доступны объектам и модулям в других частях программы. Важной чертой ООП является наследование, то есть возможность создавать иерархическую последовательность объектов от более общих к более специфическим объектам.

Методические указания содержат четыре основных раздела.

В первом разделе обсуждается взаимосвязь абстрактных типов данных и объектно-ориентированного программирования.

Во втором разделе приводится список примеров, в которых вводится понятие, являющееся абстракцией.

В третьем разделе дается краткий обзор средств языка C++, необходимых для реализации абстрактного понятия, причем вводимые средства показываются на конкретных примерах. Для определения нового (пользовательского) типа вводится понятие класс. С понятием класс непосредственно связаны понятия конструктор и деструктор. В этом же разделе рассматриваются простейшие средства для реализации производных классов.

Четвертый раздел посвящен обработке исключительных ситуаций, возникающих в процессе работы программ.

Пятый раздел представляет собой реализацию конкретных абстрактных понятий, а именно, реализацию полинома и таблицы.

В шестом разделе представлены задания для практических занятий.

1. АБСТРАКТНЫЕ ТИПЫ ДАННЫХ И ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

В языках высокого уровня можно выделить следующие категории средств определения данных:

– встроенные типы данных (integer, real, character, boolean);

– средства структурирования составных объектов (array, record, union);

– средства определения новых типов данных – это абстракция данных;

– средства отображения иерархии типов данных.

Понятие абстрактного типа [1] пришло в программирование из математики. Абстрактный объект – это то, что является предметом математического рассуждения, состоящего из определений, допущений (или постулатов) и утверждений, выводимых из определений и допущений по общепонятным правилам логического вывода (например, хорошо знакомые математикам: множества, функции, последовательности и рекурсивные структуры).

Организация данных в языках программирования базируется на понятии *типа*. К особенностям понятия типа следует отнести следующие:

1) тип определяет класс значений, которые могут принимать переменная или выражение;

2) каждое значение принадлежит одному и только одному типу;

3) тип значения константы, переменной или выражения можно вывести либо из контекста, либо из вида самого операнда, не обращаясь к значениям, вычисляемым во время работы программы;

4) каждой операции соответствует некоторый фиксированный тип ее операндов и некоторый фиксированный тип результата;

5) для каждого типа свойства значений и элементарных операций над значениями задаются с помощью аксиом;

6) при работе с языком высокого уровня знание типа позволяет обнаруживать в программе бессмысленные конструкции и решать вопрос о методе представления данных и преобразования их в вычислительной машине.

Абстракция – это инструмент познавательной деятельности человека, позволяющий лучше отразить суть дела и приводящий к абстрактным понятиям. Поэтому имеет смысл говорить о средствах абстракции в языках программирования, которые сами являются средством понимания и построения алгоритмов и обмена мыслями и результатами между программистами.

Абстрактный тип данных в языках программирования – это определение некоторого понятия в виде класса объектов с некоторыми свойствами и операциями. Такое определение оформляется как специальная синтаксическая конструкция, которая называется *классом* в языке C++.

В определение абстрактного типа данных входят следующие четыре части.

1) Внешность, содержащая имя определяемого типа (понятия), имена операций с указанием типов их аргументов и значений.

2) Абстрактное описание операций и объектов, с которыми они работают, средствами некоторого языка спецификаций.

3) Конкретное описание операций и объектов средствами языка программирования.

4) Описание связи между (2) и (3), объясняющее, в каком смысле часть (3) корректно представляет часть (2).

Внешность – это видимая часть определения, его интерфейс. Отметим, что спецификация определяет то, что важно для пользователя. А для пользо-

вателя существенным является «поведение», то есть «то, что делается», а несущественным – «то, как это делается» [1].

Главное достоинство абстракции через спецификацию состоит в несущественности способа реализации, что позволяет изменять реализацию без внесения изменений в программу.

Основные особенности средства абстракции данных:

1) инкапсуляция описания и представления объектов определяемого типа и описания операций над объектами;

2) защита инкапсулированной информации, так что детали представления не доступны вне определения абстрактного типа.

Средства абстракции данных в языке C++ включают классы, механизм управления доступом, конструкторы и деструкторы, совместное использование операций (перегрузка операций), преобразование типов, полиморфизм, обработку исключительных ситуаций.

Средства отображения иерархии классов непосредственно связаны с объектно-ориентированным программированием, для поддержки которого в языке C++ введены производные классы и виртуальные функции.

2.ПРИМЕРЫ АБСТРАКТНЫХ ТИПОВ ДАННЫХ

Спецификация абстрактных типов данных может быть выполнена на специальном формализованном языке [1]. Приведем примеры абстрактных типов данных, используя неформальный язык.

Пример 1. Опишем понятие стек (stack). Стек представляет собой последовательность элементов некоторого типа, которая характеризуется свойством: "последний вошел – первый вышел" (Last In - First Out) и над которой выполняются следующие операции:

– создать стек;

– положить в стек;

– проверить, пуст ли стек;

– проверить, переполнен ли стек;

– взять элемент, находящийся в вершине стека, удаляя его из стека;

– показать элемент, находящийся в вершине стека, т.е. взять элемент, находящийся в вершине стека, не удаляя его из стека.

Пример 2. Опишем понятие очередь (Query). Очередь представляет собой последовательность элементов некоторого типа, которая характеризуется свойством: "первый вошел – первый вышел" (First In - First Out) и над которой выполняются следующие операции:

– создать очередь;

– послать в очередь;

– проверить, пуста ли очередь;

– проверить, переполнена ли очередь;

– взять элемент.

Пример 3. Опишем понятие вектор (vector). Вектор представляет собой последовательность из n элементов со следующими операциями:

– создать вектор с заданным количеством элементов;

– добавить вектор;

– вычесть вектор;

– присвоить вектор вектору;

– показать вектор.

Пример 4. Опишем понятие полином (polynom). Полином – это алгебраическое выражение вида

$$y = a_0 \cdot x^n + a_1 \cdot x^{n-1} + \ldots + a_{n-1} \cdot x + a_n$$

Это значит, что полином определяется степенью n и последовательностью из n+1 коэффициентов. Над полиномом предусматриваются следующие операции:

– создать полином по заданной степени и коэффициентам;

– прибавить заданный полином;

– вычесть заданный полином;

– взять наибольшую степень полинома;

– взять коэффициент полинома при заданной степени;

– вычислить полином по заданному значению аргумента;

– выдать полином.

Пример 5. Опишем понятие таблицы. Таблица – это последовательность элементов заданной структуры со следующими операциями:

– создать таблицу с заданным количеством элементов;

– выбрать элементы таблицы по условию;

– сортировать таблицу по различным полям;

– показать таблицу.

3. ОБЗОР СРЕДСТВ ОПИСАНИЯ КЛАССОВ

В определении нового типа главное – отделить внешность, которая существенна для его правильного использования, от конкретной реализации, связанной с форматом данных для хранения объекта типа и операций над объектом. Доступ к таким типам ограничен заданным множеством операций (функциями доступа).

Средством определения нового типа в C++ является понятие класса.

3.1. Классы и члены

Класс – это определяемый пользователем тип. Класс специфицирует данные, необходимые для представления объекта этого типа, и множество операций для работы с объектами.

Определение класса имеет две части: закрытую часть (private), содержащую информацию для разработчика, и открытую часть (public), являющуюся интерфейсом для пользователя.

Доступ к объектам класса ограничивается множеством функций, которые описываются в интерфейсной части класса. Такие функции называются *функциями – членами***.** Пользователь может обращаться только к этим функциям.

Опишем тип стек (stack) (пример 1 в разделе 2). Стек будем располагать в динамической памяти. Поэтому элемент стека – это структура, состоящая из информационной части и ссылки на следующий элемент.

```
class  STACK
{  private:
        struct sp
```

```
            {  int inf;
               struct sp *next;
            };
     sp *s;
    public:
CREATE();           //  создать стек
int top();          //  показать элемент
push(int x);        //  добавить элемент
int  pop();         //  взять элемент
int empty();        //  проверить, пуст ли стек
int full();         //  проверить, переполнен  ли стек
};
```

Для того чтобы пользоваться объектом стек, его нужно описать:

```
STACK  st;
```

Объект st создаётся и инициализируется функцией-членом CREATE(), специально описанной для этой цели. При этом пользователь должен не забыть вызвать функцию CREATE():

```
st.CREATE();
```

Но в языке C++ есть более удобный подход, а именно, определяется специальная функция, предназначенная для инициализации объекта. Эта функции называется *конструктором*.

3.2. Конструктор и деструктор

Конструктор – это предписание, как создавать значение данного типа. Конструктор распознается по тому, что имеет то же имя, что и сам класс. Поэтому в примере роль операции создать стек CREATE() выполняет специальная функция STACK(). Функция вызывается автоматически при объявлении объекта типа STACK.

Определяемый пользователем тип всегда имеет конструктор, так как необходимы выделение памяти и инициализация объектов.

Для обеспечения уничтожения объектов используется специальная функция класса, называемая *деструктором*. Когда закончена работа с объектом, автоматически вызывается деструктор.

Деструктор имеет такое же имя, как и класс, только перед ним ставится знак тильды (~).

Для класса STACK деструктором является ~STACK() .

Опишем объект стек с использованием конструктора и деструктора, а также выполним реализацию функций-членов.

Вариант 1.

```
class  STACK
{  private:
     struct sp
        {   int inf;
            struct sp *next;
        };
     sp *s;
    public:
       STACK()  { s=0;}
      ~ STACK()
        { while (s!=0) delete s;}
       int top()
        { return s->inf;
        }

       push(int x)
        { sp *p;
          p=new sp;  p->inf=x; p->next=s;
          s=p;
         }

       int  pop()
       { sp *p;   p=s;
         int r=p->inf; s=p->next;
         delete p;
         return r;
       }
      int empty()
```

```
        { return s==0;
        }
       int full()
        {  sp *p;
           p=new sp;
           if (p!=0)
              {  delete p; return 1; }
             else return 0;
        }
};
```

3.3. Встроенные (inline) функции

Функции-члены, реализованные в классе, являются встроенными (inline). Это значит, что после компиляции в объектном коде программы пользователя вместо вызовов функций-членов будут подставлены уже преобразованные тела функций, т.е. произойдёт макроподстановка. Другими словами нет затрат на вызов функции.

Удобно реализацию функций-членов выполнять вне класса. Но в этом случае описатель inline должен быть указан явно. Следует отметить, что описатель inline эффективно использовать для коротких операций (таких, как в нашем случае со стеком).

Для того чтобы вне класса был доступ к членам класса, используется операция :: разрешения области видимости. Операнд в левой части операции :: должен быть именем класса.

Вариант 2.

```
class  STACK
{  private:
     struct sp
       { int inf;
         struct sp *next;
       };
     sp *s;
```

```
    public:
  STACK()  { s=0;}
  ~STACK()
    { if (s!=0) delete s;}
  int top();
  push(int x);
  int  pop();
  int empty();
  int full();
};

inline int STACK :: top()
 { return s->inf;
 }

STACK :: push(int x)
 { sp *p;
   p=new sp;  p->inf=x; p->next=s;
   s=p;
 }

inline int STACK :: pop()
{ sp *p;
  p=s;
  int r=p->inf;s=p->next;
  delete p;
  return r;
}

inline int STACK :: empty()
{ return s == 0;
};

inline int STACK :: full()
 {  sp *p;
    p=new sp;
    if (p!=0)
       {  delete p; return 1; }
    else return 0;
  };
```

Конструктор и деструктор тоже можно определять вне класса.

Следует отметить, что конструктор не может иметь тип возвращаемого значения. Нельзя вызывать функцию–конструктор в явном виде.

Приведем программу, в которой используется класс стек для решения следующей задачи: проверить правильность расстановки круглых скобок в арифметическом выражении.

Алгоритм анализа скобок заключается в следующем:

– если встретилась левая скобка, то она заносится в стек;

– если встретилась правая скобка, то она выталкивает из стека левую скобку в случае, если стек оказался не пуст, иначе устанавливается ошибочная ситуация;

– если по окончании просмотра арифметического выражения стек пуст, то проверка прошла успешно, иначе устанавливается ошибочная ситуация.

Будем предполагать, что класс STACK находится в заголовочном файле stack.h. Описание этого класса соответствует варианту 1 или варианту 2 с той лишь разницей, что информация в стеке будет символьного типа.

Программа:

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <iostream.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include “stack.h”
void main()
{ STACK  a;
 char x;
 int n, i, B;
 char *s;
 cout << "\n vvod  str";
 cin >> s;
 n=strlen(s);
 i=0;  B=1;
while (B && (i<n))
```

```
    {  if (s[i]=='(')  a.push(s[i]);
       if (s[i]==')')
            if (a.empty()) B=0; else x=a.pop();
       i++;
    }
 if  ((B) && (i=n) && (a.empty()) )   cout <<"\n yes";
   else cout <<"\n no";
  getch();
}
```

3.4. Класс vector

Конструктор аналогично другим функциям может иметь параметры. Кроме того, класс может иметь несколько конструкторов.

Рассмотрим класс vector с точки зрения использования различных конструкторов.

Когда объект создается, бывает необходимо присваивать элементам объекта конкретные значения. Это достигается передачей значений в качестве параметров. В классе STACK использовался конструктор без параметра. Конструктор без параметра называется конструктором по умолчанию, конструктор с параметром называется конструктором инициализации. Конструктор с параметром, который имеет тип класса называется копирующим конструктором (*copy–конструктор*). В классе vector используются конструкторы с одним параметром, двумя параметрами и *copy– конструктор*.

```
class vector
  { private:
      int *v;   int s;
    public:
      vector(int s1)
        { s=s1;   v=new int[s];  }
      vector(int _n,int *n);
      vector(const vector &y);
```

```
      ~vector()
          { delete  [ ]v; };
      void   vv_vect();
      void show();
   };

vector::vector(int s1,int *n)
{ s=s1;
  v=new  int[s];
  for(int i=0;i<s;i++)
       v[i]=n[i];
};

vector::vector(const vector &y)
{ s=y.s;
  v=new  int[s];
  for(int i=0;i<s;i++)
   v[i]=y.v[i];
}

void vector::vv_vect()
{ cout<<"\nVvod vectora\n";
  for (int i=0;i<s;i++)
      cin>>v[i];
  cout<<"\nVector vveden\n";
};

void vector::show()
{  for (int i=0;i<s;i++)
          cout<<v[i]<<" ";
};
```

Приведём примеры описания объекта класса vector.

Описание: vector a(n);

К моменту этого описания значение n должно быть определено. Автоматически будет вызван конструктор

vector(int s1);

и вектору a будет выделена память для n значений целого типа.

Описание: vector d(m,y);

Автоматически будет вызван конструктор

vector(int s1,int *n)

и в этом случае вектору d будет выделена память для m значений целого типа и скопированы n значений из области y.

Описание: vector c(a);

Автоматически будет вызван *copy–конструктор*

vector(vector &y)

и элементам вектора c будут присвоены значения элементов вектора a.

Приведем фрагменты использования класса vector.

```
int n,m;
int y[]={6,3,6,5,9};
cout <<"\n  введите  n,m " <<"  ";
cin >> n >> m;
vector  a(n);
a.vv_vect();
a.show();


vector d(m,y);
d.show();
vector c(a);
a.show();
```

3.5. Перегрузка операторов

Определим в классе vector операторы (операции): добавление вектора (символ +), вычитание вектора (символ -) и присваивание вектора (символ =).

```
class vector
    { private:
        int *v;int s;
      public:
```

```
        vector(int s1)
          { s=s1;   v=new int[s];
          }
        vector(int _n,int *n);
        vector( vector &y);
        ~vector()
          { delete []v; };
        void vv_vect();
        void show();
        vector operator+(vector n);
        vector operator-(vector n);
        vector operator=(vector n);

   };
```

Вне класса определим реализацию введённых операторов.

```
vector vector::operator+(vector n)
{
  vector t(s);
  for (int i=0;i<s;i++) t.v[i]=v[i]+n.v[i];
  return t;
};



vector vector::operator-(vector n)
{
  vector t(s);
  for (int i=0;i<s;i++) t.v[i]=v[i]-n.v[i];
  return t;
};

vector vector::operator=(vector n)
{
  if (n.s<s)  s=n.s;
  for (int i=0;i<s;i++) v[i]=n.v[i];
  return *this;
};
```

Приведём фрагмент программы, использующий описанные операторы.

```
a=a-d;
cout<<"\n vect a=a-d  "<<" " ;  a.show();
a=a+d;
cout<<"\n vect a=a+d  "<<" " ;  a.show();
```

Возможно, что для объекта vector естественней было бы использовать вызовы функций, а именно, для операции вычесть a.minus(d), добавить a.add(d).

3.6. Указатель this

Каждой функции–члену передается указатель на объект, для которого она вызвана. Таким указателем является служебное слово this. Доступ к объекту внутри функции – члена производится с помощью этого указателя this.

Служебное слово this используется при перегрузке операций.

Операции сложения и вычитания реализуем, используя указатель this:

```
vector vector :: operator+(vector n)
{ if (n.s<s)  s=n.s;
  for (int i=0;i<s;i++) v[i]= v[i]+n.v[i];
  return *this;
};
vector vector :: operator-(vector n)
{
 if (n.s<s)  s=n.s;
 for (int i=0;i<s;i++) v[i]=v[i]-n.v[i];
 return *this;
};
```

3.7.Дружественные функции-операции

Функции–операции могут быть членами класса или дружественными функциями класса. При объявлении дружественной функции должны передаваться два параметра для бинарных операций и один для унарных операций. Дружественными функциями не могут перегружаться операции присваивания =, индексирования [ ], а также () и –>.

Рассмотрим перегрузку операции сложения + для класса vector с помощью дружественной функции. Описание в классе будет иметь вид:

```
friend vector operator + (vector v1, vector v2);
```

Реализация этой операции вне класса:

```
vector operator + (vector v1, vector v2)
 { int s;
   if  (v1.s<v2.s)   s=v1.s ;   else s=v2.s;
    vector t(s);
    for (int i=0;i<s;i++) t.v[i]=v1.v[i]+v2.v[i];
    return t;
 }
```

3.8. Класс очередь que. Шаблон класса

Средством реализации полиморфизма в языке C++ является шаблон класса. На примере объекта очередь покажем использование шаблона класса: template <class T>.

Это описание указывает на то, что описывается параметризованный тип, имеющий параметром тип T.

```
template <class T>
```

```
class QUE
{  private:
   struct link
   { T inf;
     link *next;
   };
   link *start,*end;
    public:
   QUE ();
   ~QUE ();
   void add(T elem);
   T get();
   int empty();
};
```

Приведем реализацию введенных операций.

```
template <class T>
QUE <T>:: QUE ()
{  start=end=0;
};
template <class T>
void  QUE <T> :: add(T elem)
{  link *p;
   p=new link;
   p->inf=elem;
   p->next=0;
   if (start==0 && end==0) start=p;
    else end->next=p;
   end=p;
};
template <class T>
T  QUE <T> :: get()
{  link *p;
   T buf;
   p=start;
   buf=p->inf;
   start=start->next;
   delete p;
   return buf;
};
template <class T>
QUE <T>::~ QUE ()
```

```
{  link *p;
   while (start!=0)
      {
       p=start;
       start=start->next;
       delete p;
      };
};
```

Приведем фрагменты программы, использующие класс очередь.

```
QUE <int> ocher;
int x;
scanf("%d",&x);
ocher.add(x);
printf("%d\n",ocher.get());
……
QUE <float> ocher1;
int m;
float y;
scanf("%f",&y);
ocher1.add(y);
printf("%f\n",ocher1.get());
```

Аналогично можно описать параметризованный класс стек или класс вектор.

3.9. Наследование. Производные классы

Наследование является важной особенностью объектно-ориентированных языков. Для того чтобы отобразить иерархические связи, выражающие общность между классами, вводится понятие производного класса.

В языке C++ наследуемый класс называют базовым классом, наследующий класс – производным классом. Производный класс наследует свой-

ства базового класса. Поэтому отношение базовый–производный между классами называется наследованием.

Покажем наследование классов на примере объекта очередь. Пусть нам нужно над последовательностью элементов очереди выполнить дополнительно следующую операцию: определить, есть ли среди элементов нулевые. Основные операции над объектом определены в классе QUE. Это операции: добавить элемент

```
void add(T elem);
```

и взять элемент

```
T get();
```

Для простоты опишем класс очередь QUERY без использования шаблона класса.

```
class QUERY
{  private:
   struct link
   { int inf;
     link *next;
   };
   link *start,*end;
   public:
   QUERY ();
   ~QUERY ();
   void add(int elem);
   int get();
   int empty();
};
```

Для реализации новой операции можно ввести производный класс, ссылаясь на класс QUERY как базовый. Назовем производный класс QUE_0.

```
class   QUE_0 : public  QUERY
 {    public:
      int def_0 ();
 };
```

Вне класса опишем новую операцию:

```
int QUE_0 ::def_0 ()
  { link *p=start;
    while  (p!= end)  and  (p->inf !=0 )
       p=p->next;
    if (p->inf == 0 ) return 1;
    else return 0;
  }
```

Когда один класс наследует другой класс, все элементы, определенные как private в базовом классе, не имеют доступа в производном классе.

Для того чтобы в классе QUE_0 был доступ к данным класса QUERY, необходимо использовать доступ protected. Описание класса QUERY будет иметь вид:

```
class QUERY
{  protected:
   struct link
   { int inf;
     link *next;
   };
   link *start,*end;

   public:
   QUERY();
   ~QUERY();
   void add(int elem);
   int get();
   int empty();
};
```

В нашем примере конструктор базового класса представлен без параметра. В этом случае производный класс может не иметь конструктор.

4. ОБРАБОТКА ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ

4.1. Необходимость обработки исключений

Во время своей работы программа иногда сталкивается с нештатными ситуациями. Например, вызванный метод некоторого объекта может обнаружить у себя внутренние проблемы (неверные значения полей, в результате чего может произойти, например, деление на ноль) или найти ошибки в других объектах или входных данных. Следовательно, необходим некоторый механизм обнаружения и обработки нештатных ситуаций (исключений) в программе.

Когда программа конструируется из раздельных модулей и особенно когда эти модули находятся в независимо разработанных библиотеках, обработка ошибок должна быть разделена на две части:

1) генерация информации о возникновении ошибочной ситуации, которая не может быть разрешена локально;

2) обработка ошибок, обнаруженных в других местах.

Автор библиотеки может обнаружить ошибки времени выполнения, но, как правило, не знает, что делать в этом случае. Пользователь библиотеки может знать, как поступить в случае возникновения ошибок, но не в состоянии их обнаружить (иначе их поиск не перепоручался бы библиотеке). Для помощи в решении подобных проблем в языке C++ введено понятие *исключения*. Фундаментальная идея состоит в том, что функция (метод), обнаружившая проблему, но не знающая, как ее решать, *возбуждает* (throw) исключение в надежде, что вызвавшая её функция (прямо или косвенно) может решить проблему. В функции, которая хочет решать проблемы данного типа, можно указать, что она *перехватывает* (catch) такие исключения.

Такой стиль обработка ошибок предпочтительнее многих традиционных методов. Рассмотрим альтернативы. При обнаружении проблемы, которая не может быть решена локально, программа может:

а) прекратить выполнение,

б) возвратить специальное «ошибочное» значение,

в) возвратить какое-то допустимое значение и оставить программу вненормальном состоянии,

г) вызвать функцию, предназначенную для обработки ошибки.

Вариант а) – прекратить выполнение – это то, что происходит по умолчанию, когда не перехватывается исключение. Библиотечная функция, безусловно завершающая выполнение, не может использоваться в программе, первое требование к которой – надежность.

Вариант б) – возвратить специальное «ошибочное» значение – не всегда выполним, т.к. часто просто нет приемлемого ошибочного значения (например, при возврате целого любое из них может быть приемлемо). Даже когда такой подход применим, он часто неудобен, потому что он вынуждает программиста каждый раз проверять результат на ошибочное значение. Это легко может увеличить размер программы.

Вариант в) – возвратить допустимое значение и оставить программу в ненормальном состоянии – имеет тот недостаток, что вызывающая функция может не заметить, что программа находится в ненормальном состоянии. Например, многие стандартные функции библиотеки С устанавливают значение глобальной переменной errno для индикации ошибки. Однако программы в большинстве случаев не проверяют эту переменную достаточно систематически, чтобы избежать последующих ошибок. Более того, использование глобальных переменных для записи информации об ошибках работает неудовлетворительно при наличии параллельных процессов.

Вариант г) – вызвать функцию, предназначенную для обработки ошибки – возлагает на вызванную функцию решение проблемы одним из перечисленных выше способов.

Механизм обработки исключений предоставляет альтернативу традиционным методам. Он позволяет отделить код обработки ошибок от собственного кода алгоритма, делая программу более понятной и более «чистой». В результате получаем более регулярный способ обработки ошибок, что упрощает взаимодействие между отдельно написанными фрагментами программы.

4.2. Общие принципы обработки исключительных ситуаций в C++

Механизм обработки ситуаций дает способ передачи управления из точки выполнения программы в расположенную выше по управлению точку, в которой определен *обработчик исключений* (exception handler). Главная идея состоит в том, что функция, сталкивающаяся с неразрешимой проблемой, объявит исключительную ситуацию, в надежде на то, что вызвавшая ее (прямо или косвенно) функция может решить проблему. Обработчик ситуации будет вызван только в случае исполнения *выражения-возбуждения-ситуации* внутри так называемого *блока-с-контролем* или в функциях, вызванных из этого блока. В C++ синтаксис возбуждения ситуации выглядит следующим образом:

выражение-возбуждения-ситуации:

throw выражение

Выражение-возбуждения-ситуации в C++ является выражением некоторого типа. *Выражение-возбуждения-ситуации* иногда еще называют точкой возникновения (возбуждения) ситуации (throw-point). О части програм-

мы, в которой исполнилось *выражение-возбуждения-ситуации,* говорят, что в ней возникла ситуация (она возбудила ситуацию).

Рассмотрим, каким образом в C++ можно определить и обработать ошибки диапазона, возникающие в классе Vector.

```
class Vector {
  int* p;
  int* sz;
public:
  class Range { }; // класс ситуаций

  int& operator[] (int i);
  // . . .
};
```

Объекты класса Range предназначены для использования в качестве исключений и возбуждать последние следующим образом:

```
int& Vector::operator[] (int i)
{
  if (0<=i && i<sz) return p[i];
  throw Range();
}
```

В общем случае исключения новых типов следует создавать тогда, когда программист хочет обрабатывать ошибки одного типа и пропускать ошибки других типов.

4.3. Возбуждение ситуации

При возбуждении ситуации управление передается на один из обработчиков ситуации. При этом посылается объект, и тип этого объекта определяет, какой обработчик может перехватить данную ситуацию.

Например, ситуация

```
throw "Help!";
```

может быть перехвачена некоторым обработчиком типа char*:

```
try {
  // . . .
}   catch (const char* p) {
// здесь реакция на ситуацию типа символьной строки
}
```

а ситуация

```
class Overflow {
  // . . .
public: Overflow(char, double, double);
};
void f(double x) {
  // . . .
  throw Overflow('+', x, 3.45e107);
}
```

может быть перехвачена обработчиком

```
try {
  // . . .
  f(1.2);
  // . . .
}   catch (Overflow& oo) {
  // здесь обработчик ситуации типа Overflow
}
```

При возникновении ситуации управление передается на ближайший обработчик соответствующего типа; "ближайший" – тот, в чей *блок-с-контролем* управление попало в последний раз; "соответствующий тип" определяется ниже.

Выражение-возбуждения-ситуации создает временный объект, тип которого статически определяется операндом операции throw, и затем инициализирует им переменную, указанную в описании обработчика.

В C++ *выражение-возбуждения-ситуации* без операнда повторно возбуждает обрабатываемую ситуацию. *Выражение-возбуждения-ситуации* без операнда может появиться только в обработчике исключения или в функции, явно или неявно вызванной из него. Например, код, который нужно выполнить при возникновении какой-либо ситуации, не обрабатывая ее полностью, мог бы быть написан так:

```
  try {
    // . . .
  }
  catch (...) { // перехват ситуации
                // частичная обработка ситуации
    throw;
// передача ситуации некоторому другому обработчику
  }
```

4.4. Обработка исключений

Функция, нуждающаяся в обнаружении возбужденной ситуации, должна поместить вызов функции в *блок-с-контролем* с реакцией на ситуацию. Такой блок имеет следующий синтаксис в C++:

блок-с-контролем:

try { … }

catch (*объявлении-ситуации* 1) { реакция 1 }

catch (*объявлении-ситуации* 2) { реакция 2 }

catch (...) { реакция n }

Например:

```
void f(Vector& v)
 {
  // . . .
  try
  {
    do_something(v);
  }
  catch (Vector::Range)
  {
    // реакция на исключение типа Vector::Range
    // так как do_something() вызвало ситуацию,
    // делаем что-то другое,
    // попадаем сюда только, если обращение к
    // do_something() приводит
    // к вызову Vector::operator[](i) с плохим
    // индексом
  }
    // . . .
}
```

Конструкция

```
  catch (/* . . . */) {  }
```

представляет собой обработчик ситуации. Он может использоваться только сразу за *блоком-с-контролем* или непосредственно за другим обработчиком (если есть несколько обработчиков разных типов).

Многоточие (. . .) в *объявлении-ситуации* дает отождествление для любой ситуации. Обработчик с многоточием, если он есть, должен быть последним в своем *блоке-с-контролем*.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИМЕРОВ

5.1. Класс полином

```
class stp       // Базовый класс
 { protected:
   int n;
   stp(){};
   stp(int st)
     {n=st;}
 };
```

Класс полином poli является производным классом.

```
 class poli: public stp
 { public:
    int *a;
    poli(){};
    poli(int s){ n=s;};
    ~poli()    { delete []a;};
    void cr_poli();
    poli(poli &y);
   int  operator()(int );
   friend poli   operator+ (poli  bb, poli cc);
   poli & operator= (poli bb);
   void prosm();
 };

 poli & poli::  operator= (poli bb)
 { n=bb.n;
   for (int i=0;i<=n;i=i+1) a[i]=bb.a[i];
   return *this;
 };
poli::poli(poli &y)
 { n=y.n;   a=new int[n+1];
    for(int i=0;i<=n;i++)
       a[i]=y.a[i];
 };
```

```
void poli::cr_poli()
 { a=new int[n+1];
   cout<<"введите коэф-ты  "<<n;
    for (int i=0;i<=n;i++)
      cin>>a[i];
  }

int poli:: operator()(int x)
  { int k=n;
    float r;
    r=a[0];
    for (int i=1;i<=k;i=i+1)
      r=r*x+a[i];
    return r;
   }

poli  operator+ (poli bb,poli cc)
  {  int i,k,l;
     k=bb.n; l=cc.n;
     if (k>=l)
      { poli r(k);
        for (i=0;i<=k;i++) r.a[i]=bb.a[i];
        for (i=0;i<=l;i++)
          r.a[k-l+i]=r.a[k-l+i]+cc.a[i];
        return r;
       };
     poli t(l);
     for (i=0;i<=l;i++) t.a[i]=cc.a[i];
     for (i=0;i<=k;i++)
          t.a[l-k+i]=t.a[l-k+i]+bb.a[i];
     return t;
 }
void poli:: prosm()
   { int i;
     for (i=0;i<=n;i++)
        cout <<a[i]<<"  ";
     cout<<"\n";
   } ;
```

5.2. Класс таблица

```
class zap      // Базовый класс
 { protected:
   char fio[31];
   char pr[10];
   int a1;
   public:
   zap(){};
   zap(zap &z)
   { strcpy(fio,z.fio);
     strcpy(pr,z.pr);    a1=z.a1;
   };
    int get(){ return a1;};
    char* get_f()
      { char *s; s=strdup(fio);
        return s;
      };
  void input();
  void output();
 };
 class table : public zap
 {  public:
    zap *a;  int n;
    table(){};
    table(int s){ n=s;};
    ~table()    { delete []a;};
    void cr_table();
    void sort(int t);
    void sort(char t);
    void show();
  };

  void zap:: input()
  {  cout<<"\nVvod fio\n";     cin>>fio;
     cout<<"\nVvod pred\n";    cin>>pr;
     cout<<"\nVvod ball\n";    cin>>a1;
  };

  void zap::output()
  { cout<< fio <<"  "<<pr<<"  "<<a1<<"  ";
```

```
 };
void table :: cr_table()
 { a=new zap [n];
   for(int i=0;i<n;i++)
    a[i].input();
  cout <<"\n таблица создана \n";
 };
void table :: show()
{ int i;
  for(i=0;i<n;i++)
  { a[i].output();
    cout <<"\n ";
  };
};
int SRAVN(int a,int b)
 {  if(a>b) return 1;
    else return 0;
 };
int SRAVN(char a[],char b[])
 { char *u,*v;
   u=strdup(a);v=strdup(b);
   if (strcmp(u,v)>0) return 1;
   else return 0;
 };
void table ::  sort(char t)
{ zap s;  int i,j;
  for (i=n-1;i>0;i--)
  { int k=0;
    for (j=1;j<i;j++)
      if (SRAVN(a[j].get_f(),a[k].get_f()))   k=j;
    s=a[k];a[k]=a[i];a[i]=s;
  }
};
void table ::  sort(int t)
{ zap s;
  int i,j;
  for (i=n-1;i>0;i--)
   { int k=0;
    for (j=1;j<i;j++)
       if (SRAVN(a[j].get(),a[k].get()))   k=j;
    s=a[k];a[k]=a[i];a[i]=s;
   }
```

```
}
```

6. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1) Описать класс «Дробное число со знаком». Число должно быть представлено двумя полями: целая часть – длинное целое число со знаком, дробная часть – беззнаковое короткое целое число. Реализовать арифметические операции сложения, вычитания, умножения, деления и операцию сравнения дробных чисел. Написать текст программы на языке C++, демонстрирующей функционал объектов, порожденных от класса.

2) Описать класс «Деньги» для работы с денежными суммами. Денежная сумма должна быть представлена двумя полями: длинное целое число для рублей и беззнаковое короткое целое число – для копеек. Дробная часть денежной суммы (копейки) при выводе на экран должна быть отделена от целой части запятой. Реализовать сложение сумм, вычитание сумм, деление сумм, деление суммы на дробное число, умножение суммы на дробное число, операцию сравнения сумм и преобразование денежной суммы в символьную строку. Написать текст программы на языке C++, демонстрирующей функционал объектов, порожденных от класса.

3) Описать класс «Трапеция», поля класса – координаты четырех точек на плоскости: координаты – числа с плавающей запятой. Предусмотреть в классе конструктор и методы: проверка, является ли фигура, образованная четырьмя точками трапецией; проверка, является ли фигура, образованная четырьмя точками равнобедренной трапецией, вычисление длины каждой стороны, вычисление периметра трапеции, вычисление площади трапеции. Написать текст программы на языке C++, демонстрирующей функционал объекта, порожденного от класса.

4) Описать класс «Комплексное число», поля класса - действительная и мнимая части комплексного числа являются числами с плавающей запятой и находятся в закрытом разделе класса. Предусмотреть в классе конструктор и методы: присваивание комплексному числу значения, сложение комплексных чисел, вычитание комплексных чисел, умножение комплексных чисел, деление комплексных чисел и преобразование комплексного числа в символьную строку. Написать текст программы на языке C++, демонстрирующей функционал объектов, порожденных от класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невская, Е.С. Искусство программирования [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Е.С. Невская, А.А. Чекулаева, М.И. Чердынцева – Москва: Вузовская книга, 2002. - 207 с.

2. Страуструп, Б. Язык программирования C++ для профессионалов [Текст] / Б. Страуструп. – Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2006. – 568 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА Б1.В.09.11 КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Специальность –

21.05.04 Горное дело

Специализация –

Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Авторы: Таугер В.М.

Екатеринбург

Задания на курсовой проект составлены в соответствии с учебным планом по дисциплине «Конструирование мехатронных модулей» для студентов специальности 21.05.04 Горное дело, специализация «Мехатроника и робототехника промышленных комплексов».

Задания представляют собой 32 варианта технических требований к мехатронному модулю. Каждый проектант должен сконструировать мехатронный модуль в соответствии с определенным вариантом технических требований.

Составитель: В.М. Таугер, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика».

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ 4
2.ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ 5
3.СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ 6
4.ВАРИАНТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ 9
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 10

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Задачей курсового проектирования является конструирование мехатронного модуля в соответствии с техническим заданием.

Техническое задание включает в себя общие и специальные технические требования. Общие требования (раздел 2) относятся ко всем подлежащим разработке мехатронным модулям. Конкретные сочетания специальных требований (раздел 3) различны для каждого варианта. Ведущий преподаватель назначает вариант из табл. 3.1 проектанту персонально.

Руководствуясь методикой проектирования мехатронных модулей, студент формирует последовательно ***F*-, *S*-** и ***C*-**модели устройства, а затем для окончательно принятой ***C*-**модели разрабатывает техническую документацию в составе:

- расчетно-пояснительная записка;
- чертеж общего вида мехатронного модуля.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать: обоснование основных конструктивных решений; сравнительную оценку стоимости изготовления различных вариантов устройства модуля; расчет преобразователя движения, включающий в себя определение передаточного отношения и проверки на прочность и кинематическую точность; схемы, алгоритмы и т.п., необходимые для пояснения устройства и работы мехатронного модуля.

Расчетно-пояснительную записку следует выполнять на листах формата А4 с соблюдением правил ЕСКД к текстовым документам.

Чертеж общего вида должен содержать виды и разрезы с размерами, дающие полное представление о конструкции и технических возможностях меха-тронного модуля и обеспечивающие возможность дальнейшей разработки чертежно-технической документации, а также техническую характеристику модуля. На свободном поле чертежа должна быть дана экспликация с перечнем основных узлов и важнейших деталей изделия.

Чертеж общего вида следует выполнять на листе формата А1 (или большем - при необходимости) с соблюдением соответствующих требований ЕСКД.

Консультации в процессе выполнения и прием курсового проекта осуществляет ведущий преподаватель.

2. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Низкая трудоемкость монтажа (демонтажа), сборки (разборки), технического контроля и обслуживания.

2.2. Функционирование в автоматическом режиме. Конструкция должна обеспечивать изменение скорости и направления движения рабочего органа.

2.3. Автоматизированный контроль технических параметров, самодиагностика неисправностей.

2.4. Компактность конструкции.

2.5. Минимальные массогабаритные показатели.

2.6. Предпочтительно применение асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

2.7. Движение рабочего органа под действием нагрузки при выключенном двигателе не допускается. В мехатронных модулях с самотормозящимися преобразователями движения тормозной момент на валу двигателя должен составлять не менее 20% от крутящего момента при номинальной нагрузке.

3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3.1. Вид движения рабочего органа:
а) вращательное, ось вращения вертикальная;
б) вращательное, ось вращения горизонтальная;
в) возвратно-поступательное горизонтальное;
г) возвратно-поступательное вертикальное.

3.2. Максимальная величина перемещения рабочего органа:
а) неограниченное число оборотов;
б) два оборота;
в) $1{,}5\pi$;
г) 1000 мм;
д) 500 мм;
е) 100 мм.

3.3. Характер нагрузки на рабочем органе:
а) реверсивная;
б) нереверсивная.

3.4. Номинальная величина нагрузки на рабочем органе:
а) $T_{ном} = 1000$ Нм;
б) $T_{ном} = 200$ Нм;
в) $T_{ном} = 50$ Нм;
г) $F_{ном} = 10$ кН;
д) $F_{ном} = 2$ кН;
е) $F_{ном} = 0{,}5$ кН.
Обозначения: $T_{ном}$ – номинальный крутящий момент; $F_{ном}$ – номинальная осевая сила.

3.5. Номинальная скорость движения рабочего органа при номинальной нагрузке:
а) $\omega_{ном} = 7{,}85\ с^{-1}$;
б) $\omega_{ном} = 3{,}93\ с^{-1}$;
в) $\omega_{ном} = 0{,}785\ с^{-1}$;
г) $v_{ном} = 1$ м/с;
д) $v_{ном} = 0{,}2$ м/с;
е) $v_{ном} = 0{,}05$ м/с.
Обозначения: $\omega_{ном}$ – угловая скорость; $v_{ном}$ – линейная скорость.

3.6. Способ крепления модуля:
а) фланцевый;
б) на лапах.

3.7. Режим эксплуатации:
а) по рис. 3.7.1;
б) по рис. 3.7.2;
в) по рис. 3.7.3.

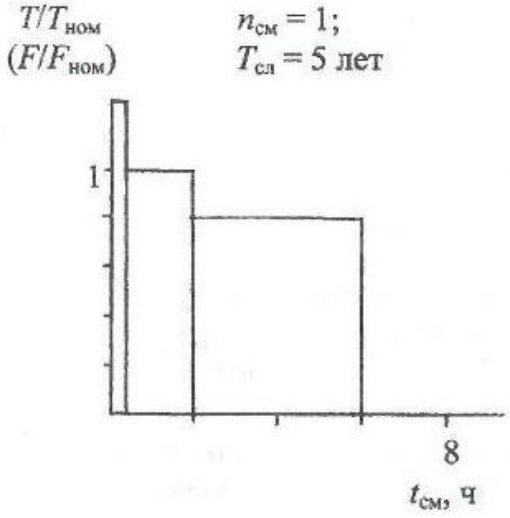


Рис. 3.7.1

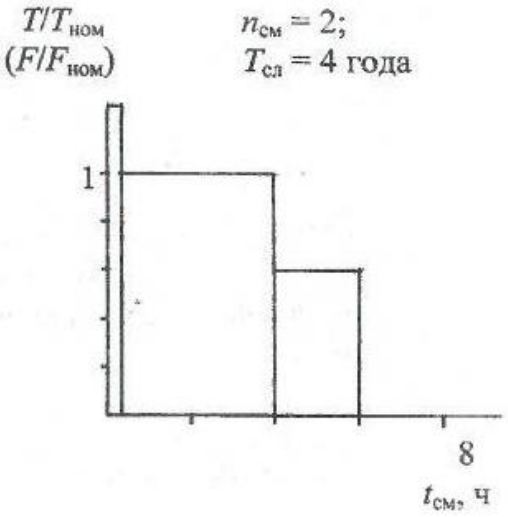


Рис. 3.7.2

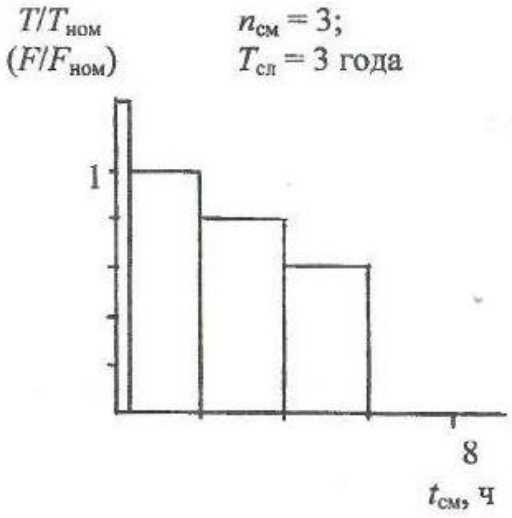


Рис. 3.7.3

Обозначения: T, F – значения нагрузки; $n_{см}$ – число смен в сутки; $t_{см}$ – продолжительность смены; $T_{сл}$ – срок службы модуля.

3.8. Допустимая кинематическая погрешность преобразователя движения:
а) $[F'_{iop}] = 0{,}15$ мм;
б) $[F'_{iop}] = 0{,}08$ мм;
в) $[F'_{iop}] = 0{,}02$ мм;

г) $[\delta\varphi] = 0{,}0015$ рад;
д) $[\delta\varphi] = 8 \cdot 10^{-4}$ рад;
е) $[\delta\varphi] = 2 \cdot 10^{-4}$ рад.

3.9. Допустимая величина мертвого хода:
а) $[J_{tp}] = 0{,}3$ мм;
б) $[J_{tp}] = 0{,}1$ мм;
в) $[J_{\varphi p}] = 0{,}003$ рад;
г) $[J_{\varphi p}] = 0{,}001$ рад.

3.10. Дополнительные требования:
а) самоторможение рабочего органа;
б) минимальная высота (вертикальный габарит) мехатронного модуля;
в) минимальная длина (наибольший горизонтальный габарит) мехатронного модуля;
г) функционирование при температурах воздуха -30…+20 $^{\circ}C$;
д) соосность вала двигателя и выходного (тихоходного) вала модуля.

4. ВАРИАНТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ

4.1. Общие технические требования к мехатронному модулю см. раздел 2.

4.2. Специальные технические требования см. табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты комплексов специальных технических требований к мехатронному модулю

Номер варианта	Специальные технические требования									
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
1	а	а	а	а	а	а	а	а	б	б
2	б	б	б	б	б	б	б	б	-	а
3	в	д	а	г	г	а	в	г	в	-
4	г	е	б	д	д	б	а	д	-	г
5	а	в	а	в	в	а	б	в	а	д
6	б	а	б	а	а	б	в	а	-	в
7	в	е	а	е	е	а	а	е	г	а
8	г	д	б	г	г	б	б	г	-	-
9	а	б	а	б	б	а	в	б	б	а
10	б	в	б	в	в	б	а	в	-	г
11	в	г	а	д	д	а	б	д	г	-
12	г	г	б	е	е	б	в	е	-	а
13	а	а	а	в	в	а	а	в	а	д
14	б	б	б	а	а	б	б	а	-	-
15	в	г	а	г	г	а	в	г	в	в
16	г	д	б	е	е	б	а	е	-	а
17	а	а	б	а	а	б	б	а	-	г
18	б	а	а	б	б	а	в	б	б	-
19	в	д	б	д	д	б	а	д	-	а
20	г	г	а	г	г	а	б	г	в	б
21	а	б	б	а	в	б	в	б	-	д
22	б	в	а	в	а	а	а	в	а	в
23	в	е	б	е	д	б	б	е	-	-
24	г	д	а	д	д	а	в	д	г	-
25	а	в	б	б	б	б	а	б	-	-
26	б	б	а	а	а	а	б	а	б	в
27	в	г	б	г	е	б	в	г	-	-
28	г	е	а	е	е	а	а	г	в	а
29	а	в	б	а	а	б	б	в	-	а
30	б	а	а	б	в	а	в	в	а	д
31	в	д	б	е	г	б	а	д	-	в
32	г	г	а	д	г	а	б	е	г	-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: Учебное пособие. -М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004.
2. Таугер В.М. Основы конструирования мехатронных модулей и систем: Учебное пособие. - Екатеринбург: УрГУПС, 2004.
3. Таугер В.М. Конструирование преобразователей движения мехатронных модулей: Учебное пособие. - Екатеринбург: УрГУПС, 2006.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Б1.В.09.13 ПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Специальность –
21.05.04 Горное дело
Специализация –
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

Лабораторная работа №1

Изучение режимов работы робота–штабелера

Цель работы:

Ознакомиться с типами управления и изучить режимы работы робота–штабелера используя «сокращенный» и «расширенный» функционал управления роботом.

Теоретическая часть:

Интерфейс управления роботом–штабелером может отображаться в двух различных видах: «сокращенный» и «расширенный». Вне зависимости от режима отображения робот–штабелер может управляться в тремя способами:

1. Ручное управление, которое осуществляется путем перемещения оператором «ползунков», задающих значения координат, и нажатия кнопки перемещений (рисунок 1.1).

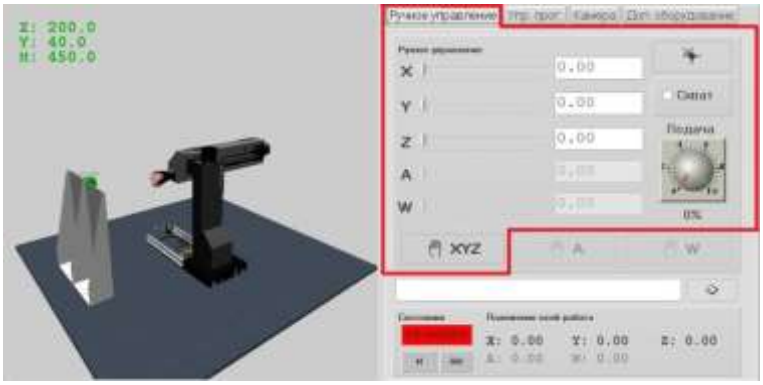


Рисунок 1.1 – Интерфейс ручного управления роботом–штабелером

2. Управление при помощи командной строки, в которой оператор прописывает текст команды, выполняемой роботом после нажатия клавиши «Enter» (рисунок 1.2).

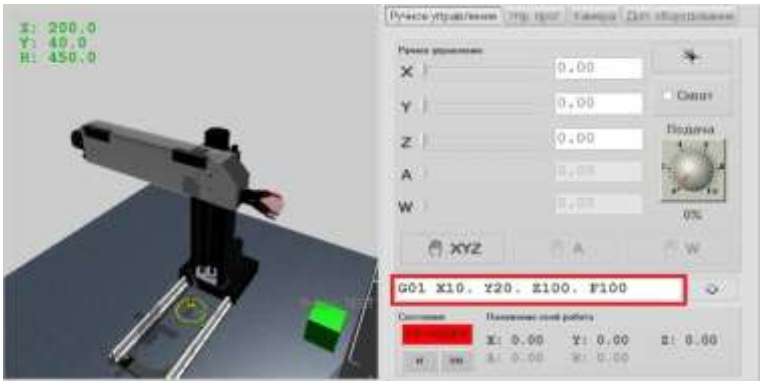


Рисунок 1.2 – Интерфейс управления при помощи командной строки

3. Управление роботом–штабелером при помощи управляющей программы, созданной в текстовом файле и загруженной оператором.

Рисунок 1.3 – Интерфейс управления роботом–штабелером при помощи управляющей программы

На рисунках 1.1 – 1.3 представлен «сокращенный» вид управления роботом–штабелером. В «расширенном» виде в интерфейсе управления роботом–штабелером отсутствует графическое представление положения робота в пространстве. Интерфейс управления роботом в «расширенном» виде представлен на рисунке 1.4.

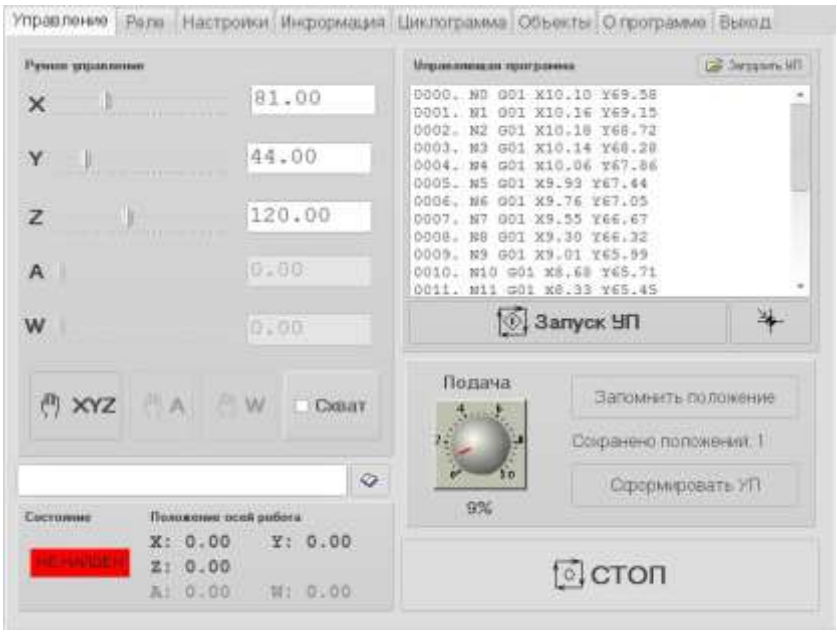


Рисунок 1.4 – Интерфейс управления роботом в «расширенном» виде

Для ручного управления роботом оператор должен переместить «ползунок» выбранной координаты (или нескольких координат для одновременного перемещения) в положение, соответствующее заданному положению робота. Значение координаты можно увидеть в белом поле рядом с выбранным «ползунком».

Для того, чтобы робот переместился в заданные координаты, необходимо после их назначения нажать кнопку XYZ. Для выхода звеньев робота в нулевое положение необходимо нажать на кнопку . Далее выбрать из списка, по какой координате следует произвести выход в нулевое положение. Для управления схватом необходимо поставить либо убрать галочку в поле рядом со словом СХВАТ.

Для управления роботом–манипулятором при помощи командной строки необходимо написать текст команды в поле командной строки (см. рисунок 1.2).

Основной командой для управления звеньями робота является команда линейного перемещения G01. Пример текста команды выглядит следующим образом:

G01 X50. Y100. Z30. F100,

где G01 – команда линейного перемещения в заданные координаты;

X50. Y100. Z30. – координаты конечных положений звеньев робота;

F100 – обозначение скорости перемещения, цифры после буквы указывают на процент от максимального перемещения.

Перемещение можно произвести по одной, двум или трем координатам одновременно. Координаты X, Y и Z задаются в миллиметрах.

Для управления схватом используются команды LOCKERON и LOCKEROFF.

Команда LOCKERON сжимает губки схвата, команда LOCKEROFF – разжимает.

Для выхода звеньев робота в нулевое положение используется команда RHOME. При этом необходимо указать координату, для которой указывается команда, например:

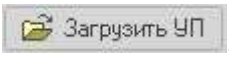
RHOMEX – выход в нулевое положение по оси X;

RHOMEY – выход в нулевое положение по оси Y;

RHOMEZ – выход в нулевое положение по оси Z.

Все команды управления роботом-манипулятором записываются ПРОПИСНЫМИ буквами.

Более подробно о программировании можно узнать из прилагаемого пособия по программированию.

Для управления роботом–штабелером при помощи управляющей программы (УП), ее нужно загрузить нажатием на кнопку 

.

Перед загрузкой УП необходимо предварительно составить текст программы в текстовом редакторе «Блокнот», в формате «имя программы.txt». Каждая команда с параметрами перемещения записывается с новой строки. Текст после знака « ; » не считывается и является комментарием.

Также составление УП возможно перемещением робота в нужные положения и запоминанием полученных координат с помощью кнопки «Запомнить положение».

После завершения необходимых перемещений робота нужно нажать кнопку «Сформировать УП», и управляющая программа будет создана автоматически. При этом нужно указать путь сохранения и дать ей имя. Эту программу можно открыть текстовым редактором и отредактировать.

Ход работы

1) Включить блоки управления стендом.

2) Нарисовать схему подключения элементов стенда.

3) Запустить программу управления штабелером. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись «Найден».

4) При помощи вкладки «объекты» в расширенном интерфейсе управления роботом создать минимум пять объектов, имитирующих ячейки для заготовок на складе.

5) В сокращенном режиме работы, оставаясь в режиме имитатора, произвести перемещения робота таким образом, чтобы схват робота поочередно оказывался там, где расположены созданные объекты. Перемещения необходимо осуществлять по одной оси, двум осям и трем осям одновременно, задавая при этом различные скорости перемещения звеньев робота–манипулятора по осям. Последовательность перемещения необходимо записать в таблицу 1.

Таблица 1 – Последовательность перемещения робота–манипулятора

№ перемещения	Координата X	Координата Y	Координата Z	Скорость перемещения F
1				
2				
3				
4				
5				

Вывести робот–манипулятор в нулевое положение по всем осям.

Составить для каждого перемещения команду. Записать текст команды в таблицу 2.

Таблица 2 – Команды перемещения робота–манипулятора

№ перемещения	Текст команды
1	
2	
3	
4	
5	

6) Путем последовательного ввода команд в командную строку произвести перемещения звеньев робота по осям. Обращать внимание на правильность написания команд. Отслеживать текущие координаты осей робота по значениям в поле «Положение осей робота». После окончания каждого перемещения нужно запоминать положение робота–манипулятора в программе нажатием кнопки «Запомнить положение» на вкладке «Управляющая программа». После запоминания всех перемещений по этим опорным точкам сформировать управляющую программу нажатием кнопки « Сформировать УП».

7) Открыть сформированную УП, добавить в конце программы команды выхода в нулевое положение по всем осям. Сохранить файл и запустить управляющую программу в имитаторе.

8) После правильного выполнения этой программы открыть её текст. Для имитации переноса заготовки из одной позиции в другую, перед перемещением робота в первую позицию вставить команду на разжим схвата, при достижении роботом первой позиции вставить команду на зажим схвата, имитируя зажим детали. Затем после перемещения робота во вторую позицию вставить команду на разжим схвата, имитируя укладку детали в ячейку.

9) По той же схеме произвести имитацию перемещения заготовки по трем ячейкам, при этом во второй ячейке происходит сначала разжим схвата и укладывание заготовки в ячейку, затем снова следует зажим этой заготовки и перенос в последнюю ячейку.

9) Записать управляющие программы. Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №2

Изучение интерпретатора языка программирования робота

Цель работы:

Изучить понятие интерпретатора. Понять процесс работы интерпретатора. Определить работу интерпретатора при написании управляющей программы робота.

Теоретическая часть:

Программирование систем с числовым программным управлением (ЧПУ) производится посредством G – кода. G – код –это общее название языка программирования систем с ЧПУ, так как он имеет множество реализаций и дополнений у разных производителей и для разных устройств.Программа, написанная с использованием G-кода, состоит из кадров, каждый кадр содержит набор команд управления.Интерпретатор анализирует и тут же выполняет (собственно интерпретация) программу покомандно (или построчно), по мере поступления её исходного кода на вход интерпретатора.

Алгоритм работы простого интерпретатора включает в себя:

1) Прочитать инструкцию.

2) Проанализировать инструкцию и определить соответствующие действия.

3) Выполнить соответствующие действия.

4) Если не достигнуто условие завершения программы, прочитать следующую инструкцию и перейти к пункту 2.

По сути робот–манипулятор – это перепрограммируемый автоматический манипулятор промышленного применения. Под перепрограммируемостью, в соответствии со стандартом, понимается свойство промышленного робота заменять управляющую программу автоматически или при помощи человека-оператора.

К перепрограммированию относится изменение последовательности и(или) величин перемещений по степени подвижности и управляющих функций с помощью средств управления на пульте устройства управления.

Работа интерпретатора заключается в сопоставлении команд G – кода с командами, подаваемыми на микроконтроллер драйвера управления звеньями робота–манипулятора. При этом, если команды управления записаны неверно, интерпретатор не может сопоставить их с командами для микроконтроллера и действия не происходит.

Интерпретатор языка программирования встроен в программу для управления роботом, поэтому правильность работы интерпретатора определяется правильностью исполнения команд управляющей программы роботом–манипулятором.

Ход работы:

1) Включить блоки управления стендом, запустить программу управления стендом;
2) Выйти из режима «имитатора», убрав галочку в поле рядом с соответствующей надписью;
3) Вывести оси робота в нулевые положения;
4) Используя данные таблицы 2 из лабораторной работы №1 выполнить команды на скорости перемещения 20%, путем последовательного ввода команд в командную строку произвести перемещения звеньев робота–манипулятора по осям. Обращать внимание на правильность написания команд. Отслеживать текущие координаты осей робота по значениям в поле «Положение осей робота». После окончания каждого перемещения нужно запоминать положение робота–манипулятора в программе нажатием кнопки «Запомнить положение» на вкладке «Управляющая программа». После запоминания всех перемещений по этим опорным точкам сформировать управляющую программу нажатием кнопки « Сформировать УП». При этом обращать внимание, чтобы звенья робота при перемещении не наезжали на элементы стенда;
5) Открыть сформированную УП, добавить в конце программы команды выхода в нулевое положение по всем осям. Сохранить файл и запустить управляющую программу;
6) Описать действия робота–манипулятора для выполнения данной управляющей программы используя алгоритм работы простого интерпретатора;
7) Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №3.

Изучение команд перемещения робота–манипулятора. Изучение работы робота–штабелера в декартовой системе координат

Цель работы

Изучение команд перемещения звеньев робота в декартовой системе координат.

Теоретическая часть

Перемещение звеньев робота задается тремя составляющими:

– координата X робота, передвижение горизонтального звена робота со схватом вперед–назад;

– координата Y робота, изменение высоты горизонтального звена робота вдоль вертикального звена вверх–вниз;

– координата Z робота, передвижение робота вправо–влево.

Данные координаты имеют только положительные значения, отсчитываемые от датчиков нулевого положения. На рисунке 3.1 звенья робота располагаются в нулевых координатах.

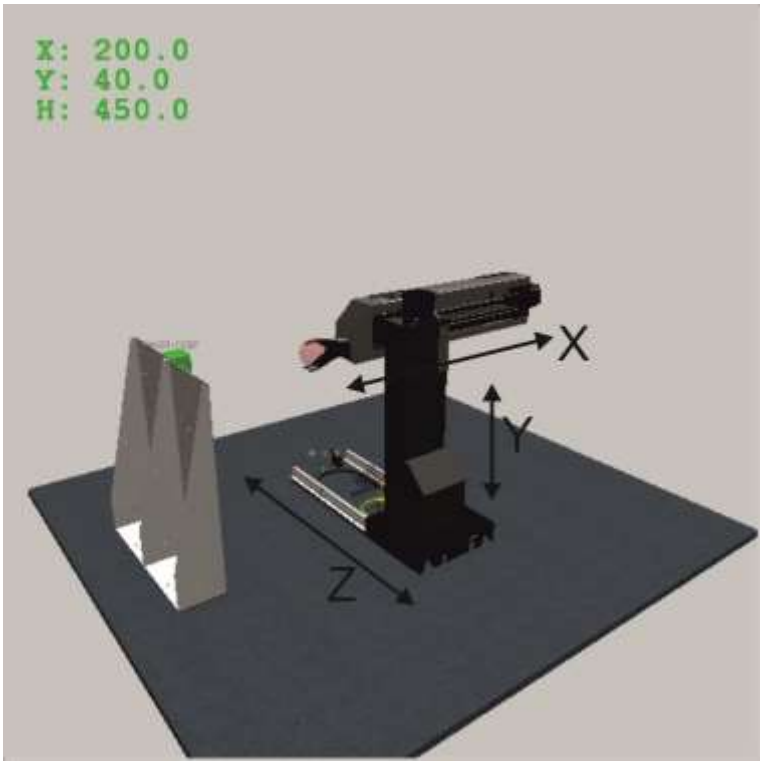


Рисунок 3.1 – Координаты перемещений звеньев робота

Декартова система координат показана на рисунке 3.2. В этой системе координат определяется положение центра схвата робота–штабелера. Декартовы координаты имеют только положительные значения по осям X и Z. По оси Y координаты имеют положительные и отрицательные значения. Положение центра схвата в декартовой системе отображается координатами в верхнем левом углу графического окна.

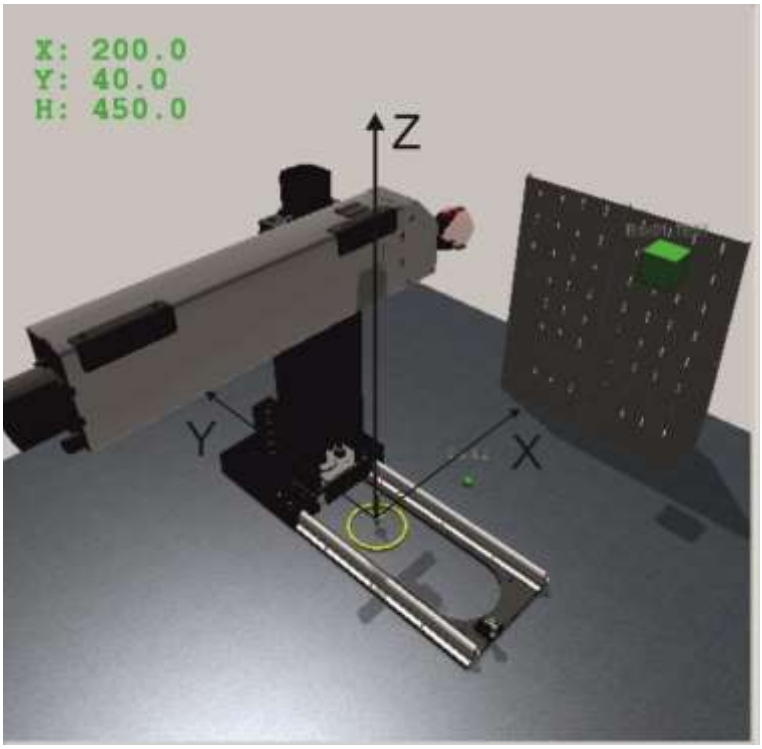


Рисунок 3.2 – Декартова система координат робота – штабелера

Более подробно с командами, используемыми в стенде можно ознакомиться в пособии по программированию.

Ход работы:

1) Включить блок управления стендом.

2) Запустить программу управления. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись: «Найден».

3) Задавая различные величины перемещений звеньев робота определить зону работы робота в декартовых координатах и крайние точки его перемещения. Записать их в значениях (X, Y, Z) и для каждой точки написать соответствие в собственных перемещениях звеньев. Оформить в виде таблицы.

4) Установить кронштейны в произвольные ячейки склада. Зажать в схвате робота заготовку. Переместить поочередно схват робота в ячейки. Записать декартовы координаты ячеек. В графической части создать объекты, имитирующие зону расположения установленных ячеек. Записать полученные координаты объектов.

5) Определить, совпадают ли координаты перемещений робота и расположения ячеек.

6) Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №4

Синтез программы сортировки объектов

Цель работы

Управление роботом–штабелером при создании управляющей программы сортировки объектов.

Теоретическая часть:

Для сортировки объектов по стенду представлена программа:

;По программе робот берет заготовку диаметром 35 миллиметров из 9 ячейки и ставит заготовку в 16 ячейку. Заготовки на длинном кронштейне.

```
RHOMEX
; Выход в нулевое положение по координате X
RHOMEY
; Выход в нулевое положение по координате Y
RHOMEZ
; Выход в нулевое положение по координате Z
LOCKEROFF
; Разжим схвата
G01 Z9. F150
; Позиционирование по координате Z для захвата заготовки из 9 ячейки
G01 Y18.
; Позиционирование по координате Y для захвата заготовки из 9 ячейки
G01 X196.
; Позиционирование по координате X для захвата заготовки из 9 ячейки
LOCKERON P2600
; Захват заготовки из 9 ячейки
G01 Y5.
;  Движение вверх по координате Y для безопасного выхода из позиции захвата заготовки
G01 Z275.
;  Позиционирование по координате Z для установки заготовки в 16 ячейку
G01 Y70.
;  Позиционирование по координате Y для установки заготовки в 16 ячейку
LOCKEROFF P2000
; Разжим схвата на 2000 импульсов
G01 X150. F150
; Безопасный отход по координате X из 16 ячейки
RHOMEX
;  Выход в нулевое положение по координате X
RHOMEY
```

; Выход в нулевое положение по координате Y
RHOMEZ
; Выход в нулевое положение по координате Z

Ход работы

1) Включить блок управления стендом;

2) Запустить программу управления стендом. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись: «Найден». Установить кронштейны в ячейки 9 и 16.

3) Разобрать представленную выше управляющую программу по сортировке объектов.

4) Создать текстовый документ формата «имя_программы.txt». Записать в документ строки представленной управляющей программы, которые содержат исполнительные команды. Сохранить текстовый документ.

5) Выйти из режима «имитатор», переместить робот–штабелер в ячейки 9 и 16, при этом проверить, чтобы схват робота располагался точно в ячейках. Сравнить полученные координаты с координатами в управляющей программе. При необходимости ввести коррективы в программу.

6) В командную строку поочередно в порядке расположения в тексте вставлять строки с командами управляющей программы, выполняя каждую команду отдельно. Визуально следить за правильностью выполнения команды. Не допускать аварийных ситуаций.

7) Импортировать отработанную управляющую программу в программу управления стендом.

8) Запустить управляющую программу, контролируя визуально перемещения робота. Не допускать аварийных ситуаций.

9) После успешного завершения программы составить аналогичную для перемещения заготовки по трем ячейкам.

10) Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №5

Синтез программы оптимизированного складирования объектов

Цель работы: произвести оптимизацию управляющей программы из лабораторной работы №4.

Теоретическая часть:

Оптимизация процесса складирования объектов подразумевает сокращение времени на выполнение автоматизированной системой своей управляющей программы. Одним из способов, позволяющих оптимизировать производственный процесс, является моделирование (имитация) выполнения программы. Данный вид оптимизации можно применить, используя перед выполнением управляющей программы среду «имитатор» для отработки управляющей программы. После оптимизации в «имитаторе» отработанную программу можно запустить для исполнения автоматизированной системой.

Для оптимизации также имеет место замена поочередного перемещения по нескольким осям одним совместным перемещением осей (интерполяция). Например, использовать одну команду G01 X46. Y120. F100 вместо двух последовательных команд G01 X46. F100 и G01 Y120. F100.

Еще одним примером оптимизации является использование меток для перехода, если нужно сделать программу повторяющейся, то есть запустить цикл.

Пример программы:

```
RHOME X
RHOME Y
RHOMR Z
1000:
G01 X100. Y100. F100
G01 Z150. F150
G01 X50. Y150. F100
G01 Z250. F150
RHOME X
RHOME Y
RHOMR Z
SHIFTTO P1000
```

В данной программе использована метка перехода 1000 в четвертой строке и обращение к ней в конце программы командой SHIFTTO P1000 в конце программы. То есть программа первый раз пройдет все строки и выполнит переход к четвертой

строке и в дальнейшем не будет выполнять первые три строчки. После числового обозначения метки ставится знак «:».

Ход работы:

1) Включить блок управления стендом.
2) Запустить программу управления штабелером. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись «Найден».
3) В режиме «имитатор» запустить управляющую программу, полученную в лабораторной работе №4. Произвести оптимизацию данной программы.
4) Выполнить зацикливание данной программы.
5) Запустить получившуюся программу складирования объектов. При этом следует подавать заготовки в первоначальную ячейку.
6) Составить отчет о выполненной работе.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры автоматики
и компьютерных технологий
(протокол № 1 от 11.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ В. С. Бочков

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.В.09.14 ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 7
Модуль 1. Основы полупроводниковой электроники 8
1. Физические основы работы полупроводниковых приборов 9
1.1. Электропроводность полупроводников 9
1.2. Электрические переходы 15
1.3. Смещение *p–n*-перехода 19
1.4. Емкость *p–n*-перехода 22
1.5. Пробой *p–n*-перехода 23
1.6. Полупроводниковые диоды 25
2. Биполярные транзисторы 27
2.1. Структура и принцип действия биполярного транзистора 27
2.2. Физическая нелинейная модель транзистора и эквивалентные схемы 30
2.3. Способы включения биполярных транзисторов 34
2.4. Основные режимы работы транзистора 35
2.5. *h*-параметры биполярного транзистора 36
2.6. Основные параметры биполярных транзисторов 38
2.7. Транзисторы с инжекционным питанием 40
3. Полевые транзисторы 41
3.1. Транзистор с управляющим *p–n*-переходом 41
3.2. МДП (МОП)-транзисторы 45
3.3. МДП-транзисторы со встроенным каналом 49
3.4. Способы включения полевых транзисторов 51
3.5. Полевой транзистор как четырёхполюсник 51
3.6. МДП-структуры специального назначения 52
3.7. Нанотранзисторы 54
4. Электронные приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением 58
4.1. Туннельный и обращенный диоды 58
4.2. Двухбазовый диод (однопереходный транзистор) 59
4.3. Лавинный транзистор 61
4.4. Динисторы и тиристоры 64
5. Компоненты оптоэлектроники 69
5.1. Излучающие диоды 71
5.2. Фоторезисторы 72
5.3. Фотодиоды 74
5.4. Фототранзисторы 76
5.5. Оптроны 77

6. Краткая характеристика индикаторов и лазеров 79
6.1. Вакуумные люминесцентные индикаторы 80
6.2. Электролюминесцентные индикаторы 82
6.3. Жидкокристаллические индикаторы 83
6.4. Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы 84
6.5. Дисплеи 86
6.6. Лазеры 87
Модуль 2. Основы аналоговой схемотехники электронных средств 92
7. Электронные усилительные устройства 92
7.1. Общие сведения об усилителях электрических сигналов 92
7.2. Основные параметры и характеристики усилителей 94
7.3. Усилительные каскады на биполярных транзисторах 101
7.4 Усилительные каскады на полевых транзисторах 110
7.5. Режимы работы усилительных каскадов 115
8. Усилители мощности и усилители постоянного тока 117
8.1. Усилители с трансформаторным включением нагрузки 118
8.2. Безтрансформаторные двухтактные усилители 119
8.3. Усилители постоянного тока 121
8.4. Дифференциальный усилитель 125
8.5. Некоторые схемные решения, используемые в усилителях 129
9. Операционные усилители 133
9.1. Общие сведения 133
9.2. Идеальный операционный усилитель 134
9.3. Основные параметры и характеристики операционных усилителей 136
9.4. Обратные связи в усилительных устройствах 140
9.5. Примеры использования операционных усилителей и обратных связей в некоторых схемах 144
9.6. Области применения операционных усилителей в электронных схемах 150
10. Генераторы электрических колебаний и электронные ключи 151
10.1. Общие сведения 151
10.2. Генераторы гармонических сигналов 153
10.3. Кварцевые генераторы 155
10.4. Генераторы колебаний прямоугольной формы (мультивибраторы) 156
10.5. Импульсные сигналы 161

10.6. Электронные ключи 164
10.7. Использование МОП-ключей в электронных устройствах с переключаемыми конденсаторами..... 172
Модуль 3. Основы цифровой схемотехники электронных средств 179
11. Основы теории логических (переключательных) функций 179
11.1. Логические функции и элементы..... 179
11.2. Аксиомы, законы, тождества и теоремы алгебры логики (булевой алгебры) 183
11.3. Представление и преобразование логических функций.... 186
11.4. Понятие о минимизации логических функций..... 188
11.5. Структура и принцип действия логических элементов..... 192
11.6. Основные параметры и характеристики логических элементов..... 196
12. Комбинационные логические устройства 201
12.1. Шифраторы и дешифраторы 202
12.2. Мультиплексоры и демультиплексоры 205
12.3. Сумматоры..... 208
12.4. Цифровой компаратор..... 210
12.5. Преобразователи кодов 211
12.6. Арифметико-логическое устройство..... 213
13. Триггеры и цифровые автоматы..... 214
13.1. Триггерная схема на двух усилительных каскадах..... 215
13.2. RS-триггеры на логических элементах..... 217
13.3. Разновидности RS-триггеров..... 222
13.4. JK-триггеры 227
13.5. D-триггер и T-триггер 229
13.6. Несимметричные триггеры..... 233
13.7. Цифровые автоматы 236
14. Регистры и счётчики 240
14.1. Общие сведения о регистрах 240
14.2. Сдвиговые регистры..... 243
14.3. Синхронные сдвиговые регистры с обратными связями 246
14.4. Функциональные узлы на базе регистров сдвига..... 248
14.5. Электронные счетчики 256
15. Запоминающие электронные устройства 262
15.1. Основные параметры и виды запоминающих устройств .. 262

15.2. Статические оперативные запоминающие устройства..... 264
15.3. Динамические оперативные запоминающие устройства .. 266
15.4. Энергонезависимые оперативные запоминающие устройства..... 267
15.5. Основные структуры оперативных запоминающих устройств..... 269
15.6. Постоянные запоминающие устройства 272
15.7. Структурная схема РПЗУ-ЭС (EPROM) 277
15.8. Постоянные запоминающие устройства РПЗУ-УФ..... 278
15.9. Условные обозначения микросхем и сигналов управления запоминающими устройствами (примеры УГО ЗУ)..... 279
15.10. Флэш-память 281
16. Направления и перспективы развития электроники 284
Литература 288

ВВЕДЕНИЕ

Специалист в любой технической или научной области, тем более связанной с разработкой и применением электронных средств, должен уверенно ориентироваться в мире электроники.

Основное внимание в конспекте лекций уделено изложению принципов действия, свойств и характеристик как элементарных электронных приборов (диодов, транзисторов, микросхем и т.п.), так и электронных устройств и средств, их использующих.

Конспект лекций состоит из описания теоретического материала трёх модулей дисциплины, тематически связанных между собой.

В модуле 1 рассматриваются, в основном, принципы действия и характеристики дискретных электронных приборов, а модули 2 и 3 посвящены основам схемотехники простейших электронных средств.

МОДУЛЬ 1. ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника – отрасль науки и техники, изучающая законы взаимодействия электронов и других заряженных частиц с электромагнитными полями и разрабатывающая методы создания электронных приборов, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии с целью передачи, обработки и хранения информации, автоматизации производственных процессов, создания аппаратуры, устройств и средств контроля, измерения и управления [25].

Различают три основных направления электроники (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Основные направления электроники

С точки зрения применения электронных приборов и устройств в настоящее время наибольшее развитие и распространение получила техническая электроника: аналоговая и цифровая (рис. 1.2).

Рис. 1.2. Основные направления технической электроники

Информационная электроника составляет основу электронно-вычислительной и информационно-измерительной техники и устройств автоматики. На базе информационной электроники разрабатываются и изготавливаются электронные устройства получения, обработки, передачи, хранения и использования информации, устройства управления различными объектами и технологическими процессами.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Электропроводность полупроводников

Полупроводниками *называют материалы, удельное сопротивление которых при комнатной температуре (25 – 27 ^{0}C) находится в пределах от 10^{-5} до 10^{10} Ом·см и занимающими промежуточное положение между металлами и диэлектриками (металлы ток пропускают, диэлектрики – нет) [8]. Сейчас известно множество полупроводников, их больше, чем металлов и диэлек-*

триков. Наиболее известны из полупроводников Si, Ge, Se, GaS – арсенид галлия. Существенным свойством полупроводника является возможность в широких пределах изменять свою проводимость под действием температуры, облучения и введения примесей.

Удовлетворительное объяснение этому явлению дает теория электропроводности, согласно которой атом вещества состоит из ядра, окруженного облаком электронов [8]. Электроны находятся в движении на некотором расстоянии от ядра в пределах слоев (оболочек), определяемых их энергией. Каждому из этих слоев можно поставить в соответствие определенный *энергетический уровень* электрона, причем чем дальше электрон находится от ядра, тем выше его энергетический уровень. Совокупность уровней образует *энергетический спектр*. Если электрон переходит с одного энергетического уровня на другой, то происходит либо выделение, либо поглощение энергии, причем это делается порциями – *квантами*.

В структуре атомов можно выделить оболочки, которые полностью заняты электронами (внутренние оболочки) и незаполненные оболочки (внешние). Электроны внешних оболочек слабее связаны с ядром и легче вступают во взаимодействие с другими атомами. Электроны внешних оболочек называют *валентными*.

Для полупроводниковых материалов характерно кристаллическое строение, при котором между атомами возникают так называемые *ковалентные связи* за счет «присвоения» соседних валентных электронов. Это наглядно можно показать на плоской модели кристаллической решетки, например для четырехвалентного германия Ge (рис. 1.3).

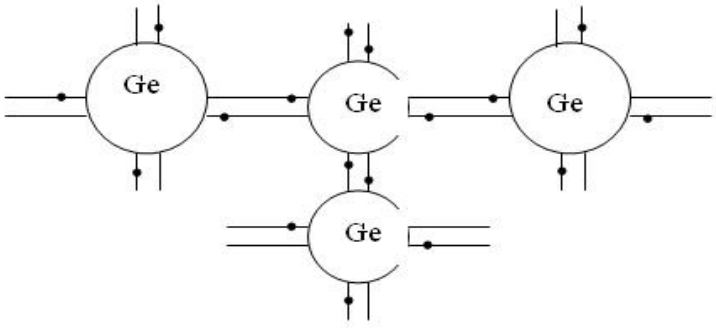


Рис. 1.3. Плоская модель кристаллической решетки Ge

Атомы связаны между собой, т.е. их электроны находятся на взаимозависимых энергетических (расщепленных) уровнях, при этом

на каждом уровне (для Ge) находится не более двух электронов. Совокупность энергетических уровней, на которых могут находиться электроны, называют *разрешенными зонами*. Между ними будут в этом случае располагаться *запрещенные зоны*, т.е. энергетические уровни, на которых электроны находиться не могут. В соответствии с зонной теорией по отношению к энергетическим состояниям (уровням) электронов различают *валентную* зону, *запрещенную* зону, зону *проводимости*. В такой интерпретации можно более определенно разделить все вещества на три большие группы: металлы, полупроводники, диэлектрики (рис. 1.4).

Рис. 1.4. Зонные диаграммы веществ

Зона проводимости – это совокупность расщепленных энергетических уровней, на которые может переходить электрон в процессе взаимодействия атомов или воздействия на атом, например, при нагреве, облучении и т.п.

У полупроводников при некотором значении температуры часть электронов приобретает энергию тепла и оказывается в зоне проводимости. Эти электроны «делают» полупроводник электропроводным. Если электрон «покидает» валентную зону, то образуется свободный энергетический уровень, как бы вакантное место (состояние), которое назвали «*дыркой*». Валентные электроны соседних атомов могут переходить на эти свободные уровни, при этом создают дырки в других атомах. Такое перемещение электронов рассматривается как движение *положительных зарядов – «дырок»*. Соответственно электропроводность, обусловленная движением электронов называется *электронной*, а движением дырок – *дырочной*. У абсолютно чистого и однородного вещества свободные электроны и дырки образуются попарно.

Процесс образования положительных и отрицательных зарядов в теле полупроводника можно представить следующим образом. Например, фотон выбивает электрон с его энергетического уровня, электрон становится свободным, а атом приобретает положительный заряд (становится положительно заряженным ионом). Процесс образования пары электрон – «дырка» называют *генерацией* зарядов, обратный процесс – *рекомбинацией* (рис. 1.5).

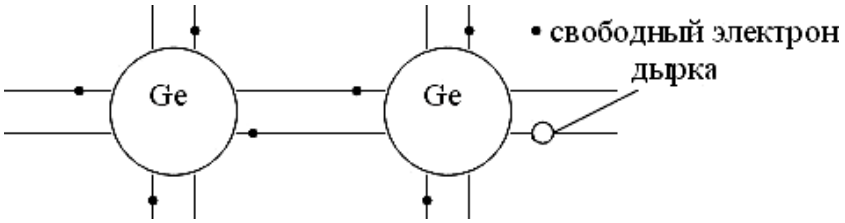


Рис. 1.5. Процессы генерации и рекомбинации

Движение зарядов, обусловленное тепловой энергией, называют *диффузией*. Средний промежуток времени между генерацией и рекомбинацией характеризует так называемое время жизни носителей заряда, а расстояние, которое успевает преодолеть заряд за это время, называется *диффузионной длиной*. Эти характеристики используются для сравнения различных полупроводниковых (ПП) веществ между собой.

Собственная электропроводность полупроводников. Приложим к образцу ПП вещества электроды источника постоянного тока, т.е. создадим в нём электрическое поле с напряженностью E. В этом случае по законам электродинамики электроны и дырки должны перемещаться. Возникнут два встречно направленных потока движения носителей зарядов, в цепи потечет ток, носящий название *ток дрейфа* (*дрейфовый ток)* (рис. 1.6).

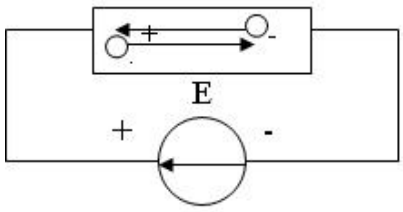


Рис. 1.6. Возникновение тока в полупроводнике

Плотности токов определяются следующим образом:

$$j_n = q_n \cdot n \cdot \mu_n \cdot E; \quad j_p = q_p \cdot p \cdot \mu_p \cdot E, \tag{1.1}$$

где j_n , j_p – плотности токов, созданных соответственно электронами и дырками;

$q_{n,}$, q_p – заряды электрона и дырки; $q_n = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Кл*;

n, p – удельная концентрация зарядов (количество в единице объема);

$\mu_{n,}$ μ_p – подвижность зарядов, т.е. средняя скорость зарядов под действием электрического поля с напряжённостью поля E = 1 В/см.

Результирующая плотность дрейфового тока:

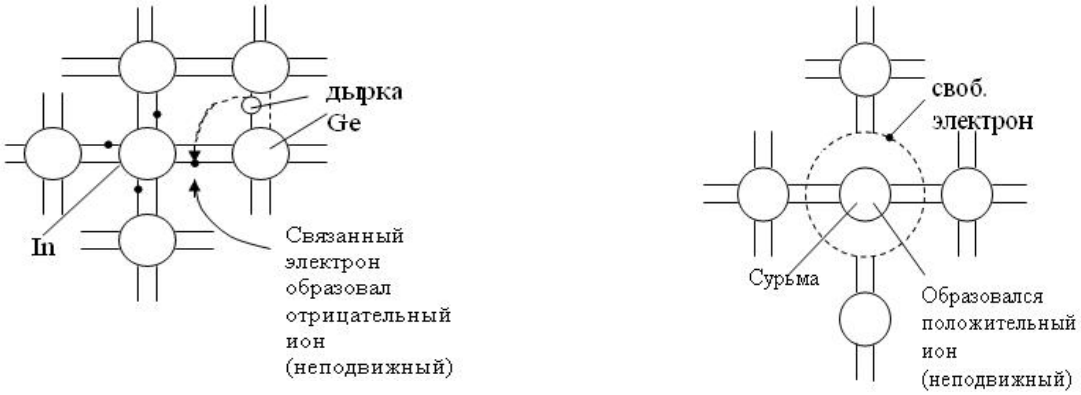
$$j_{дрейф} = E\left(q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p\right), \qquad (1.2)$$

а удельная электропроводность полупроводника:

$$\sigma = j_{дрейф} E = q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p. \qquad (1.3)$$

Выражение (1.3) показывает, что удельная собственная электропроводность полупроводника зависит от концентрации зарядов и их подвижности.

Примесная электропроводность полупроводника. Известно, что электропроводность полупроводника зависит от наличия примесей, которые могут быть двух видов: акцепторные и донорные. В_структуре вещества примесные атомы «замещают» основные атомы кристаллической решетки, образуя ковалентные связи. Однако, если валентности основного материала и примесного разные, то могут быть два случая (рис. 1.7).



а *б*

Рис. 1.7. Иллюстрация образования положительных (*а*) и отрицательных (*б*) зарядов

Первый случай – валентность примеси меньше, чем у основного материала, например Ge – четырехвалентный, а In – трехвалентный (рис. 1.7, *а*) В этом случае, чтобы образовать кристаллическую решетку, In «отбирает» один электрон у атома Ge, связывая его в ковалентные связи. Образуется «свободная» дырка – положительно заря-

женный атом Ge. Такой вид примеси называется *акцепторным*. В этом случае полупроводник приобретает дырочную электропроводность и его называют *полупроводник p*-типа.

Второй случай возникает, если валентность примеси больше, чем валентность основного материала (рис. 1.7, *б*). В этом случае оказывается «свободным» электрон, материал приобретает электронную электропроводность и его называют *полупроводник n*-типа, а примесь – *донорного* типа.

Если обозначить E_C – нижнюю границу зоны проводимости, E_V – верхнюю границу валентной зоны, то $E_C - E_V = \Delta E$ – ширина запрещенной зоны, а E_e – середина запрещенной зоны. Зонные диаграммы для рассмотренных двух случаев будут иметь вид, представленный на рис. 1.8.

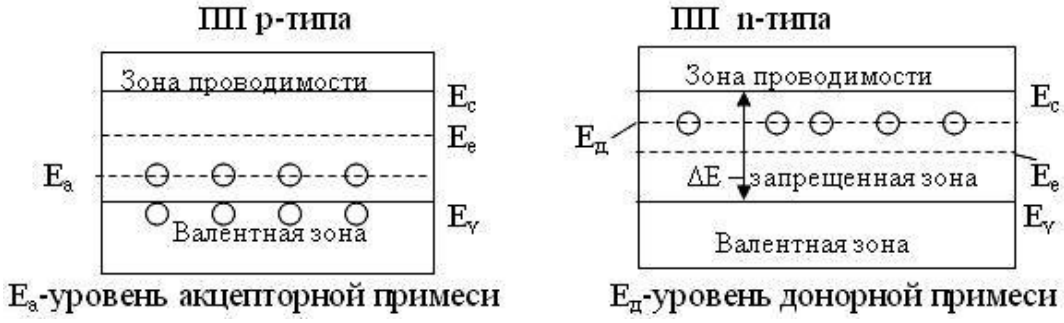


Рис. 1.8. Зонные диаграммы ПП для разных видов примесей

Часто в теории полупроводников взаимодействие и свойства зарядов характеризуются не самой энергией E, а потенциалом, определяемым, как отношение энергии к величине заряда электрона:

$$\phi = E/q\,.$$

В расчетах используется так называемый *температурный потенциал*, который рассчитывается по формуле:

$$\phi_T = \frac{K \cdot T}{q}, \qquad (1.4)$$

где K – постоянная Больцмана, $K = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж $\cdot$ К$^{-1}$,

T – абсолютная температура, ^{0}К.

Доказано [8], что

$$n \cdot p = N_c \cdot N_y \cdot e^{-\frac{\Delta E}{K \cdot T}} = \text{cons}\ , \qquad (1.5)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны.

Таким образом, произведение концентраций носителей зарядов есть величина постоянная при заданной температуре. Здесь N_c и N_y – эффективные плотности состояний соответственно в зоне проводимости и валентной зоне, определяемые массами зарядов и температурой.

Обычно при анализе свойств полупроводников используют *потенциал Ферми*, определяющий энергетические уровни электронов и дырок по отношению к ширине запрещенной зоны и зависящий от концентрации примесей.

$$\varphi_{Fn} = \varphi_E + \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right), \quad \varphi_{Fp} = \varphi_E - \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{p_i}\right), \tag{1.6}$$

где N_d , N_a – соответственно концентрации донорной и акцепторной примесей;

n_i , p_i – концентрации собственных носителей зарядов;

$\varphi_E = \dfrac{(E_c - E_v)}{2 \cdot q}$ – так называемый *электростатический потенциал* (потенциал середины запрещенной зоны).

1.2. Электрические переходы

Электрический переход – это граничный слой между двумя областями материалов, физические характеристики которых различаются. Переходы могут быть: электронно-дырочные (*p*–*n*-переходы); электронно-электронные (n^+–*n*-переходы); дырочно-дырочные (p^+– *p*-переходы). Знак ($^+$) показывает, что одна область перехода имеет повышенную концентрацию соответствующих носителей.

Широко используются *гетеропереходы*, в которых полупроводниковые материалы (от греч. heteros – другой) имеют различную ширину запрещенной зоны, а также *(p–i, n–i, p–i–n)-переходы*, в которых в одной области проводимость собственная, в другой – примесная.

Переходы металл-полупроводник. Свойства этих переходов играют важную роль в электронных приборах, так как электрические выводы от полупроводниковой части микросхем выполняют металлическими проводниками, которые должны допускать хотя бы кратковременное воздействие на них высоких температур при пайке. Электрические переходы образуются не механическим соединением,

а по специальным технологиям. Рассмотрим упрощенную картину процессов на границе металл-полупроводник *p*-типа. Обозначения, принятые на рис. 1.9, имеют следующий смысл: $\varphi_{Fм}$, φ_{Fp} – потенциалы Ферми для металла и полупроводника; φ_E – потенциал середины запрещенной зоны; φ_C, φ_V – соответственно потенциалы нижней границы зоны проводимости и потенциал верхней границы валентной зоны полупроводника.

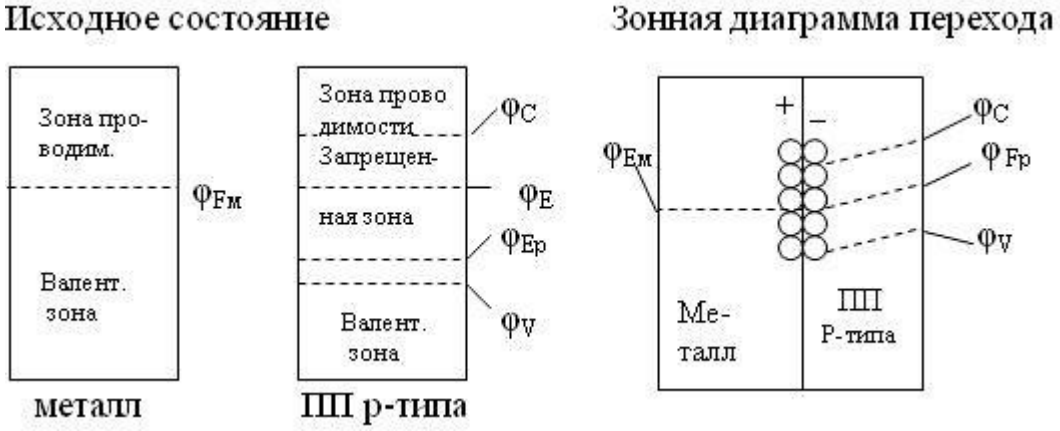


Рис. 1.9. Образование перехода металл-полупроводник

Образование перехода металл-полупроводник обусловлено следующим: $\varphi_{Fм} > \varphi_{Fp}$, поэтому электроны проникают в приграничную область полупроводника *p*-типа, там рекомбинируют с дырками, образуя слой отрицательно заряженных ионов и оставляя в граничном слое металла положительные ионы. В результате у границы образуется свое *внутреннее электрическое поле*, «вытягивающее» электроны из металла и не препятствующее переходу электронов из полупроводника в металл.

Процесс будет идти до тех пор, пока не станут равными потенциалы Ферми и не установится динамическое равновесие. При этом результирующий ток равен нулю, так как образовавшееся электрическое поле препятствует прохождению основных носителей зарядов, а потоки встречного движения зарядов будут одинаковы. У границ контакта образуются объемные заряды, появляется *контактная разность потенциалов*. В полупроводнике концентрация дырок в приграничном слое уменьшится [$n \cdot p$ = Const, см. (1.5)], поэтому этот слой будет иметь повышенное удельное сопротивление.

Приложим к такому переходу внешнее электрическое поле: «+» источника э.д.с. E подключим к полупроводнику, а «–» к металлу. В этом случае внешнее электрическое поле будет направлено встречно внутреннему полю $E_{внутр}$, созданному зарядами в области перехода

металл-полупроводник (рис. 1.10). Сопротивление приконтактного слоя уменьшится и через переход потечёт ток.

Если сменить полярность внешнего источника, то внешнее электрическое поле еще более увеличит сопротивление приконтактного слоя.

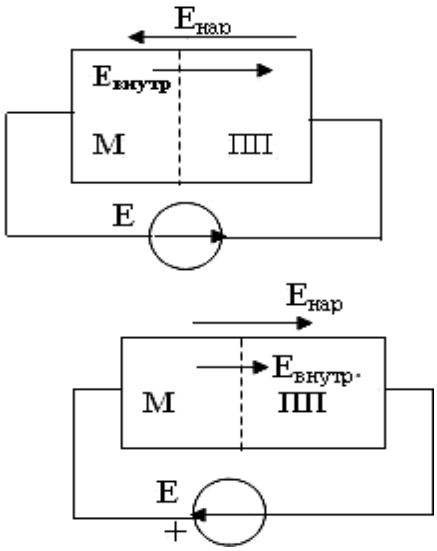


Рис. 1.10. Переход металл (М) – ПП
с внешним электрическим полем

В этом случае оба поля не препятствуют прохождению через барьер неосновных носителей заряда, однако их концентрация очень мала и ток ничтожно мал. Таким образом, переход между металлом и полупроводником не одинаково пропускает ток при разной полярности приложенного напряжения. Такой переход назван *барьером Шоттки*. Его главное свойство в том, что он обладает *вентильным* свойством (*односторонней проводимостью*), т.е. пропускает ток только в одном направлении. Аналогичное явление наблюдается, если рассмотреть контакт металла с полупроводником *n*-типа, у которого уровень Ферми выше, чем у металла.

Для практики особо важен случай, когда уровень Ферми металла меньше уровня Ферми ПП *p*-типа, либо выше уровня Ферми ПП *n*-типа. В этом случае граничный слой будет обогащаться основными носителями зарядов и удельное сопротивление граничного слоя понижается. Это явление используется для обеспечения малого переходного сопротивления (омического контакта) в месте присоединения металлических выводов к кристаллу полупроводника.

***p–n*-переход.** *p–n*-переход – это переход между двумя областями полупроводника, имеющими различный тип проводимости. Если концентрации зарядов одинаковы ($p_p \sim n_n$), то переход называется

симметричным. Обычно $n_n >> p_p$ или $p_p >> n_n$ (в 100 – 1000 раз) – такие переходы несимметричны.

Рассмотрим явления в *p* – *n*-переходе (рис. 1.11), например, если $p_p >> n_n$.

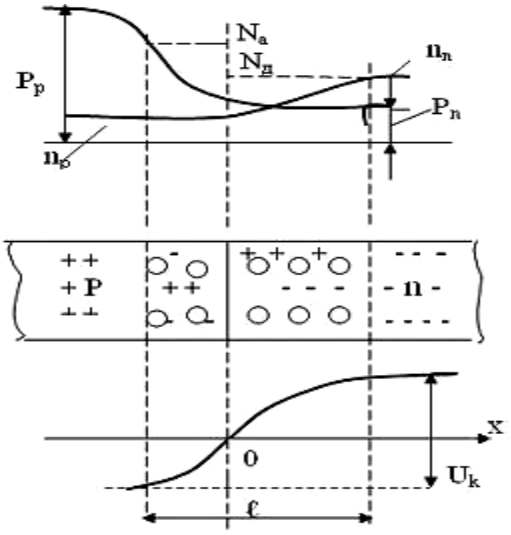


Рис. 1.11. *p–n*-переход без внешнего электрического поля

Так как концентрация дырок *p*-области больше, то дырки диффундируют из *p*-области в *n*-область, рекомбинируют с электронами этой области и создают в приграничной *n*-области повышенную концентрацию ионов донорной примеси (положительных зарядов). Электроны из *n*-области перемещаются в *p*-область, где их концентрация мала ($n_p << n_n$) и рекомбинируют с дырками, создавая повышенную концентрацию отрицательных ионов акцепторной примеси в приграничной *p*-области. Перемещение происходит до выравнивания потенциалов (уровней) Ферми приграничных областей.

Область образовавшихся неподвижных пространственных зарядов (ионов) называется *областью p–n-перехода*. В этой области концентрации основных носителей зарядов понижены, следовательно удельное сопротивление *p–n*-перехода выше, чем вдали от перехода. За пределами *p–n*-перехода заряды взаимно компенсируют друг друга, т.е. полупроводник в целом остается нейтральным. Поле, созданное объемными зарядами, уменьшает поток дырок из области *p* в область *n* и поток электронов из области *n* в область *p*, однако не препятствует потоку электронов из *p* области в *n* и потоку дырок из области *n* в область *p*, т.е. поле не препятствует прохождению неосновных носителей через переход. Эти носители имеют тепловое проис-

хождение. Суммарная плотность тока равна нулю, так как потоки неосновных носителей уравновешивают друг друга.

Таким образом, в зоне *p–n*-перехода образуется разность потенциалов, которую называют *потенциальным барьером* либо *контактной разностью потенциалов* U_k .

С некоторыми упрощениями [8] можно считать, что значение U_k зависит от концентрации зарядов:

$$U_k = \varphi_T \ln\left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}\right), \tag{1.7}$$

где N_a и N_d – соответственно концентрации акцепторной и донорной примесей;

n_i – собственная концентрация электронов.

Принято считать, что для германия (Ge) $U_k \approx 0{,}3B$, для кремния (Si) $U_k \approx 0{,}7B$.

1.3. Смещение *p–n*-перехода

Смещением *p–n*-перехода называют подачу на переход напряжения постоянного тока. Если «+» источника приложить к области *p*, а «–» к области *n* (непосредственно или через другие элементы), то считается, что на переход подано *прямое смещение*. В этом случае потенциальный барьер уменьшится и станет равным $U_1 = U_k - U$ (рис. 1.12). Условный исходный размер *p–n*-перехода l_0 уменьшится ($l_{см}$ на рис. 1.12) вместе с уменьшением потенциального барьера ($U_1 < U_k$).

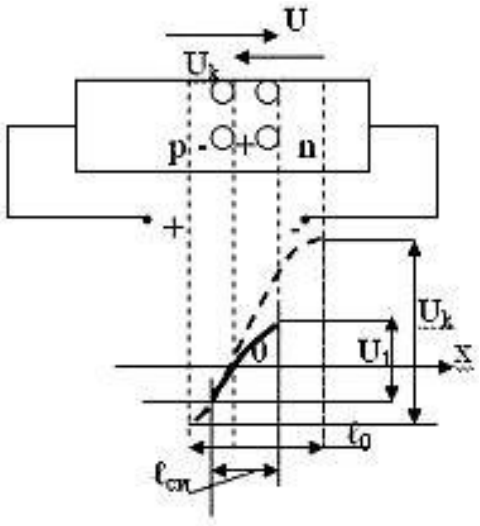


Рис. 1.12. *p–n*-переход при прямом смещении

Картина сохраняется до тех пор, пока $|U_k| > |U|$, ток будет еще мал. Расчетный (условный) размер смещённого *p–n*-перехода:

$$l_{см} = \sqrt[n]{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U_k - U)}{qN_d}}. \qquad (1.8)$$

Ток увеличится незначительно, так как обусловлен диффузионным движением носителей заряда, перемещение которых увеличивается с уменьшением размера перехода и барьера.

Если $U_k = U$, барьер исчезает, ток диффузии увеличивается, через барьер течет ток, называемый *прямым током*. Прямой ток обусловлен токами *дрейфа и диффузии*.

Ток диффузии обусловлен разностью концентраций носителей, а *ток дрейфа* – приложенным напряжением и сопротивлением *p–n*-перехода. Здесь наблюдается явление *инжекции* – введение носителей заряда через переход в ту область, где эти заряды не являются основными (электронов из *n*-области в *p*-область и дырок из *p*-области в *n*-область), из области с большей концентрацией в область с малой концентрацией. Инжекция зарядов происходит из области с малым удельным сопротивлением в область с большим удельным сопротивлением.

Инжектирующий слой с большой концентрацией зарядов (малым удельным сопротивлением) называют *эмиттером*. Слой с малой удельной концентрацией зарядов (большим удельным сопротивлением) называют *базой.*

Установлено, что прямой ток основных носителей заряда, возникающий за счет снижения потенциального барьера, связан с приложенным напряжением экспоненциальным соотношением:

$$I_t' = I_{t0} \cdot e^{\frac{u}{\varphi_T}}, \qquad (1.9)$$

где I_{t0} – ток, протекающий через *p–n*-переход, находящийся в равновесном состоянии (*тепловой ток, обратный ток насыщения*).

Однако существует и ток диффузии, направленный встречно, обусловленный тепловым состоянием. Тогда можно считать, что

$$I_{пр} = I_t' - I_{t0} = I_{t0} \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1), \qquad (1.10)$$

где I_{np} – прямой ток через барьер. Особую роль играет ток I_{t0} – обратный ток насыщения. Экспериментально доказано, что он экспоненциально зависит от температуры.

Обратное смещение *p–n*-перехода. Приложим «+» к *n*-области, а «–» к *p*-области полупроводника, т.е. обеспечим обратное смещение на *p–n*-переходе (рис. 1.13). Теперь потенциальный барьер увеличится ($U_1=U_k + U$), движение основных зарядов будет затруднено. Ток через переход будет обусловлен неосновными носителями зарядов, которые «вытягиваются» из областей полем обратной полярности. Этот процесс называется «*экстракцией*». В результате через обратносмещённый переход будет протекать малый *обратный ток*.

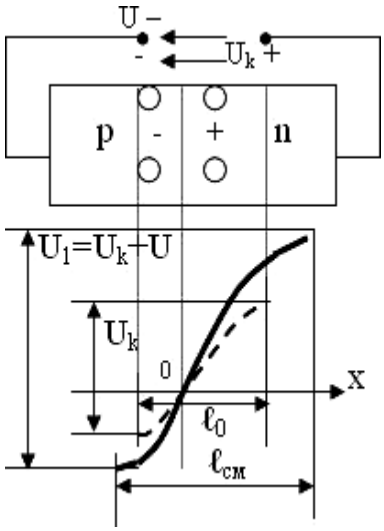


Рис. 1.13. *p–n*-переход при обратном смещении

Величину обратного тока через переход определим аналогично (1.10), учитывая, что приложенное напряжение значительно больше величины теплового потенциала ($U >> \varphi_t$).

Тогда обратный ток определится по формуле:

$$I_{np} = I_{t0} \cdot \left(e^{\frac{u}{\phi_t}} - 1 \right) \approx -I_{t0} \quad . \tag{1.11}$$

По выражениям 1.10, 1.11 можно сделать вывод о том, что *p–n*-переход обладает *вентильным* свойством, которое заключается в том, что при прямом смещении через переход протекает прямой ток, зависящий от приложенного напряжения по экспоненциальному закону, а в случае обратного смещения через *p–n*-переход течет ма-

лый обратный ток (тепловой ток), который практически от напряжения не зависит, но увеличивается по экспоненциальному закону с увеличением температуры.

Условный исходный размер p – n-перехода l_0 при наличии обратного смещения возрастает до величины $l_{см}$ (рис. 1.13) вместе с увеличением потенциального барьера ($U_1 > U_k$).

Зависимость тока через p–n-переход от приложенного к нему напряжения называют *вольт-амперной характеристикой (ВАХ) p–n-перехода* (рис. 1.14).

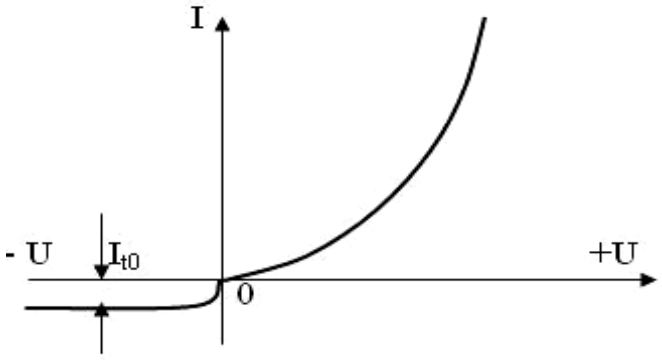


Рис. 1.14. Идеализированная ВАХ p–n-перехода

1.4. Емкость p–n-перехода

Рассматривая электропроводность p–n-перехода при приложении к нему внешнего электрического поля, можно видеть, что толщина p–n-перехода изменяется (модулируется), а по обе стороны границы перехода имеются объемные электрические заряды. Следовательно, p–n-переход должен обладать определенной емкостью. Различают две составляющих емкости: *барьерную*, отражающую перераспределение зарядов в p–n-переходе, и *диффузионную*, отражающую перераспределение зарядов вблизи p–n-перехода. При прямом смещении проявляется в основном диффузионная емкость $C_{диф}$. При обратном смещении большую роль играет барьерная емкость $C_{бар}$ [2].

Емкость $C_{бар}$ обусловлена наличием в p–n-переходе ионов донорной и акцепторной примесей, как бы образующих две обкладки конденсатора:

$$C_{бар} = \left(\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l_{см}} \right) \cdot \sqrt[n]{\frac{U_k}{U_k + |U|}}, \qquad (1.12)$$

где U_k – значение контактной разности потенциалов;

U – приложенное напряжение;

l_0 – толщина p–n перехода при $U = 0$;

– относительная диэлектрическая проницаемость материала;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

S – площадь поперечного сечения p–n-перехода;

$n = 2$ для резких переходов, $n = 3$ для плавных переходов.

С увеличением приложенного обратного напряжения барьерная емкость $C_{бар}$ уменьшается из-за увеличения толщины перехода. Величина $C_{диф}$ отражает физический процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных вследствие изменения концентраций инжектированных носителей при изменениях приложенного напряжения. $C_{диф}$ значительно меньше $C_{бар}$ и очень слабо зависит от приложенного напряжения. Зависимость барьерной ёмкости от напряжения (рис. 1.15) ощутимее, поэтому часто используется в электронике.

$C_{диф}$ зависит от величины прямого тока, протекавшего через p–n-переход в момент начала изменения приложенного напряжения. Это имеет важное значение при изготовлении быстродействующих полупроводниковых приборов.

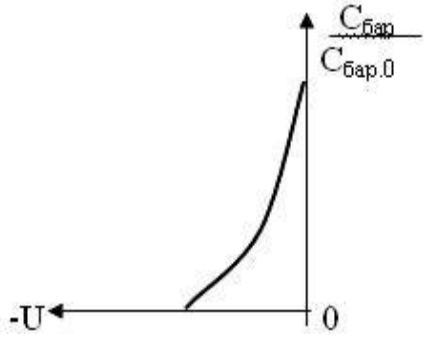


Рис. 1.15. Зависимость $C_{бар}(U)$
при обратном смещении p–n-перехода

1.5. Пробой *p*–*n*-перехода

Пробоем называется значительное уменьшение сопротивления перехода при обратном смещении, сопровождающееся возрастанием обратного тока. Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой.

Туннельный пробой обусловлен туннельным эффектом, т.е. прохождением электронов сквозь потенциальный барьер (из валентной зоны одного полупроводника в зону проводимости другого), высота которого больше, чем энергия носителей заряда (рис. 1.16) [9].

В этом случае энергетические зоны искривляются настолько, что $\varphi_{vp} > \varphi_{cn}$, т.е. энергия электронов валентной зоны полупроводника *p*-типа становится равной энергии электронов зоны проводимости полупроводника *n*-типа.

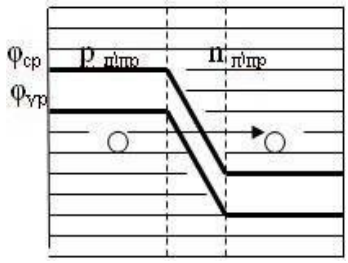


Рис. 1.16. Зонные диаграммы
при тунельном пробое

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, когда напряженность электрического поля при обратном смещении так велика, что неосновные носители заряда, движущиеся через *p–n*-переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами ионизируют их. Появляются пары электрон-дырка, которые ускоряются и ионизируют другие атомы. Процесс нарастает лавинообразно, при этом величина тока ограничивается только внешним сопротивлением.

Ток лавинного пробоя можно приближенно определить по формуле:

$$I_{лав} = M_л I_{обр}, \qquad (1.13)$$

где $M_л$ – коэффициент лавинного умножения.

Лавинный пробой возникает в сравнительно высокоомных ПП, (имеющих большое удельное сопротивление, т.е. малую концентрацию основных носителей) и при достаточно большой ширине *p–n*-перехода.

ВАХ перехода при различных видах пробоев показаны на рис. 1.17. Напряжение лавинного пробоя зависит от температуры и увеличивается с ее ростом (из-за сокращения длины свободного пробега носителей заряда).

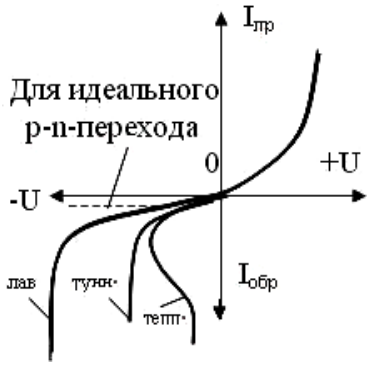


Рис. 1.17. ВАХ реального *p–n*-перехода

Тепловой пробой возникает в результате разогрева *p–n*-перехода, когда количество тепла, выделяемое током в *p–n*-переходе, больше количества тепла, отводимого от него. Известно, что увеличение температуры приводит к увеличению интенсивности генерации электронно-дырочных пар, что выражается в увеличении обратного тока по экспоненциальному закону. Это в свою очередь увеличивает температуру *p–n*-перехода, в результате чего наступает тепловой пробой. ВАХ *p–n*-перехода при тепловом пробое отличается от ВАХ при туннельном и лавинном пробоях (с увеличением тока теплового пробоя падает напряжение, приложенное к *p–n*-переходу).

1.6. Полупроводниковые диоды

Диод – это полупроводниковый прибор с одним *p–n*-переходом и двумя выводами. Рассмотренные выше свойства *p–n*-перехода дают возможность рассматривать свойства диодов путем анализа их ВАХ (рис. 1.18) Полупроводниковый диод можно получить из ПП с *p–n*-переходом, если снабдить этот полупроводник омическими (металлическими) контактами. Наиболее распространены германиевые и кремниевые диоды.

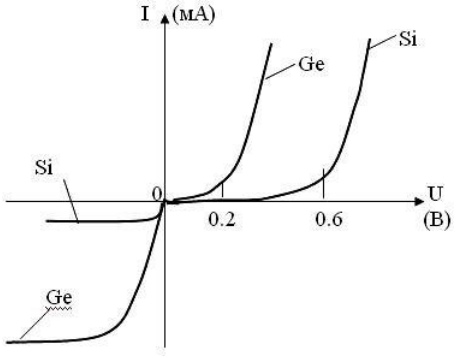


Рис. 1.18. ВАХ германиевого и кремниевого диодов

Краткая классификация диодов. Диоды, как наиболее многочисленные полупроводниковые приборы, классифицируют по различным признакам: назначению, конструкции, току и напряжению, по частоте, видам устойчивости к воздействиям внешней среды и т.д. (рис. 1.19) [13].

Назначение диодов. Различают диоды выпрямительные, импульсные, туннельные, обращенные и т.п.

Выпрямительные диоды используются для выпрямления переменного тока (преобразования переменного тока в постоянный). *Импульсные* диоды предназначены для работы в импульсных цепях, так как отличаются малой емкостью *p–n*-перехода и другими характеристиками, обеспечивающими быстродействие. Разновидность импульсных диодов – диоды Шоттки, выполненные на основе перехода металл-полупроводник, отличающиеся очень малыми (нА) обратными токами.

Рис. 1.19. Примерная классификация диодов

Туннельные диоды (ТД) – диоды, в которых туннельный эффект приводит к появлению на ВАХ участка с отрицательным сопротивлением (рис. 1.20). Участок 0-1 (рис. 1.20) определяется дрейфовым током. Участок 1-2 имеет отрицательное сопротивление. Участок 2-3 определяется диффузионным током. ТД используют в генераторах высокой частоты (до 1 ГГц).

Обращенный диод служит для выпрямления малых напряжений.

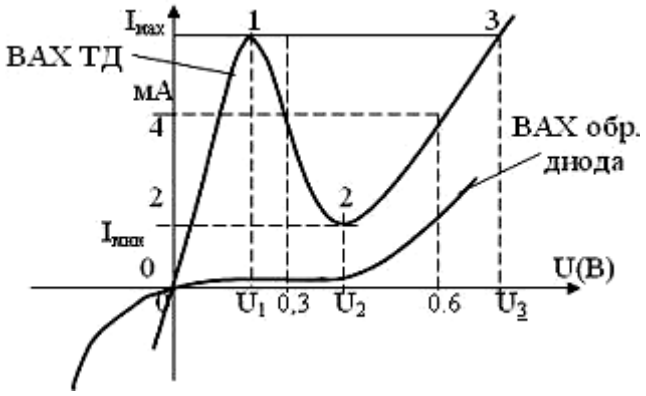


Рис. 1.20. ВАХ туннельного и обращенного диодов

Стабилитроны – полупроводниковые диоды, напряжение на которых в области электрического пробоя слабо зависит от тока. Предназначены для стабилизации напряжения.

Варикапы – полупроводниковые диоды, предназначенные для использования в качестве емкости, управляемой электрическим напряжением. Варикап работает при обратном смещении *p–n*-перехода, его емкость определяют согласно формуле:

$$C = C_0 \cdot \left[\frac{U_k}{U_k + |U|} \right]^{\frac{1}{n}}, \qquad (1.14)$$

где n =2 для резких и n = 3 для плавных переходов;

U_k – значение контактной разности потенциалов;

U – приложенное обратное напряжение;

C_0 – начальная емкость *p–n*-перехода.

Варикап, используемый в умножителях частоты, называют *варактором*.

Фотодиоды, светодиоды – диоды, использующие эффект взаимодействия оптического излучения (видимого, инфракрасного) с носителями заряда в зоне *p–n*-перехода. В фотодиодах при облучении повышается обратный ток, в светодиодах в режиме прямого тока в зоне *p–n*-перехода возникает видимое или инфракрасное излучение.

Имеются еще *магнитодиоды, тензодиоды,* в которых меняется электропроводность под действием магнитного поля или механических деформаций [9].

2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

2.1. Структура и принцип действия биполярного транзистора

Транзистор – прибор, содержащий два или более электронно-дырочных перехода, имеющий не менее трех выводов и пригодный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов.

Упрощенные структурные схемы и условные обозначения транзисторов изображены на рис. 2.1.

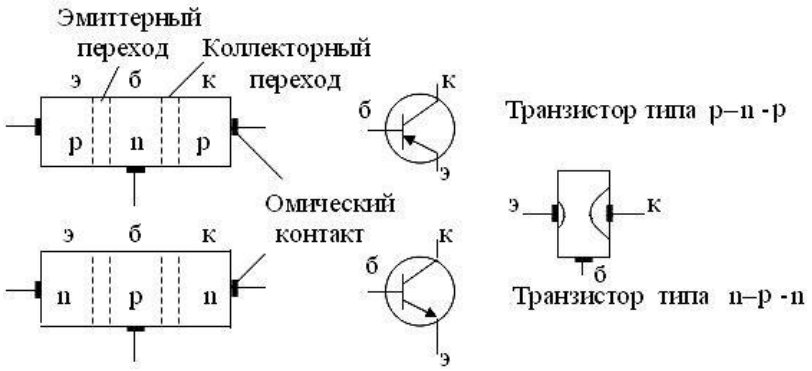


Рис. 2.1. Структурные схемы и условные графические обозначения (УГО) биполярных транзисторов

Транзистор изготавливается по специальной технологии на кристалле полупроводника путем создания трех областей с различной проводимостью. Средняя область – *база*, другие называются *эмиттер* и *коллектор*. Между областями образуется два *p–n*-перехода, связанных между собой. Область, являющаяся источником носителей заряда при прямом смещении, называют эмиттером. Область, выполняющая функцию собирания зарядов, называют коллектором. На практике этими терминами называют выводы прибора. Соответственно *p–n*-переходы называют эмиттерным и коллекторным. В обычном включении на эмиттер относительно базы подается напряжение, создающее прямое смещение, а на коллектор – обратное смещение. Иногда используется так называемое инверсное включение, при котором коллектор и эмиттер меняются местами. При этом можно

иметь различные способы включения транзистора: по схеме с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК). На рис. 2.2 изображены названные выше три способа включения биполярного транзистора со структурой *p–n–p* с указанием условных входа, выхода и обозначением электродов (э – эмиттер, к – коллектор, б – база). Показаны также направления протекания токов в электродах (выводах) транзистора.

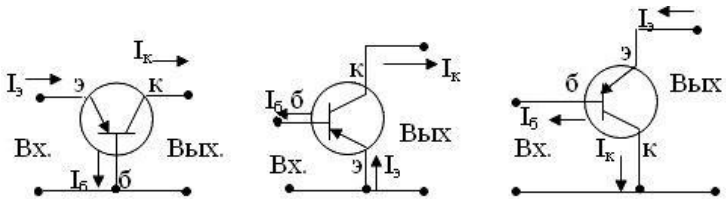


Рис. 2.2. Три схемы включения биполярного транзистора

Соединив между собой два любых электрода, можно получить различные диодные структуры.

Рассмотрим принцип действия транзистора, включив его по схеме с ОБ (рис. 2.3).

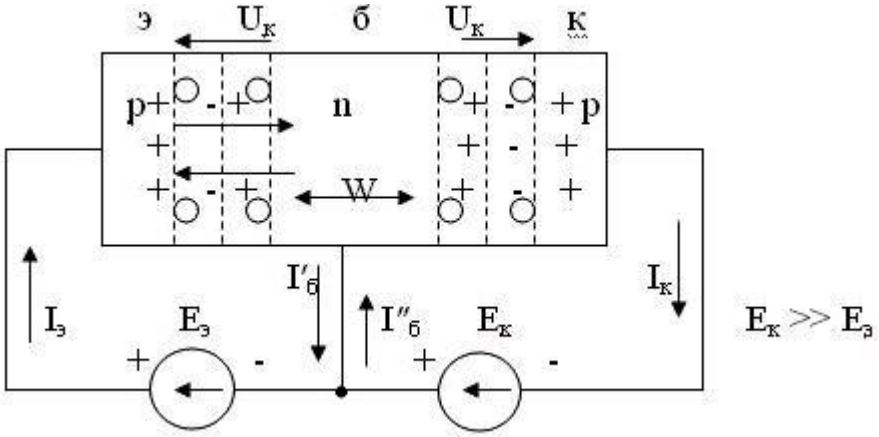


Рис. 2.3. Структурная схема включения транзистора по схеме ОБ

В структуре кристалла происходит инжекция дырок в область базы и встречное движение электронов в эмиттер, при этом

$$I_{эр} = \gamma \cdot I_э;\ \gamma = I_{эр} / I_э\ , \qquad (2.1)$$

где $I_{эр}$ – ток, обусловленный движением дырок;

$I_э$ – полный ток через эмиттерный *p–n*-переход;

γ – коэффициент инжекции.

Дырки, проникающие в базу, частично компенсируются притоком электронов от источника $E_э$, создавая ток $I_б$. Главная особенность лю-

бого транзистора – ширина базы во много раз меньше диффузионной длины:

$$W << 0{,}2 l_{диф},$$

где $l_{диф}$ – диффузионная длина (среднестатистическая величина свободного пути заряда).

По этой причине основные носители заряда из эмиттера (дырки) диффундируют в область базы и достигают второго *p–n*-перехода, смещённого в обратном направлении. Большинство дырок не успевают рекомбинировать с электронами и попадают вблизи коллекторного перехода в поле, втягивающее их в область коллектора (экстракция дырок). Электроны, число которых равно числу дырок, ушедших через коллекторный переход, уходят через базовый вывод, создавая составляющую тока базы $I'_б$.

Относительное число *неосновных для базы* носителей заряда (дырок), достигших коллекторного перехода, характеризуется коэффициентом переноса χ, показывающим, что только часть тока $I_{эр}$ достигает коллектора – это I_{kp}:

$$I_{kp} = \chi \cdot I_{эр}; \; \chi = I_{kp} / I_{эр}; \qquad (2.2)$$

где I_{kp} и $I_{эр}$ – дырочные составляющие токов коллектора и эмиттера.

Учитывая, что только часть носителей достигает коллектора, можем записать

$$I_{kp} = \alpha \cdot I_{эр}, \qquad (2.3)$$

где $\alpha = \gamma \cdot \chi = I_{kp} / I_э$ – коэффициент передачи тока в схеме ОБ.

Известно [18], что через коллекторный *p–n*-переход обязательно будет течь ток *неосновных для коллектора* носителей, создающих ток $I_{кбо}$ – неуправляемый ток *p–n*-перехода (обратный ток). Результирующий ток в коллекторной цепи:

$$I_k = \alpha \cdot I_э + I_{кбо} \; . \qquad (2.4)$$

2.2. Физическая нелинейная модель транзистора и эквивалентные схемы

Упрощенная эквивалентная схема идеализированного транзистора, имеющего структуру *p–n–p* [2], представлена на рис. 2.4.

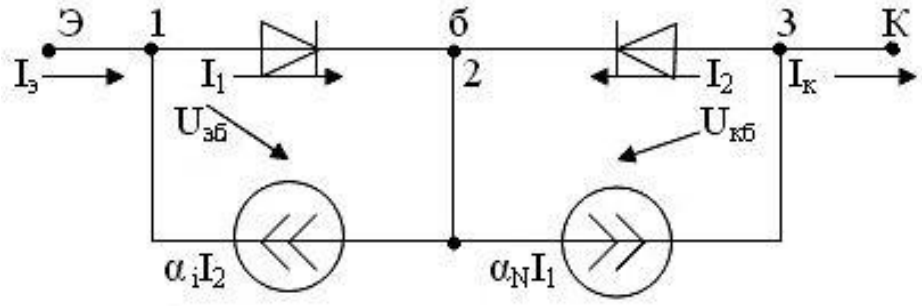


Рис. 2.4. Упрощенная эквивалентная схема биполярного транзистора

Коэффициенты α_i, α_N – это коэффициенты передачи тока, учитывающие тот факт, что не все заряды достигают соответствующих областей через переходы при инверсном (α_i) и прямом (нормальном) (α_N) включении ($\alpha_N < 1$, $\alpha_i << \alpha_N$). Формально можно записать:

$$\begin{aligned} I_э &= I_1 - \alpha_i \cdot I_2, \\ I_k &= \alpha_N \cdot I_1 - I_2. \end{aligned} \qquad (2.5)$$

Токи через *p–n*-переходы можно выразить известным способом через так называемые токи насыщения:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{нас.э}\left(e^{\frac{U_{эб}}{\varphi_T}} - 1 \right), \text{ если } U_{кб} = 0, \text{ а } U_{эб} > 0, \\ I_2 &= I_{нас.к}\left(e^{\frac{U_{кб}}{\varphi_T}} - 1 \right), \text{ если } U_{эб} = 0, \text{ а } U_{кб} < 0. \end{aligned} \qquad (2.6)$$

Токи I_1 и I_2 удобнее выразить через обратные токи переходов, учитывая, что в справочниках [15] приводятся значения именно обратных токов:

$$I_{эб\,о}, \text{ при } U_{кб} = 0 \text{ и } I_k = 0, U_{эб} < 0$$

$$I_{кб\,о}, \text{ при } U_{эб} = 0 \text{ и } I_э = 0, U_{кб} < 0$$

В этом случае

$$I_{нас.к} = \frac{I_{кб\ о}}{1-\alpha_i \cdot \alpha_N}; I_{нас.э} = \frac{I_{эб\ о}}{1-\alpha_i \cdot \alpha_N}. \qquad (2.7)$$

Возвращаясь к (2.5), с учетом (2.6, 2.7), получим:

$$I_э = \frac{I_{эб\ о}}{(1-\alpha_i \cdot \alpha_N)\cdot\left(e^{\frac{U_{эб}}{\varphi T}}-1\right)} - \frac{\alpha_i \cdot I_{кб\ о}}{(1-\alpha_i \cdot \alpha_N)\cdot\left(e^{\frac{U_{кб}}{\varphi T}}-1\right)},$$

$$I_к = \frac{\alpha_N}{(1-\alpha_i \cdot \alpha_N)\cdot I_{эб\ о}\cdot\left(e^{\frac{U_{эб}}{\varphi T}}-1\right)} - \frac{I_{кб\ о}}{(1-\alpha_i \cdot \alpha_N)\cdot\left(e^{\frac{U_{кб}}{\varphi T}}-1\right)}, \qquad (2.8)$$

$$I_б = I_э - I_к.$$

Полученная система уравнений носит название уравнения Эберса – Молла. Характеристики, соответствующие этим уравнениям, приведены на рис. 2.5.

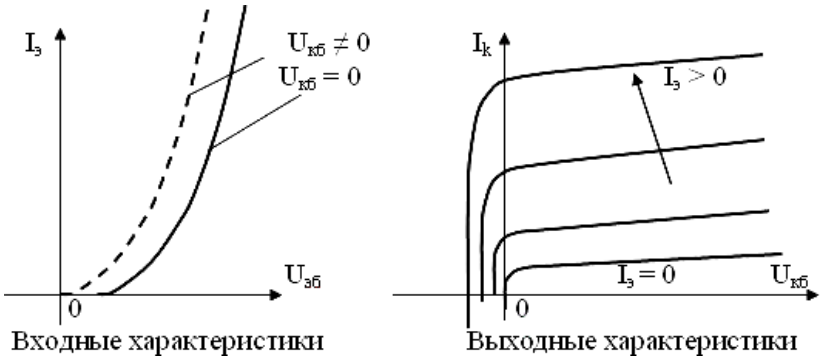


Рис. 2.5. Статические характеристики транзистора, включённого по схеме ОБ

Рассмотренная физическая модель нелинейна и применяется для анализа работы только при относительно больших изменениях напряжения и тока.

Во многих случаях на фоне сравнительно больших постоянных составляющих токов и напряжений на транзистор действуют малые переменные составляющие. В этом случае эти составляющие могут анализироваться раздельно, причем при анализе переменных составляющих используются *малосигнальные эквивалентные схемы,* состоящие из линейных элементов. Параметры линейных элементов

получают линеаризацией исходных статических характеристик транзисторов в окрестности режима работы по постоянному току.

Наиболее часто встречается Т-образная эквивалентная схема. Для транзистора, включенного по схеме ОБ, Т-образная схема имеет вид, представленный на рис. 2.6.

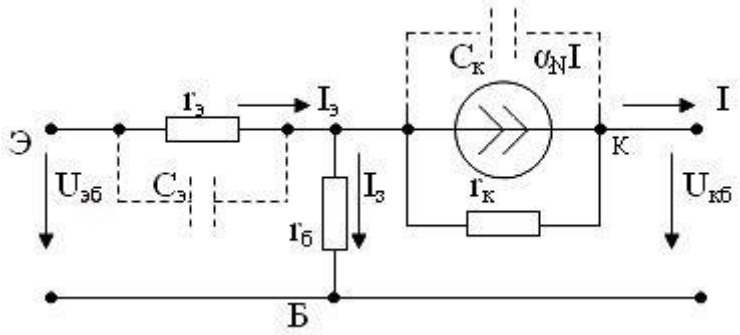


Рис. 2.6. Вариант Т-образной схемы замещения транзистора:
$r_э, r_k$ – дифференциальные сопротивления переходов;
$r_б$ – сопротивление базы; включение нормальное (неинверсное),
коэффициент передачи тока $\alpha_N = \alpha$; $C_к, C_э$ – ёмкости переходов

Т-образная схема (рис 2.6) не единственная. Наиболее распространенные варианты приводятся на рис. 2.7 и 2.8.

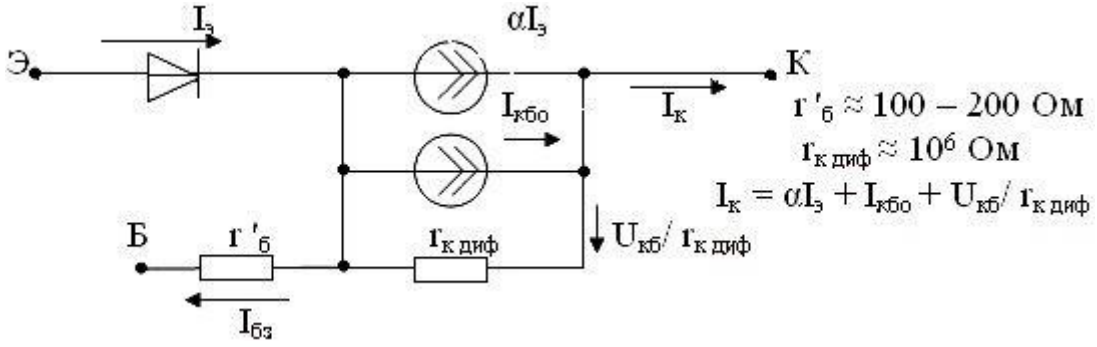


Рис. 2.7. Вариант схемы замещения транзистора,
включенного по схеме ОБ

Т-образная эквивалентная схема транзистора, включенного по схеме ОЭ, представлена на рис. 2.8. В схему введен диод, отражающий наличие *p–n*-перехода Э-Б. Ток базы $I_{бз}$ в цепи коллектора увеличивается в β раз, причем $\beta = \alpha/(1 - \alpha)$. Статические характерисики для схемы с ОЭ показаны на рис. 2.9.

В схеме замещения (рис. 2.8) отражается факт зависимости тока коллектора от тока базы и свойств транзистора, учитываемых коэффициентом β, который называется *коэффициентом усиления базового тока в схеме ОЭ*. Коэффициент передачи тока $\alpha < 1$, поэтому $\beta > 1$.

Анализируя выражения (2.8), можно заметить два важных обстоятельства:

1) при отсутствии тока базы (обрыв базы) обратный ток в цепи коллектор – эмиттер увеличивается многократно;

2) сопротивление коллекторного перехода $r'_{кдиф} << r_{кдиф}$, где $r_{кдиф}$ – сопротивление коллекторного перехода в схеме замещения ОБ (рис. 2.7).

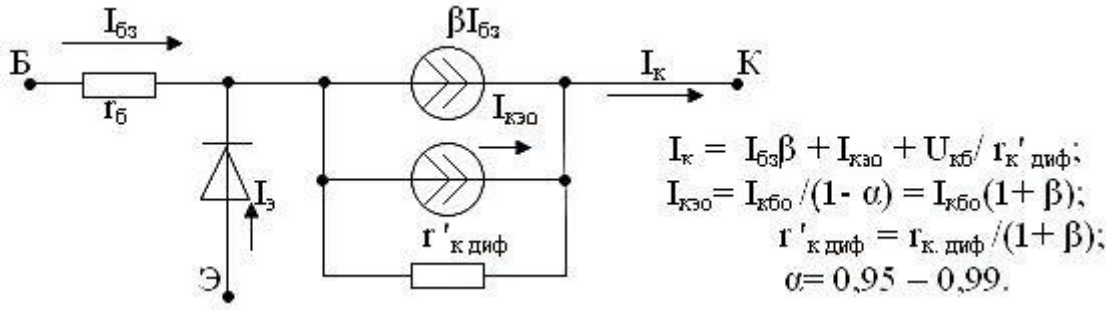


Рис. 2.8. Т-образная схема замещения транзистора, включённого по схеме ОЭ

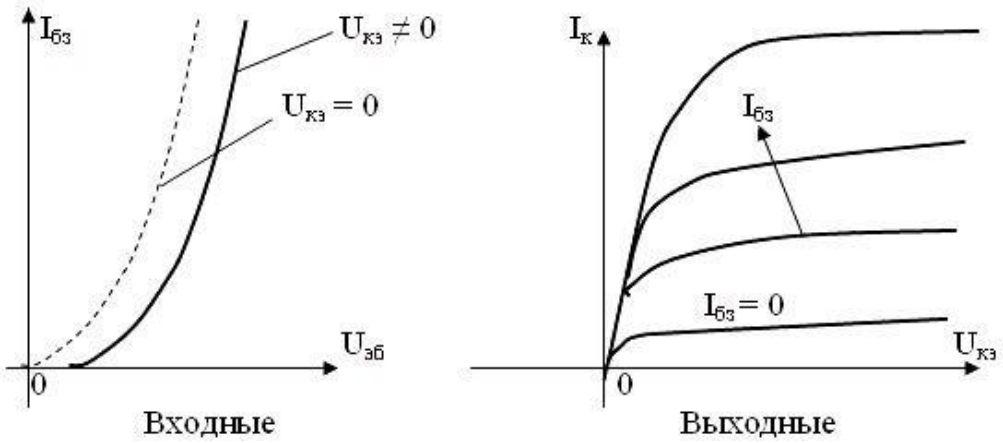


Рис. 2.9. Статические характеристики для схемы ОЭ

2.3. Способы включения биполярных транзисторов

В электрических схемах биполярные транзисторы могут включаться тремя различными способами: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) (рис. 2.2). Название способа включения происходит от названия того электрода биполярного транзистора, который в рассматриваемой схеме является общим для входного и выходного контуров электрической цепи.

Важность способа включения транзистора состоит в том, что схемы в зависимости от этого приобретают разные свойства при совершенно одинаковых параметрах транзисторов.

Примеры возможных способов включения транзисторов показаны на рис. 2.10.

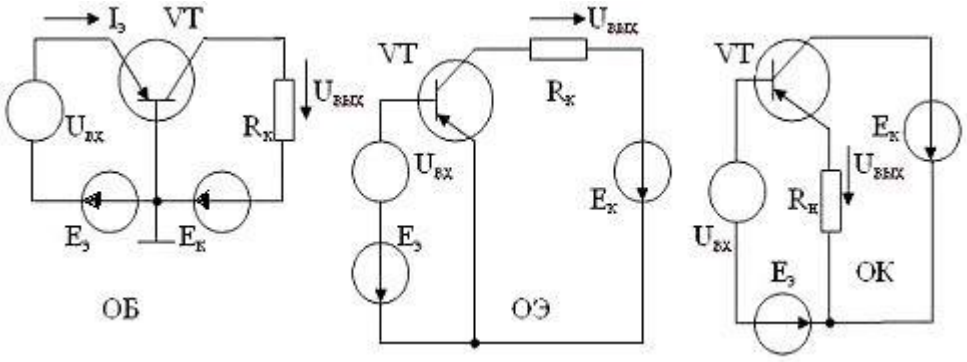


Рис. 2.10. Три способа включения биполярного транзистора в электрической схеме с источниками питания, смещения и входного сигнала:
$U_{вх}$ – входной (усиливаемый) сигнал; $E_э$, $E_к$ – источники эмиттерного и коллекторного смещений (внешние источники питания); R_k – резистор для ограничения тока в цепи коллектора в схемах ОБ и ОЭ (или сопротивление нагрузки); R_H – резистор (сопротивление нагрузки) в цепи эмиттера схемы ОК

Отличительным признаком схемы ОК является отсутствие ограничивающего резистора в цепи коллектора. Схему ОК часто называют *эмиттерным повторителем*.

Каждая из схем использует биполярный транзистор в качестве элемента, обеспечивающего усиление входного сигнала $U_{вх}$. Стрелки напряжения $U_{вх}$ не показаны, так как это напряжение может быть положительным, отрицательным либо переменным. Рассматриваемые схемы обладают разными свойствами при совершенно одинаковых, включенных по-разному, транзисторах.

Принцип усиления входного сигнала для схем одинаков. Он состоит в том, что входной сигнал воздействует на базовую (управляющую) цепь транзистора и вызывает изменение сопротивления основной (управляемой) цепи (коллектор – эмиттер) транзистора, вследствие чего ток в этой цепи, созданный источником питания, будет изменяться, обеспечивая изменение выходного напряжения $U_{вых}$. При этом вследствие нелинейности характеристик транзистора малые изменения $U_{вх}$ могут вызвать гораздо большие изменения выходного сигнала $U_{вых}$, создавая эффект усиления входного сигнала.

Области использования схем определяются их разными свойствами, наибольшее распространение получили схемы ОЭ и ОК.

2.4. Основные режимы работы транзистора

Различают три основных режима работы транзистора: активный, отсечки, насыщения.

Активный режим – нормальный: эмиттер смещен в прямом направлении, коллектор – в обратном. *Инверсный режим* – наоборот. В уравнениях в нормальном активном режиме $U_{эб}$ имеет знак «+», $U_{кб}$ имеет знак «–».

Режим отсечки: глубокая отсечка – оба перехода смещены в обратном направлении, причем модули этих напряжений должны быть:

$$U > (3 – 5)\, m\, \varphi_T,$$

где $m \approx (1{,}5 – 2)$.

В режиме отсечки $I_к = I_{кбо.}$ Режим отсечки характеризует закрытое состояние транзистора (транзистор заперт), при котором его сопротивление максимально, токи – минимальны.

Режим насыщения характеризует открытое состояние транзистора, когда его сопротивление минимально, а токи определяются внешними источниками, но не должны превышать некоторых допустимых значений. В режиме насыщения оба перехода транзистора с помощью внешних напряжений смещены в прямом направлении. Напряжение транзистора $U_{кэ}$ минимально:

$$U_{кэ\ нас} \approx \varphi_T(1 – \alpha_i) / \alpha_i. \qquad (2.9)$$

Ток коллектора $I_к \leq I_{к\ max}$.

Режим отсечки и насыщения широко используется в электронных ключах. Достигаются эти режимы различными способами, в том числе и изменением подводимых к транзистору напряжений.

2.5. *h*-параметры биполярного транзистора

Транзистор можно представить в расчетном отношении как активный четырехполюсник, имеющий два входных и два выходных зажима (рис. 2.11). Это представление во многих случаях существенно упрощает расчеты схем с транзисторами.

Согласно теории электрических цепей [11] связь между токами и напряжениями четырехполюсника может быть показана с помощью системы уравнений:

$$U_1 = h_{11}\, i_1 \; + \; h_{12}\, U_2 \,,\; i_2 = \; h_{21}\, i_1 + h_{22}\, U_2. \qquad (2.10)$$

Коэффициенты *h*, входящие в уравнения, получили название «*h-параметры*».

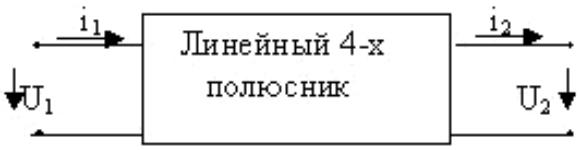


Рис. 2.11. Четырехполюсник – аналог транзистора:
i_1, i_2 – входной и выходной токи, V_1, V_2 – входное и выходное напряжения

Физический смысл этих коэффициентов выясняется, если рассматривать два характерных режима: холостой ход (ХХ) и короткое замыкание (КЗ) на входе и выходе четырехполюсника. Режим ХХ характеризуется отсутствием тока при наличии напряжения, режим КЗ – отсутствием напряжения при наличии тока. В этих случаях:

$h_{11} = U_1/i_1\,(U_2 = 0)$ – входное сопротивление при КЗ на выходе;

$h_{12} = U_1/ U_2\;(i_1 = 0)$ – коэффициент передачи напряжения при ХХ на входе (коэффициент обратной связи по напряжению);

$h_{21} = i_2 / i_1\;(U_2 = 0)$ – коэффициент передачи тока при КЗ на выходе;

$h_{22} = i_2 / U_2\,(i_1 = 0)$ – выходная проводимость при ХХ на входе.

В усилительных устройствах с транзисторами *h*-параметры определяют обычно по соотношениям между приращениями токов и напряжений. Например, для схемы с общим эмиттером:

$$\Delta\, U_{бэ} = \; h_{11э}\,\Delta\, I_{бз} + \; h_{12э}\,\Delta U_{кэ}, \qquad (2.13)$$
$$\Delta\, I_к = \; h_{21э}\,\Delta\, I_{бз} + \; h_{22э}\,\Delta\, U_{кэ}.$$

Получив опытным путем входные и выходные характеристики, можно вычислить *h*-параметры, как частные производные в заданных точках характеристик, полагая неизменными нужные величины. Например, в схеме ОЭ:

$$h_{11э} = \left.\frac{\Delta\, U_{бэ}}{\Delta\, I_{бз}}\right|_{\substack{U_{кэ} = \text{Const} \\ (\Delta\, U_{кэ} = 0)}} \qquad h_{12э} = \left.\frac{\Delta\, U_{бэ}}{\Delta\, U_{кэ}}\right|_{I_{бз} = \text{Const};} \qquad (2.14)$$

$$h_{21э} = \left.\frac{\Delta\, I_к}{\Delta\, I_{бз}}\right|_{\substack{U_{кэ} = \text{Const} \\ (\Delta\, U_{кэ} \; = 0)}} \quad ; \quad h_{22э} = \left.\frac{\Delta\, I_к}{\Delta\, U_{кэ}}\right|_{I_{бз} = \text{Const};}$$

h-параметры определяются для любой из трех схем включения транзистора, чаще всего используются $h_{ппэ}$, причем система

h-параметров позволяет в расчетах использовать обобщенную схему замещения транзистора для *h*-параметров, показанную на рис. 2.12.

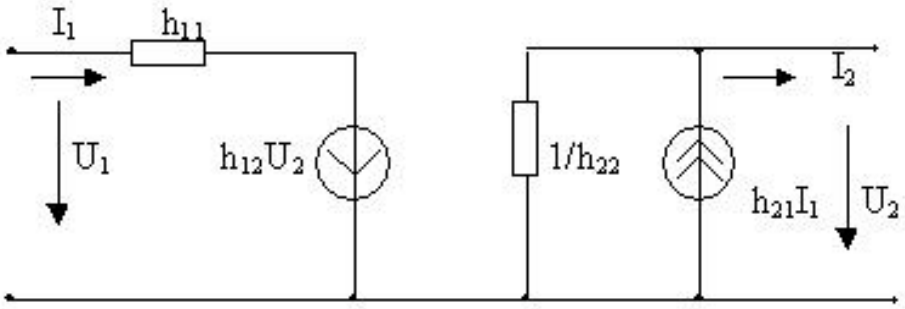


Рис. 2.12. Обобщенная схема замещения биполярного транзистора

Упрощенные (пренебрегаем h_{12}) схемы замещения транзисторов для *h*-параметров будут иметь вид, представленный на рис. 2.13.

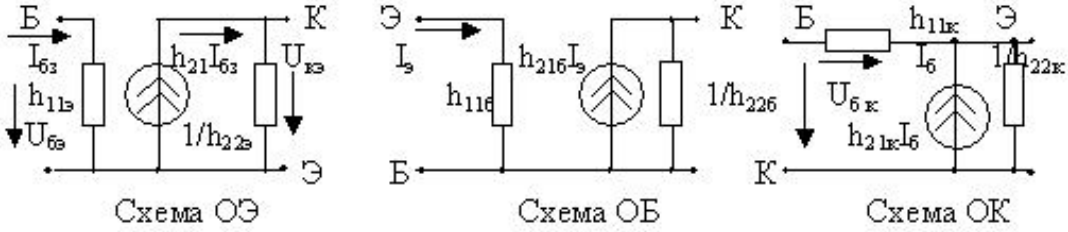


Рис. 2.13. Схемы замещения транзисторов в *h*-параметрах

2.6. Основные параметры биполярных транзисторов

К основным параметрам биполярных транзисторов относятся:

1. Коэффициенты $h_{21э}$, $h_{21б}$, $h_{21к}$ – это коэффициенты передачи тока (коэффициенты усиления по току) (в схеме ОЭ $h_{21э}$ – это β, в схеме ОБ $h_{21б}$ – α).
2. Граничная частота для коэффициента передачи тока – это частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается до 1.
3. Частота усиления $f(h_{21})$ – это частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз – этим значением определяется так называемая полоса пропускания частот, т.е. диапазон частот, в которых характеристики усиления удовлетворительны.
4. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода в схеме ОЭ

$$h_{11э} = r_{э\ диф} = \left.\frac{dU_{бэ}}{dI_{бэ}}\right|_{U_{кэ} = Const}$$

(Значения $h_{11э}$ – Омы, десятки Ом).

5. Выходная проводимость $h_{22э}$ связана с дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода.

$$\frac{1}{h_{22э}} = r_{к\ диф} = \frac{d\,U_{кэ}}{d\,I_к}\Bigg|_{I_б = Const}$$

6. Коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12э} = \frac{d\,U_{бэ}}{d\,U_{кэ}}\Bigg|_{I_б = Const},\ h_{12э} \approx 10^{-3} \cdot 10^{-4}$$

7. Объемное сопротивление базы: $r_б$ = (десятки – сотни Ом).

8. Емкость коллекторного перехода $C_к$. Это фактически барьерная емкость коллекторного перехода $C_к \approx (5 – 50)\ pF$.

9. Максимальная частота генерации:

$$f_{макс} \approx \sqrt{\frac{f\,(h_{21б})}{30 r_б\, C_к}}$$

где $f_{макс}$ – это наибольшая частота, при которой транзистор может работать (способен работать в схеме автогенератора).

10. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении: $I_{кбо} = I_к$ при $I_э$=0, $U_{кб}$<0. О значении этого тока говорилось выше. Величина тока $I_{кбо}$ от μA до нескольких мА в зависимости от мощности и качества изготовления транзистора.

11. Максимально допустимый ток коллектора – $I_{к\ макс.}$

12. Наибольшая допустимая мощность рассеяния коллектора:

$$P_{к\ макс} = I_{к\ макс}\, U_{кэ}\,.$$

13. Тепловое сопротивление между коллектором и корпусом:

$$R_т = \Delta T / P_{к\ макс}\,,$$

где ΔT – перепад (градиент) температур между коллектором и корпусом.

Следует помнить, что приведенные в справочных материалах параметры транзисторов определены для заданного диапазона их изменения, т.е. для определенных режимов работы и в заданном диапазоне температур. Поэтому для представления о том, как будут меняться параметры, в литературе [15, 18] приводятся обобщенные зависимости физических параметров от режима работы и от температуры. Вид этих зависимостей (например, для схемы ОЭ) представлен на рис. 2.14.

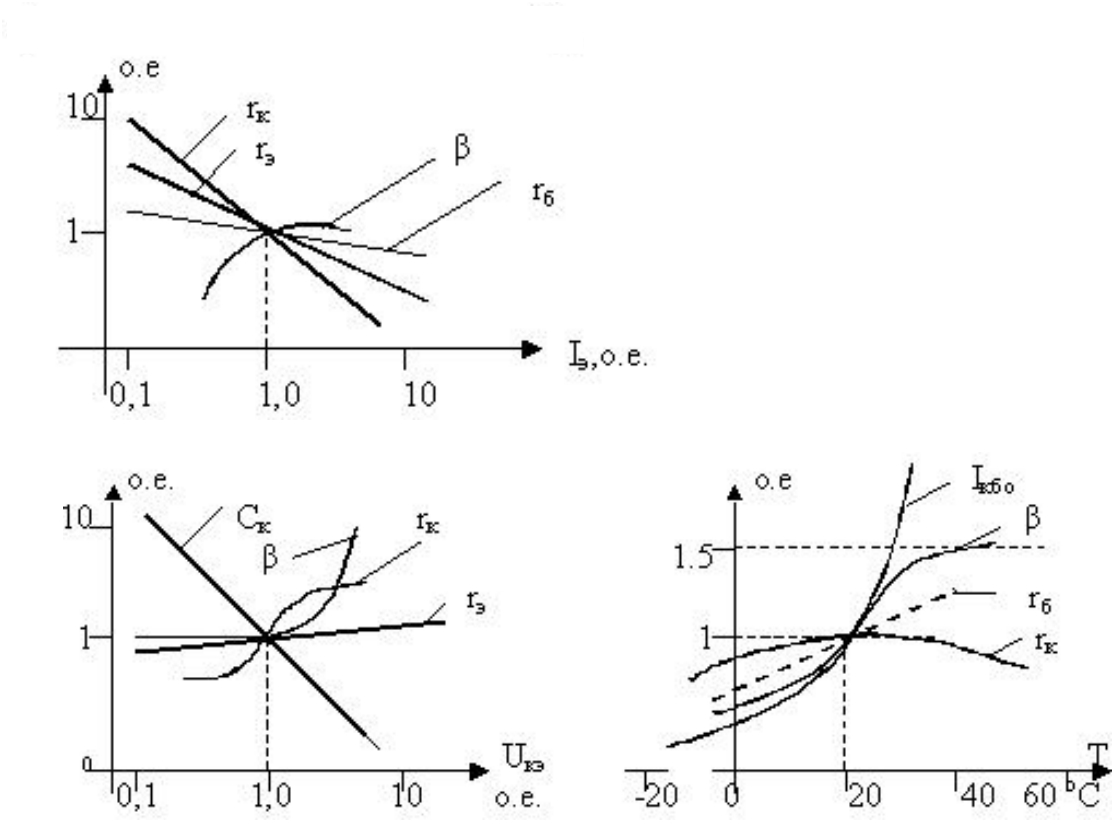


Рис. 2.14. Примерный вид обобщенных зависимостей физических параметров биполярных транзисторов от тока $I_э$ (а), напряжения $U_{кэ}$ (б) и температуры Т (в)

Известно, что для Ge *p–n*-переходов максимально допустимая температура 80 ÷ 100 ºС, для – 150 ÷ 200 ºС.

2.7. Транзисторы с инжекционным питанием

Интересным развитием биполярных транзисторов являются полупроводниковые приборы с инжекционным питанием (предложены в 1971 году, используются в составе микросхем) [7, 9]. Благодаря особой конструкции, эти приборы обладают весьма полезными свойствами. В составе интегральных схем (их называют $И^2Л$ – элементы)

они позволяют получить высокую степень интеграции, так как для их действия требуется очень малая энергия переключения $Э_n = 10^{-12}$ Дж. Хорошо работают в диапазоне температур от – 60 до + 125 ^{0}С. Особенностями являются: инверсный режим (по схеме), ключевой режим (по действию), небольшой логический уровень высокого и низкого напряжений U^1 = (0,6 – 0,7) В, U^0 =(0,1 – 0,2) В, наличие общего для групп четвертого электрода – инжектора, высокое

быстродействие ($t_{здр} \approx 10$ нс). Упрощенная структура транзистора и УГО представлены на рис. 2.15.

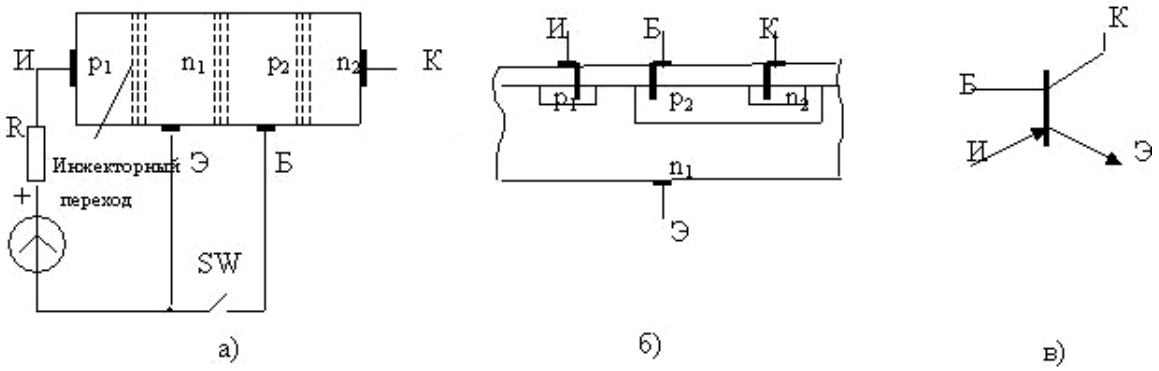


Рис. 2.15. И^{2}Л-элемент: структуры (*а*), (*б*) и УГО (*в*):
И – инжектор, SW – ключ

Принцип действия И^{2}Л-элемента: заряды инжектируются в область P_1, область эмиттера обогащается, поэтому понижается барьер перехода n_1–p_2, а следовательно и перехода p_2–n_2. Между эмиттером и коллектором образуется малое сопротивление (возникает режим насыщения). Если эмиттер соединить с базой, замкнув ключ SW, то сопротивление перехода p_2–n_2 резко увеличивается (возникает режим отсечки). Роль ключа SW может выполнять такой же точно транзистор, а инжектор у них будет общим.

3. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, работа которого обусловлена током основных носителей зарядов, протекающим через проводящий канал, сопротивление которого модулируется (управляется) электрическим полем. Другое название – *униполярные* транзисторы – обусловлено тем, что ток в них создается носителями заряда одного знака (электронами или дырками). Полевые транзисторы имеют определенные преимущества перед биполярными транзисторами, такие как высокое входное сопротивление, малые мощности для управления, высокие частотные свойства, возможность работы при низких температурах, высокая технологичность изготовления.

Полевые транзисторы делятся на транзисторы с затвором в виде *p*–*n*-перехода (с управляющим *p*–*n*-переходом) и с изолированным затвором [со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП – транзисторы)], (другое название МОП-транзисторы).

3.1. Транзистор с управляющим *p*–*n*-переходом

Транзистор с управляющим *p*–*n*-переходом представляет собой пластину (участок) полупроводника *p* или *n* типа, от торцов которой сделаны отводы, называемые сток и исток, а вдоль пластины выполнен электрический переход (*p*–*n*-переход или барьер Шоттки), имеющий свой вывод, называемый затвором. На затвор подается такое по отношению к истоку напряжение, чтобы *p*–*n*-переход между затвором и кристаллом был смещен в обратном направлении (рис. 3.1).

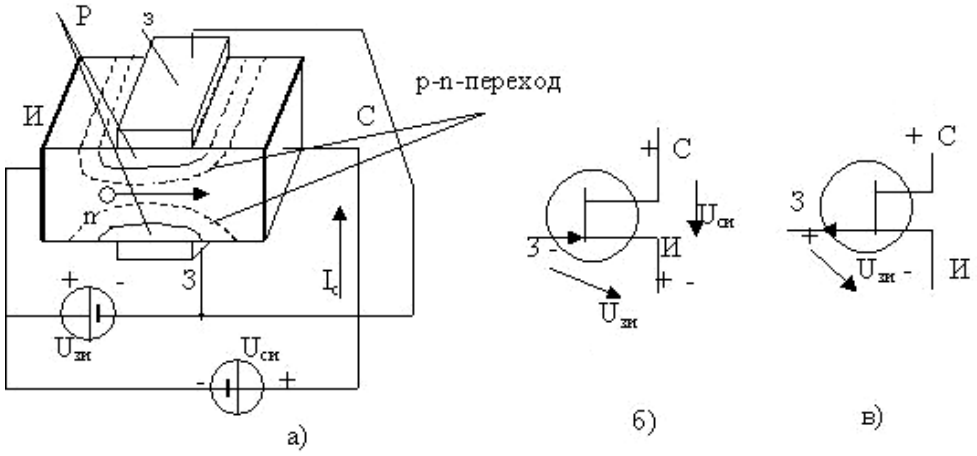


Рис. 3.1. Структура и УГО транзистора с управляющим *p*–*n*-переходом и каналом *n*-типа (*а*), (*б*); УГО транзистора с каналом *p*-типа (*в*)

Статические характеристики полевого транзистора с управляющим *p–n*-переходом и каналом *n*-типа представлены ниже на рис. 3.2.

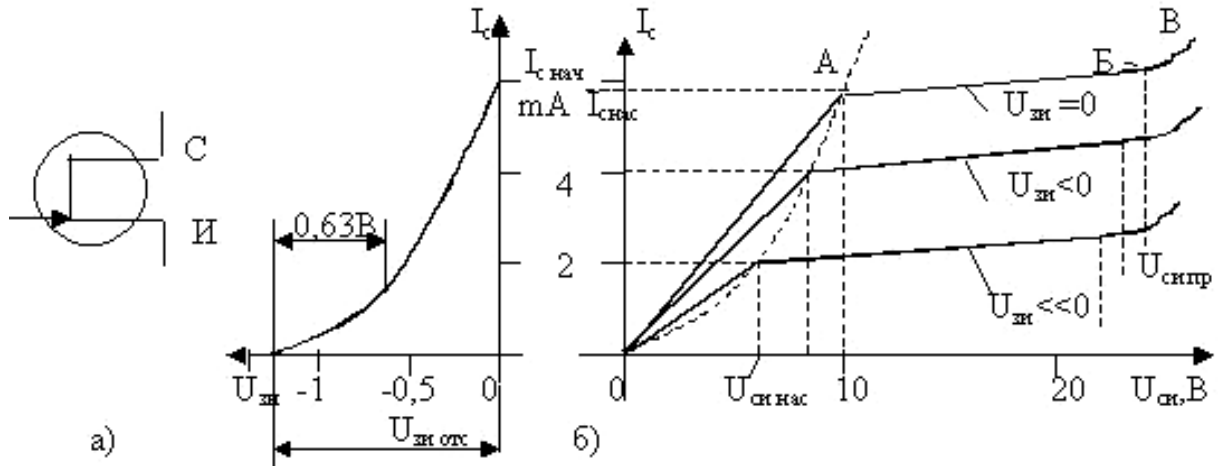


Рис. 3.2. Стоко-затворная (*а*) и выходные (*б*) статические характеристики полевого транзистора с управляющим *p–n*-переходом и каналом *n*-типа

Ток стока, при котором достигается значение тока насыщения, называется *начальным током стока* (обозначено $I_{с\ нач}$). Напряжение $U_{си}$, при котором происходит насыщение канала, называется *напряжением насыщения* (обозначено $U_{си\ нас}$). Напряжение $U_{зи}$, при котором ток стока $I_с$ =0, называется *напряжением отсечки* (обозначено $U_{зи\ отс}$). Значения токов насыщения $I_{снас}$ и напряжений $U_{си\ нас}$ зависят от значений $U_{зи}$, причем геометрическое место точек, соответствующих перекрытию канала и наступлению режима насыщения (пунктирная линия), образуют кривую, похожую на прямую ветвь ВАХ диода. С увеличением модуля $U_{зи}$ уменьшается пробивное напряжение между стоком и истоком $U_{си\ пр}$, так как к *p–n*-переходу прикладывается сумма напряжений $U_{си}+U_{зи}$.

На выходных характеристиках имеются три участка: ОА, АБ, БВ. На участке ОА зависимость $I_с = f\ (U_{си})$ практически линейна и имеет большую крутизну. Участок АБ-область насыщения, участок БВ-область электрического пробоя. Участок ОА похож на ВАХ резистора, поэтому полевые транзисторы (ПТ) можно использовать как управляемое сопротивление. Участок АБ используется для усилительных режимов.

Основные параметры ПТ с управляющим *p–n*-переходом. Основными параметрами полевого транзистора являются:

1. Ток стока I_c в области насыщения выходных характеристик при неизменном значении $U_{си}$ определяется по аналитическому выражению стоко-затворной характеристики (3.1):

$$I_c = I_{c\,нач}\,(1 - U_{зи} / U_{зи\,отс})^2. \qquad (3.1)$$

2. Крутизна характеристики S (оценка управляющего действия затвора):

$$S = dI_c / dU_{зи} \;\big|\; Ucu = \text{Const}. \qquad (3.2)$$

Наибольшую крутизну характеристика (3.1) имеет в области $U_{зи}$=0, причем

$$S = S_{нач}\,(1 - U_{зи} / U_{зи\,отс})^2,\ S_{нач} = -(2\,I_{с\,нас} / U_{зи\,отс}), \qquad (3.3)$$

где S ≈ (0,3 – 3) мА\В.

3. Температурные свойства ПТ характеризуются семейством стоко-затворных характеристик при разных значениях температуры окружающей среды (рис. 3.3). По характеристикам видно, что ПТ с управляющим *p–n*-переходом имеет «термостабильную» точку Т.

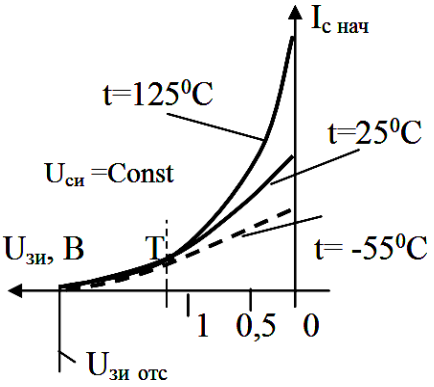


Рис. 3.3. Стоко-затворные характеристики ПТ при разных температурах

Наличие точки, в которой сходятся характеристики, снятые в широком диапазоне температур, свидетельствует о том, что параметры ПТ в этой точке мало зависят от температуры. Нужно заметить, что и крутизна характеристики в этой точке не велика.

4. Усилительные свойства ПТ помимо крутизны *S* характеризуются ещё коэффициентом усиления напряжения *M*, причем

$$M = dU_{си} / dU_{зи} \;\big|\; Ic = \text{Const}. \qquad (3.4)$$

5. Дифференциальное внутреннее сопротивление

$$R_{си\ диф} = dU_{си} / dI_c \;\big|\; Uзи = \text{Const}, \qquad (3.5)$$

$R_{си\ диф}$ = (0,1 – 1) Мом.

Учитывая (3.3), (3.4), (3.5), получим

$$M = S\,R_{си\ диф}\,. \qquad (3.6)$$

6. Емкость *p*–*n*-перехода между затвором и каналом характеризуют двумя значениями: ёмкостью между затвором и истоком $C_{зи}$ и между затвором и стоком $C_{зс}$. Величина ёмкости составляет (5 – 20)*pF*.

7. Эквивалентные схемы ПТ с управляющим *p*–*n*-переходом разнообразны в зависимости от условий применения. Наиболее часто используются так называемые малосигнальные (для сигналов переменного тока) эквивалентные схемы, показанные на рис. 3.4.

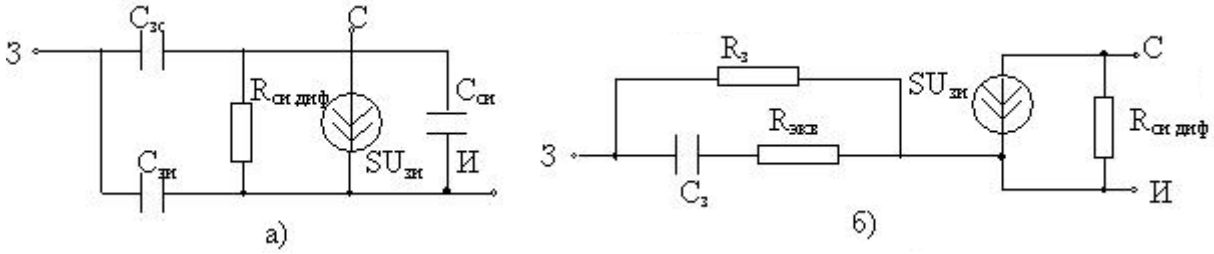


Рис. 3.4. Малосигнальные эквивалентные схемы ПТ:
исходная (*а*), преобразованная (*б*);
$R_З$ – омическое сопротивление затвора,
$R_{экв}$ – усредненное эквивалентное сопротивление,
через которое заряжается эквивалентная емкость затвора $C_з$

Ориентировочные значения для параметров ПТ с управляющим *p*–*n*-переходом [15]:

S = (0,3 – 3) мА/В; $R_З = 10^{10}$ Ом; $R_{си}$ = (0,1 – 1) мОм;

$R_{экв}$ = (50 – 800) Ом; $C_з$ = (0,2 – 10) пФ.

Изменение параметров и характеристик ПТ с изменением температуры обусловлено изменением:

– обратного тока *p*–*n*-перехода;

– контактной разности потенциалов;

– удельного сопротивления канала.

Особое свойство ПТ с управляющим *p*–*n*-переходом – наличие термостабильной точки (рис. 3.3). Это свойство обусловлено тем, что с ростом температуры удельное сопротивление канала увеличивается, вызывая уменьшение тока стока. Это дает возможность правильным выбором режимов взаимно компенсировать изменения тока стока, вызванные изменением контактной разности потенциалов и удельного сопротивления канала. При этом можно добиться, чтобы ток I_c оставался неизменным в широком диапазоне изменения темпе-

ратур (рис. 3.3). Это объясняется тем, что контактная разность потенциалов с увеличением температуры уменьшается приблизительно на 2,2 мВ/град, что должно (при неизменном $U_{зи}$) приводить к увеличению тока стока. Увеличение удельного сопротивления канала должно приводить к уменьшению этого тока. Ориентировочное положение термостабильной точки на стоко-затворной характеристике определяется значением: $|U_{зи\ т}| = |U_{зи\ отс}| - 0{,}63$ В. Недостаток этого режима – малая крутизна характеристик.

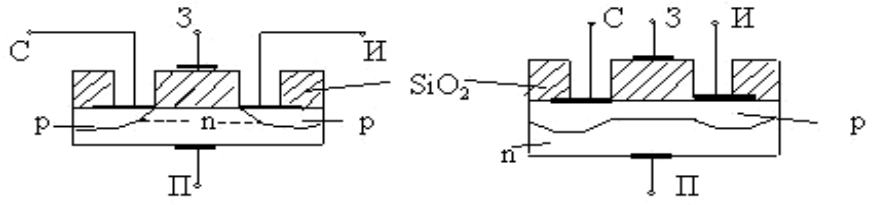
3.2. МДП (МОП)-транзисторы

МДП-транзисторы (полевые транзисторы с изолированным затвором) могут быть двух видов:

а) с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам);

б) со встроенным каналом (канал создается при изготовлении).

У МДП-транзистора, в отличие от ПТ с управляющим *p*–*n*-переходом, металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод П (рис. 3.5) от кристалла, называемый подложкой.



а *б*

Рис. 3.5. Схематичная структура МОП транзисторов с индуцированным каналом (*а*) и со встроенным каналом (*б*), (каналы *p*-типа)

МДП-транзистор с индуцированным каналом *p*-типа устроен следующим образом. Основа – пластина слаболегированного кремния *n*-типа называется подложкой (вывод П на рис. 3.5). В теле подложки созданы две сильно легированные области с полупроводником *p*-типа. Одна из них – сток (С), другая – исток (И). Электрод затвора З изолирован от областей тонким слоем диэлектрика SiO_2 толщиной (0,2 – 0,3) мкм.

Вследствие физических явлений, возникающих на границе раздела диэлектрика SiO_2 с полупроводником *n*-типа, в подложке индуцируется обогащенный электронами поверхностный слой (рис. 3.6).

Между *p*-областями стока и истока будет располагаться слой отрицательных зарядов, образуя структуру *p–n–p* на пути от истока к стоку.

В месте контакта двуокиси кремния и полупроводника образуется контактная разность потенциалов, достигающая значения (1,4 – 2,4) В.

p-области с подложкой *n*-типа образуют *p–n*-переходы. К стоку и истоку прикладываются противоположные по знаку потенциалы, поэтому при любой полярности приложенного к электродам стока и истока напряжения один из *p–n*-переходов будет смещен в обратном направлении и препятствует протеканию тока. Следовательно, в данном приборе в исходном состоянии между стоком и истоком отсутствует токоведущий канал. Проводящий канал возникает при достижении напряжением на затворе некоторого порогового значения $U_{зи\ пор}$ при $U_{си} \neq 0$, $|U_{зи\ пор}| \approx (2 – 4)$ В.

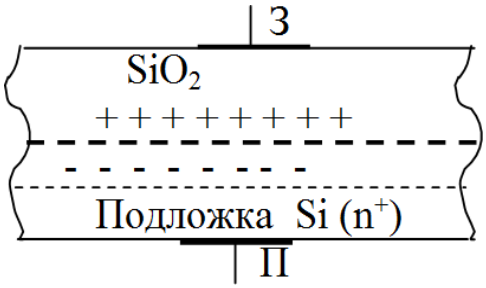


Рис. 3.6. Исходное распределение зарядов на границе раздела двуокиси кремния и полупроводника

При увеличении (в данном случае отрицательного относительно истока) напряжения на затворе выше порогового значения в подложке на границе раздела образуется слой зарядов с электропроводностью *p*-типа. Этот слой соединяет *p*-области стока и истока, образуя токопроводящий (индуцированный) канал. Чем больше значение отрицательного напряжения на затворе, тем больше толщина индуцированного канала и его проводимость. Таким образом, рассматриваемая структура обладает признаками управляемого ключевого элемента. Если на затворе установлен положительный или нулевой потенциал, ток между стоком и истоком протекать не может (цепь «разомкнута», т.е. имеет очень большое сопротивление). Если же на затворе установить отрицательный потенциал, по модулю больший $U_{зи\ пор}$, в цепи сток – исток может протекать ток, зависящий от управляющего напряжения $U_{зи}$ и напряжения питания $U_{си}$ (рис. 3.7, *в*).

Стоко-затворную характеристику часто называют характеристикой управления, так как от величины и знака напряжения на затворе относительно истока $U_{зи}$ зависит величина тока стока I_c.

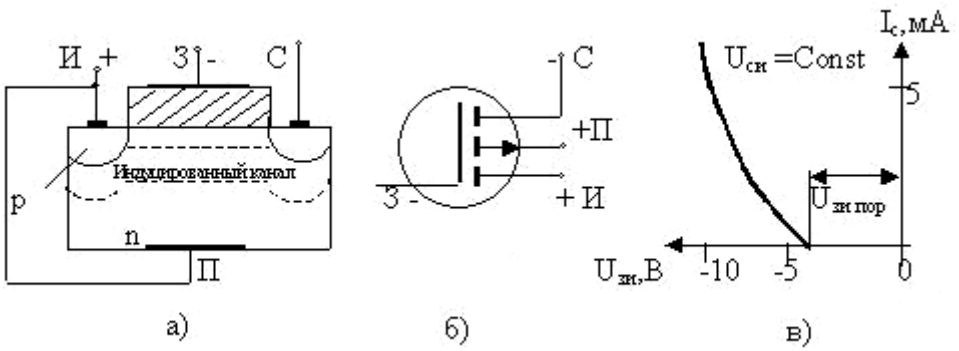


Рис. 3.7. Иллюстрация образования токопроводящего канала (*а*), условное графическое обозначение (*б*) и стоко-затворная характеристика (*в*) МДП-транзистора с индуцированным каналом *p*-типа

Статические стоковые (выходные) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом *p*-типа (рис. 3.8) по виду похожи на таковые для транзистора с управляющим *p*–*n*-переходом и каналом *n*-типа (рис. 3.2, *б*).

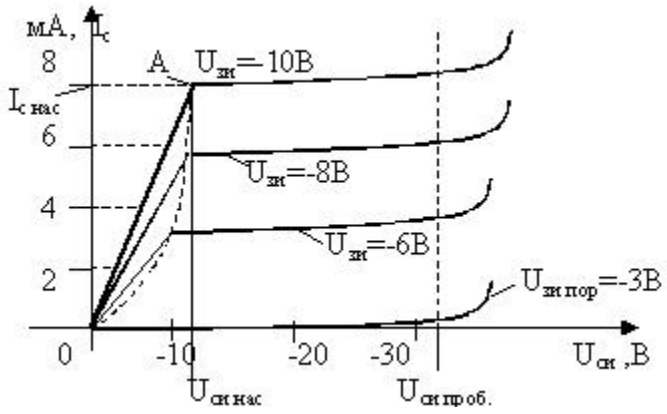


Рис. 3.8. Упрощённые стоковые характеристики МДП-транзистора с индуцированным *p*-каналом (электрические величины ориентировочные)

При $|U_{зи}| < |U_{зи\ пор}|$ ток очень мал (доли μА), поэтому до пробивного напряжения $U_{си\ проб}$ величина тока I_c практически незаметна. Если $|U_{зи}|$ превышает $|U_{зи\ пор}|$, то при малых значениях $|U_{си}|$ ток стока изменяется вначале прямо пропорционально изменению $U_{си}$ (участок ОА). Затем из-за сужения канала и уменьшения его общей проводимости рост тока I_c уменьшается. В точке А ток достигает значения тока на-

сыщения, соответствующего значению $U_{зи}$ для данной характеристики. Ток стока можно представить состоящим из двух составляющих:

$$I_c = I_к + I_{c\,ост},$$

где $I_к$ – ток канала (управляемая часть);

$I_{c\ ост}$ – остаточный ток стока (это ток утечки плюс обратный ток неосновных носителей), $I_{c\,ост} \approx 0$.

В точке А (рис. 3.8) управляемая часть тока уже не растет (достигнут режим насыщения), поэтому при дальнейшем увеличении $U_{си}$ ток стока остается неизменным, равным насыщенному значению $I_{c\ нас.}$ При увеличении напряжения $U_{си}$ до значения $U_{си\ проб}$ возникает электрический пробой стокового *p*–*n*-перехода, ток стока резко увеличивается, замыкаясь через цепь подложки (подложку обычно соединяют с истоком отдельным проводником). Если увеличивать значение $|U_{зи}|$ при неизменном $U_{си}$, то за счет увеличения электропроводности канала стоковая характеристика поднимется вверх, а значения $|U_{си\ на}|$ и $I_{c\ нас}$ станут больше.

Следует отметить, что практически пропорциональная зависимость тока стока I_c от напряжения $U_{си}$ при заданном значении управляющего напряжения $U_{зи}$ на участках ОА стоковых характеристик (рис. 3.8) позволяет построить «переменный резистор» с управляемой вольт-амперной характеристикой. Управление таким элементом может осуществляться либо простым изменением потенциала на затворе при заданном значении напряжения сток – исток, либо изменением обоих напряжений. Несмотря на малый возможный диапазон изменения этих напряжений данные свойства полевого транзистора существенно расширяют возможности их использования в различных устройствах.

В МОП-транзисторах с индуцированным каналом может также использоваться подложка *p*-типа, в которой будет индуцироваться канал *n*-типа (рис. 3.9).

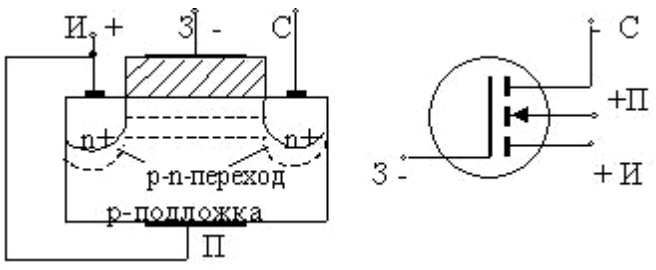


Рис. 3.9. Структура и УГО полевого транзистора с индуцируемым каналом *n*-типа

В исходном состоянии структуры вследствие контактных явлений на границе раздела диэлектрика SiO_2 с полупроводником подложки образуется слой зарядов с электропроводностью *n*-типа, т.е. высоколегированные *n*-области уже соединены начальным каналом *n*–типа, который будет обладать при $U_{зи}$=0 некоторой проводимостью. В таком канале путь для тока от истока к стоку уже открыт при $U_{зи}$=0.

Если $U_{зи}$<0, а исток соединен с подложкой, то отрицательное напряжение на затворе будет способствовать обеднению слоя, образующего проводящий канал *n*-типа. При некотором значении $U_{зи\ пор}$<0 канал ликвидируется вовсе. Учитывая сказанное, статические характеристики МОП-транзистора с индуцируемым каналом *n*-типа будут отличаться от таковых для транзистора с индуцируемым каналом *p*-типа. Основные отличия: стоко-затворная характеристика может пересекать ось тока стока, так как ток стока имеет не нулевое значение при отсутствии управляющего напряжения $U_{зи}$; управляющее напряжение может быть отрицательным, положительным либо нулевым.

Анализируя стоко-затворные характеристики транзистора с индуцируемым каналом *n*-типа (рис. 3.10, *а*), можно видеть, что этот транзистор также обладает свойствами управляемого ключевого элемента как и транзистор с индуцируемым каналом *p*-типа.

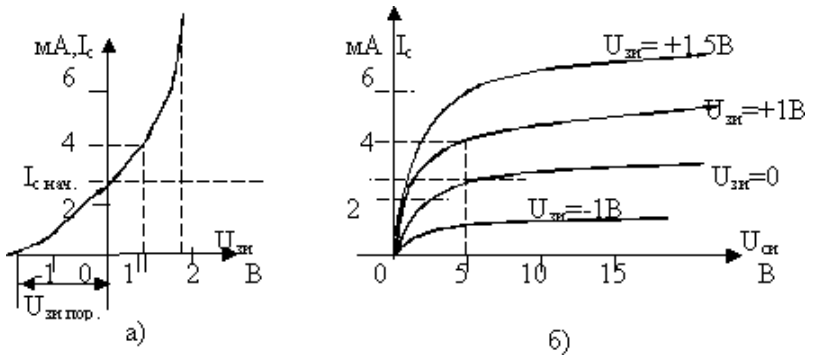


Рис. 3.10. Примерный вид характеристики управления (*а*) и выходных характеристик МОП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа (*б*)

Отмеченные выше две характерные особенности МОП-транзистора с индуцируемым каналом *n*-типа позволяют существенно расширить область их использования в электронных устройствах.

3.3. МДП-транзисторы со встроенным каналом

МДП-транзисторы со встроенным каналом могут быть с каналом *n* или *p*-типа. Условное изображение таких транзисторов показано на

рис. 3.11. Статические характеристики МОП-транзистора со встроенным каналом *n*-типа качественно не отличаются от статических характеристик МОП-транзистора с индуцируемым каналом *n*-типа. Это же справедливо и для МДП-транзисторов со встроенным каналом *p*-типа.

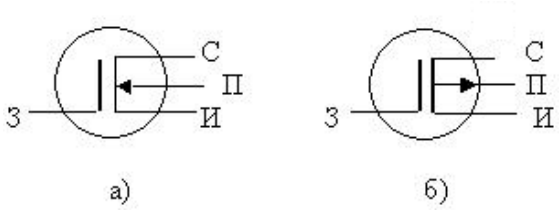


Рис. 3.11. УГО полевых транзисторов со встроенным каналом: канал *n*-типа (*а*), канал *p*-типа (*б*)

У транзисторов со встроенным каналом можно получить относительно большие токи – это их преимущество.

У всех МДП-транзисторов потенциал подложки относительно истока оказывает влияние на характеристики транзистора.

Если на подложку подается потенциал относительно истока, то напряжение между подложкой и истоком должно иметь такую полярность, чтобы *p*–*n*-переход «исток – подложка» был смещен в обратном направлении.

С увеличением напряжения между подложкой и истоком ($U_{пи}$) уменьшается действие управляющего напряжения $U_{зи}$, т.е. при том же $U_{зи}$ ток стока I_c становится меньше (рис. 3.12). Это отражается на положении стоко-затворной характеристики: с ростом напряжения $U_{пи}$ она смещается влево, увеличивая пороговое напряжение открытия транзистора. Возможность изменения состояния МОП-транзистора с помощью дополнительного напряжения, подаваемого на подложку, расширяет функциональные возможности этого прибора.

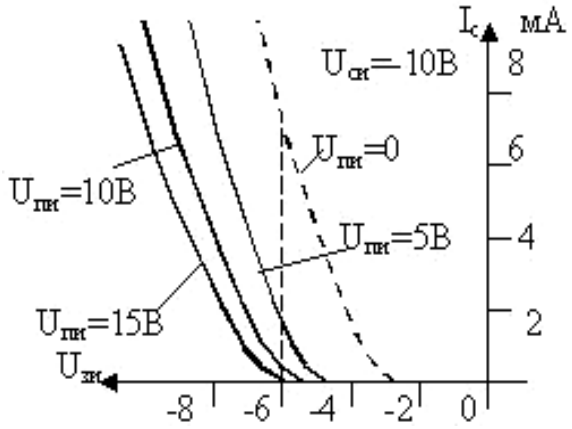


Рис. 3.12. Иллюстрация влияния напряжения $U_{пи}$ на характеристики управления МДП-транзистора с индуцируемым каналом *p*-типа

3.4. Способы включения полевых транзисторов

Способы включения полевых транзисторов (ПТ) в электрическую схему на примере полевого транзистора с управляющим *p–n*-переходом и каналом *p*-типа показаны на рис. 3.13.

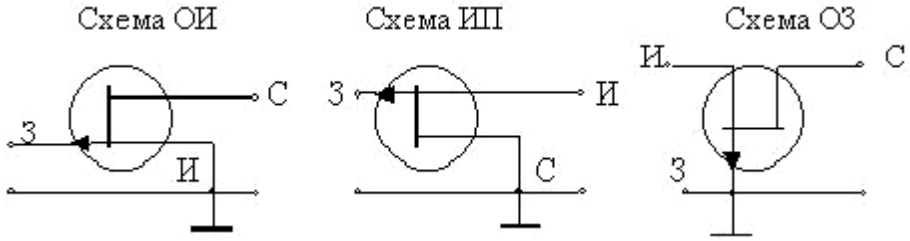


Рис. 3.13. Схемы включения полевых транзисторов:
с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) – истоковый повторитель (ИП),
с общим затвором (ОЗ)

3.5. Полевой транзистор как четырехполюсник

В расчетах схем с полевыми транзисторами также используют параметры четырехполюсника: при малых сигналах наиболее удобна система *g*-параметров (рис. 3.14).

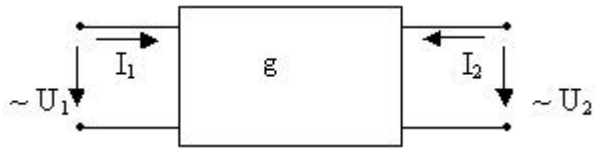


Рис. 3.14. Четырехполюсник – расчётный
эквивалент полевого транзистора

Система уравнений, соответствующая четырехполюснику, имеет вид:

$$I_{1\sim} = g_{11}\,U_{1\sim} + g_{12}\,U_{2\sim}\,; \quad I_2 = g_{21}\,U_{1\sim} + g_{22}\,U_{2\sim}\,. \qquad (3.7)$$

Коэффициенты данной системы имеют размерности проводимостей и являются универсальными параметрами, которые для каждой из схем включения ПТ имеют свои значения.

Для схемы ОИ:

g_{11} – входная проводимость при $U_{2\sim} = 0$;

g_{12} – проводимость обратной передачи при $U_{1\sim} = 0$;

g_{21} – проводимость прямой передачи при $U_{2\sim} = 0$;

g_{22} – выходная проводимость при $U_{1\sim} = 0$.

Следует заметить, что режимы $U_{1\sim} = 0$, $U_{2\sim} = 0$ достигаются не коротким замыканием выводов, а включением емкостей (достаточно больших), представляющих малое сопротивление для переменных составляющих. На высоких частотах g-параметры переходят в y-параметры, где $y = g + j\omega C$, а ёмкость C определяется по эквивалентной схеме.

3.6. МДП-структуры специального назначения

Структура МНОП (металл – нитрид – оксид – полупроводник) – это составная часть микросхем памяти (рис. 3.15).

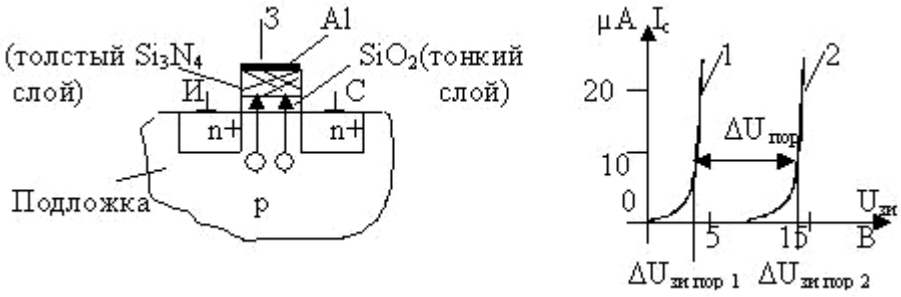


Рис. 3.15. Структура МНОП и характеристики управления до (*1*) и после (*2*) программирования ($\Delta U_{пор}$ – межпороговая зона)

В структуре МНОП диэлектрик двухслойный. Если на затвор подать +(28 ÷ 30) В, то электроны из подложки туннелируют в толстый слой Si_3N_4, где образуют область неподвижных отрицательных ионов. Их заряд повышает пороговое напряжение (кривая 2, рис. 3.15) и может храниться долго (несколько лет) при отключении всех напряжений.

Если подать отрицательное напряжение, заряд рассасывается, пороговое напряжение уменьшается (кривая 1, рис. 3.15). «Записывая» заряд, мы изменяем сопротивление, которое будет проявляться при пороге $U_{зи} \approx$(3 ÷ 5) В. На МНОП структурах выполняют запоминающие элементы, которые будут иметь то или иное сопротивление между стоком и истоком. Другим видом структур специального назначения являются *приборы с зарядовой связью*.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) относятся к приборам с переносом заряда [9]. Упрощенная структура такого прибора представлена на рис. 3.16.

Конструктивно ПЗС можно представить цепочкой МОП-транзисторов на общем кристалле *p*-типа. Каждый транзистор – своеобразный конденсатор. Размеры электродов – 10 мкм, промежуток между ними (2 – 4) мкм, толщина диэлектрика 0,1 мкм (рис. 3.16).

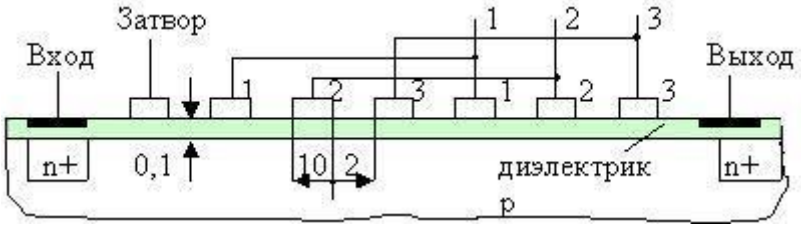


Рис. 3.16. Схематичная структура ПЗС

Характерны два режима работы:

1) хранение информации в виде заряда в одном или нескольких конденсаторах;

2) перенос заряда из одного конденсатора вдоль цепочки в следующий: (наличие заряда = «1», отсутствие = «0» в цифровой форме), изменение величины заряда – в аналоговой форме.

МОП-транзисторы с плавающим затвором (с лавинной инжекцией заряда) (ЛИЗМОП). В структуре ЛИЗМОП (рис. 3.17) при подаче напряжения на сток или исток (относительно подложки) возникает лавинный пробой *p–n*-перехода между *p*-областью и подложкой. Электроны с повышенной энергией проникают в изолирующий слой и достигают области затвора, образуя там отрицательный заряд, который может храниться несколько лет. Наличие этого заряда вызывает появление проводящего канала, соединяющего сток и исток, т.е. транзистор становится проводящим. Чтобы транзистор стал непроводящим, надо убрать заряд. Делают это путем облучения кварцевыми лампами через специальные окна из кварцевого стекла. Такая структура используется для создания запоминающих ячеек в микросхемах памяти запоминающих устройств цифровых схем. Металлический вывод от затвора в таких структурах не нужен.

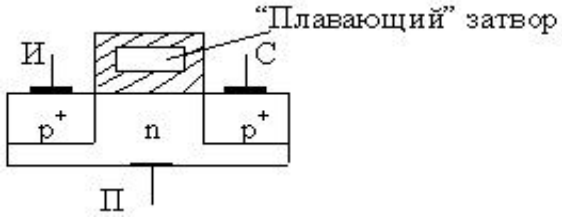


Рис. 3.17. Структура запоминающей ячейки ЛИЗМОП

Полевые транзисторы с двумя затворами (тетродные). Наличие второго затвора позволяет одновременно управлять током транзистора с помощью двух управляющих напряжений, что используется для построения различных функциональных схем, например множительных устройств (рис. 3.18).

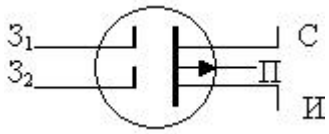


Рис. 3.18. Изображение ПТ с двумя затворами
(МОП-транзистор со встроенным каналом *p*-типа)

Для ПТ с двумя затворами указывают крутизну характеристики по первому и второму затворам, напряжение отсечки первого и второго затвора. Остальное – как для однозатворного.

3.7. Нанотранзисторы

Проблемы микроминиатюризации. Планарная групповая технология производства ИС добилась впечатляющих успехов в миниатюризации полупроводниковых элементов, в частности транзисторов, размещенных на одном чипе.

Физические законы, лежащие в основе работы транзисторов, устанавливают свои пределы на размеры элементов, а технология требует новых подходов и процессов. Одной из основных проблем при переходе к наноразмерам транзисторов является проблема межсоединений [23]. С уменьшением геометрических параметров линий межсоединений на кристалле возрастают плотность тока и сопротивление, что вызывает разогрев этих линий, изменение их геометрии, причем при плотности тока ~10^5 А/см^2 и температуре 210 ^{0}С токоведущие дорожки выходят из строя. Время работы межсоединений существенно уменьшается, а надёжность работы чипа резко падает.

С увеличением частоты сигналов линии межсоединений становятся волноводными линиями. Оценки показывают, что начиная с частот 10^{11} Гц задержки сигнала, обусловленные волновыми свойствами, становятся сравнимыми со временем переключения транзисторов ($t_{II} \approx 10^{-11}$ с).

В наноструктурах используются квантовые эффекты токопереноса, не характерные для обычного токопереноса по проводным линиям, поэтому обычные металлические дорожки теряют свое предназначение, а для межсоединений должны быть разработаны нанопроводники [23].

В настоящее время элементной базой микроэлектроники являются микроэлектронные транзисторы. Основной кремниевой транзисторной структурой в микроэлектронике является кремниевая МДП-структура.

Сейчас достигнуты длина канала и затвора около 100 нм, толщина подзатворного слоя ($Si0_2$) составляет 0,8 нм (три атомных слоя). Это позволило увеличить быстродействие, но обостряет следующие проблемы: возрастают токи утечек, увеличиваются сопротивления областей сток-исток (увеличивается плотность выделяемой в структуре мощности, растет напряжение переключения). С увеличением напряжения возрастает опасность пробоя подзатворного слоя. Уменьшение длины канала требует увеличения степени легирования в канале до 10^{18} см$^{-3}$, а это приводит к снижению подвижности носителей заряда и росту порога включения транзистора [23].

Сейчас ведутся разработки транзисторных структур для субмикронной технологии: на 0,13; 0,10; 0,07 мкм, а технология нанометрового диапазона станет промышленной предположительно на ближайшие 50 лет [23].

Некоторые виды транзисторов субмикронной технологии. Проблему масштабирования параметров транзисторов пока предлагается решать в следующих направлениях [23]:

1. КНИ-транзисторы (кремний на изоляторе с ультратонким основанием) (UTB-Ultrathin Body):

а) приборы с управляемой проводимостью канала;

б) транзисторы с двойным затвором;

в) плавникоподобный полевой транзистор (FinFET);

г) одноэлектронные транзисторы.

КНИ транзистор имеет обедненное носителями заряда основание, поэтому в инверсионном слое электрическое поле слабее, следовательно, мощность управления требуется малая.

Фирма Intel создала транзистор TeraHertz (рис. 3.19), в котором основание обеднено полностью, толщина основания 30 нм, за счет этого достигнуто высокое быстродействие и низкая потребляемая мощность.

При напряжении 1,3 В, ток стока достигает 650 мкА, а ток утечки составляет 9 нА.

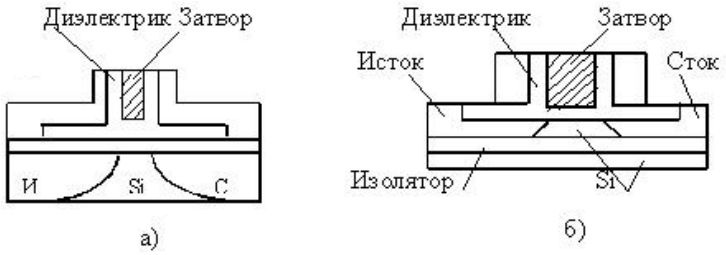


Рис. 3.19. Структуры обычного (*а*) и TeraHertz (*б*) транзисторов

Стоко-затворные характеристики КНИ-транзистора показаны на рис. 3.20.

Недостатки КНИ-структур: короткий канал трудно управляется напряжением затвора, требуется высокая степень легирования области истока. Эти недостатки можно частично устранить в транзисторах с двойным затвором.

Конструкция такого транзистора имеет вид пластины (плавника), обернутой затворной областью. Эти транзисторы получили название FinFET-транзисторы (fin – плавник).

Каналы индуцируются напряжением на затворах вдоль обеих сторон пластины.

Трехмерная структура позволяет значительно снизить потери на тепловыделение, ток увеличивается в два раза. Тело транзистора (плавник) имеет толщину 20 нм и высоту 180 нм.

Пороговое напряжение 0,15 В. Затворов может быть два или три (рис. 3.21).

Рис. 3.20. Примерные стоко-затворные характеристики КНИ-транзистора

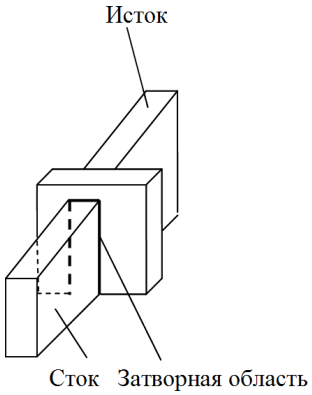


Рис. 3.21. Конструктивная схема нанотранзистора с тремя затворами

2. Гетеротранзисторы (HEMT-транзисторы) (High Electron Mobility Transistor) – это гетероструктурные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов.

Наиболее популярным активным элементом такого типа (на гетероструктурах) является *n*-канальный полевой транзистор с затвором Шоттки на арсеинд-галлиевой (GaAs) структуре (MESFET). Транзисторы этого типа имеют длину канала ≈ 0,13 мкм и работают на частоте 50 ГГц.

На основе гетеропереходных ПТ с затвором Шоттки (ГПТШ) созданы СВЧ-транзисторы на переходах AlGaN-GaN.

Структура ГПТШ на основе GaN показана на рис. 3.22.

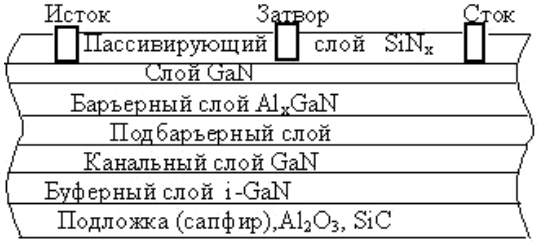


Рис. 3.22. Структура транзистора на гетеропереходах

3. Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок. Эти транзисторы имеют меньшие размеры и меньшее потребление по сравнению с другими нанотранзисторами. Углеродная нанотрубка по диаметру меньше толщины человеческого волоса в $10^4 – 10^5$ раз.

Транзистор формируется на кремниевой подложке, покрытой слоем окисла SiO_2 (рис. 3.23, *а*). В Московском институте электронной техники (МИЭТ) проведены исследования макетных образцов нанотранзисторов на основе углеродных трубок [23]. Стокозатворная характеристика транзистора напоминает классическую характеристику МОП транзистора со встроенным каналом *p*-типа (рис. 3.23, *б*).

Отмечено, что создание нанотранзисторов на основе единичной нанотрубки является весьма трудоёмким процессом.

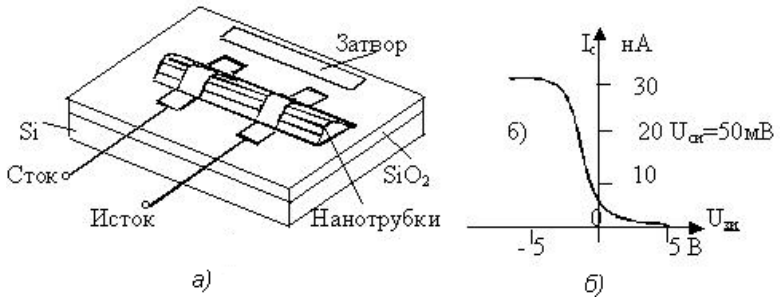


Рис. 3.23. Структурная схема нанотранзистора на углеродных нанотрубках (*а*) и его стоко-затворная характеристика (*б*)

Транзисторы на основе углеродных нанотрубок считаются перспективными для работы в условиях высоких температур.

4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Приборы, имеющие на вольтамперной характеристике участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), позволяют выполнить устройства, обладающие особыми свойствами и характеристиками. К таким приборам относятся: туннельные диоды, однопереходные транзисторы (двухбазовые диоды), тиристоры и динисторы.

4.1. Туннельный и обращенный диоды

Туннельный диод (ТД) – это диод, на ВАХ которого имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В зависимости от назначения туннельные диоды разделяют на: усилительные (ЗИ 101, ЗИ 104); генераторные (ЗИ 201, ЗИ 203); переключательные (ЗИ 306 – ЗИ 309) [13].

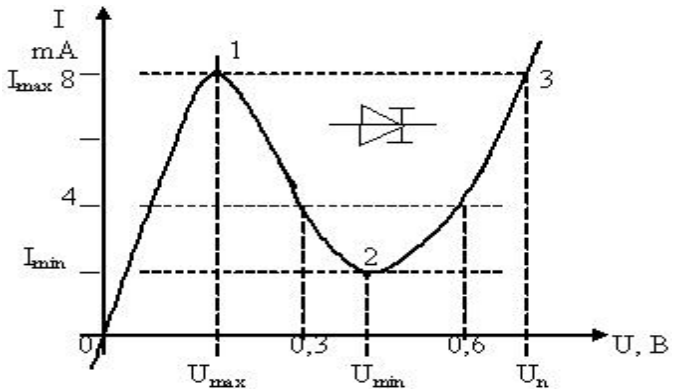


Рис. 4.1. ВАХ туннельного диода

Туннельный диод имеет один p^+–n^+-переход, но по сравнению с обычными диодами отличается высокой концентрацией примесей. Из-за этого обедненный слой, образующийся в месте *p*–*n*-перехода, оказывается очень тонким. Это приводит к появлению так называемого туннельного эффекта, когда носители зарядов (электроны

и дырки), имеющие меньшую энергию, чем высота потенциального барьера, могут проникать сквозь этот барьер (туннелировать) вследствие волновых свойств частиц [25].

На участке 0 – 1 (рис. 4.1), где действует туннельный механизм переноса носителей заряда (вся область отрицательных и начальный участок положительных напряжений, приложенных к диоду), сопротивление диода мало. С увеличением положительного напряжения до значения $U_{макс}$ туннельный ток диода растет (участок 0 – 1) до значения $I_{макс}$, а затем снижается. При напряжении $U_{мин}$, соответствующем току $I_{мин}$, туннельный эффект прекращается. С дальнейшим ростом напряжения начинает проявляться инжекция носителей тока через прямо смещенный *p–n*-переход, потенциальный барьер перехода снижается, увеличивается прямой ток, обусловленный диффузией зарядов.

Наклон падающего участка ВАХ (участок 1 – 2 на рис. 4.1) определяет величину дифференциального отрицательного сопротивления диода: $R_д = \Delta U / \Delta I$, $R_д$ составляет (десятки – сотни) Ом.

Наличие отрицательного сопротивления позволяет использовать ТД для генерации колебаний и в переключательных схемах. Напряжение переключения $U_{перекл} = U_п - U_{макс}$, где $U_п$ – напряжение питания.

Так как туннельный механизм переноса зарядов не связан с процессами диффузии носителей заряда, то ТД могут работать на очень высоких частотах (сотни МГц – ГГц) и в широком диапазоне температур (от 4,2 до 620 К). ТД изготавливают из Si, Ga, AsGa.

Обращенный диод является разновидностью ТД, однако в нем вместо участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ имеется практически горизонтальный участок. Диод можно использовать для выпрямления малых напряжений, если использовать обратную ветвь ВАХ (рис. 4.2).

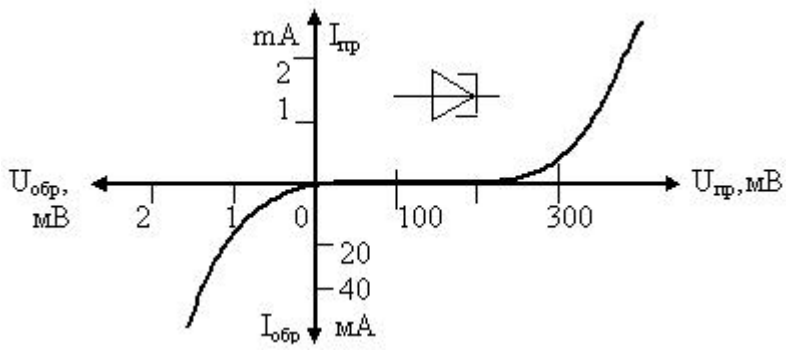


Рис. 4.2. ВАХ обращённого диода

4.2. Двухбазовый диод (однопереходный транзистор)

Двухбазовый диод – это трёхэлектродный полупроводниковый прибор, содержащий один электронно-дырочный переход (эмиттерный) и два вывода от базовой области ($б_1$ и $б_2$ рис. 4.3).

База выполнена из полупроводника одного типа проводимости, а эмиттер – из другого. При межбазовом напряжении $U_{мб} = 0$ ВАХ $i_1 = f(U_1)$ представляет собой обычную ВАХ p–n-перехода. При $U_{мб} > 0$ ток i_2 создает внутри кристалла (базы) на участке $Э – б_1$ падение напряжения $U_{вн}$, которое является запирающим для p–n-перехода. Поэтому при $U_{вн} > U_1$ переход закрыт, через него, как обычно, течет малый обратный ток ($i_1 = – I_{10}$). При $U_1 \geq U_{вн}$ (точка 1, на рис. 4.3, *в*) переход открывается, в базу из эмиттера инжектируются неосновные носители, сопротивление участка базы $Э – б_1$ резко падает.

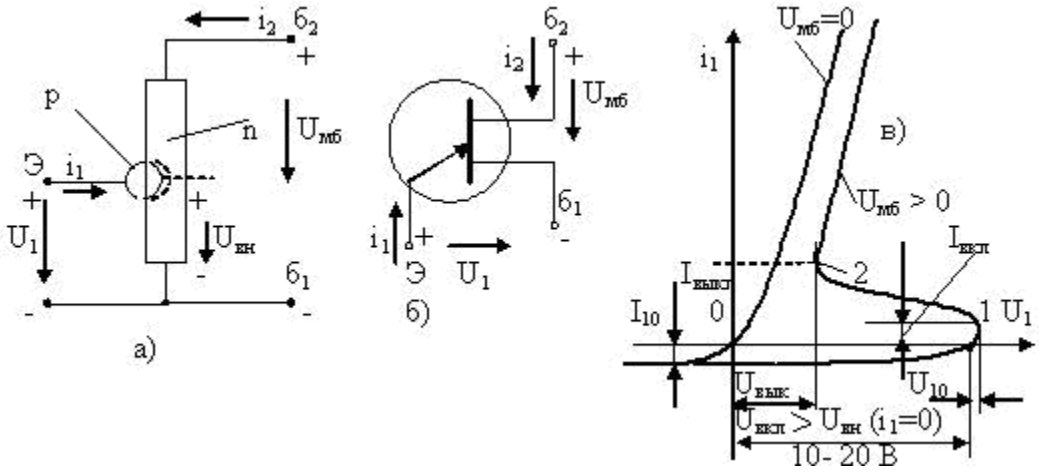


Рис. 4.3. Структура *(а),* УГО *(б)* и ВАХ *(в)* двухбазового диода с n-базой

С уменьшением сопротивления перехода эмиттер-база 1 уменьшается запирающее напряжение $U_{вн}$, ток i_1 увеличивается, еще более открывая p–n-переход ($dU_1 / di_1 < 0$) – развивается лавинообразный процесс, заканчивающийся полным открытием перехода (точка 2), после чего ВАХ выходит на прямую ветвь характеристики p–n-перехода. Напряжение включения:

$$U_{вкл} = U_{вн\,(i1=0)} + U_{10} \approx U_{вн\,(i1=0)} = U_{мб}\,(R_{б1}/R_{мб}) = U_{мб} \cdot \eta_R, \qquad (4.1)$$

где $R_{мб}$, $R_{б1}$ – сопротивление кристалла соответственно между $б_1$, $б_2$ и $Э - б_1$;

U_{10} – начальное напряжение открытого перехода , $U_{10} << U_{вкл}$;

$\eta_R = U_{вн\ (i1=0)} / U_{мб} \approx R_{б1} / (R_{б1} + R_{б2})$ – внутренний параметр (коэффициент передачи напряжения).

Диоды КТ 117А-Г имеют: η_R = 0,5 – 0,9; $R_{мб}$ = (4 – 12) кОм;

$I_{вкл} \leq 20$ мкА; $I_{э\ мах} \leq 50$ мА; $I_{выкл} \geq 1$ мА; $U_{мб} \leq 30$ В;

$f_{ген \cdot макс} \leq 200$ кГц; $U_{остаточное\ э\text{-}б} \leq 5$ В.

Существуют однопереходные транзисторы (двухбазовые диоды) с базой из полупроводника *p*-типа и эмиттером *n*-типа. ВАХ такого диода аналогичны рассмотренным, но направления токов и напряжений изменяются на обратные, а стрелка на эмиттере в УГО направлена от базы. Есть безкорпусные двухбазовые диоды КТ 119 А, Б, которые используются в схемах генерации и в релейных элементах [15]. Из двух биполярных транзисторов можно создать аналог двухбазового диода, схема которого приведена на рис. 4.4.

Падение напряжения на резисторе $R_{б1}$ играет роль внутреннего напряжения. Транзисторы VT_1 и VT_2 закрыты при $U_1 < [E \cdot R_{б1}/(R_{б1} + R_{б2})] = U_{Rб1}$.

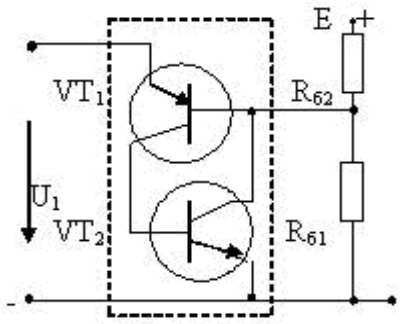


Рис. 4.4. Схема аналога двухбазового диода

Если $U_1 \geq U_{Rб1}$ транзисторы открываются, причём остаточное падение напряжения на открытых транзисторах будет значительно меньше, чем в схеме двухбазового диода.

Преимуществом аналога над оригиналом является малое остаточное напряжение на открытом выходе. Второе преимущество – изменением $R_{б1}$, $R_{б2}$ легко регулировать $U_{вкл}$ прибора.

4.3. Лавинный транзистор

Лавинными транзисторами называют транзисторы, в которых эффект ударной ионизации в *p–n*-переходе используется для повышения коэффициента передачи тока α. По структуре и основным свойствам лавинный транзистор не отличается от обычных плоскостных транзисторов, однако он работает в такой области характеристик, которая не свойственна усилительному режиму обычного транзистора.

Интегральный коэффициент передачи эмиттерного тока в лавинном транзисторе при наличии ударной ионизации выражается формулой:

$$\alpha_м = M \bullet \alpha \approx 1,$$

где M – коэффициент ударной ионизации.

Известно, что ударная ионизация происходит, когда напряженность электрического поля, вызванная обратным смещением, достаточно велика, и неосновные носители заряда, движущиеся через *p–n*-переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами в зоне *p–n*-перехода ионизируют их [18]. В результате появляются пары электрон – дырка, которые в свою очередь ускоряются и могут вызвать ионизацию других атомов и т.д. Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках. Коэффициент ударной ионизации можно приближенно оценить по следующему эмпирическому выражению:

$$M \approx 1 / [1 - (U/U_\beta)^n], \qquad (4.2)$$

где $n = 3$ для Si(p), Ge(n), $n = 5$ для Ge(p), Si(n);

$U_\beta = U_м \sqrt[n]{1 - \alpha}$ – характеристическое напряжение лавинного пробоя;

$U_м$ – напряжение пробоя в схеме ОБ.

Включение лавинного транзистора по схеме ОЭ показано на рис. 4.5, *а*. Коллекторные характеристики в схеме ОЭ в области до пробоя имеют вид, показанный на рис. 4.5, *б*, где $U_β$ – напряжение лавинного пробоя.

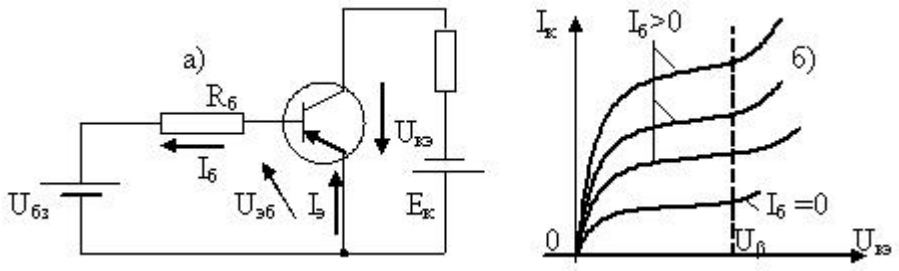


Рис. 4.5. Схема включения лавинного транзистора *(а)* и его коллекторные характеристики в предпробойной области *(б)*

Если обеспечить $I_б < 0$, то можно достичь такого положения, что при достижении $U_β$ ток будет еще мал, однако вследствие ударной ионизации его значение будет определяться соотношением $I_б = – I_к = –M\, I_{ко.}$ При дальнейшем увеличении $U_{кэ}$ увеличивается коэффициент M, $|\, U_{эб}|$ уменьшается $(U_{эб} = U_{бэ} – M\, I_{ко}\, R_б)$, а при $U_{эб} = 0$ переход открывается и $I_б \approx U_{бэ} / R_б$. Если в обычном выражении тока коллектора транзистора $I_к = (\alpha\, I_э + I_{ко}) /(1 – \alpha)$ учесть коэффициент M, то получим:

$$I_к = M(\alpha I_э + I_{ко})/(1 – M\alpha). \qquad (4.3)$$

Это выражение по сути является ВАХ лавинного транзистора, если учесть, что $M = f\,(U)$. Коэффициент передачи тока α нелинейно зависит от значения тока эмиттера (рис. 4.6).

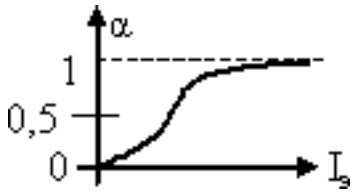


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента α от тока эмиттера $\alpha = f(I_э)$

В лавинном транзисторе можно создать режимы, не достижимые для обычных транзисторов. В частности, можно получить выходные характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления, что даёт возможность строить на лавинных транзисто-

рах управляемые импульсные устройства. Вид выходных характеристик показан на рис. 4.7.

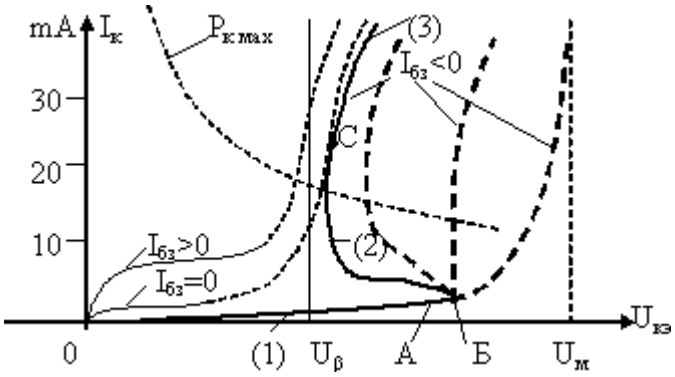


Рис. 4.7. Семейство ВАХ лавинного транзистора

На рис. 4.7 помимо выходных характеристик проведены дополнительные линии, ограничивающие область допустимых значений параметров транзистора: $U_м$ – предельное значение напряжения $U_{кэ}$; $P_{к\,макс}$ – максимальная допустимая мощность рассеяния коллектора. ВАХ, имеющая явно выраженный участок с отрицательным сопротивлением, содержит три участка: (1)-0АБ, (2)-БС, (3)-С3 (рис. 4.7), что даёт возможность выполнить анализ работы транзистора для каждого из участков раздельно.

На начальном участке (1) эмиттерный переход заперт и следовательно $\alpha \approx 0$, $U_{кэ}$ растет при слабом увеличении тока $I_к$. В точке А отпирается эмиттерный переход, $I_к = U_б / R_б > I_{ко} / \alpha$. Увеличение тока $I_к$ обеспечивается (сопровождается) теперь увеличением $\alpha \cdot I_э$ согласно выражению (4.3). Дифференциальное сопротивление перехода уменьшается, а в критической точке Б оно обращается в нуль и далее становится отрицательным. На участке (2) связь напряжения и тока можно выразить соотношением:

$$U_м \sqrt[n]{1 - (\alpha I_э + I_{ко}) / I_к}, \qquad (4.4)$$

где $I_э = I_к + I_{бз}$ при $I_{бз} < 0$, $\alpha = f(I_э)$.

На участке (2) увеличение $I_к$ сопровождается снижением $U_{кэ}$. В этом можно убедиться, если взять $dU_{кэ} / dI_к$. На участке БС сопротивление перехода эмиттер-коллектор транзистора имеет отрицательное значение (увеличение тока сопровождается уменьшением напряжения). В точке С сопротивление вновь обращается в нуль и затем

принимает положительное значение (участок 3). Изменяя величину тока базы $I_{б3}$ можем получить семейство характеристик, при этом точка Б смещается незначительно, а точка С может смещаться от U_{β} до $U_{м}$. Специфика лавинного транзистора состоит в том, что он может длительно работать в рассматриваемых режимах, причем ВАХ с отрицательным участком получается при сравнительно большом коллекторном напряжении $U_{кэ} \approx (20 – 30)$ В.

Лавинные транзисторы используются в формирователях мощных импульсов тока (до десятков А) с очень малым временем нарастания (коротких импульсов с частотой до 100 мГц) и в усилителях электрических колебаний дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн [25].

4.4. Динисторы и тиристоры

Динисторы и тиристоры – это полупроводниковые приборы, имеющие четырёхслойную структуру, состоящую из чередующихся областей *p* и *n*-полупроводника. Динистор имеет два вывода и три *p*–*n*-перехода.

Структура динистора представлена на рис. 4.8:

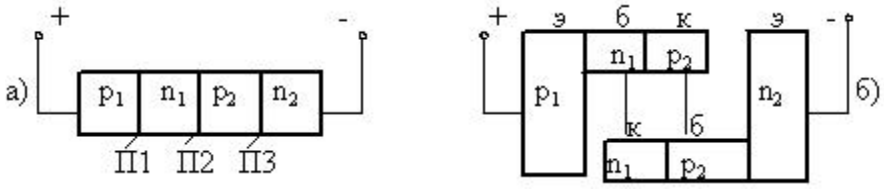


Рис. 4.8. Структура динистора *(а)* и её двухтранзисторное представление *(б)*

Если приложить к динистору внешнее напряжение («+» к области p_1, а «–» к области n_2), то переходы $П_1$, $П_3$ окажутся смещенными в прямом направлении, а переход $П_2$ – в обратном. Переход $П_2$ называют коллекторным. Следовательно, всё внешнее напряжение

будет приложено к коллекторному переходу, но ток в цепи не течет. Представленная выше двухтранзисторная структура динистора (рис. 4.8, *б*) позволяет создать схему его транзисторного аналога (рис. 4.9, а).

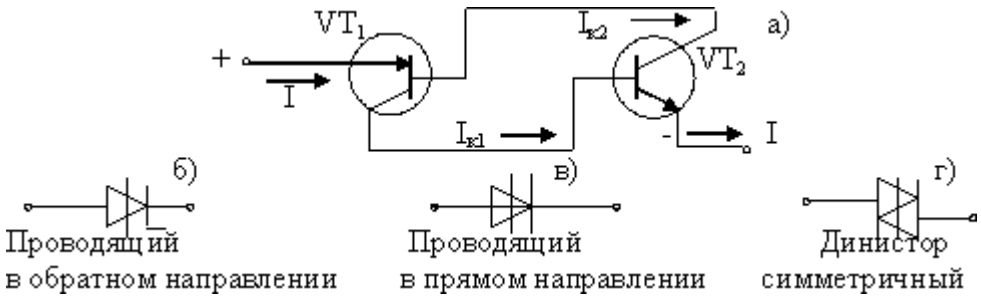


Рис. 4.9. Схема транзисторного аналога *(а)* и условные графические обозначения динисторов *(б), (в), (г)*

Транзисторный аналог динистора позволяет выяснить соотношения для токов. На схеме рис. 4.9, *а* видно, что $I = I_{э1} = I_{э2} = I_{к1} + I_{к2}$, с другой стороны $I = \alpha_1 I_{э1} + \alpha_2 I_{э2} + I_0 = I_0 /(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$, где I_0 – обратный ток коллекторного перехода; α_1 , α_2 – коэффициенты передачи тока от перехода $П_1$ к $П_2$ и от $П_2$ к $П_3$.

Пока коллекторный переход смещён в обратном направлении, практически все приложенное напряжение падает на нем. Поэтому при больших напряжениях следует учитывать ударную ионизацию в этом переходе. Если для упрощения принять один и тот же коэффициент лавинного умножения M для обратного тока и коэффициентов передачи, то выражение для тока I примет следующий вид:

$$I = \frac{M I_0}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)} . \qquad (4.5)$$

Это похоже на выражение (4.3) для тока лавинного транзистора. ВАХ динистора имеет *S*-образный вид (рис. 4.10). Переключение происходит при $M(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$, когда сопротивление структуры становится малым (дифференциальное сопротивление стремится к нулю).

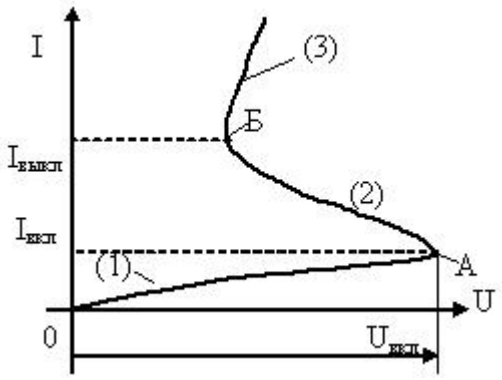


Рис. 4.10. Статическая ВАХ динистора

Принцип действия динистора можно пояснить следующим образом.

Так как переходы $П_1$ и $П_3$ смещены в прямом направлении, из них в области баз (n_1 и p_2) инжектируются носители заряда: дырки – из области p_1, электроны – из области n_2. Эти носители диффундируют в базах к коллекторному переходу и его полем перебрасываются через p–n-переход. (В обратных направлениях движутся и дырки и электроны, образуя ток I_0) При малых значениях приложенного напряжения все оно практически падает на коллекторном переходе $П_2$, к переходам $П_1$ и $П_3$ приложены малые значения падения напряжения, инжекция носителей невелика. Ток мал и равен обратному току перехода $П_2$ и вначале меняется незначительно. С дальнейшим возрастанием напряжения, по мере увеличения ширины перехода $П_2$, все больше проявляется ударная ионизация. Когда достигается значение напряжения лавинного пробоя, развивается лавинный процесс. Ток через переход $П_2$ увеличивается, но его сопротивление уменьшается значительно сильнее, и падение напряжения на нем тоже уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к повышению напряжений, приложенных в прямом направлении к переходам $П_1$ и $П_3$, и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока. Сопротивление перехода $П_2$ становится малым, в цепи потечёт ток, величина которого будет ограничиваться только внешним сопротивлением (происходит переключение динистора из непроводящего состояния в проводящее). На ВАХ этому процессу соответствует участок АБ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Переключение происходит практически мгновенно, поэтому участок АБ – это участок неустойчивой работы прибора. Ток в цепи динистора изменяется от значения $I_{вкл}$ до значения $I_{выкл}$ (рис. 4.10). После пе-

реключения ВАХ аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении.

Если от одной из баз динисторной структуры сделать отвод (управляющий электрод), то получим управляемый прибор, называемый *тиристором* (тринистором).

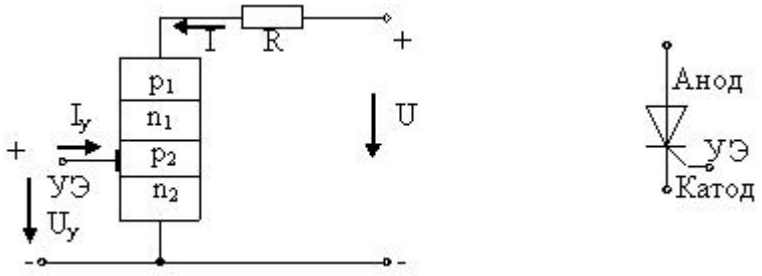


Рис. 4.11. Структурная схема и УГО тиристора с управлением по катоду

Если на переход $p_2 - n_2$ (рис. 4.11) подать внешнее смещение (напряжение U_y), то в цепи управления потечёт ток управления I_y, ток через переход p_2–n_2 увеличивается, вызывая снижение потенциального барьера коллекторного перехода n_1–p_2. Лавинный пробой перехода n_1–p_2 произойдёт при меньшем значении внутреннего напряжения, приложенного к этому переходу. В главной цепи тиристора под действием внешнего (анодного) напряжения потечёт ток I, величина которого будет определяться сопротивлением резистора R. С некоторыми допущениями ток в главной цепи можно определить по соотношению:

$$I = M\,(I_0 + \alpha_2\, I_y)/\,[1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)], \qquad (4.6)$$

где $\alpha_2\, I_y$ – добавка тока управления.

Увеличение тока через переход p_2–n_2 увеличивает вероятность возникновения лавинного процесса. Поэтому, изменяя ток, можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора, и тем самым управлять моментом его включения. Принцип действия тиристора хорошо иллюстрируется семейством его ВАХ, построенных при разных значениях тока управления (рис. 4.12). ВАХ, соответствующая значению $I_y = 0$, является по сути ВАХ динистора и определяет предельное значение напряжения между анодом и катодом, которое может без пробоя выдержать тиристор. При отсутствии или недостаточной величине сопротивления резистора R (рис. 4.11) в случае достижения внешним напряжением предельного значения тиристор будет повреждён чрезмерно большим током.

Для рассмотрения работы тиристора в электрической цепи, содержащей источник питания с напряжением U и нагрузочный резистор R, совместим семейство ВАХ тиристора и резистора (рис. 4.12).

Линию нагрузки проводим по точкам U_1 / R, U_1. Исходная рабочая (характеристическая, изображающая) точка «a» находится на пересечении линии нагрузки с ВАХ тиристора при $I_y = 0$.

Для включения тиристора в его цепь управления подаётся ток управления $I_{y1} > 0$. Исходная рабочая точка «a» переместится в положение (a_1), которому соответствует ВАХ при токе управления I_{y1} и напряжении переключения U_n.

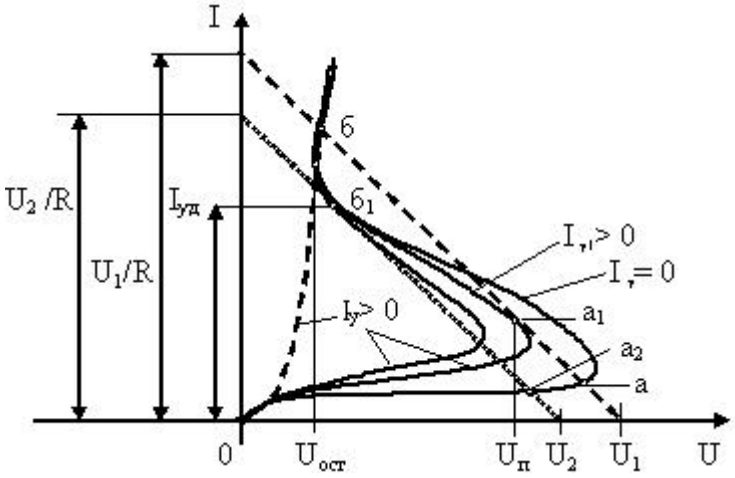


Рис. 4.12. Семейство ВАХ тиристора и резистора при изменении тока управления

Тиристор открывается, что соответствует переходу изображающей точки из положения (a_1) в положение ($б$). Напряжение на тиристоре становится малым и равным $U_{ост}$, а максимальное значение тока I ограничено сопротивлением резистора R. Чтобы выключить тиристор, нужно либо уменьшить ток в его главной цепи до значения тока удержания ($I < I_{уд}$) путем понижения напряжения U до U_2 после отключения цепи управления, либо создания в цепи УЭ управляющего тока противоположной полярности. Этот процесс на рис. 4.12 характеризует линия нагрузки, проведённая параллельно первой через точку $I_{уд,}$, и отсекающая от оси токов участок U_2 / R. При этом рабочая точка из положения ($б_1$) перейдет в положение (a_2), а при восстановлении напряжения – в положение (a).

В настоящее время тиристоры используются преимущественно

в силовой электронике, как мощные управляемые коммутаторы сило-

вых электрических цепей. Применяются тиристоры не только с односторонней проводимостью с управлением по катоду либо по аноду, но и симметричные (симисторы), проводящие ток в обоих направлениях [13]. УГО некоторых видов тиристоров показаны на рис. 4.13.

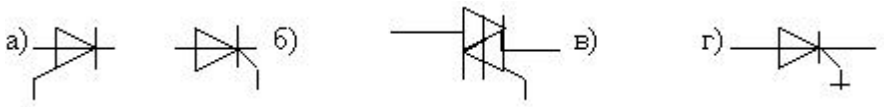


Рис. 4.13. Условные графические изображения тиристоров: управляемый по аноду (*а*), по катоду (*б*), симметричный (*в*), запираемый (*г*)

К основным параметрам тиристора относятся допустимые значения токов и напряжений, скорости их изменения, время включения – выключения.

5. КОМПОНЕНТЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Оптоэлектроника – раздел электроники, изучающий использование эффекта взаимодействия электромагнитных волн оптического диапазона ($3\cdot10^{11}$ – $3\cdot 10^{17}$) Гц, (1 мм – $1\cdot 10^{-3}$ мкм) с электронами в веществах и методы создания оптоэлектронных приборов (ОЭП) и устройств, использующих это взаимодействие для генерации, передачи, хранения, обработки и отображения информации [9]. Длина волны излучения определяется соотношением:

$$\lambda[\text{м}] = \frac{C}{f} = \frac{300\cdot 10^{6}[\text{м/с}]}{f\,[1/\text{с}]}. \qquad (5.1)$$

Время возникновения идей оптоэлектроники (ОЭЛ) – 50-е годы XX века. Как самостоятельный раздел науки и техники ОЭЛ начала

формироваться в 60-е годы (появление лазеров и излучающих диодов). С 1970-х годов возникла интегральная оптика.

Большинство современных ОЭП и устройств работает в диапазоне волн (0,5 – 1,5) мкм, ($6 \cdot 10^{14}$ – $2 \cdot 10^{14}$) Гц. Работа этих устройств основана на использовании различных видов люминесценции (холодное свечение, продолжающееся после исчезновения облучения), электро-магнито-акусто-оптических эффектов, фотоэлектрических явлений.

Достоинства и преимущества ОЭЛ по сравнению с традиционной полупроводниковой электроникой обусловлены:

– электрической нейтральностью квантов оптического излучения – фотонов;

– высокой частотой световых колебаний;

– малой расходимостью светового луча (до 1″) и возможностью его фокусировки [9].

Электрическая нейтральность фотонов обеспечивает невосприимчивость оптических каналов связи к воздействиям электромагнитных полей, т.е. обеспечивает высокую помехозащищенность; полную гальваническую развязку входных и выходных цепей; двойную (пространственную и временную) модуляцию потока оптического излучения.

Высокая частота световых колебаний обеспечивает высокую информационную емкость оптических каналов связи.

Малая расходимость светового луча позволяет передать энергию оптического излучения с минимальными потерями.

Основными оптоэлектронными элементами являются:

а) источники когерентного (связанного, при сложении усиливающегося) излучения (полупроводниковые лазеры) и некогерентного излучения [излучающие диоды (ИК, УФ, светодиоды)];

б) оптические среды (активные, пассивные);

в) приемники оптического излучения (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры);

г) оптические элементы (линзы, призмы, зеркала, поляризаторы):

– волоконно-оптические элементы [жгуты, фоконы (фокус, конус)],

– селфоки (self focusing);

– интегрально-оптические элементы (оптические зеркала, фильтры).

Широкое применение находят в электронно-вычислительных средствах излучающие диоды, оптоэлектронные пары, оптоэлектронные переключатели, оптроны, различные классы индикаторов.

5.1. Излучающие диоды

Излучающий диод – это диод, содержащий полупроводниковый *p–n*-переход, в котором при прохождении электрического тока генерируется оптическое излучение в инфракрасной (ИК), видимой или ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Распространены инфракрасные и излучающие в видимой части спектра диоды (светодиоды). Прохождение тока через *p–n*-переход в прямом направлении в светодиодах сопровождается рекомбинацией инжектированных носителей заряда. В определенных материалах (GaAs, GaSb, InAs, InSb и т.д.) процесс рекомбинации сопровождается выделением кванта света – фотона, при этом возникает некогерентное свечение люминисценции. Цвет свечения зависит от материала примеси полупроводника: примесь ZnO – красный цвет, азот N – зеленый, (ZnO + N) – желтый, оранжевый. Основные характеристики светодиода (ВАХ и характеристика яркости) показаны на рис. 5.1.

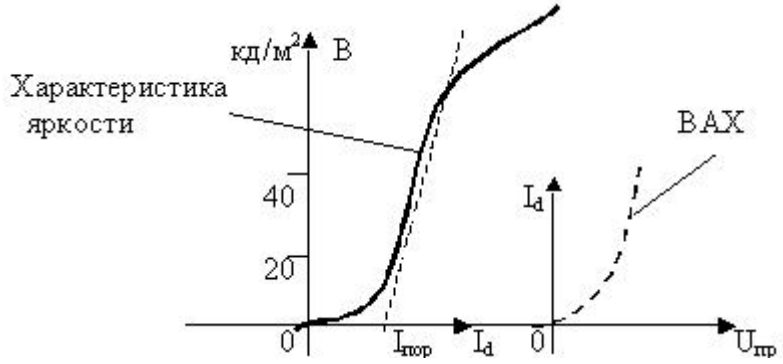


Рис. 5.1. ВАХ и характеристика яркости светодиода

Характеристика яркости имеет нелинейный начальный участок, на котором яркость мала, и линейный участок, в пределах которого яркость изменяется в десятки раз (рис. 5.1). Именно этот участок чаще всего используется. На этом участке яркость свечения:

$$B = B_0 (I_d - I_{пор}), \qquad (5.2)$$

где B_0 – чувствительность по яркости;

I_d – ток светодиода;

$I_{пор}$ – пороговый ток – ток, при котором возможна линеаризация характеристики, $I_{пор} \approx$ (0,1 – 2,5) мА.

Аналитическое выражение ВАХ:

$$I_d = I_m [(\exp (U/M\varphi_m) - 1], \qquad (5.3)$$

где I_m – тепловой ток;

φ_m – тепловой потенциал, M=(0,5 – 2).

В эквивалентной схеме (рис. 5.2, *в*) обозначено: R – омическое сопротивление кристалла полупроводника и контактов; $R_д$ – сопротивление p–n-перехода, зависящее от тока; $C_д$ – емкость p–n-перехода, зависящая от тока.

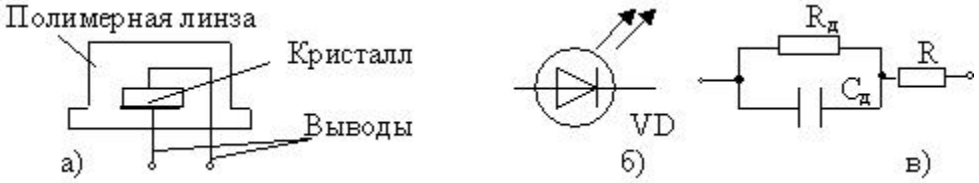


Рис. 5.2. Конструкция *(а),* УГО *(б)*
и эквивалентная схема *(в)* светодиода

Материалы для светодиодов – арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP и другие.

Основные параметры светодиодов:

1. Сила света – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении. Единица измерения – Вт/ср (ватт/стерадиан) или мКд (миликанделла), яркость измеряется в Кд/м^2. Для светодиодов сила света составляет (0,1 – 10) мКд.

2. Цвет свечения (длина волны излучения).

3. Постоянное прямое напряжение – падение напряжения при заданном токе, равное (2 – 4) В.

4. Угол излучения – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины ее максимального значения.

5. Характеристики яркости, ВАХ, КПД преобразования.

5.2. Фоторезисторы

В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием излучения. Под действием света в фоторезисторе возрастает концентрация подвижных носителей заряда за счет того, что кванты электромагнитного излучения возбуждают

электроны и переводят их из валентной зоны в зону проводимости. Фотопроводимость ζ_ϕ характеризуется изменением электропроводности кристалла по сравнению с его затемненным состоянием:

$$\zeta_\phi = q(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p), \qquad (5.4)$$

где Δn, Δp – приращения концентраций зарядов в результате облучения;

μ_n, μ_p – подвижности отрицательных и положительных зарядов.

Конструктивно фоторезистор (ФР) представляет собой пленку полупроводника, сформированную на основании и имеющую отводы, укрепленные в корпусе (рис. 5.3).

Рис. 5.3. Конструктивное представление и УГО фоторезистора

Свет может облучать поверхность либо параллельно, либо перпендикулярно токоотводящим поверхностям. Основные характеристики фоторезисторов показаны на рис. 5.4.

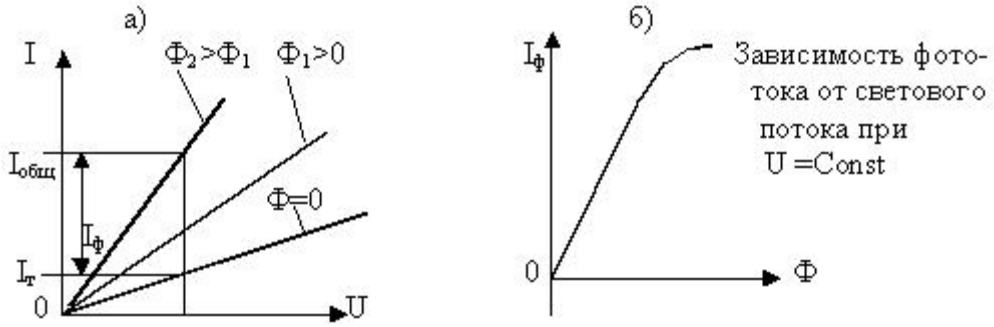


Рис. 5.4. ВАХ *(а)* и энергетическая характеристика *(б)* фоторезистора

Фоторезистор – пассивный элемент, ток в нём возникает только при подаче на него напряжения питания U, но величина тока зависит и от величины светового потока Φ, падающего на его поверхность. Ток фоторезистора $I_{общ}$ имеет две составляющих: I_ϕ – фототок, обусловленный наличием светового потока; I_m – темновой ток (при $\Phi = 0$), $I_{общ.} = I_m + I_\phi$.

Энергетическая характеристика в области малых потоков линейна, затем рост тока замедляется из-за увеличения рекомбинаций носителей заряда.

Основные параметры фоторезистора:

1. Чувствительность – это отношение выходной величины к входной. Обычно используют для ФР токовую чувствительность – отношение приращения фототока к вызвавшему его приращению величины, характеризующей излучение:

а) токовая чувствительность к световому потоку:

$S_{ф\ диф} = \Delta I_ф / \Delta Ф$;

б) токовая чувствительность к освещенности E:

$S_{E\ диф} = \Delta I_ф / \Delta E$.

Освещенность E измеряется в Люксах (Кд·ср/м^2). Чаще всего используют величину удельной интегральной чувствительности, которая характеризует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение 1 В.

$$S_{инт.} = I_ф / Ф \ . \qquad (5.5)$$

Чувствительность ФР зависит от материала, из которого они изготовлены, что отражают спектральные характеристики [абсолютная (АСХ) и относительная (ОСХ)]. АСХ – это зависимость чувствительности от частоты (длины волны) падающего излучения. ОСХ – это зависимость относительной чувствительности от частоты (длины волны):

$$S(\lambda) = S_{абс}(\lambda) / S_{абс.мах}(\lambda),$$

где $S(\lambda)$, $S_{абс}(\lambda)$, $S_{абс.мах}(\lambda)$ – соответственно относительная, абсолютная, максимальная абсолютная чувствительности.

Характеристики $S(\lambda)$ имеют чётко выраженный максимум, соответствующий определённой длине волны облучения для каждого материала (рис. 5.5).

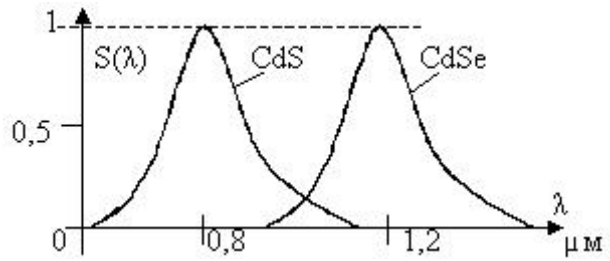


Рис. 5.5. Вид спектральных характеристик фоторезистора

2. Граничная частота $f_{гр}$ – это частота синусоидального сигнала, модулирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью немодулированного потока: $f_{гр} = (10^3 – 10^5)$ Гц.

3. Температурный коэффициент фототока:

$\alpha_m = \partial I_ф / \partial T \cdot 1/ I_ф$, при $Ф$ = Const, $\alpha_m = (–10^{-3} – 10^{-4})$ 1/град.

4. Рабочее напряжение (5 – 100) В.

5. Допустимая мощность рассеяния (0,01 – 0,1) Вт.

5.3. Фотодиоды

Фотодиод (ФД) – полупроводниковый диод, обладающий свойством односторонней проводимости, возникающей при воздействии на него оптического излучения. ФД используется для преобразования оптического сигнала в электрический. Наиболее распространены *p–i –n*-диоды, в которых толщина высокоомной *i*-области выбирается так, чтобы обеспечить наилучшие свойства (чувствительность и быстродействие) прибора. *p–i–n*-структура образуется, если области *p* и *n* разделены высокоомным слоем (рис. 5.6) с собственной (*i*) проводимостью для снижения напряженности поля в переходе.

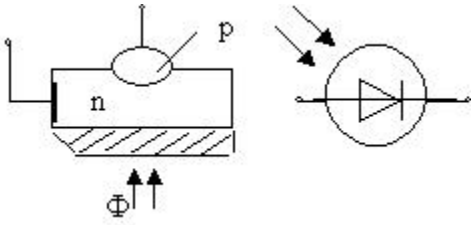


Рис. 5.6. Структура и УГО фотодиода

Действие фотодиода основано на поглощении света вблизи области *p–n*-перехода, в результате чего генерируются новые носители заряда (электронно-дырочные пары).

Различают два режима работы ФД:

а) фотодиодный, когда имеется источник питания, создающий обратное смещение;

б) вентильный (фотогенераторный), когда такой источник отсутствует.

В фотодиодном режиме возникающие в результате фотогенерации носители зарядов приводят к возрастанию обратного тока, который зависит от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от величины обратного напряжения (рис. 5.7).

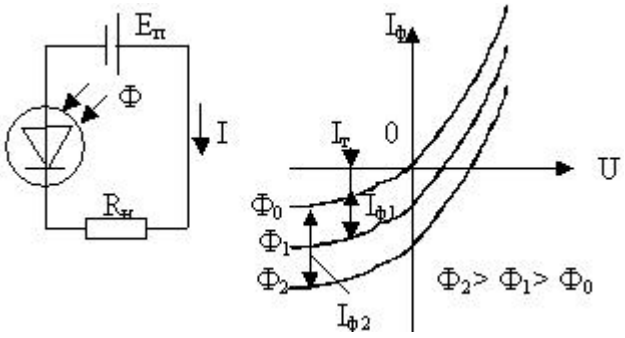


Рис. 5.7. Схема включения и ВАХ ФД в фотодиодном режиме

В вентильном (фотогенераторном) режиме ФД используется как фотогенератор (источник фотоэдс, фотоэлемент).

Фотоэдс $E_ф$ зависит от светового потока и свойств полупроводника:

$$E_ф \approx \varphi_т \ln (I_ф / I_0) = \varphi_т \ln (S_{инт}\, Ф / I_0)\,, \qquad (5.6)$$

где $\varphi_т$ – тепловой потенциал;

$I_ф$ – фототок:

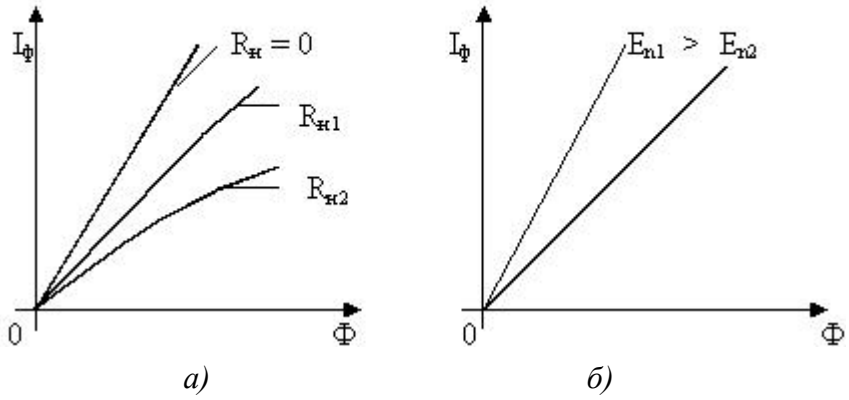
$I_ф = S_{инт}\, Ф;$

$S_{инт}$ – интегральная токовая чувствительность;

I_0 – тепловой ток *p–n*-перехода.

Основные характеристики и параметры фотодиода:

1. Энергетические характеристики $I_ф = f(Ф)$ – зависимости фототока от светового потока (рис. 5.8, *а*). При работе в генераторном режиме $I_ф = f(Ф)$ линейна, если $R_н = 0$ (коротко замкнутый ФД) (рис. 5.8, *б*). С ростом $R_н$ характеристики искривляются.



а) *б)*

Рис. 5.8. Энергетические характеристики фотодиода:
а – фотогенераторный режим, *б* – фотодиодный режим

2. Спектральные характеристики фотодиода аналогичны характеристикам фоторезистора.

3. Граничная частота – частота, при которой интегральная чувствительность уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со статическим значением $f_{гр} \approx 10^7$ Гц = 10 МГц. У фоторезисторов $f_{гр} \approx (1 – 100)$ кГц.

Сейчас разработаны ФД на основе *p–i–n*-структур, барьеров Шоттки, лавинные ФД, предназначенные в основном для повышения быстродействия и увеличения чувствительности.

5.4. Фототранзисторы

Фототранзистор (ФТ) – транзистор (обычно биполярный), в котором управление коллекторным током осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта. ФТ служит для преобразования световых сигналов в электрические с одновременным усилением последних. Включение ФТ во внешнюю электрическую цепь подобно включению транзистора по схеме с общим эмиттером, обычно с нулевым током базы (вывод базы отключен от внешней цепи). Такой режим

характерен только для ФТ и носит название «режим с плавающей базой».

Фототранзистор сделан так, что излучение попадает на область базы. В результате поглощения энергии в базе генерируются электронно-дырочные пары, участвующие в создании фототока. При отсутствии облучения ($Ф = 0$) между коллектором и эмиттером течет темновой ток, т.е. обратный ток p–n-перехода. Схемы включения ФТ показаны на рис. 5.9.

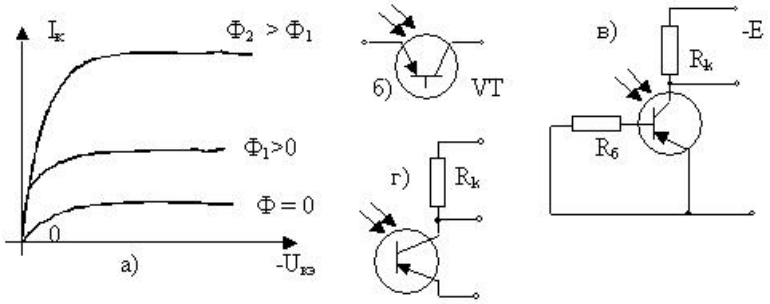


Рис. 5.9. Выходные характеристики *(а),* УГО *(б)* и схемы включения фототранзистора при наличии *(в)* и отсутствии *(г)* базового вывода

Основные характеристики и параметры фототранзистора:

1. ВАХ фототранзистора подобны ВАХ транзистора в схеме с ОЭ, но параметром служит не ток базы, а поток $Ф$ (рис. 5.9, *а*).
2. Энергетические $I_ф = f(Ф)$ и спектральные $S(\lambda)$ характеристики подобны характеристикам ФД.
3. Коэффициент усиления по фототоку:

$$K_{уф} = (1 + h_{21э}).$$

4. Ширина полосы пропускания – $(10^4 – 10^5)$ Гц.
5. Значение темнового тока (при $Ф = 0$).
6. Токовая чувствительность $S_{инт} = I_ф / Ф$.

В качестве высокочувствительных фотоприемников используются также полевые фототранзисторы, имеющие более широкую полосу пропускания $(10^6 – 10^8)$ Гц. Используются также фототиристоры.

5.5. Оптроны

Оптроны – это полупроводниковые приборы, состоящие из излучателя света и фотоприемника, взаимодействующих друг с другом и помещенных в общем корпусе. Оптроны используют для оптиче-

ской связи отдельных частей радиоэлектронных устройств. С помощью оптронов обеспечивается электрическая развязка между частями устройства (гальваническое разделение цепей).

В оптронах между источником излучения и фотоприемником имеется среда, выполняющая функции световода. Эта среда должна иметь большой коэффициент преломления для согласования с большим коэффициентом преломления материалов, служащих источниками света. Среды с большим коэффициентом преломления называются иммерсионными: это свинцовые и селеновые стёкла с коэффициентами преломления соответственно (1,7– 1,9) и (2,4 – 2,6).

Оптроны широко применяются в самых различных устройствах автоматики и электронной техники. Конструкции и параметры оптронов постоянно совершенствуются с целью уменьшения потребления энергии источниками излучения и расширения функциональных возможностей фотоприёмной части.

Структуры диодных оптронов с разными световодами приведены на рис. 5.10. Примеры обозначений оптронов показаны на рис. 5.11.

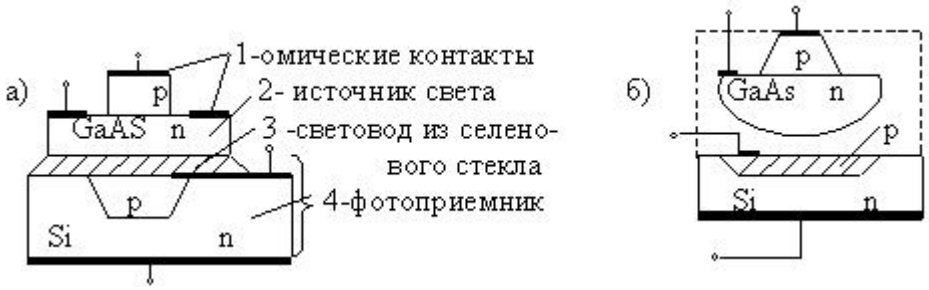


Рис. 5.10. Структура диодных оптронов со световодом из стекла (*а*) и вакуумным (воздушным) световодом (*б*):
1 – омические контакты; 2 – источник света;
3 – световод из селенового стекла; 4 – фотоприемник

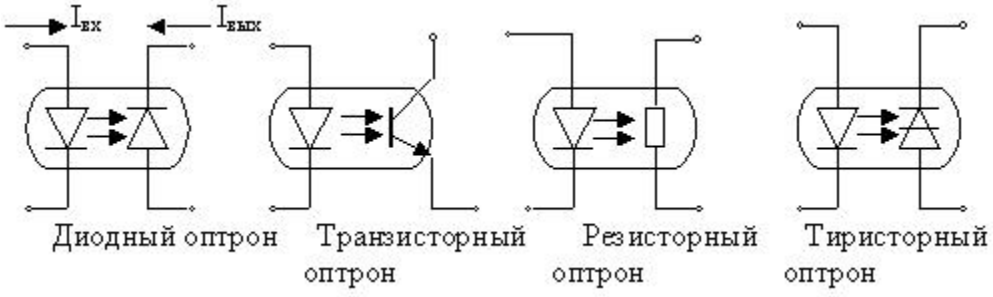


Рис. 5.11. Условные изображения оптронов разных типов

Сопротивление между входной и выходной цепями оптронов составляет (10^{13} – 10^{15}) Ом. Диодные, транзисторные и тиристорные оптроны используют в основном в ключевых режимах. Резисторный оптрон чаще всего применяют в усилительных устройствах. Сейчас разработаны оптроны, в которых совмещаются функции простейших оптронов и электронных преобразователей (усилителей), выполняемых на одной подложке [13]. Условное графическое изображение такого оптрона показано на рис. 5.12.

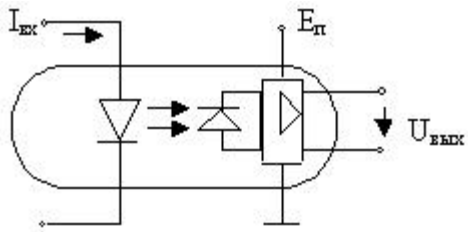


Рис. 5.12. Пример УГО оптрона с усилительным элементом на выходе

Промышленностью серийно выпускаются оптоэлектронные коммутаторы сигналов, состоящие из арсенид-галлиевого излучателя, кремниевого фотодиода и интегрального усилителя, обеспечивающего выходные уровни напряжения, достаточные для управления логическими элементами ТТЛ-серий (серии К249ЛП1, К262КП1 и др.). Входной ток оптоэлектронных коммутаторов не превышает 20 mA, ёмкость между входом и выходом – не более 5 пФ [13].

6. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНДИКАТОРОВ И ЛАЗЕРОВ

Там, где информацию требуется представить в форме, удобной для визуального восприятия часто применяются устройства, называемые *индикаторами*. Основные компоненты этих устройств – это приборы, обеспечивающие преобразование электрических сигналов в пространственное распределение яркости излучения или в распределение степени пропускания или поглощения светового излучения [4]. Из электрических сигналов в этих приборах получают ви-

димое изображение букв, цифр, геометрических фигур, знаков, полос, мнемосхем и пр.

Устройства отображения информации создаются на основе таких активных излучательных компонентов как:

– электронно-лучевые трубки;

– газонаполненные источники излучения;

– электролюминесцентные и накаливаемые приборы.

Широко распространены пассивные излучательные компоненты: жидкокристаллические, электрохромные, электрофоретические.

Цвет пассивных электрохромных компонентов зависит от интенсивности поля. В элекрофоретических приборах под действием электрического поля перемещаются заряженные пигментные частицы.

Наиболее часто применяют знакосинтезирующие индикаторы (ЗСИ) и электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), дисплеи. Дисплей – это устройство отображения информации, обеспечивающее связь человека с машиной.

По виду отображаемой информации ЗСИ делятся на:

– единичные (точка, запятая, круг, квадрат);

– цифровые;

– буквенно-цифровые (и специальные математические символы);

– шкальные (информация в виде уровней или значений величин);

– мнемонические (для изображений фрагментов мнемосхем);

– графические (графики, символы, спецзнаки).

По виду элементов и способу формирования информационного поля:

– сегментные;

– матричные.

По виду питающего напряжения:

– постоянного тока;

– переменного тока;

– пульсирующего тока.

По значению питающего напряжения:

– низковольтные (менее 5 В);

– средневольтные (менее 30 В);

– высоковольтные (более 30 В).

6.1. Вакуумные люминесцентные индикаторы

Вакуумные люминесцентные индикаторы (ВЛИ) относятся к активным источникам излучения, преобразующим электрическую энергию в световую. Используются в микрокалькуляторах и ЭВМ, кассовых аппаратах, электронных часах и приборах. ВЛИ представляет собой электронную диодную или триодную систему, в которой под воздействием электронной бомбардировки высвечиваются покрытые низковольтным катодолюминофором сегменты – аноды (рис. 6.1).

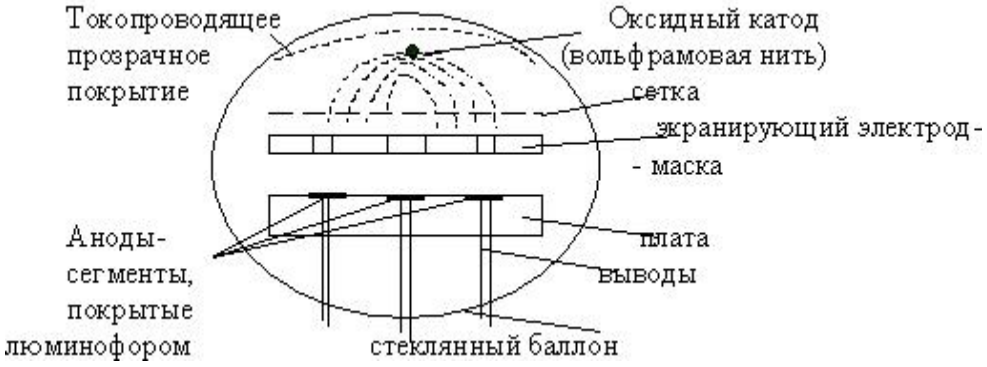


Рис. 6.1. Конструктивная схема электровакуумного люминесцентного накаливаемого индикатора (поперечный разрез)

Низковольтная вакуумная *катодная люминесценция* носит рекомбинационный характер: люминофор бомбардируется электронами, что приводит к нарушению его термодинамического равновесия. Появляются активные электроны и дырки, которые рекомбинируют между собой, излучая фотоны. Низковольтная катодолюминесценция

возникает при небольших ускоряющих напряжениях, приложенных между анодом и катодом (единицы – десятки Вольт).

ВЛИ выпускаются одноразрядные и многоразрядные, в цилиндрических и плоских баллонах, с различными размерами знаков разных типов:

– типа ИВ, ИВЛ (люминесцентные), например, ИВ27 имеет 24 вывода, яркость 500 кд/м^2 (для сравнения цветной кинескоп – 300 кд/м^2);

– шкальные – ИВЛШ;

– со встроенным управлением – ИВЛШУ;

– матричные – ИВЛМ;

– одноцветные и многоцветные индикаторы типа ИЛТ (бытовые).

Формирование изображения на информационном поле ВЛИ осуществляется статическим или мультиплексным (динамическим) способами. Статический способ – возбуждающие сигналы подаются на аноды – сегменты и изображение знака формируется одновременно. При динамическом способе возбуждающие сигналы подаются в определенной последовательности с заданной частотой, создавая эффект непрерывного свечения. Частота должна быть не ниже 50 Гц во избежание мелькания изображения.

6.2. Электролюминесцентные индикаторы

Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ) предназначены для отображения различной информации в системах управления и контроля. В них также используется явление люминесценции, заключающееся в том, что некоторые вещества способны излучать свет под действием электрического поля. ЭЛИ в простейшем случае представляет собой плоский конденсатор с диэлектриком – слоем органической смолы с люминесцентным порошком на основе сульфида или селенида цинка (ZnS, ZnSe). Добавление активаторов обеспечивает цвет свечения: зеленый, голубой, желтый, красный, белый). Упрощенная структура ЭЛИ показана на рис. 6.2.

Рис. 6.2. Структура электролюминесцентного индикатора:
1 – стеклянная пластина; 2 – прозрачная токопроводящая пленка;
3 – слой люминофорадиэлектрик; 4 – металлическая пленка

Принцип действия индикатора: переменное напряжение прикладывается к токопроводящим пластинам, под действием созданного электрического поля в слое люминофора возникает свечение. Электрод 4 (металлический) имеет форму букв или цифр, или сегментов для получения синтезируемых знаков или геометрических фигур. Электрод 2 (оксид олова) – сплошной и прозрачный. Наиболее распространены буквенно-цифровые сегментные индикаторы (для изображения цифр используются 7 – 9 сегментов, 19 сегментов используются для изображения любых букв русского и латинского алфавита).

ЭЛИ делают обычно с пластмассовым корпусом, питание осуществляется переменным напряжением частотой (400 – 1200) Гц. Линейные размеры могут быть от единиц до десятков миллиметров. Потребление – от долей мА до десятков мА. Срок службы – несколько тысяч часов. Яркость изображения – хорошая. Недостатком является сложная система управления.

6.3. Жидкокристаллические индикаторы

Жидкокристаллические индикаторы **(**ЖКИ) – это пассивные приборы, в основу работы которых положено свойство некоторых веществ изменять свои оптические показатели (коэффициенты отражения, преломления, поглощения) под влиянием внешнего электрического поля. При этом вследствие модуляции падающего света изменяется цвет участков, к которым приложено электрическое поле, и на поверхности вещества появляется рисунок определенной конфигурации. Жидкокристаллическим (мезаморфным) называется термодина-

мически устойчивое состояние, при котором вещество сохраняет анизотропию (неодинаковость) физических свойств, присущую твердым кристаллам, и текучесть, характерную для жидкостей (производные бензола, стероидов и других соединений). Характерной особенностью жидких кристаллов (ЖК) является то, что молекулы имеют сравнительно большую длину и относительно малую ширину. ЖК-диэлектрики, имеющие удельное сопротивление $R_{уд.} = 10^6 – 10^{10}$ ОМ·см. Плотность ЖК близка к плотности воды. Конструктивная схема элемента ЖКИ показана на рис. 6.3.

В ЖК используются три основных электрооптических эффекта:

– эффект, связанный с движением молекул вещества – динамическое рассеяние (ДР);

– эффект, связанный с поворотом молекул: твист – эффект (ТЭ);

– эффект «гость – хозяин» (Г – Х).

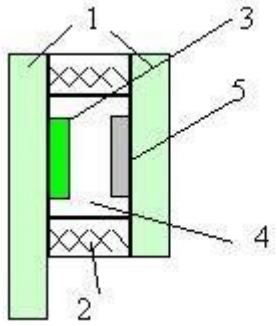


Рис. 6.3. Конструктивная схема элемента ЖКИ:

1 – стеклянные пластины; 2 – склеивающее соединение;

3 – передний прозрачный электрод (например, двуокись олова);

4 – ЖК; 5 – задний отражающий или прозрачный электрод

ЖКИ могут быть двух классов – работающие на просвет и работающие на отражение. Отражающие не требуют специальной подсветки. Работающие на просвет предполагают наличие дополнительного освещения.

В зависимости от вида используемого электрооптического эффекта технология изготовления ЖКИ различна. Например, в ЖКИ, работающих на эффекте ДР с отражением, на поверхности проводящих слоев наносится тонкое химически инертное прозрачное покрытие.

В ЖКИ, использующих отражение и твист-эффект (ТЭ), помимо стеклянных пластин имеются поляризаторы, внутренние поверхности пластин полируются.

В индикаторах Г – Х один слой (хозяин) взаимодействует с молекулами другого слоя (гостя). Слой ЖК-хозяина за счет поглощения световой энергии при отсутствии электрического поля приобретает окраску гостя, а под действием электрического поля – обесцвечивается. Эти цветовые различия хорошо воспринимаются в условиях высокой освещенности. ЖКИ, работающие в условиях низкой освещенности (менее 35 Кд/м^2), работают с подсветкой. Для подсветки используют миниатюрные лампы накаливания.

Достоинством ЖКИ является малое потребление на:

– эффекте ДР – (5 – 10) мкВт/см^2;

– эффекте ТЭ – не более 20 мкВт/см^2.

ЖКИ хорошо совместимы с КМОП микросхемами. Рабочие напряжения ЖКИ ДР не более 20 В, а на ТЭ – 5 В. Срок службы ЖКИ при эксплуатации достигает 40 тысяч часов (на переменном токе). Недостатком является низкое быстродействие (особенно при пониженных температурах) и зависимость параметров от температуры окружающей среды.

Управление ЖКИ обычно осуществляется сигналами переменного тока, так как долговечность ЖКИ, работающих на постоянном токе, оказывается на порядок ниже. Часто используют так называемый фазовый метод управления, при котором на общий электрод на задней поверхности и электроды на передней поверхности подаются прямоугольные импульсы, сдвинутые на 180^0 при возбуждении, и без сдвига – при отсутствии возбуждения.

6.4. Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы

Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы (ППЗСИ) – это низковольтные приборы, основу которых составляет полупроводниковый диод, в *p*–*n*-переходе которого в результате рекомбинации электронов и дырок при их инжекции генерируется световое излучение. ППЗСИ удобно совмещаются с уровнями токов микро-

схем. Приборы имеют достаточно хороший уровень яркости, однако обладают относительно высокими уровнями рабочих токов.

Основные материалы для изготовления ППЗСИ – твердые растворы GaAs (арсенид галия) и GaP (фосфид галия). Примером единичных ППЗСИ являются светодиоды АЛ 102, АЛ 307, структуры которых показаны на рис. 6.4.

Рис. 6.4. Структурные схемы единичных ППЗСИ

Многоэлементные ППЗСИ. Выпускается несколько сотен типов ППЗСИ. Они различаются числом элементов, размерами, конфигурацией, цветом свечения, конструкцией. По числу элементов и их взаимному расположению в пределах поля одного разряда различают четыре типа знаковых индикаторов:

1) семисегментный – может быть цифровой, буквенно-цифровой;

2) девятисегментный – для изображения цифр и набора букв русского и латинского алфавита;

3) тридцапяти сегментный матричный – универсальный, позволяет изменять начертания отдельных символов;

4) пятисегментный – дополнение к девятисегментному, предназначен для изображения символов полярности и переполнения в цифровых устройствах. Пример цифрового индикатора, в котором каждый элемент – светодиод, показан на рис. 6.5.

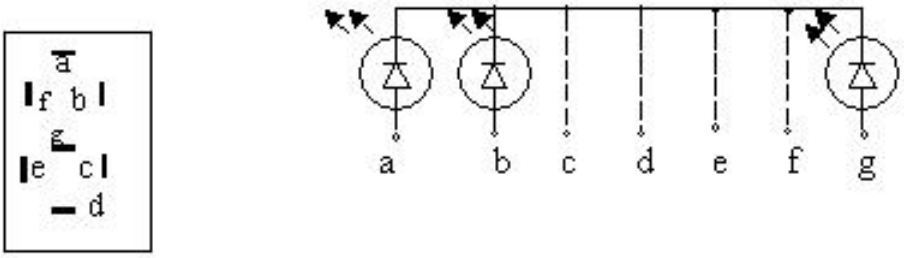


Рис. 6.5. Вид и схема одноразрядного
семисегментного индикатора

6.5. Дисплеи

Дисплей – это оконечное устройство информационных систем, служащее для визуального отображения информации и связи человека с вычислительным устройством (может быть в наручных часах, калькуляторах и т.п.).

Все дисплеи можно разделить на два класса: излучающие свет и модулирующие свет. Светоизлучающий дисплей должен давать свечение достаточной яркости, особенно, если используется при дневном освещении. Важен цвет свечения: человеческий глаз наиболее чувствителен к желтому и желто-зеленому цвету. Изображение должно быть контрастным. Контраст – это отношение максимальной яркости к минимальной. Учитывая, что человеческий глаз не различает изменения, происходящие быстрее, чем за 0,1 с, от дисплеев не требуется большое быстродействие. Разрешающая способность дисплея оценивается минимальным размером наблюдаемого элемента. Это может быть квадрат со стороной не менее 50 мкм. У многих дисплеев этот элемент больше и зависит от яркости и расстояния до наблюдателя.

Многие дисплеи обладают памятью, т.е. способностью сохранять изображение после снятия питания или с малым потреблением. Основные типы светоизлучающих дисплеев:

а) электронно-лучевые устройства, (электронно-лучевые трубки);

б) дисплеи на (СИД) светоизлучающих диодах – обычно имеют размер несколько сантиметров и низкое напряжение питания (5 В);

в) дисплеи на газоразрядных элементах (плазменные), имеют две взаимно-перпендикулярные системы электродов в виде проводящих полос. Между электродами расположены ячейки с инертным газом (неон, ксенон или смесь). На этом принципе делаются газоразрядные индикаторные панели (ГИП), которые могут иметь, например, 512 горизонтальных и 512 вертикальных полос. Разрешающая способность (2 – 3) линии на 1 мм. Неон дает оранжевое свечение. Используя люминофор на электродах можно получить другой цвет. Питание ГИП возможно постоянным или переменным током;

г) электролюминесцентные дисплеи – составлены из ЭЛИ.

Основные типы светомодулирующих дисплеев:

– жидкокристаллический (ЖКД) имеет малую мощность, низкую стоимость. Может быть малого (в часах) и большого (в ноутбуках) размера;

– электрохромные (ЭХД) – основаны на использовании электрохромного эффекта, состоящего в том, что некоторые вещества под действием электрического поля или при прохождении тока меняют свой цвет. Таким веществом является, например, WO_3 – триоксид вольфрама. Его пленка под напряжением приобретает синий цвет. Требуемое напряжение (0,5 – 1,5) В. При перемене полярности напряжения пленка приобретает исходный цвет. Недостаток – невысокое быстродействие, небольшой срок службы;

– электрофорезные дисплеи (ЭФД) – используют явление электрофореза: под действием электрического поля в жидкости перемещаются взвешенные частицы (пигмент в окрашенной жидкости), притягиваются к электродам, образуя знаки, по цвету резко отличающиеся от цвета жидкости. Напряжение для ЭФД составляет десятки Вольт. Срок службы – десятки тысяч часов, быстродействие – низкое.

6.6. Лазеры

Принцип действия лазера основан на использовании синхронного и синфазного излучения атомов (когерентного излучения).

Идея лазера высказана советским учёным В.А. Фабрикантом в 1939 году. Идея состоит в следующем. Вещество содержит цепочки атомов, вытянутых в одну линию. Если эти атомы находятся в возбужденном состоянии, то внешний фотон, ударив в крайний атом, вызовет излучение нового фотона, который будет вызывать излучение следующего фотона и т.д. Световой поток увеличивается во много раз, теоретически до $\approx 10^{20}$ раз. Образуется огромное количество фотонов, имеющих одинаковую энергию и одинаковое направление движения, т.е. образуется *когерентное излучение*.

В реальности не все атомы могут быть возбуждены, поэтому могут поглощать энергию фотона и уменьшать излучение света.

Если число невозбужденных атомов равно числу возбужденных, никакого усиления излучения не будет. Чтобы произошло усиление когерентного излучения, необходимо в большинстве атомов «переселить» электроны на более высокие энергетические уровни (более удаленные от ядра орбиты) и сохранять это состояние достаточное время. С этой целью к данному веществу, называемому активной средой (рабочим веществом), нужно подводить каким-то образом энергию, вызывающую возбуждение атомов. Этот процесс называется накачкой. Работу лазера (оптического квантового генератора) можно пояснить следующим образом (рис. 6.6).

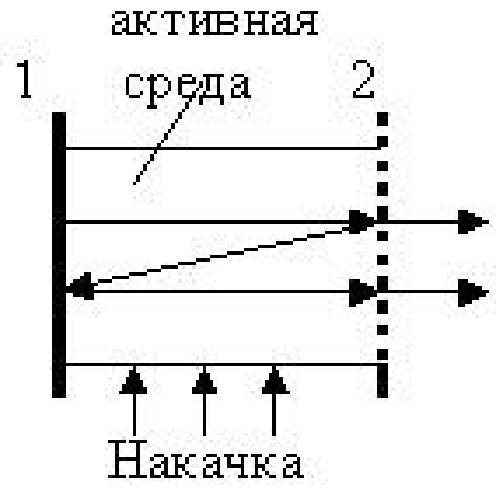


Рис. 6.6. Иллюстрация работы лазерного излучателя

В пространстве, заполненном активной средой, между двумя плоскими зеркалами (рис. 6.6), одно из которых *2* – полупрозрачное, движется поток излучаемых фотонов от зеркала *1* к зеркалу *2*. Большая часть этого потока излучается через зеркало *2* во внешнюю среду в виде когерентного луча, а небольшая часть движется обратно, увеличиваясь по пути, затем отражается от зеркала *1*, вновь движется к зеркалу *2*, частично отражается и т.д.

Для поддержания атомов в возбужденном состоянии служит внешний источник энергии, осуществляющий накачку.

Основные свойства лазерного излучения:

1. Весьма малая расходимость луча (тысячные доли градуса), так как это поток параллельно летящих фотонов.

2. Лазерное излучение с помощью собирающих линз и зеркал можно сфокусировать в точку диаметром 0,5 мкм. (Если такой луч послать к Луне, то он высветит пятно диаметром 30 м.)

3. Высокая монохроматичность, т.е. практически излучение идет на одной единственной частоте. Полоса, которую занимает когерентное излучение лазера, составляет $\approx 10^{-3}$ Гц.

4. Можно в широких пределах управлять длительностью излучения (от длительных до сверхкоротких вспышек – 10^{-15} с). При этом мощность излучения оказывается очень большой, что приводит к тому, что вещества могут изменять свои свойства под действием лазерного излучения. Интенсивность такого излучения высока (при фокусировке – до 10^{20} Вт/см^2), напряженность электрического поля в луче достигает 10^{11} В/см. Под действием такого поля многие вещества подвержены ионизации атомов и расщепляются на электроны и положительные ионы.

Типы лазеров [25]:

1) жидкостные лазеры, имеющие в качестве активной среды растворы органических красителей. Длина волны излучения λ = (0,3 – 1,3) мкм (от ультрафиолетового до инфракрасного излучения);

2) газовые лазеры, в которых под действием накачки происходит дисссоциация молекул газа и их возбуждение. Распространены CO_2 -лазеры, которые могут иметь мощность до 10 кВт, $\lambda \approx 10$ мкм, $\eta \approx 40$ %. Имеется несколько разновидностей газовых лазеров:

а) фотодиссационные;

б) газоразрядные, имеющие в качестве активной среды разреженный газ, накачка в них осуществляется тлеющим разрядом (аргоновые, ионные лазеры);

в) лазеры на атомных переходах: λ = (0,4 – 100) мкм. (Гелиево-неоновые лазеры, накачка осуществляется тлеющим разрядом переменным напряжением U = 1000 В);

г) молекулярные лазеры λ = (0,2 – 50) мкм:

– разновидность – газодинамический CO_2-лазер, позволяет получить большую мощность (до 100 кВт);

– эксимерные лазеры – накачка быстрыми электронами, среда – инертный газ, λ = 0,126 мкм (наиболее короткая волна излучения);

3) химические лазеры – возбуждение за счет химических реакций;

4) полупроводниковые лазеры (твердотельные).

В твёрдотельных лазерах когерентное излучение получается при переходе электронов с нижнего уровня зоны проводимости на верхний уровень валентной зоны. Существует два типа таких лазеров.

Первый тип имеет пластину безпримесного полупроводника, в котором накачка производится пучком быстрых электронов с энергией (50 – 100) кЭВ, либо делается оптическая накачка. К таким полупроводникам относятся GaAs (арсенид галия), CdS (сульфид кадмия), CdSe (селенид кадмия). Накачка электронным пучком вызывает сильный нагрев, поэтому требуется интенсивное охлаждение (до 80 ^{0}К). Накачка может быть поперечная либо продольная, последняя позволяет лучше обеспечить охлаждение кристалла полупроводника.

Второй тип – инжекционный лазер, представляющий собой кристалл с особым *p–n*-переходом (рис. 6.7).

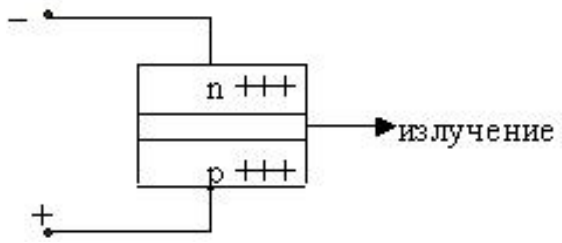


Рис. 6.7. Упрощенная структура твёрдотельного инжекционного лазера

Полупроводник имеет высокую концентрацию примесей ($10^{18} \div 10^{19}$)/см^3 (вырожденный полупроводник). Грани, перпендикулярные плоскости *p–n*-перехода отполированы и служат зеркалами оптического резонатора. На переход подается прямое смещение, происходит активная рекомбинация носителей (GaAs), генерируется излучение с длиной волны λ = (0,8 – 0,9) мкм и коэффициентом полезного действия η = (50 – 60) %. Такой лазер размером 1 мм дает мощность излучения до 10 мВт (в импульсе до 100 Вт).

Применение лазерного излучения. В настоящее время область применения лазерного излучения стремительно расширяется. Быстро развивается нелинейная оптика – область физики, изучающая взаимодействие лазерного излучения с различными веществами.

Лазерный луч может проникать через вещества, непрозрачные для обычного света. Изменение частоты (генерация гармоник) наблюдается при прохождении лазерного луча через некоторые вещества. При этом достигается КПД около 100 %. Лазерное излучение способно управлять движением атомов. Взаимодействие лазерного луча с атомами вещества вызывает появление в спектре этого вещества новых линий, по которым можно судить о новых свойствах этого вещества (нелинейная лазерная спектроскопия).

Важнейшая область применения – связь. Высокая направленность и огромный частотный диапазон позволяют разместить в узком диапазоне большое число передач. В космосе лазерный луч позволяет осуществить связь на огромные расстояния. На земле высококачественная связь лазерным лучом осуществляется по оптоволоконным линиям (световодам). В густом тумане лазерный луч позволяет использовать связь на расстоянии нескольких сотен метров.

Лазерное излучение используется в локаторах, в геодезических измерениях, при обработке твердых материалов, в качественных видео и звукозаписях, в медицине (лазерный скальпель), в биологии – для изучения процессов фотосинтеза и т.п. Лазеры, использующие излучение СВЧ-диапазона (сантиметровые и миллиметровые волны), называют мазерами [25].

МОДУЛЬ 2. ОСНОВЫ АНАЛОГОВОЙ СХЕМОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

7. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

7.1. Общие сведения об усилителях электрических сигналов

Усилителем называется устройство, способное путем затраты небольшого количества энергии управлять потоком гораздо большей энергии, получаемой от какого-либо источника [21]. Если управляющая и управляемая величины (энергия) являются электрическими, усилитель называют усилителем электрических сигналов.

Классификация усилительных устройств по двум основным признакам приведена на рис. 7.1.

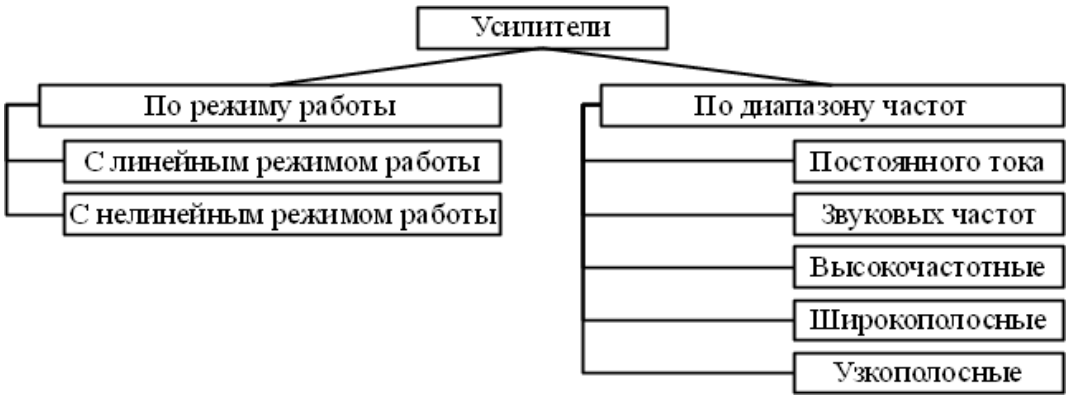


Рис. 7.1. Примерная классификация усилителей электрических сигналов

Классификация чаще всего делается по диапазону частот усиливаемых сигналов, называемому полосой пропускания. С этой точки зрения считается что, например, усилитель постоянного тока (УПТ) имеет полосу пропускания $\Delta f = (0 – 10^6)$ Гц, усилитель звуковых частот (УЗЧ) – $(20 – 20 \cdot 10^3)$ Гц, широкополосный усилитель – $(20 – 100 \cdot 10^6)$ Гц.

Усилители с линейным режимом работы предназначены для получения выходного сигнала, близкого по форме к входному, т.е. мгновенные значения выходного электрического сигнала должны быть пропорциональны мгновенным значениям входного сигнала (чаще всего это синусоидальные сигналы).

В усилителях с нелинейным режимом работы мгновенные значения входного и выходного сигналов не пропорциональны. К ним относятся усилители-ограничители, нелинейные импульсные усилители, ключевые схемы.

В зависимости от характера нагрузки и назначения различают усилители напряжения (УН), усилители тока (УТ), усилители мощности (УМ), однако в конечном итоге в усилителях преобразуется (усиливается) мощность.

Простейшую часть усилительного устройства часто называют усилительным каскадом (рис. 7.2), а цепь, в которую включен каскад, трактом (рис. 7.3).

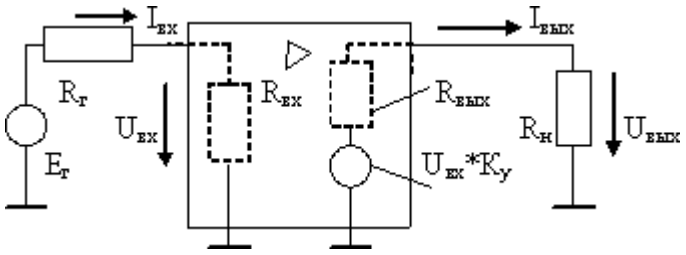


Рис. 7.2. Структурная схема включения каскада в усилительный тракт

Каждый усилительный каскад выполняет свою функцию. Различают каскады входные (предварительного усиления), промежуточные, выходные.

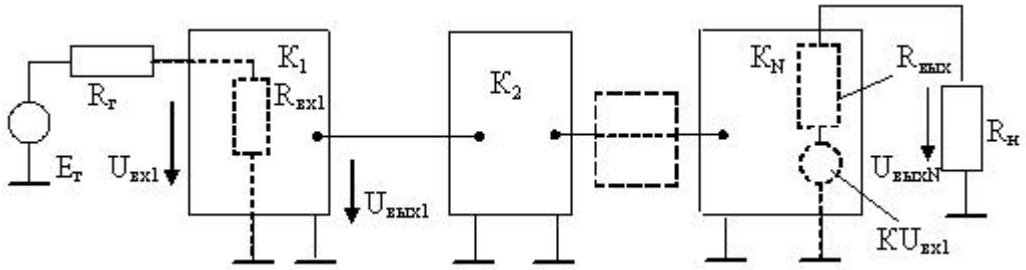


Рис. 7.3. Каскадное соединение усилительных каскадов

Первый каскад – входной, осуществляет согласование усилителя с источником входного сигнала $E_Г$, имеющим внутреннее сопротивление $R_Г$. Согласование – это приведение в соответствие возможностей источника и параметров нагрузки. Каскад имеет входное сопротивление $R_{ВХ1}$ и коэффициент усиления K_1. Нагрузкой первого каскада служит входное сопротивление второго каскада и т.д.

Промежуточные каскады обеспечивают усиление полезного сигнала до величины, необходимой для выходного каскада. Выходной каскад обеспечивает передачу требуемого тока, напряжения или мощности в нагрузку $R_Н$. Если соединение каскадов осуществлено так, что пропускается и постоянная, и переменная составляющие сигнала, усилитель называется усилителем с непосредственной (гальванической) связью. Примером может быть усилитель постоянного тока (УПТ). Если связь осуществлена так, что постоянная составляющая не пропускается на выход, то такие усилители называются усилителями переменного тока. Межкаскадные связи могут быть осуществлены через RC-цепи, трансформаторы, LC-цепи.

Со стороны входных зажимов усилитель характеризуется входным сопротивлением $R_{BX} = \Delta U_{BX} / \Delta I_{BX}$.

Величина R_{BX} различна в различных режимах, поэтому для *источников входного сигнала* возможны следующие режимы:

а) режим холостого хода (ХХ), когда $R_Г << R_{ВХ}$;

б) режим короткого замыкания (КЗ), когда $R_Г >> R_{ВХ}$;

в) согласованный режим, когда $R_Г = R_{ВХ}$, такой режим обеспечивают в усилителях мощности, так как в этом случае происходит наибольшая передача мощности [24].

Со стороны выходных зажимов усилитель (или любой каскад) можно представить зависимым источником напряжения $E = K \cdot U_{ВХ}$
и выходным сопротивлением $R_{ВЫХ}$. В зависимости от соотношения выходного сопротивления и сопротивления нагрузки $R_Н$ для выходной цепи также различают три режима:

а) $ХХ_{вых}$, когда $R_{ВЫХ} << R_Н$;

б) $КЗ_{вых}$, когда $R_{ВЫХ} >> R_Н$;

в) согласованный, когда $R_{ВЫХ} = R_Н$.

7.2. Основные параметры и характеристики усилителей

Технические характеристики усилительных устройств определяют степень усиления полезных сигналов, зависимости параметров усилителя от частоты синусоидальных входных воздействий, шумовые характеристики. К основным параметрам усилителя относят следующие величины.

1. Коэффициент усиления (передачи, преобразования) по напряжению:

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}, \qquad (7.1)$$

где $U_{ВЫХ}$, $U_{ВХ}$ – амплитудные или действующие значения выходного и входного переменных напряжений.

Часто определяют коэффициент усиления как $K = U_{ВЫХ} / E_Г$. При последовательном соединении каскадов (рис. 7.3) общий коэффициент усиления $K_U = U_{ВЫХN} / U_{ВХ1}$ определяется произведением коэффициентов усиления каскадов:

$$K_U = (U_{ВЫХ1} / U_{ВХ1}) \cdot (U_{ВЫХ2} / U_{ВХ2}) \cdot \cdot \cdot (U_{ВЫХN} / U_{ВХN}),$$

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot \cdot \cdot K_{UN}. \qquad (7.2)$$

Обычно коэффициент усиления усилителя оценивается в децибелах (дБ):

$$K_U, \text{дБ} = 20\ lg(U_{ВЫХ} / U_{ВХ}) = 20\ lg K_U.$$

Соответствие значений коэффициентов в относительных единицах (о.е.) и в децибелах показано в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Соответствие относительных единиц и децибел

K_U, о.е.	1,258	$2^{1/2}$	2	3,16	10	31,6	10^2	10^3	10^4	10^5

K_U, дБ	2	3	6	10	20	30	40	60	80	100

Выражение K_U в децибелах позволяет определять результирующий K_U для нескольких последовательно соединенных каскадов сложением коэффициентов, а не умножением их:

$$K_U,\text{дБ} = K_{U1},\text{дБ} + K_{U2},\text{дБ} + \cdots\cdots + K_{UN},\text{дБ}.$$

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_I = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} \text{ или } K_I,\text{дБ} = 20\lg K_I. \qquad (7.3)$$

Коэффициенты усиления по току и напряжению, определяемые для гармонических входных воздействий, как правило, рассматриваются в виде комплексных величин, зависящих от частоты – $\dot{K}(j\omega)$ или $\underline{K}(\omega)$.

3. Мощность на выходе (выходная мощность) – $P_{ВЫХ}$.

4. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = P_{ВЫХ} / P_{ВХ} \text{ или } K_p,\text{дБ} = 10\lg(P_{ВЫХ} / P_{ВХ}) = 10\lg K_p. \qquad (7.4)$$

5. Коэффициент преобразования (передачи) – более общее понятие, частным случаем которого является коэффициент усиления, это отношение величины выходного сигнала к величине входного, например:

$S = I_{ВЫХ} / U_{ВХ}$ – коэффициент преобразования напряжения $U_{ВХ}$ в ток $I_{ВЫХ}$; $W = P_{ВЫХ} / I_{ВХ}$ – коэффициент преобразования тока в мощность.

6. Динамический диапазон усиления:

$$D = U_{ВХ\,MAX} / U_{ВХ\,MIN};\ \text{D, дБ} = 20\lg D.$$

Это отношение наибольшего допустимого входного напряжения к его наименьшему значению: $U_{ВХ\,MAX}$ – ограничено сверху возникновением искажений на выходе; $U_{ВХ\,MIN}$ – ограничено снизу уровнем собственных шумов, когда уже невозможно различить шум и полезный сигнал.

7. Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение выходной мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку, к общей мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = P_{ВЫХ} / P_0.$$

КПД характеризует энергетические показатели усилителя.

8. Напряжение шумов и помех усилителя.

Наличие шумов на выходе усилителя при отсутствии входного сигнала объясняется несколькими причинами:

– тепловым шумом сопротивлений, обусловленным хаотическими движениями носителей заряда в проводнике, находящимся при температуре выше абсолютного нуля;

– шумами электронных приборов, также обусловленными тепловым действием и неоднородностями структуры;

– шумами, создаваемыми за счет пульсаций напряжения источников питания.

Шумовые свойства оценивают коэффициентом шума:

$$F = \frac{P_{ВЫХ} / P_{ШВЫХ}}{P_{ИСТ} / P_{ШИСТ}} = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ИСТ}} \cdot \frac{P_{ШИСТ}}{P_{ШВЫХ}}. \qquad (7.5)$$

Коэффициент шума показывает во сколько раз ухудшается отношение сигнал/шум на выходе усилителя по сравнению с отношением сигнал/шум источника сигнала.

Ввиду того, что коэффициенты усиления – величины комплексные, важнейшими характеристиками усилителей являются амплитудные, амплитудно-частотные (АЧХ), фазо-частотные (ФЧХ), амплитудно-фазо-частотные (АФЧХ) характеристики.

9. Амплитудная характеристика – это зависимость амплитудного значения напряжения первой гармоники выходного напряжения от амплитуды синусоидального входного напряжения (рис. 7.4).

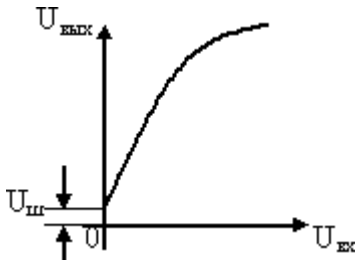
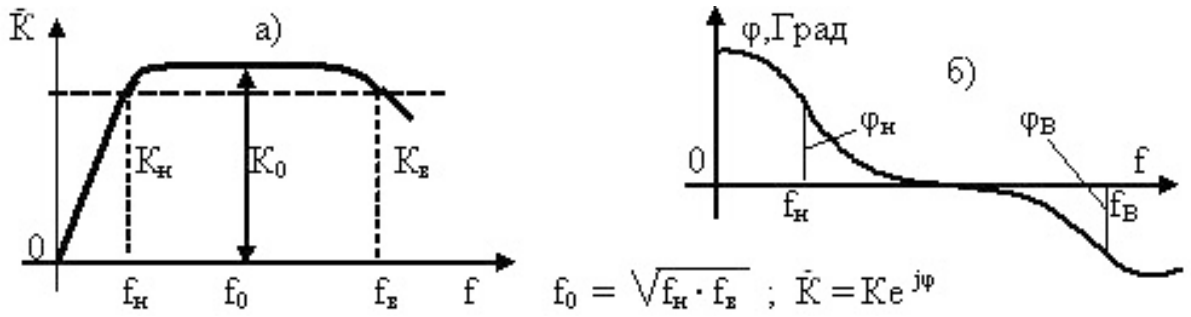


Рис. 7.4. Амплитудная характеристика усилителя ($U_Ш$ – напряжение шума)

10. АЧХ – это зависимость модуля комплексного коэффициента усиления $|K(f)|$ от частоты f входного сигнала (рис. 7.5, *а*).



а *б*

Рис. 7.5. АЧХ (*а*) и ФЧХ (*б*) усилителя переменного тока

11. ФЧХ – зависимость угла сдвига фазы φ между выходным и входным напряжениями от частоты f (рис. 7.5, *б*). На рис. 7.5 обозначено: K_0 – коэффициент усиления на средней частоте f_0; K_H, K_B – коэффициенты усиления на нижней (f_H) и верхней (f_B) границе полосы пропускания усилителя; φ_H, φ_B – фазовый сдвиг, соответственно на нижней и верхней частотной границе.

12. АФЧХ – это построенная на комплексной плоскости зависимость модуля коэффициента усиления $|\dot{K}(f)|$ и угла сдвига фазы между входным и выходным напряжениями от частоты. АФЧХ объединяет АЧХ и ФЧХ (рис. 7.6).

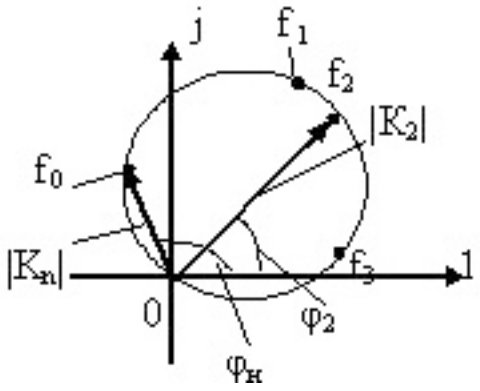


Рис. 7.6. АФЧХ усилителя переменного тока

АФЧХ представляет собой годограф вектора $\dot{K}(f)$ на комплексной плоскости, длина которого соответствует модулю коэффициента усиления на данной частоте, а угол поворота относительно оси действительных чисел соответствует сдвигу фаз между входным и выходным сигналами.

Свойства усилителей по быстродействию характеризуются переходной характеристикой (ПХ).

13. ПХ – это зависимость от времени выходного напряжения усилителя, на вход которого подан мгновенный скачок напряжения $U_{ВХ}(t)$ (рис 7.7).

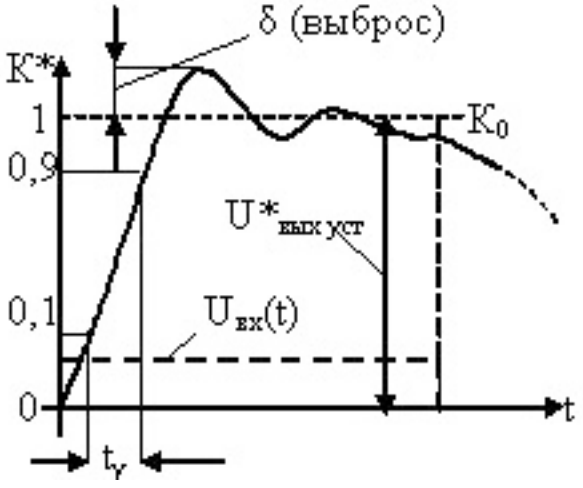


Рис. 7.7. Переходная характеристика усилителя

На рис. 7.7 обозначено: выброс δ – величина максимального превышения над установившимся значением; $t_У$ – время установления от уровня *0,1* $U_{ВЫХ\ УСТ}$ до уровня *0,9* $U_{ВЫХ\ УСТ}$; K – относительный коэффициент усиления (за 1 принята величина $K = U_{ВЫХ} / U_{ВЫХУСТ}$).

14. Рабочий диапазон частот (полоса пропускания) – полоса частот от нижней f_H до верхней f_B, в пределах которой $K(f)$ не выходит за пределы заданных допусков. Часто рабочий диапазон частот определяют на уровне, меньшем максимального на 3 дБ, при этом K_U уменьшается на границах этого диапазона в $\sqrt{2}$ раз.

15. Коэффициенты частотных искажений. Частотные искажения обусловлены отклонением частотных характеристик от идеальных и приводят к искажениям формы сигналов. Коэффициенты частотных искажений M_H, M_B показывают уменьшение модуля коэффициента усиления относительно его среднего значения в области низких и высоких частот:

$$M_H = K_0 / K_H;\ M_B = K_0 / K_B, \qquad (7.6)$$
$$M_H, \text{ дБ} = 20lg(K_0 / K_H);\ M_B, \text{ дБ} = 20lg(K_0 / K_B),$$

где K_0, K_H, K_B – коэффициенты (модули) усиления на средних, низких и высоких частотах. K_0 обычно определяют для частоты $f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_B}$.

Неравномерность АЧХ – выраженное в процентах максимальное отклонение коэффициента усиления в заданной полосе частот от заданного значения, также характеризует частотные свойства уси-лителя:

$$\delta(\%) = \Delta K_{MAX} / K_0 \cdot 100\ \%.$$

16. Фазовые искажения обусловлены отличием ФЧХ от идеальной и вызываются неодинаковым сдвигом по фазе отдельных гармонических составляющих спектра сигнала сложной формы. Фазовые искажения возникают из-за наличия в схемах усилителей реактивных (ёмкостных, индуктивных) сопротивлений элементов схемы и инерционности полупроводниковых приборов. Существуют теоретические условия усиления (передачи) сигнала без искажения его формы [21]. Пусть входной сигнал есть сумма m гармонических составляющих:

$$U_{BX} = \sum_{n=1}^{m} U_{n\ MAX} \sin(n\omega t + \phi_n),$$

где n – номер гармоники;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

φ_n – начальный фазовый сдвиг n-й гармоники.

Если усилитель, который одинаково усиливает амплитуды гармоник с коэффициентом K, на частоте n-й гармоники вносит фазовый сдвиг, зависящий от частоты гармонической составляющей как
$\varphi_n = n\omega\tau$, где τ – время сдвига, причём τ = Const, то

$$U_{ВЫХ} = K \times \sum_{n=1}^{m} U_{n\ MAX} \sin(n\omega(t + \tau) + \varphi_n). \qquad (7.7)$$

Отсюда следует, что входное и выходное напряжения отличаются лишь временем сдвига τ, а форма их сохраняется неизменной.

Таким образом, форма сигнала не искажается, если фазовый сдвиг, вносимый усилителем, изменяется прямо пропорционально частоте. Идеальной ФЧХ является прямая, проходящая под углом
к горизонтальной оси. Мерой фазовых искажений является разность ординат действительной и идеальной ФЧХ – $\Delta\varphi$ (рис. 7.8). Частотные и фазовые искажения относятся к линейным искажениям.

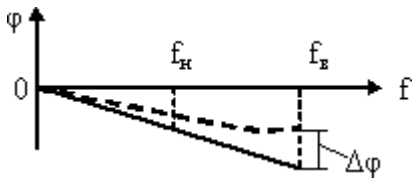


Рис. 7.8. Отклонение реальной ФЧХ (показана пунктиром) от идеальной

17. Наряду с линейными искажениями в усилительных устройствах присутствуют и нелинейные искажения, обусловленные нелинейностью амплитудной характеристики усилителя. Их оценивают либо коэффициентом нелинейных искажений $K_{НИ}$, либо коэффициентом гармоник $K_Г$.

$$K_{НИ} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \ldots + P_n}{P_1 + P_2 + P_3 + \ldots + P_n}},$$

$$K_Г = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \ldots + P_n}{P_1}}, \qquad (7.8)$$

где P_1 – мощность первой гармоники выходного сигнала;

P_n – мощность n-й гармоники выходного сигнала.

В обоих случаях в числителе подкоренного выражения стоит сумма мощностей гармоник с порядком, большим единицы.

7.3. Усилительные каскады на биполярных транзисторах

Принципы построения и действия различных каскадов поясним на примере структурной схемы для усилительного каскада на каком-либо усилительном элементе (УЭ).

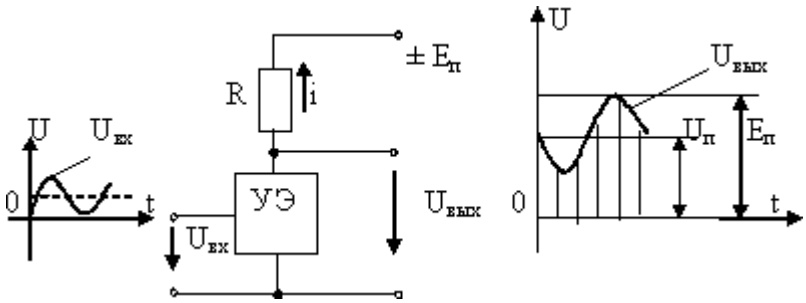


Рис. 7.9. Структурная схема усилительного каскада и осциллограммы сигналов на его входе и выходе

Основным элементом каскада (рис. 7.9) является управляемый (усилительный) элемент (УЭ) – это может быть, в частности, биполярный или полевой транзистор. Резистор *R* ограничивает ток источника питания $E_П$. Усиливаемый входной сигнал $U_{ВХ}$ подается на вход УЭ. Выходной сигнал снимается с выхода УЭ или резистора *R*. Выходной сигнал $U_{ВЫХ}$ создается в результате изменения сопротивления УЭ, т.е. в результате изменения тока *i* в выходной цепи под воздействием $U_{ВХ}$.

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения $E_П$ в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения внутреннего сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом. Переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входной цепи), следует рассматривать как переменные составляющие суммарного тока и напряжения, состоящего из постоянной
и переменной составляющих.

Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока $I_П$ и напряжения $U_П$. Эти составляющие определяют режим покоя усилительного каскада. Параметры покоя по входной и выходной цепи характеризуют статический режим схемы при отсутствии входного сигнала. Если усилительный элемент – транзистор, то параметры усилительного каскада зависят от способа включения транзистора, выполняющего роль управляемого элемента. Для биполярных транзисторов различают три вида каскадов: с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК), общей базой (ОБ).

Усилительный каскад с общим эмиттером (схема ОЭ). Упрощённая схема каскада с общим эмиттером показана на рис. 7.10.
В схеме эмиттерная цепь является общей для входного контура, образованного источником сигнала и цепью база-эмиттер транзистора,
и для выходного контура, содержащего цепь коллектор-эмиттер транзистора, разделительный конденсатор $C_{С2}$ и резистор $R_Н$.

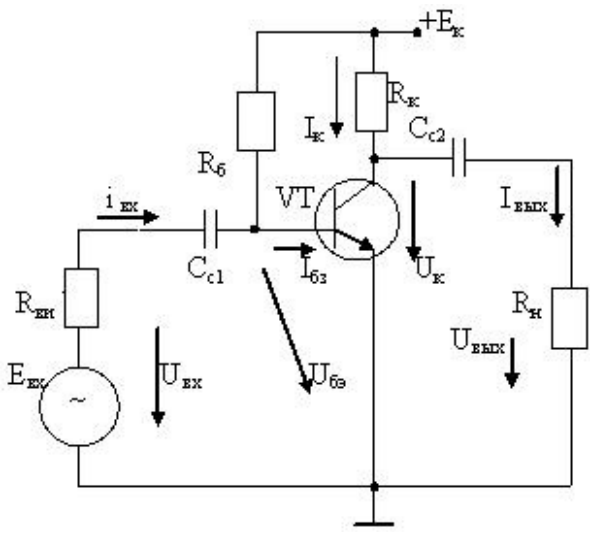


Рис. 7.10. Схема усилительного каскада с транзистором, включённым по схеме с общим эмиттером

Назначение и обозначения элементов в схеме (рис. 7.10):
E_K – ЭДС источника питания; U_K – напряжение на коллекторе;
$U_{БЭ}$ – напряжение между базой и эмиттером; $E_{ВХ}$ – ЭДС источника входного сигнала; $U_{ВХ}$, $U_{ВЫХ}$ – входное и выходное напряжение;
$R_{ВИ}$ – резистор в цепи источника сигнала; $R_Б$ – резистор для создания начального тока базы $I_{БЭ}$; R_K – резистор для ограничения тока в цепи коллектора; R_H – резистор нагрузки; $C_{С1}$ – разделительный конденсатор на входе; $C_{С2}$ – разделительный конденсатор на выходе; $i_{ВХ}$, $I_{ВЫХ}$ – входной и выходной токи; I_K – коллекторный ток. Разделительный конденсатор на входе $C_{С1}$ исключает прохождение постоянного тока от источника питания в цепь источника входного сигнала.

Конденсатор $C_{С2}$ обеспечивает прохождение в резистор нагрузки переменной составляющей $U_{ВЫХ}$ коллекторного напряжения U_K, не пропуская в нагрузку постоянный ток от источника питания E_K. Величина E_K обычно составляет (5 – 30) В, а токи транзисторов малой мощности обычно не превышают несколько десятков миллиампер.

Для коллекторной цепи транзистора при отсутствии входного сигнала справедливо уравнение, называемое уравнением покоя выходной цепи:

$$E_K = U_K + R_K I_K. \qquad (7.9)$$

Процесс усиления входного сигнала удобно представить графо-аналитическим способом, используя ВАХ транзистора. Подробное описание и иллюстрация такого способа представлены на рис. 7.11.

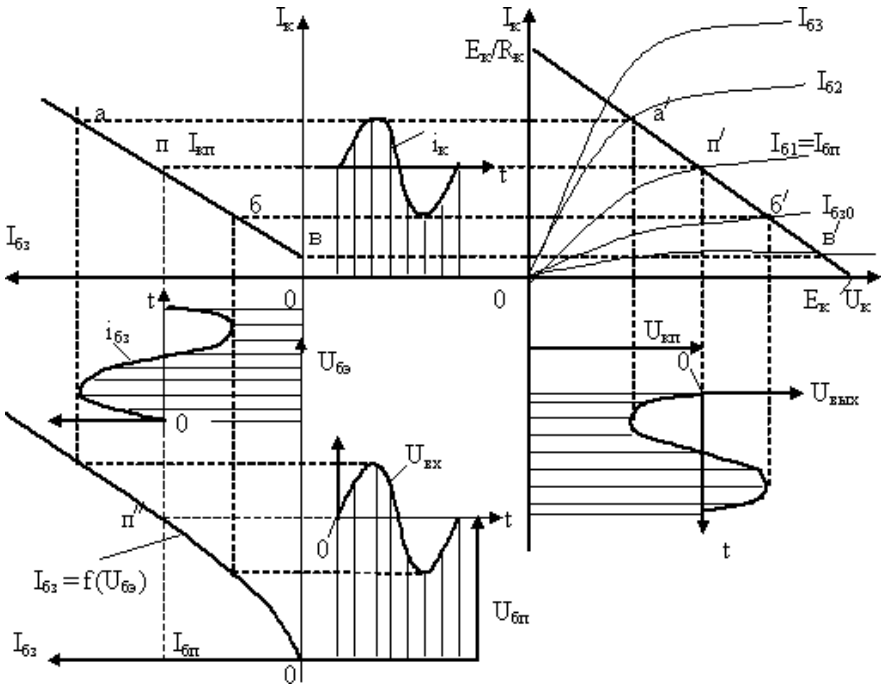


Рис. 7.11. Иллюстрация процесса усиления входного сигнала в схеме ОЭ

Для проведения анализа работы схемы, изображенной на рис. 7.10, уравнение (7.9) выходной цепи ($U_K = E_K - R_K I_K$) изобразим на плоскости выходных характеристик транзистора в виде прямой линии с координатами точек ($U_K = E_к$, $I_K = 0$) и ($U_K = 0$, $I_K = E_K / R_K$). Эта линия является вольт-амперной характеристикой (ВАХ) резистора R_K и называется линией нагрузки. Точки пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками дают графическое решение уравнения покоя (7.9) для данного сопротивления R_K и различных значений тока базы $I_{БЗ}$.

Во втором квадранте строим характеристику $I_K = f(I_{БЗ})$ по точкам пересечения а/, п/, в/. Затем в третьем квадранте строим по току $I_{БЗ}$ входную характеристику $I_{БЗ} = f(U_{БЭ})$, повернутую на 90^0 против часовой стрелки по сравнению с её обычным изображением.

Сопротивление резистора R_K выбирают, исходя из того, чтобы линия нагрузки располагалась ниже линий $I_{K\,MAX}$, $U_{K\,MAX}$, $P_{K\,MAX}$. В то же время участок а/в/ должен быть достаточно протяженным.

Резистор $R_Б$ обеспечивает режим покоя базы. С помощью этого резистора можно выбрать положение точки п// на линейном участке входной характеристики, при этом:

$$R_Б = (E_K - U_{БП}) / I_{БП}. \qquad (7.10)$$

При подаче на вход каскада переменного напряжения $U_{BX}(t)$ ток базы будет изменяться в соответствии с входной характеристикой
и будет иметь постоянную и переменную составляющую. В транзисторе будут изменяться коллекторный и эмиттерный токи, а также коллекторное напряжение U_K. Переменная составляющая коллекторного напряжения $U_K(t) = U_{ВЫХ}$ будет по амплитуде значительно больше U_{BX} и противоположна по фазе (рис. 7.11).

Если $U_{BX}(t)$ укладывается в линейный участок характеристики $I_{БЗ} = f(U_{БЭ})$, то искажений формы сигнала не будет. Если $U_{BX}(t)$ больше некоторого значения, появятся искажения формы – срезы, т.е. будут возникать нелинейные искажения. Оценку диапазона изменений входных напряжений, усиливаемых без искажения (динамического диапазона), делают по

амплитудной характеристике. Диапазон работы без искажений ограничивается линейным участком амплитудной характеристики (рис. 7.12, *б*).

При работе усилительного каскада в режиме, соответствующем линейным участкам характеристик, т.е. при отсутствии искажений, параметры усилителя можно рассчитать аналитически по
h-параметрам транзистора. Для этого используем схему замещения транзистора, включенного по схеме ОЭ, а в схеме каскада мысленно «закорачиваем» выводы конденсаторов и источника питания. Схема замещения приобретает вид, показанный на рис. 7.12, *а*.

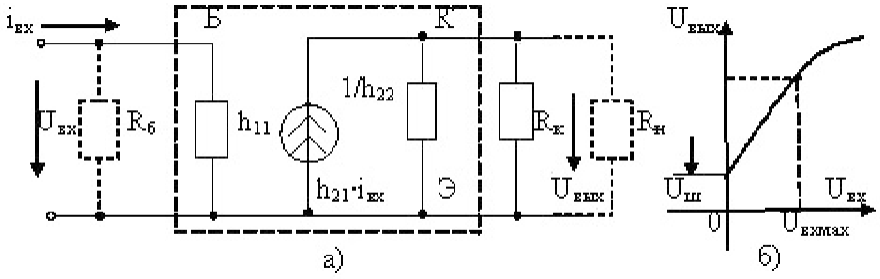


Рис. 7.12. Схема замещения каскада в *h*-параметрах (*а*) и определение диапазона неискаженной работы (*б*)

Система уравнений, соответствующая схеме замещения, имеет вид:

$$U_{ВХ} = i_{ВХ} \cdot h_{11} \cdot R_Б / (R_Б + h_{11});$$

$$U_{ВЫХ} / R_K + U_{ВЫХ} / R_H + h_{22} \cdot U_{ВЫХ} - h_{21} \cdot i_{ВХ} = 0. \qquad (7.11)$$

Обычно $R_Б >> h_{11}$, $R_H >> R_K$, тогда

$U_{ВХ} \approx i_{ВХ} \cdot h_{11}$; $h_{22} \cdot U_{ВЫХ} + U_{ВЫХ} / R_K \approx h_{21} \cdot i_{ВХ}$; откуда получим

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \cdot h_{21} / h_{11} \cdot 1 / (h_{22} + 1/R_K). \qquad (7.12)$$

Определяем коэффициент усиления по напряжению, учитывая, что $R_K \cdot h_{22} << 1$. В этом случае

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = h_{21} / h_{11} \cdot R_K / (1 + R_K h_{22}) \approx R_K \cdot h_{21} / h_{11}; \qquad (7.13)$$

$$R_{ВХ} = h_{11} \cdot R_Б / (R_Б + h_{11}) \approx h_{11}. \qquad (7.14)$$

$$R_{ВЫХ} = R_K \,||\, (1 / h_{22});$$

$$R_{ВЫХ} = R_K / h_{22} \,(R_K + 1 / h_{22}) = R_K / (1 + h_{22} R_K) \approx R_K. \qquad (7.15)$$

Как правило, $R_{ВХ}$ составляет сотни Ом – несколько кОм; $R_{ВЫХ}$ обычно больше $R_{ВХ}$.

Низкое входное сопротивление создает трудности в работе источника сигнала, если его внутреннее сопротивление велико. В этом случае образуется делитель напряжения входного сигнала, и лишь его малая доля попадает во входную цепь транзистора (рис. 7.10):
$U_{ВХ} = e_{ВХ} \cdot R_{ВХ} / (R_{ВИ} + R_{ВХ}) << e_{ВХ}$.

При высоком выходном сопротивлении каскада требуется, чтобы сопротивление нагрузки R_H было еще больше, иначе существенно уменьшается коэффициент усиления по напряжению.

Если $R_H << R_K$, то $|K_U| = h_{21} / h_{11} \cdot (R_H \,||\, R_K) << h_{21} / h_{11} \cdot R_K$.

Температурная стабилизация каскада ОЭ. С ростом температуры в полупроводнике увеличивается число неосновных носителей заряда, и в транзисторе увеличивается коллекторный ток I_K. С ростом I_K напряжение $U_K = E_K - R_K \cdot I_K$ уменьшается (рис. 7.13).

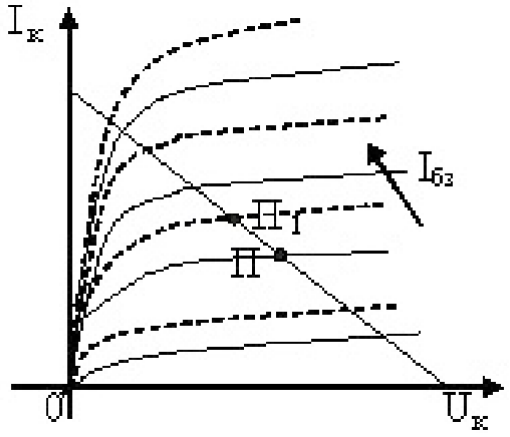


Рис. 7.13. Смещение точки покоя с ростом температуры

Со смещением точки покоя увеличивается вероятность искажений. Для уменьшения влияния температуры на характеристики каскада используют схемы температурной стабилизации (рис. 7.14).

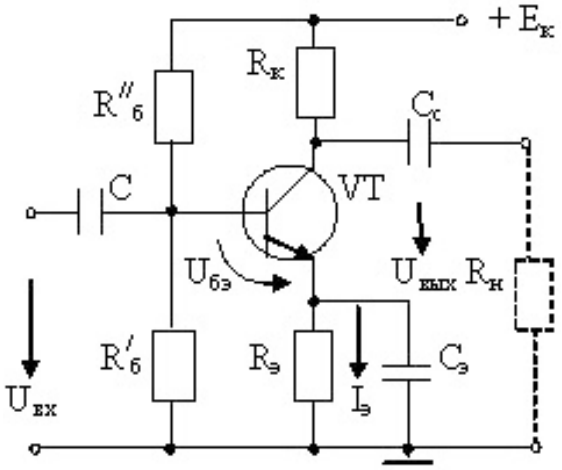


Рис. 7.14. Схема каскада ОЭ с эмиттерной термостабилизацией

Сопротивление $R_Э$ создаёт зависимость $U_{БЭ}$ от $I_Э$, однако при этом часть входного сигнала теряется из-за отрицательной обратной связи по току эмиттера. Включение $C_Э$ препятствует снижению коэффициента усиления.

Принцип температурной компенсации состоит в следующем.
В режиме покоя $U_{БЭ} = E_К R'_Б / (R'_Б + R''_Б) - R_Э I_Э$. Температурное увеличение тока $I_Э$ вызывает уменьшение управляющего транзистором напряжения $U_{БЭ}$, препятствующее этому увеличению. Исходное состояние транзистора сохраняется, однако часть коллекторного (выходного) напряжения теряется в виде падения напряжения на резисторе $R_Э$, что снижает коэффициент усиления схемы. При наличии входного сигнала $U_{БЭ} = U_{ВХ} - Z_Э I_Э$, где $Z_Э$ – эквивалентное сопротивление в цепи эмиттера. Если конденсатор $C_Э$ отсутствует, то $Z_Э = R_Э$ и коэффициент усиления для переменной составляющей выходного напряжения будет снижен. Если параллельно резистору $R_Э$ подключить конденсатор $C_Э$, имеющий сопротивление

$X_C = 1 / \omega C_Э << R_Э$, то $Z_Э << R_Э$ и снижение коэффициента усиления для переменной составляющей выходного напряжения будет небольшим.

Второй способ температурной стабилизации каскада ОЭ показан на рис. 7.15. В этой схеме ток базы определяется напряжением U_K
(в отличие от первой схемы, где $I_{Б3}$ определяется E_K). Если в результате роста температуры увеличивается I_K, то U_K падает, уменьшается и ток базы, возвращая ток коллектора к исходному состоянию. Чтобы переменная составляющая U_K не попадала в базу, установлен конденсатор $C_Ф$, причём ёмкость $C_Ф$ должна быть выбрана из условия
$Z = 1 / 2\pi f_H C_Ф = (R'_Б + R''_Б) / (10 \div 20)$, где f_H – низшая частота усиления.

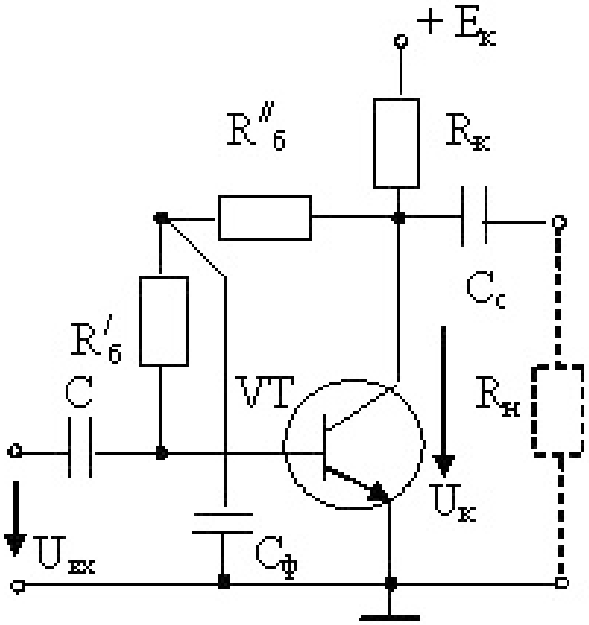


Рис. 7.15. Каскад ОЭ с коллекторной термостабилизацией

Эта схема обладает меньшей стабильностью, чем предыдущая, однако в ней отсутствует снижение $U_{ВЫХ}$ за счет потери в $R_Э$, что было в схеме с эмиттерной стабилизацией. Ёмкость конденсатора $C_Ф$
в этой схеме оказывается значительно меньшей, чем в предыдущей.

Усилительный каскад с общим коллектором (эмиттерный повторитель, схема ОК). Схема каскада с общим коллектором показана на рис. 7.16. В этом усилительном каскаде основной резистор,
с которого снимается $U_{ВЫХ}$, включён в эмиттерную цепь, а коллектор соединён с общей точкой схемы по переменной составляющей сигнала, так как внутреннее сопротивление источника E_K близко к нулю.
В режиме покоя резистор $R_Б$ создаёт начальный ток смещения в цепи базы. Его значение выбирают так, чтобы рабочая точка в режиме покоя на входной характеристике находилась примерно в середине её линейного участка.

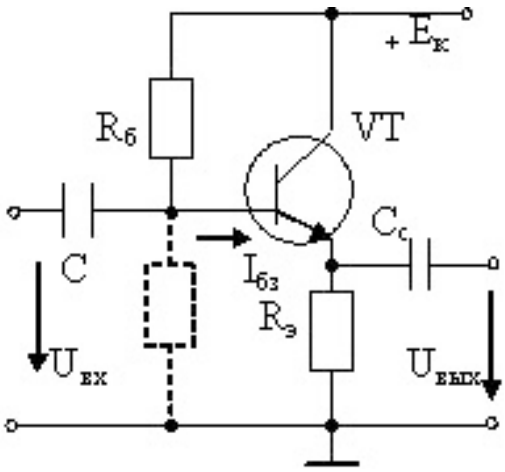


Рис. 7.16. Схема каскада с общим коллектором

Для определения основных характеристик усилительного каскада с ОК рассмотрим его схему замещения в *h*-параметрах (рис. 7.17). Система уравнений, описывающих схему имеет вид:

$$h_{21}\, i_{ВХ} + i_{ВХ} - U_{ВЫХ} / R_Э - U_{ВЫХ}\, h_{22} = 0;$$

$$U_{ВХ} = i_{ВХ}\, h_{11} + U_{ВЫХ}.$$

Решая систему относительно $U_{ВЫХ}$, получим:

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} / \{1+h_{11}(1+h_{22}R_Э)/[(1+h_{21})R_Э]\}.$$

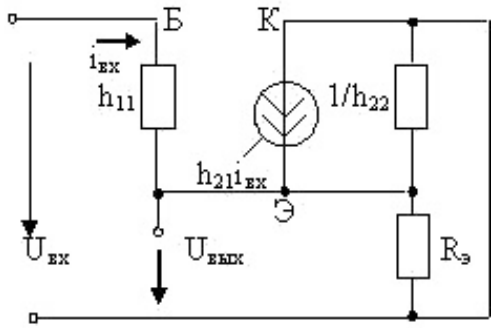


Рис. 7.17. Схема замещения эмиттерного повторителя в *h*-параметрах

Определяем коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$.

$$K_U = 1/\{1+h_{11}(1+h_{22}\, R_Э)/[(1+h_{21})R_Э]\}. \qquad (7.16)$$

По выражению (7.16) видно, что $K_U < 1$.

Учитывая, что обычно $R_Э = (10^2 – 10^4)$ Ом, а $h_{22} \cdot R_Э << 1$, выражение (7.16) можно преобразовать к виду:

$$K_U = 1/[\ 1+\ h_{11}\ /(1+\ h_{21}) \cdot R_Э]. \qquad (7.17)$$

В схеме эмиттерного повторителя фазы входного и выходного сигналов совпадают, а входное и выходное напряжения близки по значению, поэтому схема и получила своё название. Определяем входное сопротивление схемы:

$$R_{BX} = U_{BX} / i_{BX} = U_{BX} / (U_{BX} - U_{BЫХ}) \cdot h_{11} = h_{11} / (1 - K_U). \quad (7.18)$$

Анализ выражения (7.18) показывает, что $R_{BX} >> h_{11}$ и может достигать несколько сотен кОм. Большое входное сопротивление – достоинство эмиттерного повторителя. Для определения выходного сопротивления используем схему замещения каскада ОК в виде, представленном на рис. 7.18.

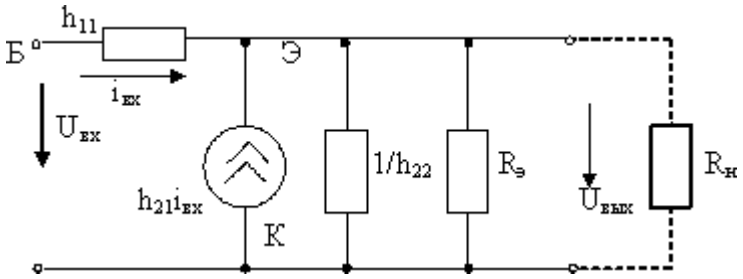


Рис. 7.18. Вариант схемы замещения эмиттерного повторителя

Выходное сопротивление, согласно [11], определяется как отношение напряжения холостого хода схемы (при отключенном сопротивлении нагрузки) к току короткого замыкания на выходе $R_{BЫХ} = U_{XX} / i_{K3}$.

Уравнения, описывающие схему в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) на выходе, имеют вид:

– в режиме КЗ: $i_{K3} = i_{BX} + h_{21} \cdot i_{BX} = i_{BX} (1+h_{21})$, или $i_{K3} = U_{BX} / h_{11} (1+h_{21})$;

– в режиме ХХ: $U_{XX} = U_{BX} - i_{BX} \cdot h_{11}$.

$$R_{BЫХ} = h_{11} \cdot (1 - h_{11}/R_{BX}) / (1 + h_{21}) \quad (7.19)$$

Учитывая, что $R_{BX} >> h_{11}$, получим $R_{BЫХ} \approx h_{11}/(1+h_{21})$.

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя имеет величину порядка десятков Ом, что также является достоинством каскада.

Таким образом, эмиттерный повторитель обладает высоким входным и малым выходным сопротивлениями. Следовательно, его коэффициент усиления по току может быть высоким. Эмиттерный повторитель обычно используют для согласования высокоомного источника усиливаемого сигнала с низкоомным нагрузочным устройством.

Температурная стабильность каскада обеспечивается основным резистором $R_Э$, включенным в эмиттерную цепь, подобно тому, как это было выполнено в схеме каскада с ОЭ (по принципу эмиттерной стабилизации – рис. 7.14).

Усилительный каскад с общей базой (схема ОБ). Схема каскада с общей базой показана на рис. 7.19. В схеме ОБ для создания режима покоя, при котором работа обеспечивается на линейном участке характеристики, используются резисторы $R'_Б$ и $R''_Б$. Конденсатор $C_Б$ имеет на усиливаемой частоте сопротивление $1/2\pi f C_Б << R_Б$, поэтому падение переменной составляющей на этой параллельной цепочке мало и можно считать, что база соединена с общей точкой схемы.

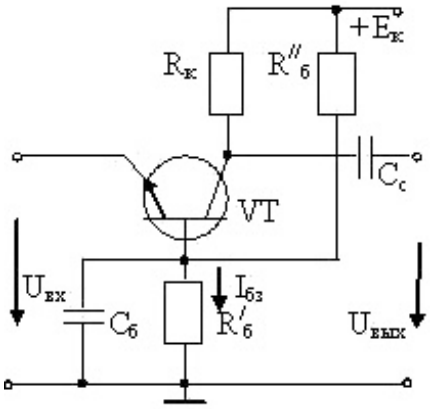


Рис. 7.19. Схема усилительного каскада с общей базой

Усиливаемый сигнал (входное напряжение U_{BX}) подается между базой и эмиттером. Через конденсатор связи C_C с коллектора снимается переменное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$.

Каскад с общей базой имеет коэффициент усиления по напряжению примерно такой же, как в схеме с ОЭ. Однако коэффициент усиления по току гораздо ниже, так как входной ток – эмиттерный, а выходной – коллекторный. Коэффициент усиления по мощности меньше, чем в схемах ОЭ и ОК. Каскад ОБ имеет малое входное сопротивление и высокое выходное сопротивление. По указанным причинам этот каскад используется редко.

7.4. Усилительные каскады на полевых транзисторах

Каскад с общим истоком (ОИ). Схема каскада с общим истоком на полевом транзисторе с управляющим *p–n*-переходом показана на рис. 7.20. Звено $R_И C_И$ обеспечивает отрицательное смещение на затворе *3* относительно истока *И*. Резистор $R_З$ соединяет затвор с общей шиной и предназначен для стабилизации входного сопротивления каскада, причём $R_З \approx 1$ МОм и на 1 – 2 порядка меньше входного сопротивления транзистора.

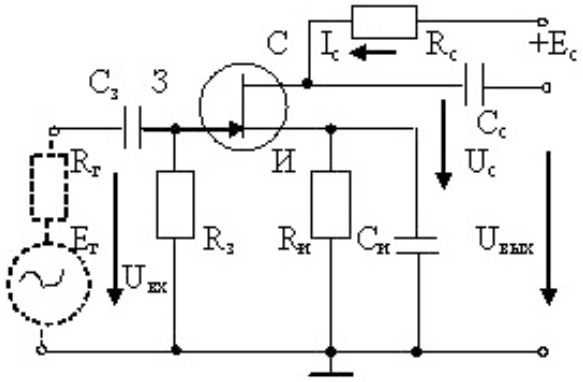


Рис. 7.20. Схема усилительного каскада ОИ на полевом транзисторе

Резистор R_C служит для ограничения тока и на нем выделяется усиленное переменное напряжение. Схема замещения усилительного каскада с ОИ для переменного тока имеет вид,

представленный на рис. 7.21. Пунктирным контуром охвачена схема замещения полевого транзистора.

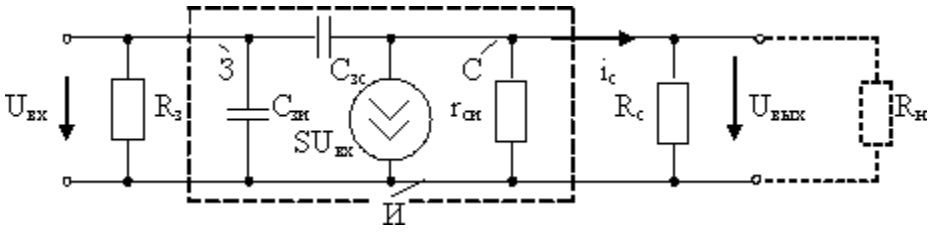


Рис. 7.21. Схема замещения
каскада ОИ для переменного тока

В схеме замещения (рис. 7.21) элементы $R_И$ и $C_И$, показанные в схеме на рис. 7.20, отсутствуют, так как предполагается, что емкость $C_И$ достаточно велика и «закорачивает» цепь $R_И$ по переменному току. $C_{ЗС}$, $C_{ЗИ}$ – конденсаторы, учитывающие наличие ёмкости между затвором и стоком и между затвором и истоком.

Основными параметрами каскада являются: входное сопротивление $R_{ВХ} \approx R_З$; коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$.

$$K_U = S\, U_{ВХ}\, r_{СИ}\, R_C /(R_C + r_{СИ}) / U_{ВХ} = S\, r_{СИ}\, R_C / (R_C + r_{СИ}), \quad (7.20)$$

где S – крутизна характеристики транзистора;

$r_{СИ}$ – внутреннее сопротивление транзистора между стоком и истоком.

Если учесть, что $R_C << r_{СИ}$, то

$$K_U \approx S\, R_C. \quad (7.21)$$

Выходное сопротивление каскада:

$$R_{ВЫХ} = R_C \,||\, r_{СИ} \approx R_C. \quad (7.22)$$

Часто используют упрощенные эквивалентные схемы каскадов. Например, в приближённых расчетах применяют упрощенные эквивалентные схемы для сигналов средних и высоких частот (рис. 7.22).

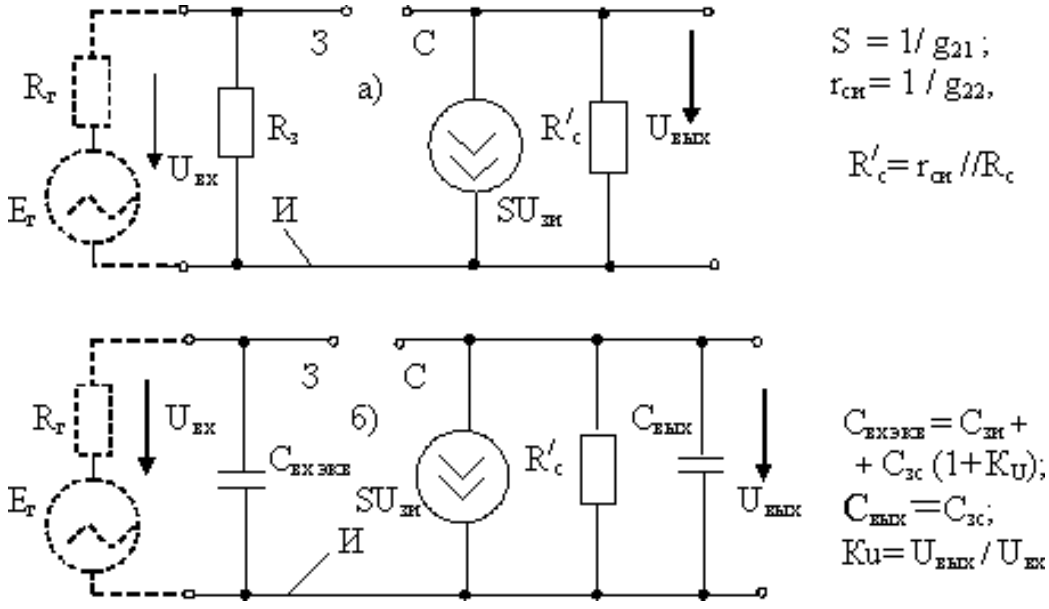


Рис. 7.22. Упрощённые схемы замещения каскада ОИ для сигналов средних (*а*) и высоких (*б*) частот

Анализ работы усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком удобно провести графоаналитическим способом с помощью стоковых характеристик $I_C = f(U_C)$.

Уравнение для цепи стока и истока в режиме покоя (рис. 7.20) имеет вид: $E_C = U_C + R_C I_C$, откуда

$$I_C = (E_C - U_C) / R_C. \qquad (7.23)$$

Аналогично методике, изложенной выше, в области выходных характеристик (рис. 7.23) в первом квадранте координатной плоскости проводим линию нагрузки. Стоко-затворную характеристику размещаем во втором квадранте в соответствии с положением точек пересечения нагрузочной линии с выходными характеристиками. Выбираем исходное положение характеристической (рабочей) точки (П, П/ на рис. 7.23). Построение графика выходного напряжения $U_{ВЫХ}(t)$ следует начинать с построения графика входного напряжения $U_{ВХ}(t)$ в третьем квадранте рис. 7.23.

Анализ графиков изменения входного $U_{ВХ}(t)$ и выходного $U_{ВЫХ}(t)$ напряжений показывает, что направления их изменений противоположны (противофазны).

Вследствие большого разброса параметров и влияния температуры для полевых транзисторов, как и для биполярных, необходима стабилизация положения рабочей точки на характеристиках транзистора (точки П, П' на рис. 7.23).

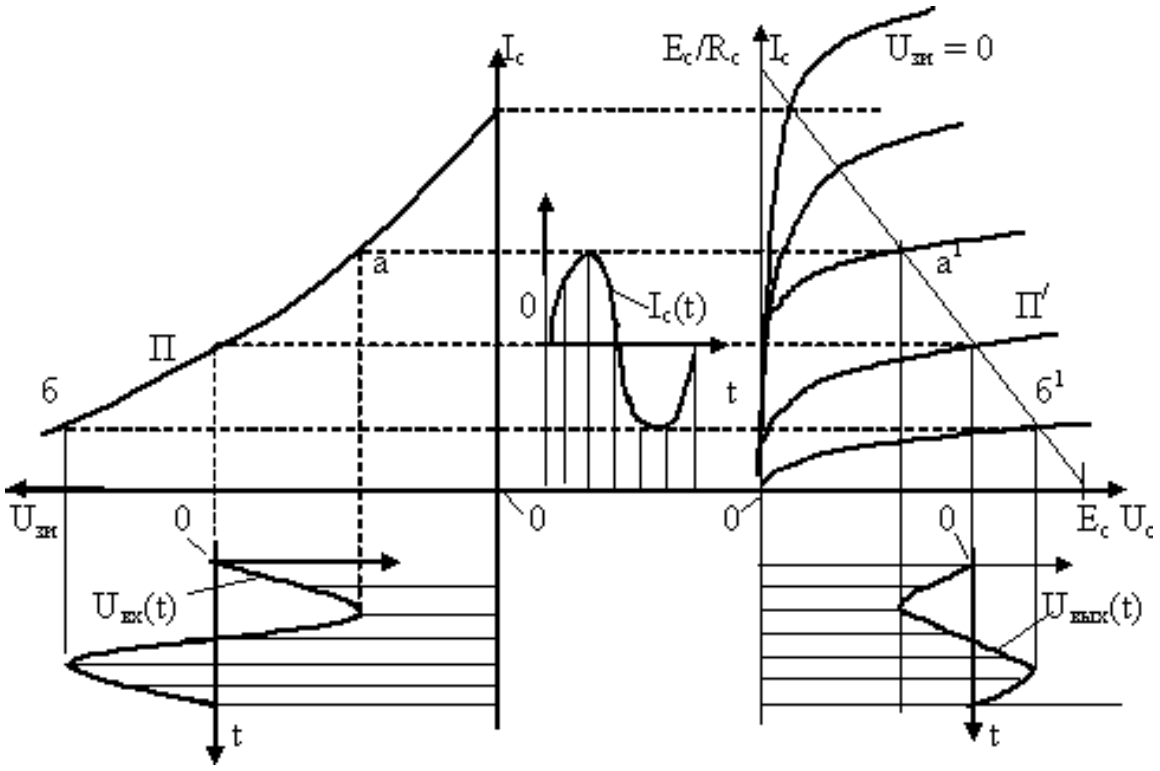


Рис. 7.23. Иллюстрация к графоаналитическому анализу работы усилительного каскада с общим истоком (ОИ)

Стабилизация достигается включением в цепь истока резистора $R_И$ (рис. 7.20), сопротивление которого выбирается несколько большим, чем нужно для создания смещения. Для компенсации излишнего смещения на входе включают высокоомный резисторный делитель.

Истоковый повторитель (схема усилительного каскада с общим стоком). Истоковый повторитель аналогичен эмиттерному повторителю, собранному на биполярном транзисторе. Схемы каскадов с общим стоком показаны на рис. 7.24.

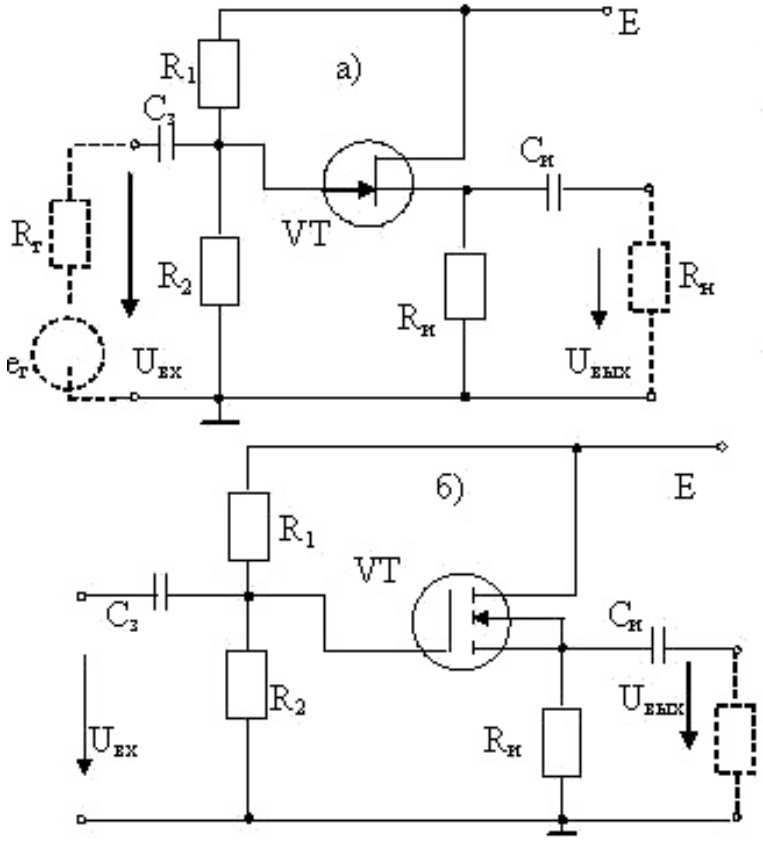


Рис. 7.24. Схемы истоковых повторителей на полевых транзисторах

Каскад (рис. 7.24, *а*) выполнен на транзисторе с управляющим *p–n*-переходом (с каналом *n*-типа). Каскад (рис. 7.24, *б*) выполнен на МДП-транзисторе с индуцированным каналом *n*-типа. Резисторный делитель напряжения R_1, R_2 обеспечивает смещение на затворе.

Методика расчёта параметров истокового повторителя аналогична методике расчёта параметров эмиттерного повторителя. Эквивалентная схема показана на рис. 7.25.

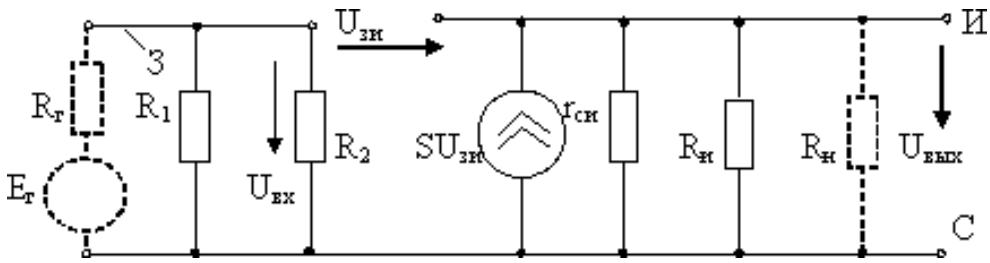


Рис. 7.25. Эквивалентная схема истокового повторителя

Эквивалентная схема показана для средних частот, как наиболее простая. Аналитические выражения для определения параметров приведены ниже (*S* – крутизна характеристики транзистора):

$$U_{ВЫХ} = SU_{ЗИ} \cdot R'_{И}\ ;\ R'_{И} = (r_{СИ} \,||\, R_{И} \,||\, R_{Н});$$
$$U_{ВХ} = U_{ЗИ}\,(1 + S{\cdot}R'_{и});$$
$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = S{\cdot}R'_{и} / (1 + S{\cdot}R'_{и}); \qquad (7.24)$$
$$R_{ВХ} = R_1 \,||\, R_2;\ R_{ВЫХ} \approx 1/S;\ K_I = K_U\,(R_1 \,||\, R_2)/R_Н.$$

7.5. Режимы работы усилительных каскадов

Различают три основных режима работы усилительных каскадов (три класса усиления): А, В, С [12]. Основные параметры этих режимов – нелинейные искажения и коэффициент полезного действия. Параметры класса усиления зависят от исходного состояния усилительного каскада, отражаемого положением рабочей точки на выходных характеристиках и от уровня входного усиливаемого сигнала.

Режим А характеризуется тем, что рабочую точку в режиме покоя выбирают на линейном участке (чаще всего посередине) выходной
и переходной (сквозной) характеристик транзистора. Сквозная характеристика для биполярного транзистора – это зависимость выходного (коллекторного) тока от входного тока (тока базы).

Для полевого транзистора сквозная характеристика – это, например, зависимость тока стока от управляющего напряжения между затвором и истоком. Уровень (амплитуда) входного сигнала в режиме А должен быть таким, чтобы работа усилительного каскада происходила на линейном участке характеристики. В этом случае искажение формы выходного сигнала по сравнению с формой входного будут минимальными. Однако этот режим имеет низкий КПД, который вычисляется как отношение выходной (полезной) мощности $P_{ВЫХ}$
к мощности источника питания P_0:

$$\eta = (P_{ВЫХ} / P_0)\ 100\ \%. \qquad (7.25)$$

Соотношение между мощностями удобно выявить, используя графическое представление процесса усиления входного сигнала
в усилительном каскаде (рис. 7.11) Соответствующие построения показаны на рис. 7.26 и 7.27.

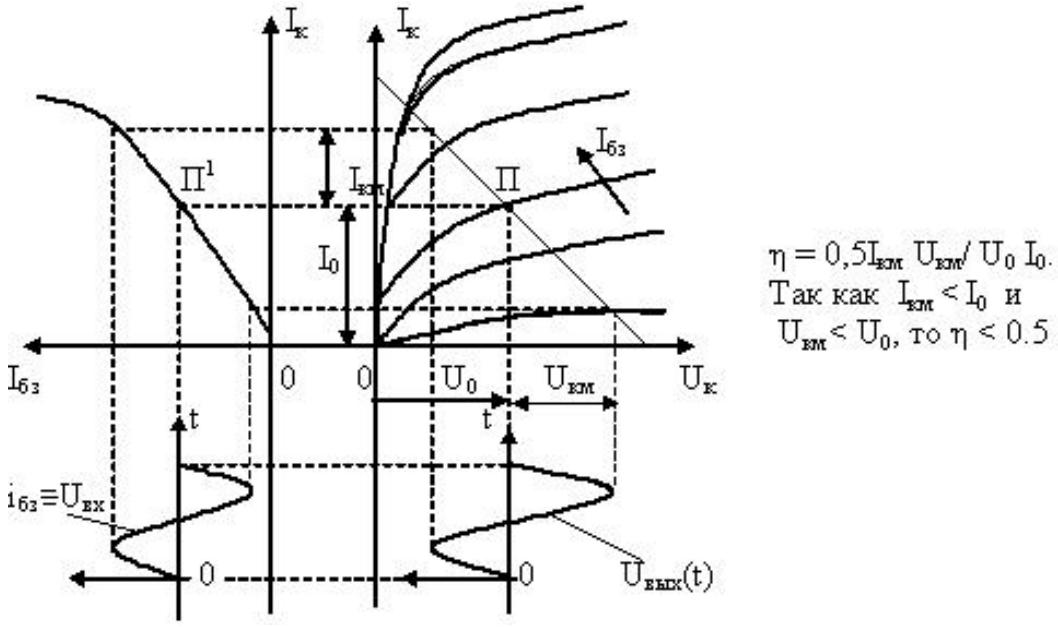


Рис. 7.26. Выбор положения рабочей точки
на характеристиках каскада ОЭ в классе усиления А

Постоянные составляющие напряжения U_0 и тока I_0 определяют исходное положение рабочей точки П. Потребляемая мощность равна произведению постоянных составляющих коллекторных напряжений и токов $P_0 = U_0 I_0$. Для синусоидальных величин выходная мощность

$$P_{ВЫХ} = 0{,}5\, U_{КМ}\, I_{КМ},$$

где $U_{КМ}$, $I_{КМ}$ – амплитуды коллекторных напряжений и токов. Следовательно, КПД каскада в режиме А (рис. 7.26) согласно (7.25) не может быть больше 50 %.

Режим В характеризуется тем, что рабочую точку П выбирают
в начале переходной характеристики (в точке отсечки) (рис. 7.27, *а*). В этом режиме переменные составляющие тока и напряжения транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения.

При синусоидальном входном сигнале будем иметь на выходе полупериод синусоиды, т.е. большие искажения. Режим В будет иметь более высокий КПД по сравнению с режимом А, так как ток покоя I_0 мал, несмотря на то, что U_0 больше ($\eta \approx 80$ %). Иногда используют режим АВ, при котором рабочая точка занимает промежуточное положение.

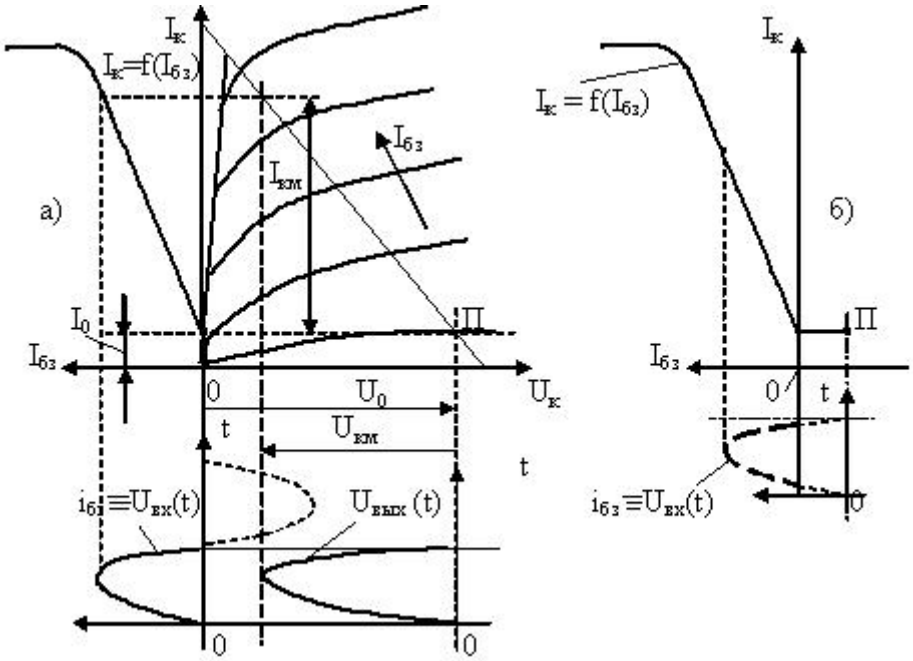


Рис. 7.27. Выбор исходного положения рабочей точки на характеристиках усилительного каскада ОЭ в режимах В (*а*) и С (*б*)

В режиме С рабочую точку выбирают за точкой отсечки и ток в транзисторе возникает только в течение некоторой части полупериода входного напряжения. Искажения будут большими, а КПД близок к 100 %. Режим С используют в избирательных усилителях, автогенераторах, выделяя из искаженного выходного сигнала основную гармонику [21].

8. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ И УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Усилителями мощности называют выходные каскады, предназначенные для передачи максимальной мощности в нагрузочное устройство. Нагрузочными устройствами являются обычно обмотки реле и электродвигателей, громкоговорители, нагревательные устройства. Для усилителя мощности главными показателями являются коэффициент усиления по мощности K_P и высокий КПД.

8.1. Усилители с трансформаторным включением нагрузки

Однотактный усилительный каскад. Принципиальная схема однотактного усилительного каскада с трансформаторным согласованием нагрузки приведена на рис. 8.1. Утолщёнными линиями условно изображены обмотки трансформатора TV: первичная обмотка включена в цепь коллектора транзистора VT, к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки R_H.

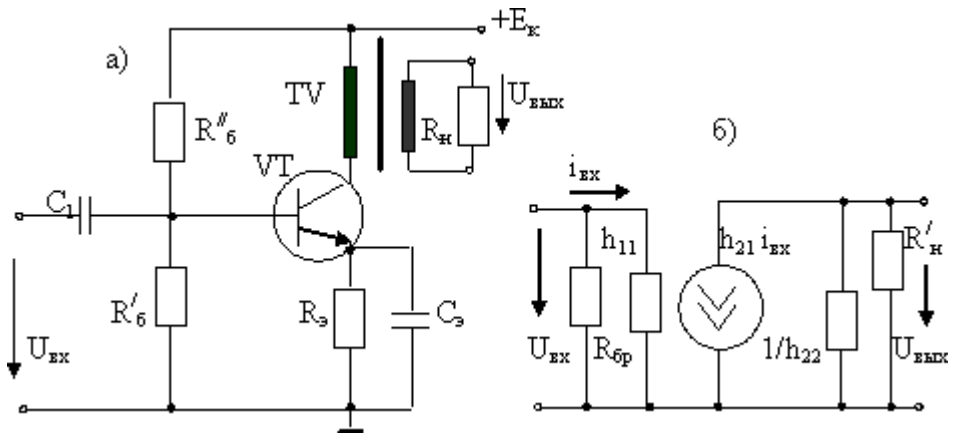


Рис. 8.1. Однотактный усилитель мощности (*а*)
и его упрощенная схема замещения (*б*)

В схеме усилителя элементы $R'_Б$, $R''_Б$, $R_Э$, $C_Э$ обеспечивают выбранный режим по постоянному току и его температурную стабилизацию. Трансформатор TV согласует сопротивление резистора нагрузки R_H с выходным сопротивлением транзисторного каскада $R_{ВЫХ}$ и формирует усиленные ток и напряжение, а также гальванически отделяет цепь нагрузки и цепи каскада. В схеме замещения резистор $R_{БР}$ – эквивалентное сопротивление делителя напряжения, обеспечиваюшего нужное смещение на базе транзистора; $R'_Н$ – эквивалентное сопротивление нагрузки: $R'_н = n^2 R_H$, где $n = W1/W2$ – коэффициент трасформации трасформатора TV; $W1$, $W2$ – числа витков первичной (коллекторной) и вторичной обмоток. Усилитель используется чаще всего в режиме А во избежание больших искажений. Недостаток схемы – завышенная мощность трансформатора из-за подмагничивания магнитного сердечника трансформатора постоянным током коллектора.

Двухтактный трансформаторный усилитель мощности. Усилитель состоит из двух симметричных плеч (рис. 8.2). Транзисторы VT1, VT2 подбирают с максимально близкими параметрами. Каждый из транзисторов работает противофазно. Входной трансформатор $TV_{ВХ}$ обеспечивает получение одинаковых по модулю, но противоположных по фазе входных напряжений. Выходной трансформатор $TV_{ВЫХ}$ суммирует переменные выходные токи и напряжения транзисторов. R_1, R_2 – делитель, обеспечивающий заданное положение рабочей точки (смещение) транзисторов. В этой схеме, в отличие от однотактной, отсутствует подмагничивание выходного трансформатора постоянным током. Это благоприятно сказывается на форме выходного сигнала и других показателях.

Особенно эффективен режим В, когда каждый из транзисторов участвует в формировании выходного напряжения только в течение одного полупериода. Транзисторы работают поочередно, образуя гармоническое выходное напряжение из двух полуволн.

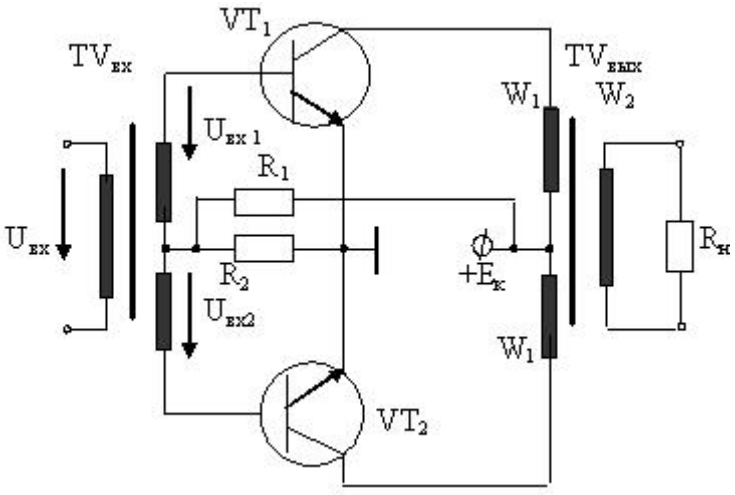


Рис. 8.2. Схема двухтактного
трансформаторного усилителя мощности

Основные достоинства схемы: гальваническое разделение входных и выходных цепей, высокий КПД. Недостаток – сложность, обусловленная необходимостью использования двух трёхобмоточных трансформаторов и трудность обеспечения симметрии в схеме.

8.2. Безтрансформаторные двухтактные усилители

Безтрансформаторные двухтактные усилители используются
в выходных каскадах электронных устройств. На схеме рис. 8.3 показан усилитель на двух одинаковых биполярных транзисторах.

Транзисторы управляются двумя противофазными сигналами U_{BX1}, U_{BX2}. В первом такте участвует, например,VT2, к базовой цепи которого приложено открывающее напряжение – полуволна U_{BX2}.
В этот полупериод транзистор VT1 будет закрыт положительной полуволной U_{BX1}. Во втором такте транзистором VT1 усиливается вторая полуволна входного тока, а VT2 будет закрыт.

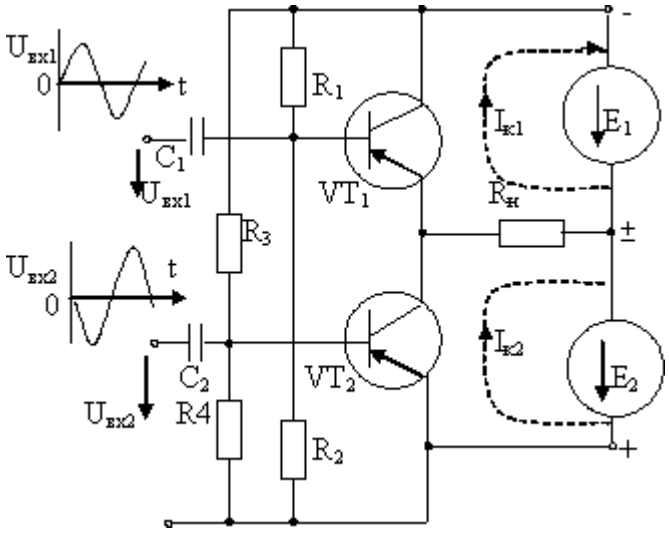


Рис. 8.3. Схема двухтактного безтрансформаторного усилителя с транзисторами одного типа проводимости

Вариант схемы двухтактного безтрансформаторного усилителя на транзисторах разного типа проводимости (на комплементарных транзисторах) показан на рис. 8.4.

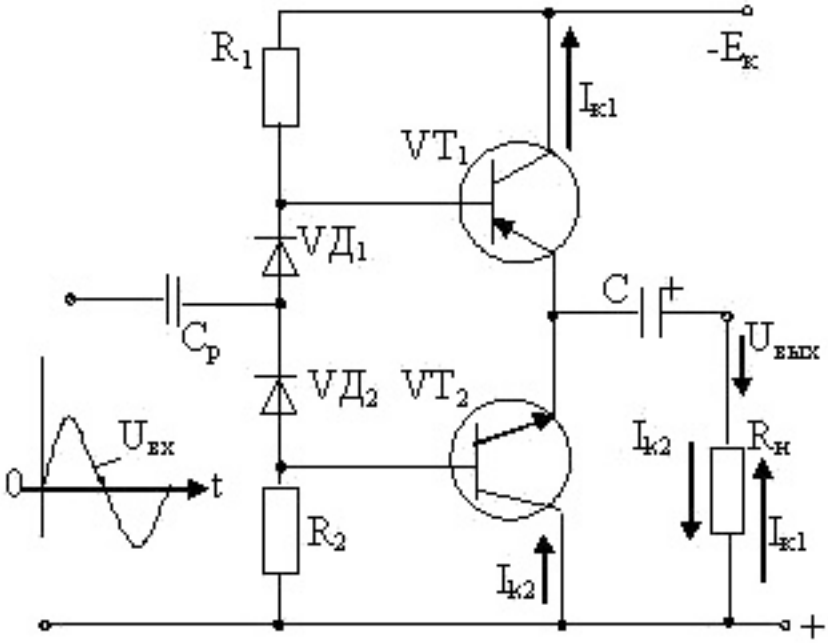


Рис. 8.4. Схема двухтактного усилителя с одним источником питания

В схеме нужен конденсатор *С* большой ёмкости, так как он заменяет источник питания в такте, когда транзистор VT1 закрыт. Транзисторы должны иметь идентичные характеристики. Эти условия ограничивают область применения такого усилителя.

8.3. Усилители постоянного тока

Усилители постоянного тока (УПТ) – это усилители, способные усиливать не только сигналы переменного тока, но и сигналы, медленно изменяющиеся во времени, т.е. сигналы,

эквивалентная частота которых практически равна нулю. АЧХ УПТ отличается от АЧХ усилителя переменных сигналов (рис. 8.5).

Связь источника сигнала со входом усилителя и междкаскадные связи в УТП не могут быть осуществлены посредством конденсаторов и трансформаторов подобно усилителям переменного тока.

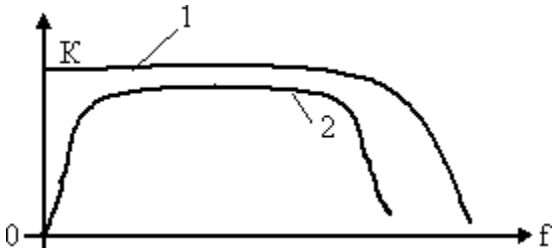


Рис. 8.5. Примерный вид АЧХ усилителя постоянного тока (*1*) и усилителя переменного тока (*2*)

В усилителях переменного тока связь входных и выходных цепей осуществляется резистивно-емкостными или трансформаторными цепями. Для передачи сигнала в УПТ по тракту усиления необходима непосредственная (с помощью проводников или резисторов) связь по постоянному току между усилительными каскадами и источником сигнала. В области высоких частот в УПТ сказываются паразитные емкостные и индуктивные связи, которые приводят к снижению коэффициента усиления в области высоких частот также, как и в усилителе переменного тока с резистивно-емкостными связями (рис. 8.5).

УПТ должны удовлетворять нескольким требованиям:

– при отсутствии входного сигнала должен отсутствовать выходной сигнал;

– при изменении знака входного сигнала должен изменяться знак и выходной сигнал;

– выходное напряжение должно быть пропорционально входному.

Усилители с непосредственной связью между каскадами. Непосредственная связь каскадов обусловливает особенности расчета их режима покоя (режима, при котором отсутствует входной сигнал).

В первую очередь необходимо из усиливаемого и выходного сигналов убрать постоянные составляющие, обеспечивающие исходный режим работы усилительного элемента. Это можно, например, осуществить компенсационным методом. Упрощенная схема каскада УПТ на одном транзисторе показана на рис. 8.6. Схема имеет, в основном, только теоретическое значение, на практике используются другие схемы, лишенные недостатков, присущих рассматриваемой.

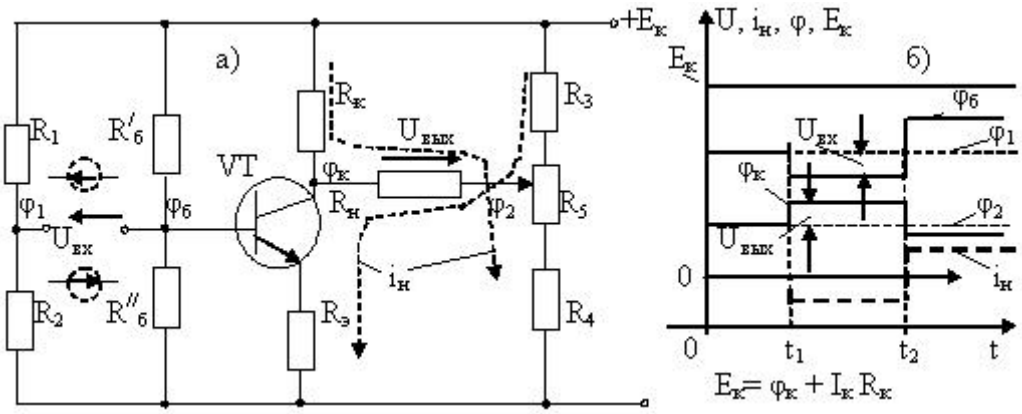


Рис. 8.6. Схема каскада УПТ с компенсацией постоянных составляющих (*а*) и диаграммы изменения сигналов (*б*):
φ_i – потенциалы в соответствующих точках;
$i_н$ – ток в сопротивлении нагрузки R_H;
$U_{ВХ}$ – входной (усиливаемый) сигнал, $U_{ВХ} = \varphi_1 - \varphi_б$; $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение, $U_{ВЫХ} = \varphi_к - \varphi_2$; R_5 – резистор настройки нулевого уровня выходного напряжения при отсутствии входного сигнала

В схеме отсутствуют конденсаторы внутрикаскадных связей, поэтому вид АЧХ соответствует таковому для УПТ (рис. 8.5).

Резистор $R_Э$ осуществляет температурную стабилизацию и расширяет полосу пропускания каскада за счёт создания отрицательной обратной связи по току нагрузки.

Сопротивление нагрузки R_H включено между коллектором и средней точкой делителя R_3, R_5, R_4. Входной сигнал (напряжение $U_{ВХ}$) подаётся между базой и средней точкой делителя R_1, R_2.

При отсутствии входного напряжения ($U_{ВХ} = 0$) и равенстве потенциалов в соответствующих точках ($\varphi_1 = \varphi_б$, $\varphi_к = \varphi_2$) ток в нагрузке отсутствует ($i_H = 0$). Для точной подстройки режима служит переменный резистор R_5. Если, например, на вход подать отрицательный сигнал (момент t_1 на рис. 8.6, *б*), ток базы транзистора уменьшится. Изменение тока базы вызывает соответствующее изменение тока коллектора, увеличивается потенциал $\varphi_к$, вызывая ток i_H в резисторе R_H. Если входной сигнал меняет знак (момент t_2) – ток коллектора увеличивается, потенциал $\varphi_к$ уменьшается, в резисторе R_H ток изменит направление. Таким образом, схема удовлетворяет требованиям, предъявляемым к УПТ.

Рассмотренная выше схема усилителя постоянного тока имеет следующие недостатки:

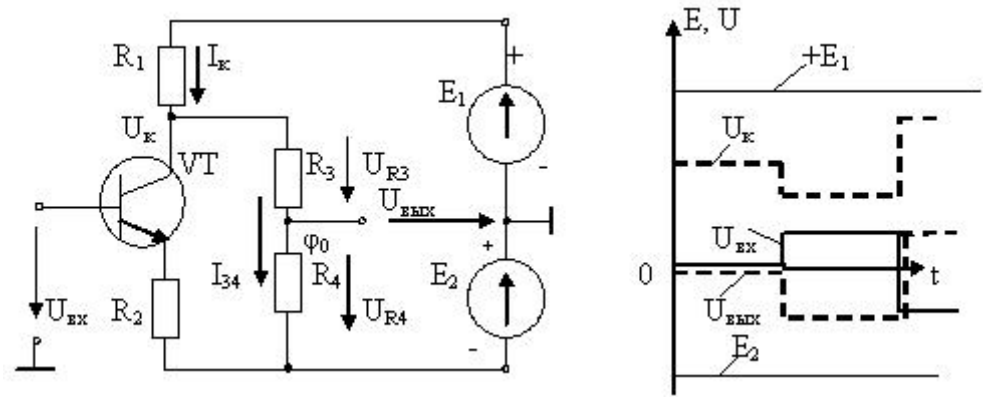
а) нагрузочный резистор не соединен с общей точкой схемы;

б) источник входного сигнала не соединен с общей точкой схемы;

в) требуется тщательная предварительная настройка исходного состояния и подстройка в процессе работы. Это создает неудобства при построении более сложных схем.

Названные недостатки можно частично устранить, если использовать не один, а два источника питания.

Упрощенная схема каскада УПТ представлена на рис. 8.7.



а *б*

Рис. 8.7. Упрощенная схема (*а*) и диаграммы (*б*) сигналов каскада УПТ с двумя источниками питания

Работу каскада УПТ (рис. 8.7) можно пояснить следующим образом.

В контуре U_K, E_2, R_4, R_3 справедливо уравнение:

$$U_{R3} + U_{R4} = U_к + E_2.$$

Потенциал средней точки φ_0 делителя R_3R_4 должен быть равен нулю в исходном состоянии схемы, для чего должно соблюдаться условие $I_{34}R_4 = E_2$. В этом случае $E_2 = U_{R4}$, а $U_{R3} = U_K$. Ток I_{34} выбирают из соотношения $I_{34} = (0{,}02 – 0{,}1)\, I_K$, т.е. значительно меньше тока коллектора, чтобы не нарушать режим работы транзистора, в этом случае $R_3 = U_K / I_{34}$, $R_4 = E_2 / I_{34}$.

При подаче, например, положительного входного напряжения U_{BX} возрастает ток базы, увеличивается ток коллектора I_K и падение напряжения R_1I_K, снижается напряжение коллектора U_K. Это приводит
к снижению потенциала средней точки φ_0 и появлению отрицательного выходного напряжения. Если $R_3 >> R_1$, $R_4 >> R_1$, (в этом случае можно пренебречь шунтирующим действием делителя R_3R_4) коэффициент усиления напряжения схемы можно приближённо определить по соотношению:

$$K = K_0\, R_4/(R_3 + R_4), \qquad (8.1)$$

где K_0 – коэффициент усиления напряжения усилителя с коллекторной нагрузкой без делителя R_3R_4.

Дрейф в УПТ (дрейф нуля). С течением времени в УПТ изменяются токи транзисторов и напряжения на их электродах, нарушается компенсация постоянных составляющих напряжений и на выходе УПТ появляется напряжение при отсутствии входного сигнала. Это явление называют дрейфом нуля.

УПТ должен усиливать напряжение вплоть до самых низких частот, поэтому всякое изменение постоянных составляющих напряжения из-за нестабильности источников питания, старения транзисторов, изменения температуры окружающей среды принципиально не отличается от полезного сигнала. Дрейф нуля можно наблюдать, если вход усилителя УПТ замкнуть накоротко, а на выходе включить милливольтметр. С течением времени на выходе появится напряжение дрейфа $U_{ВЫХ} = U_{ДР}$ (рис. 8.8).

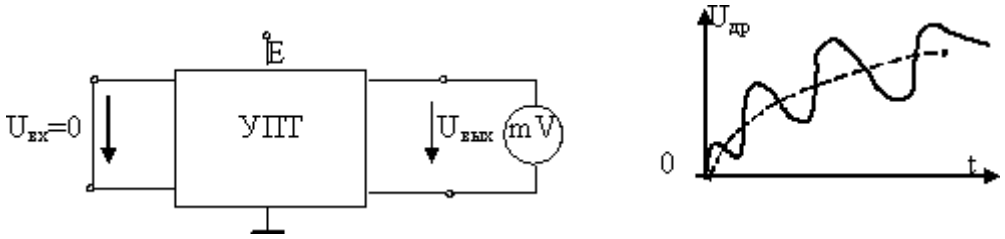


Рис. 8.8. Структурная схема для обнаружения дрейфа нуля и диаграмма изменения напряжения дрейфа после включения схемы

Если УПТ имеет коэффициент усиления по напряжению K, то величину дрейфа оценивают по выражению $U_{ДР} = U_{ВЫХ} / K$ при $U_{ВХ} = 0$ и называют дрейфом, приведенным к входу усилителя.

УПТ может правильно воспроизводить на выходе только те сигналы, которые значительно превышают напряжение дрейфа, т.е. при $U_{ВХ} >> U_{ДР}$, поэтому $U_{ДР}$ определяет чувствительность усилителя по входу. Напряжение дрейфа условно можно разделить на две составляющие: монотонно изменяющаяся и переменная составляющие (медленный и быстрый дрейф).

Первая обусловлена изменением характеристик транзисторов, вторая – колебаниями напряжения источника питания, температуры
и т.п.

Борьбу с дрейфом осуществляют различными способами, главные из них:

– стабилизация напряжения источников питания;

– стабилизация температурного режима;

– подбор и тренировка транзисторов;

– преобразование усиливаемого сигнала;

– использование дифференциальных (балансных) схем УПТ.

Например, при стабилизации напряжения питания с точностью ±0,01 %, температурной стабилизации ±1 ^{0}C удается снизить дрейф усилителя до $U_{ДР\,ВЫХ} \approx$ (5 – 20) мВ.

8.4. Дифференциальный усилитель

Одним из эффективных способов борьбы с дрейфом нуля является использование дифференциальных схем усиления сигналов постоянного тока [8]. Дифференциальный усилитель (ДУ) – это устройство, усиливающее разность двух напряжений. В идеальном ДУ выходное напряжение должно быть пропорционально разности абсолютных величин этих напряжений. Входные и выходные напряжения определяются относительно общей точки схемы, являющейся также общей точкой двух последовательно включенных источников питания (рис. 8.9).

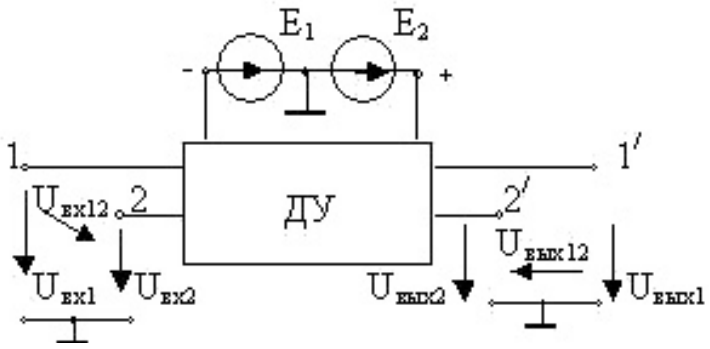


Рис. 8.9. Структурная схема дифференциального усилителя

Коэффициент усиления ДУ определяется как отношение разности выходных (усиленных) сигналов к разности входных сигналов:

$$K_P = (U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2}) / (U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) = U_{ВЫХ12} / U_{ВХ12}. \qquad (8.2)$$

В реальном ДУ коэффициент усиления (передачи) напряжения K_P зависит не только от разности, но и от суммы напряжений. Это выражается в том, что выходное напряжение ДУ определяется по двум коэффициентам передачи входных сигналов:

$$U_{ВЫХ12} = U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2},$$
$$U_{ВЫХ12} = K_P(U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) \pm K_C\,(U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2, \qquad (8.3)$$

где K_P – коэффициент усиления разностного напряжения;

K_C – коэффициент передачи суммы входных сигналов. Полусумму входных сигналов $(U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2$ называют синфазным сигналом. С учетом приведенных соотношений можно дать определение коэффициента передачи синфазного сигнала, полагая $(U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) = 0$:

$$K_C = 2\,(U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2})_{СФ} / (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}). \qquad (8.4)$$

Коэффициент передачи синфазного сигнала есть отношение напряжения на выходе к синфазному входному напряжению при разностном напряжении на входе, равном нулю. Качество ДУ оценивается коэффициентом ослабления синфазного сигнала:

$$K_{ОЛСФ} = K_P / K_C. \qquad (8.5)$$

С учетом (8.5) выходное напряжение будет определяться соотношением:

$$U_{ВЫХ12} = K_P[(U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) \pm (U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / 2K_{ОЛСФ}]. \qquad (8.6)$$

У «хороших» ДУ обычно $K_{ОЛСФ}$ = (80 – 120) дБ.

Относительную погрешность усиления разности напряжений можно найти по выражению:

$$\delta = 2(U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) / [K_{ОЛСФ}\,(U_{ВХ1} - U_{ВХ2})]. \qquad (8.7)$$

Выражение (8.7) показывает, что δ тем меньше, чем больше $K_{ОЛСФ}$.

Принципы построения дифференциальных усилительных каскадов. ДУ построены по принципу 4-плечевого измерительного моста (рис. 8.10).

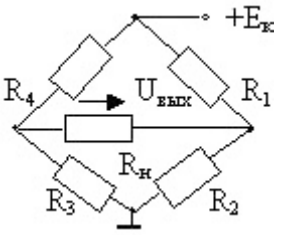


Рис. 8.10. Схема 4-плечевого измерительного моста

Мост сбалансирован (находится в равновесии), если $R_1R_3 = R_2R_4$, при этом $U_{ВЫХ} = 0$. Изменение напряжения питания E_K и пропорциональное изменение резисторов не нарушает равновесия в схеме.

Схема дифференциального усилителя показана на рис. 8.11, в ней вместо резисторов моста используются транзисторы.

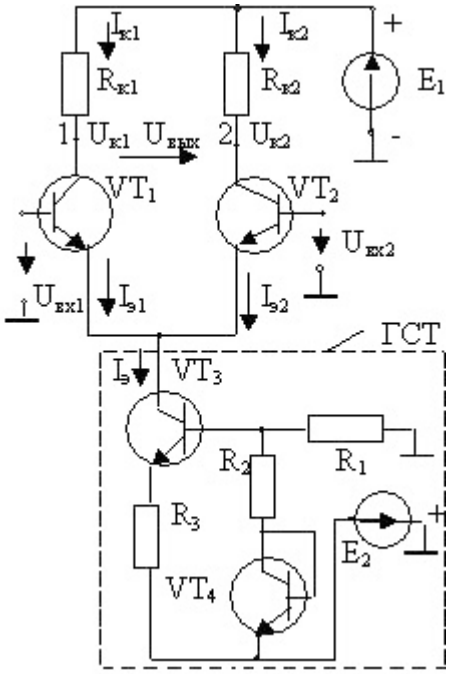


Рис. 8.11. Схема ДУ с транзисторами
в плечах равновесного моста

Стабильность работы ДУ достигается не только использованием свойств равновесного моста, но и обеспечением стабильности тока $I_Э$, протекающего в цепях источников питания. Величина этого тока определяется параметрами схемы, называемой генератором стабильного тока (ГСТ). В неё входят транзисторы VT_3, VT_4, резисторы R_1, R_2, R_3 и источник E_2. Равновесный мост образуют резисторы $R_{К1} = R_{К2}$, идентичные транзисторы VT_1, VT_2. Если $E_1 = E_2$, то $I_{Э1} = I_{Э2} = I_Э/2$. Если $U_{ВХ1} = U_{ВХ2}$, то $U_{К1} = U_{К2} = E_1 – I_ЭR_К/2$, $U_{ВЫХ} = 0$. Это будет, в частности, и при $U_{ВХ1} = U_{ВХ2} = 0$, т.е. когда входы ДУ соединены с общей точкой схемы.

Наличие симметрии в схеме 4-плечевого моста с транзисторами – обязательное условие правильной работы схемы, поэтому характеристики используемых транзисторов должны быть идентичны.

Высокая стабильность ДУ (нечувствительность к дрейфу нуля) обеспечивается тем, что изменения параметров идентичных элементов происходят в одну сторону и при вычитании на выходе не проявляются.

Например, при изменении температуры напряжения U_{K1} и U_{K2} изменяются одинаково, и в выходном разностном сигнале $U_{ВЫХ}$ это изменение практически не ощущается.

Входных сигналов не обязательно должно быть два. В частности, один из сигналов может быть равен нулю. Входы называют дифференциальными, причем один из входов называют *инвертирующим,*
а другой *неинвертирующим*. Для определения аналитических соотношений изобразим упрощённую схему ДУ (рис. 8.12).

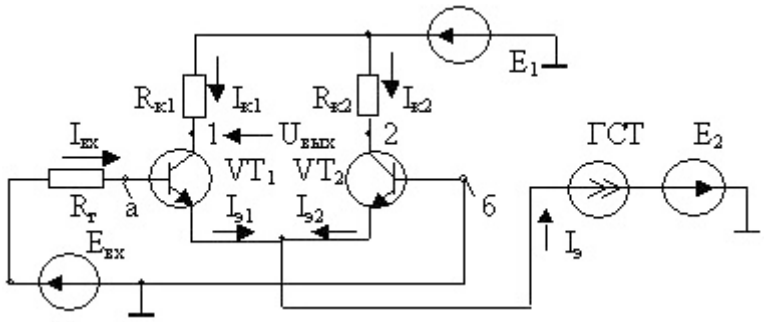


Рис. 8.12. Упрощённая схема ДУ

Можно заметить, что если подать входной сигнал $E_{ВХ}$ на базу VT_1, то коллекторное напряжение в точке 1 (U_{K1}) с увеличением $E_{ВХ}$ уменьшается, т.е. инвертируется. При этом коллекторное напряжение в точке 2 (U_{K2}) с увеличением $E_{ВХ}$ тоже увеличивается, т.е. не инвертируется.

Поэтому вход *а* называют инвертирующим; *б* – не инвертирующим. При этом выходное напряжение:

$$U_{ВЫХ} = U_{K2} - U_{K1} = 2\Delta U_K, \qquad (8.8)$$

где ΔU_K – величина изменения каждого коллекторного напряжения.

Интересно, что если, например, $I_{Э2} = 0$ (обрыв цепи эмиттера VT_2), то $I_{Э1} \approx I_{K1} \approx I_Э$, $U_{K1} = E_1 - I_{Э1} R_{K1}$, $U_{K2} = E_1$, $U_{ВЫХ} = I_Э R_{K1} =$
$=$ Const.

Схема теряет способность усиления входного сигнала. С изменением полярности входного сигнала или при подаче входного сигнала на базовую цепь транзистора VT_2 процессы протекают аналогично.

Расчет коэффициента усиления по напряжению для дифференциального каскада. Для упрощения будем считать, что входные сопротивления каскада по каждому входу транзисторов VT_1,
VT_2 (рис. 8.12) одинаковы, а $R_H = \infty$ (режим XX), тогда
$I_{ВХ} = E_{ВХ}/(R_Г + R_{ВХ1} + R_{ВХ2}) \approx E_{ВХ} / (R_Г + 2\ h_{11Э})$, где Rr – внутреннее сопротивление источника входного сигнала $E_{ВХ}$. Входные токи создают приращения коллекторных токов $\pm\Delta I_K = \pm I_{ВХ} h_{21Э}$. Приращения токов вызывают приращения коллекторных напряжений:

$$\pm\Delta U_K = \pm\Delta I_K R_к = \pm h_{21Э} I_{ВХ} R_K.$$

Коэффициент усиления по напряжению здесь удобнее определить по соотношению: $K_{UXX}=(U_{K1} - U_{K2})/E_{ВХ}$ или $K_{UXX}=2\Delta U_K/E_{ВХ}$. После подстановки имеем

$$K_{UXX} = 2\ h_{21Э} \cdot R_K / (R_Г + 2h_{11Э}). \qquad (8.9)$$

Если учесть сопротивление нагрузки, то:

$$K_{UH} = 2h_{21Э} \cdot (R_K \,||\, R_H) / (R_Г + 2h_{11Э}).$$

Если $R_Г \to 0$, а $R_H \to \infty$, то

$$K_{UД} = h_{21Э} \cdot R_K / h_{11Э}, \qquad (8.10)$$

где $K_{UД}$ – коэффициент усиления каскада при указанных условиях.

В случае, когда подаются оба сигнала и подаваемые входные напряжения разнополярны, то

$$U_{ВЫХ} = K_{UД} \cdot [U_{BX1} - (-U_{BX2})] = K_{UД} (U_{BX1} + U_{BX2}). \qquad (8.11)$$

Если подаваемые входные напряжения однополярны (синфазны), то

$$U_{ВЫХ} = K_{UД} (U_{BX1} - U_{BX2}). \qquad (8.12)$$

8.5. Некоторые схемные решения, используемые в усилителях

С целью улучшения свойств ДУ используют решения, которые часто встречаются в схемах усилительных каскадов интегральных элементов. Одно из таких решений – генератор стабильного тока, схема которого показана на рис. 8.13.

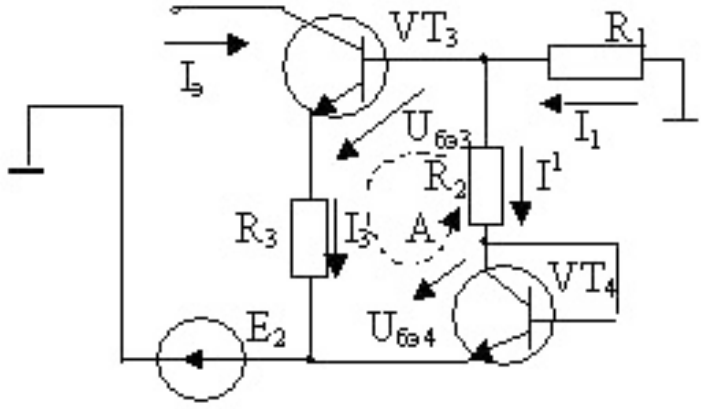


Рис. 8.13. Расчетная схема ГСТ

Для определения свойств ГСТ используем уравнение баланса напряжений в контуре А: $U_{БЭ3}+I_3R_3 = I_1R_2+U_{БЭ4}$. Током, ответвляющимся в базу VT_3, пренебрегаем. В этом случае $I_1=I^1$, а входной ток $I_Э$ равен току I_3. Определим величину тока $I_Э$:

$$I_Э = [I_1R_2+(U_{БЭ4} - U_{БЭ3})]/R_3. \qquad (8.13)$$

Если $U_{БЭ3} = U_{БЭ4}$, то $I_Э = I_1R_2/R_3 = [E_2/(R_1+R_2)]\, R_2/R_3$. (8.14)

Если E_2 стабильно и R_1, R_2, R_3 – точные, то $I_Э$ = Const независимо от сопротивления той части схемы ДУ, откуда он вытекает (но обязательно при её наличии).

Схемное решение ГСТ, называемое «токовое зеркало» представлено на рис. 8.14.

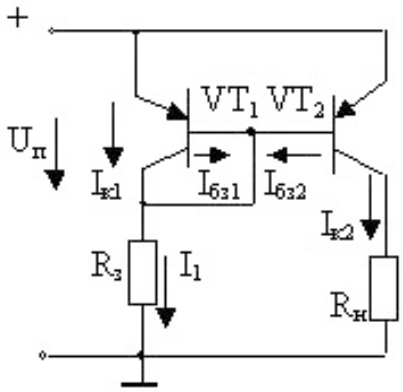


Рис. 8.14. Схема «токовое зеркало»

Для схемы справедливы уравнения:

$$I_1 = I_{K1}+I_{Б31}+I_{Б32} = (1+h_{21,1})I_{Б31}+I_{Б32}\ ;\ I_{K2} = h_{21,2}\, I_{Б32},$$

$$I_{K1}/I_{K2} = [(1+h_{21,1})I_{Б31}+I_{Б32}] / h_{21,2}\, I_{Б32}. \qquad (8.15)$$

Если $I_{Б31} = I_{Б32}$, что может быть лишь при идентичных транзисторах, $h_{21,1}=h_{21,2}>>1$, то $I_{K2}=I_1(h_{21,1}+2)/h_{21,2}=I_1(1+2/h_{21,2})$, т.е. ток I_{K2} приближённо равен I_1.

Ток в цепи резистора R_3 определяется напряжением $U_П$:
$I_1 = (U_П–U_{БЭ}) / R_3$, а ток I_{K2} практически не зависит от сопротивления резистора R_H (это свойство генератора тока). Равенство $I_1 = I_{K2}$ определило название схемы – «токовое зеркало». На транзисторах с проводимостью типа *n–p–n*-схема «токовое зеркало» будет иметь вид, показанный на рис. 8.15.

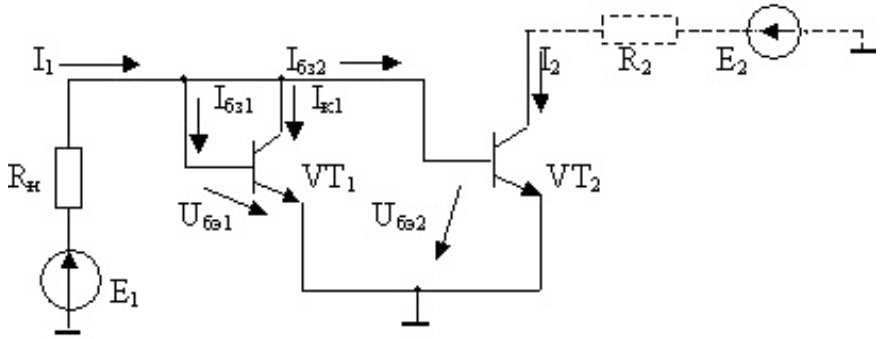


Рис. 8.15. «Токовое зеркало» на транзисторах *n–p–n*

Для схемы справедливы уравнения: $I_{K1} = h_{21}\, I_{Б31}$; $I_1 = I_{K1} + 2I_{Б31}$, так как $I_{Б31} = I_{Б32}$, потому что $U_{БЭ1} = U_{ЭБ2}$; $I_2 = h_{21}\, I_{Б32} = h_{21}\, I_{Б31}$; $I_1 = (E_1 – U_{БЭ1})/R_H$.

Определяем отношение токов, подставляя их значения:

$$I_2 / I_1 = h_{21}\cdot I_{Б31} / (I_{K1} + 2I_{Б31}) = h_{21} / (2 + h_{21}) \approx 1. \qquad (8.16)$$

При достаточно больших значениях R_H, h_{21} и E_1 получим $I_2 = I_1 \equiv E_1 /R_H$, что соответствует свойству «токового зеркала». Улучшенный вариант схемы (рис. 8.14) представлен на рис. 8.16.

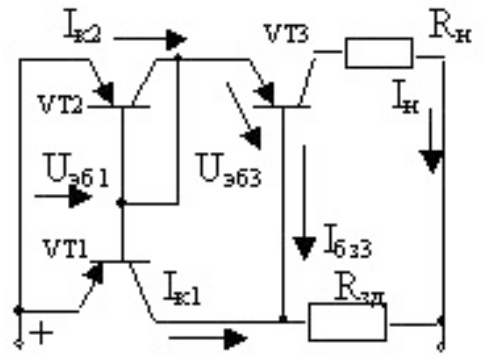


Рис. 8.16. Улучшенный вариант «токового зеркала»

Здесь выполняется соотношение: $I_H = I_{K2} + I_{Б31} + I_{Б32} – I_{Б33}$. Если $R_{ЗД} >> R_H$, а транзисторы работают в линейном режиме и $I_{Б31} << I_{K1}$, то $I_{K2} = I_{K1}$, ток нагрузки I_H практически не зависит от сопротивления R_H.

«Токовое зеркало» – динамическая нагрузка ДУ. Рассмотрим схему дифференциального каскада, в которой вместо резисторов нагрузки включены транзисторы по схеме «токовое зеркало» (рис. 8.17). Такое включение называют динамической нагрузкой.

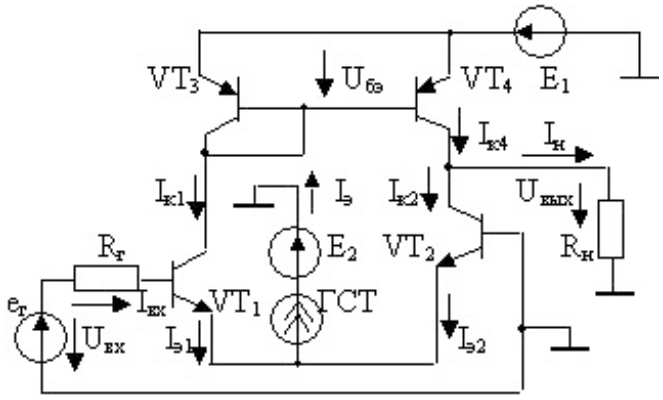


Рис. 8.17. Схема ДУ с динамической нагрузкой

По свойству «токового зеркала» при идентичности параметров транзисторов в схеме соблюдается равенство $I_{K1} = I_{K4}$. Ток в нагрузке (резисторе R_H) определяется соотношением $I_H = I_{K4} – I_{K2}$.

В режиме покоя ($e_Г = 0$, $U_{ВХ} = 0$) для дифференциальной схемы справедливо следующее соотношение токов:

$$I_{K1} = I_{K4} = I_{K2} = I_{Э1} = I_{Э2} = I_Э/2.$$

Если на вход подаётся усиливаемый сигнал ($e_Г \neq 0$), создающий ток $I_{ВХ}$ в базовых цепях входных транзисторов, например, показанного на схеме направления, то в коллекторных токах появляются приращения: $I_{K1} = I_Э / 2 + h_{21}\, I_{ВХ}$; $I_{K2} = I_Э / 2 – h_{21}\, I_{ВХ}$.

Учитывая, что $I_{K1} = I_{K4}$, получим выражения для выходных величин:

$$I_H = I_{K4} – I_{K2} = 2\, h_{21} \cdot I_{ВХ};\; U_{ВЫХ} = 2\, h_{21} \cdot I_{ВХ}\, R_H. \qquad (8.17)$$

Если изменится полярность входного тока, изменится знак $U_{ВЫХ}$. Коэффициент усиления напряжения определится соотношением:

$$K_U = U_{ВЫХ} / e_Г = 2\, h_{21}\, R_H / (R_Г + 2\, h_{11}). \qquad (8.18)$$

Выражение (8.18) показывает, что коэффициент усиления схемы K_U пропорционален сопротивлению резистора нагрузки $R_н$.

Составные транзисторы. В усилительных схемах, в том числе и дифференциальных, часто используются так называемые составные транзисторы, представляющие собой два или более транзистора, которые собраны в схему, имеющую три вывода и работающую как отдельный транзистор. Простейшие схемы составных транзисторов представлены на рис. 8.18.

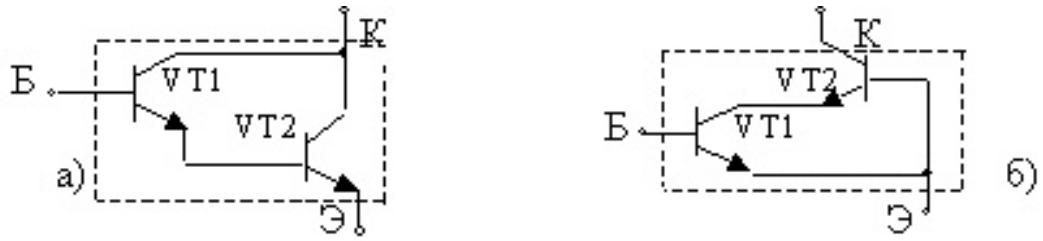


Рис. 8.18. Схемы составных транзисторов

Схема рис. 8.18, *а* имеет следующие значения *h*-параметров: $h_{11}=h_{11Э1}+h_{11Э2}(1+h_{21Э1})$; $h_{21}=h_{21Э1}+h_{21Э2}(1+h_{21Э1})$; $h_{12}=h_{12Э1}$; $h_{22}=h_{22Э2}$. Схема имеет большое входное сопротивление и большой коэффициент усиления базового тока.

В схеме рис. 8.18, *б*, называемой каскодной, $h_{11}=h_{11Э1}$; $h_{12}=h_{12Э1}h_{12Э2}$; $h_{22}=h_{22Б2}$; $h_{21}=h_{21Э1}h_{21Б2}\approx h_{21Э1}$. Эта схема имеет $h_{12}\approx 0$, поэтому обладает улучшенными частотными свойствами и расширенной полосой пропускания.

9. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

9.1. Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) – это усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления в широком диапазоне частот (от 0 до десятков МГц), выполненный по интегральной технологии. ОУ позволяет реализовать усилительные устройства, приближающиеся по свойствам к идеальным усилителям, и поэтому относится к универсальным электронным схемам, на основе которых строят разнообразные функциональные узлы.

Из теории усилителей известно, что при достаточно большом собственном коэффициенте усиления усилительного элемента свойства усилительного каскада, охваченного цепями внешних обратных связей, определяются свойствами этих связей [21]. На основе ОУ выбором элементов цепей обратных связей можно обеспечить выполнение различных математических операций с аналоговыми сигналами: сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование, логарифмирование, усреднение и др.

Особенности схемотехники ОУ определяются тем, что в его схеме используются лучшие схемные решения усилительных устройств: на входе ОУ – дифференциальный усилительный каскад, используются динамические нагрузки, схемы источников тока, токовое зеркало, эмиттерные повторители на выходе (рис. 9.1).

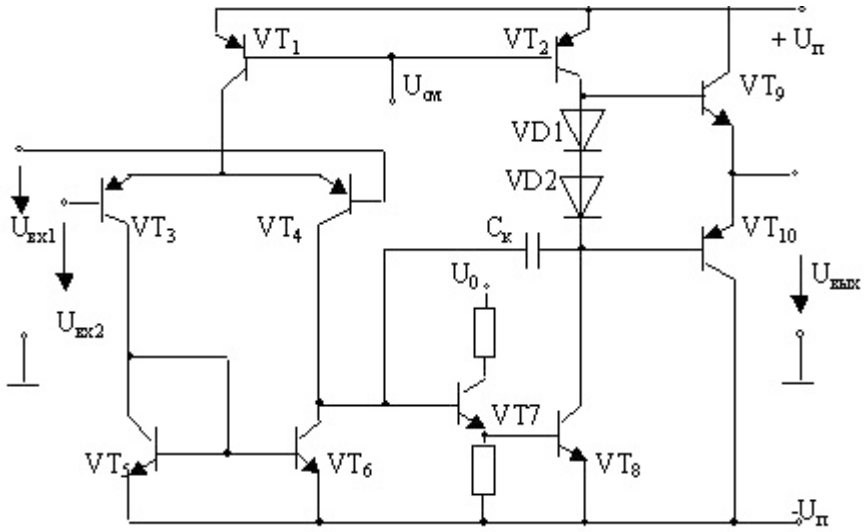


Рис. 9.1. Упрощенная структурная схема ОУ (пример)

В схемах ОУ изображают либо прямоугольником, либо треугольником с указанием входов и выхода, как показано на рис. 9.2.

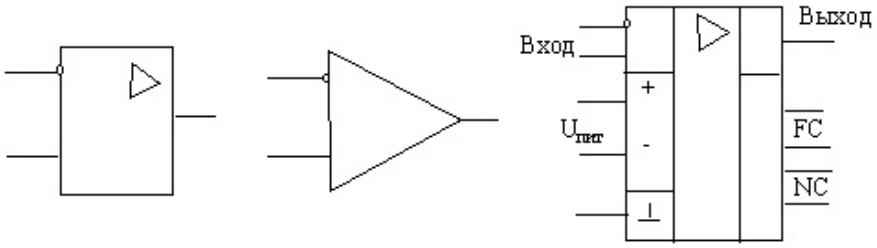


Рис. 9.2. Варианты условных графических изображений ОУ:
FC – выводы для частотной коррекции; NC – выводы для коррекции нуля

Характерной особенностью ОУ является то, что входные сигналы подаются относительно одной общей для входа и выхода точки (шины), которая непосредственно связана с общей точкой двух последовательно соединенных источников питания. Эта точка может не выводиться из корпуса микросхемы, а образована внешними цепями. ОУ имеет два входа, один из которых называется *инвертирующим*,
а другой *неинвертирующим* (инвертирующий вход помечают кружком). Часто эти входы называют соответственно *инверсным* и *прямым*. Выводы для коррекции у современных ОУ могут отсутствовать.

9.2. Идеальный операционный усилитель

Основные принципы работы устройств, построенных на основе ОУ, базируются на понятии «идеальный ОУ», т.е. виртуальный ОУ, для которого приняты следующие допущения: собственный коэффициент усиления $K = \infty$, входное сопротивление $R_{BX} = \infty$, выходное сопротивление $R_{вых} = 0$, полоса пропускания $\Delta f = (0 – \infty)$ Гц, отсутствуют дрейф и шумы (при $U_{BX} = 0$, $U_{ВЫХ} = 0$) [6].

С учетом принятых допущений найдем основное уравнение для идеального ОУ. Для этого составим систему уравнений для схемы, показанной на рис. 9.3.

Примем разность потенциалов между входами равной нулю, тогда:

$$U_{BX1} – U_{BX2} – I_1 Z_1 = 0;$$
$$U_{BX1} – U_{ВЫХ} – I_2 Z_2 – I_1 Z_1 = 0;$$
$$I_1 = (U_{BX1} – U_{BX2})/Z_1.$$

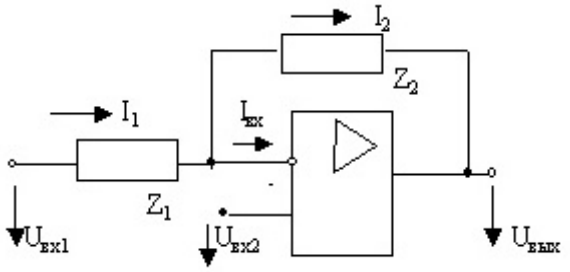


Рис. 9.3. Расчетная схема для идеального ОУ

Учитывая, что $I_1 = I_2$, получим:

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1}\, Z_2 / Z_1 + U_{ВХ2}\,(1 + Z_2 / Z_1). \qquad (9.1)$$

Уравнение (9.1) позволяет получить соотношения между входными и выходным сигналами для частных случаев:

а) $U_{ВХ1} = 0$, $U_{ВЫХ} = U_{ВХ2}\,(1 + Z_2 / Z_1)$ – неинвертирующее включение ОУ (рис. 9.4, *а*);

б) $U_{ВХ2} = 0$, $U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1}\, Z_2 / Z_1$ – инвертирующее включение ОУ (рис. 9.4, *б*);

в) $Z_2 = 0$, $U_{ВЫХ} = U_{ВХ2}$ – ОУ включен по схеме повторителя напряжения (рис. 9.4, *в*).

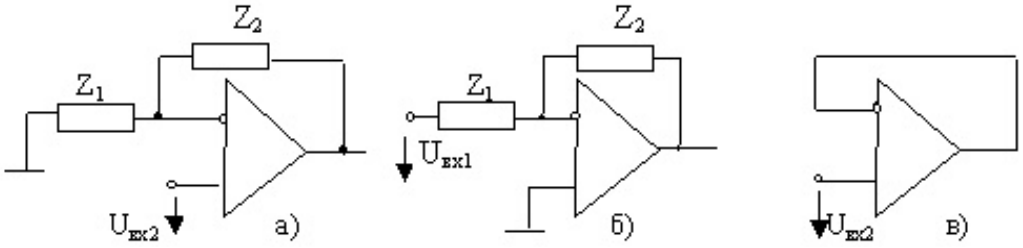


Рис. 9.4. Варианты включения ОУ:
а – неинвертирующее включение; *б* – инвертирующее включение;
в – повторитель напряжения

Выбирая различные виды входных элементов и обратных связей ОУ, можно строить различные функциональные узлы. Широко распространены сумматоры (вычитатели) аналоговых сигналов, интеграторы, дифференциаторы и др. Структурные схемы таких устройств показаны на рис. 9.5.

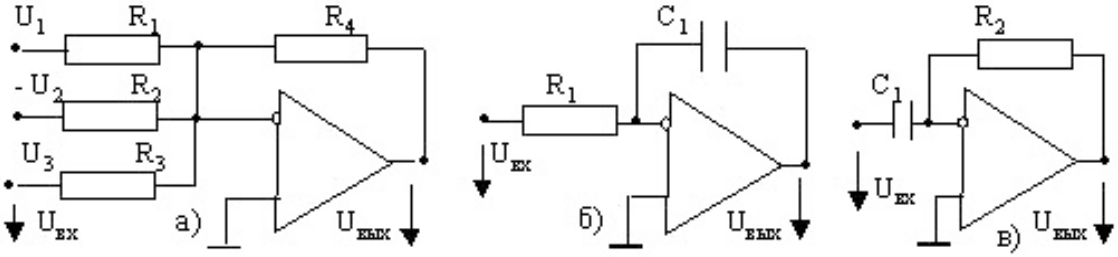


Рис. 9.5. Функциональные узлы, построенные на ОУ:
а – сумматор (вычитатель) напряжений; *б* – интегратор входного напряжения;
в – дифференциатор входного напряжения

Уравнения, связывающие входные и выходные напряжения для схем (рис. 9.5) имеют следующий вид:

Схема (а): $U_{ВЫХ} = -R_4\,[(U_1 / R_1) - (U_2 / R_2) + (U_3 / R_3)]$.

Схема (б): $U_{ВЫХ} = -1/T_И \int U_{ВХ} dt$,

где $T_И$ – постоянная времени интегрирования, $T_И = R_1 C_1$.

Схема (в): $U_{ВЫХ} = -T_Д\, dU_{ВХ}/dt$,

где $T_Д$ – постоянная времени дифференцирования, $T_Д = R_2 C_1$.

Уравнения, характеризующие свойства схем с ОУ, охваченными различного рода цепями обратных связей, имеют несложный вид только в том случае, если принимается предположение, что ОУ идеален.

В практических уточняющих расчетах схем с применением ОУ часто используют схемную модель ОУ (схему замещения), в которой можно учесть реальные входные и выходные сопротивления ОУ, влияние величины и несимметрии входных токов, напряжение смещения нуля. Один из простых вариантов схемы замещения ОУ [6] показан на рис. 9.6.

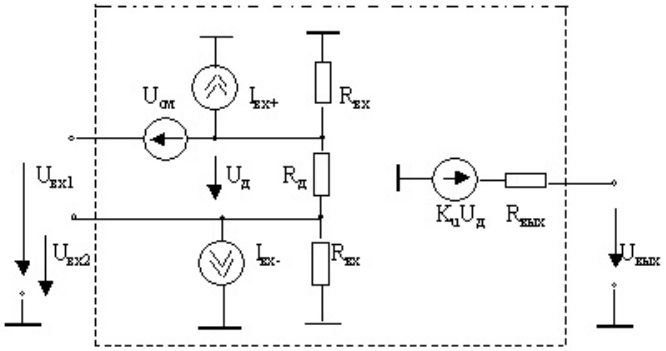


Рис. 9.6. Схема замещения ОУ для малых сигналов (вариант)

В схеме замещения обозначено: $U_Д$ – дифференциальное напряжение, которое усиливается в схеме, причем $U_Д = U_{ВХ1} – U_{ВХ2} + U_{СМ}$; $R_Д$ – дифференциальное входное сопротивление; K_U – собственный коэффициент усиления; $U_{СМ}$ – напряжение смещения входа. Наличие входных токов по каждому входу имитируется двумя источниками тока $I_{ВХ–}$, $I_{ВХ+}$.

9.3. Основные параметры и характеристики операционных усилителей

Реальный ОУ описывается большим числом параметров и характеристик, некоторые из которых являются входными, некоторые – выходными, другие характеризуют передачу сигнала операционным усилителем. Основные параметры и характеристики реального ОУ:

1. Напряжение смещения нуля $U_{СМ}$ – это напряжение на выходе ОУ при нулевом входном сигнале, деленное на коэффициент усиления:

$$U_{СМ} = U_{ВЫХ} / K, \quad U_{ВХ} = 0.$$

2. Входные токи обусловлены конечным значением входных сопротивлений ОУ. Входные токи ОУ обеспечивают нормальную работу входного дифференциального каскада. Если этот каскад выполнен на полевых транзисторах, то входные токи столь малы, что сравнимы с токами различных утечек. Однако если источники входного сигнала, подключенные к входам ОУ, имеют разные внутренние сопротивления, то между входами образуется нежелательная разность потенциалов, которая после усиления появится на выходе. Поэтому резисторы, подключаемые к входам ОУ, следует по возможности выбирать с одинаковыми сопротивлениями.

3. Разность входных токов образуется по приведенным в п. 2 причинам и может иметь любой знак.

4. Входные сопротивления: дифференциальное и синфазное.

Дифференциальное входное сопротивление – это полное входное сопротивление со стороны любого входа при условии, что второй вход соединен с общим выводом схемы. Значение этого сопротивления – от десятков кОм до сотен мОм. Входное синфазное сопротивление характеризует изменение среднего входного тока при приложении к входам ОУ синфазного напряжения. Синфазное сопротивление на несколько порядков выше сопротивления для дифференциального сигнала.

5. Коэффициент ослабления синфазного сигнала – это отношение напряжения синфазного (поданного на оба входа одновременно) сигнала к дифференциальному входному на-

пряжению, которое обеспечило бы на выходе такой же сигнал, как и в случае подачи синфазного напряжения:

$$K_{ОЛСФ} = U_{ВХ\,СФ}/U_{ВХ\,ДИФ}, \text{ при } U_{ВЫХ\,СФ} = U_{ВЫХ\,ДИФ}.$$

Так как $U_{ВЫХ} = K\,(U_{ВХ\,ДИФ} + U_{ВХ\,СФ}/K_{ОЛСФ})$, то ясно, что $K_{ОЛСФ}$ характеризует диапазон синфазного напряжения, при котором работа ОУ не нарушается.

6. Температурные дрейфы: по напряжению – $U_{СМ}$/°С, по току – $I_{ВХ}$/°С важны для особо точных (прецизионных) ОУ, оцениваются в мкВ/°С и в нА/°С.

7. Напряжение шумов, приведенное к входу, – это действующее значение $U_{ВЫХ}$ при нулевом входном сигнале и нулевом внутреннем сопротивлении источника сигнала, деленное на коэффициент усиления ОУ: $U_{Ш\,ВХ} = U_{Ш\,ВЫХ}/K$.

Шумы оценивают в определенной полосе частот входного сигнала, поэтому размерность оценки шума имеет вид: $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Иногда в технических данных ОУ приводят значение коэффициента шума в дБ, как отношение мощностей приведенного шума ОУ к мощности шума внутреннего сопротивления источника, с помощью которого измеряют шумовые характеристики.

8. Коэффициент влияния нестабильности источника питания – это отношение приведенного к входу изменения выходного напряжения ОУ к вызвавшему его изменению питающего напряжения:

$$K_в = \Delta\, U_{СМ}/\,\Delta U_{ПИТ}, \text{ мкВ/В}.$$

9. Выходное сопротивление – это измеренное со стороны выходного зажима ОУ активное сопротивление.

10. Выходное напряжение и выходной максимально допустимый ток – параметры, указывающиеся при определенной (допустимой) величине сопротивления нагрузки.

11. Коэффициент усиления по напряжению K_U.

12. Частота единичного усиления f_1 – это частота входного сигнала, при которой модуль коэффициента усиления ОУ равен 1. Часто указывают граничную частоту, под ней подразумевается частота, до которой ОУ обеспечивает гарантируемое значение коэффициента усиления.

13. Допустимая скорость нарастания напряжения – это максимальная скорость изменения выходного напряжения при максимальном значении его амплитуды, В/мкс.

14. Время установления выходного сигнала – время, за которое выходной сигнал нарастает от 0,1 до 0,9 амплитудного значения.

15. Время восстановления – время возврата из режима насыщения.

16. Амплитудная характеристика представляет собой зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного сигнала. Согласно такому определению ОУ будет иметь две характеристики: для инвертирующего и неинвертирующего входов. Вид характеристик представлен на рис. 9.7.

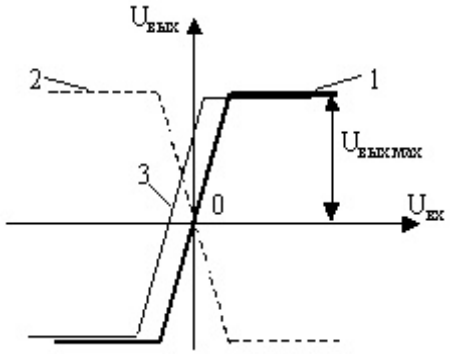


Рис. 9.7. Амплитудные характеристики ОУ:
1 – по неинвертирующему входу, *2* – по инвертирующему входу,
3 – по неинвертирующему входу при наличии смещения нуля

Следует учитывать, что масштабы напряжений имеют разные значения: по горизонтальной оси – милливольты, по вертикальной оси – вольты, а также то, что в ОУ максимальное $U_{ВЫХ}$ не может превышать напряжение источника питания.

17. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ). АЧХ показывает зависимость коэффициента усиления ОУ от частоты входного сигнала. ФЧХ показывает зависимость угла сдвига фаз входного и выходного сигналов от частоты входного сигнала. Наличие указанных характеристик обусловлено тем, что в схеме ОУ всегда имеются паразитные емкости и индуктивности, вносящие сдвиги фаз в сигналы в процессе их усиления. При этом с ростом частоты коэффициент усиления падает, а фазовый сдвиг увеличивается. Если фазовый сдвиг достигает значения 2π, то отрицатель- ная обратная связь превращается в положительную, усилитель превращается в генератор беспорядочных колебаний (возбуждается), теряет устойчивость работы, а следовательно и усилительные свойства.

Примерный вид АЧХ и ФЧХ показан на рис. 9.8.

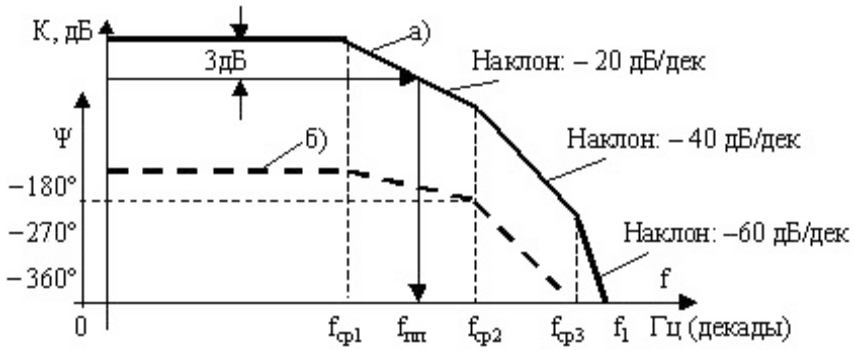


Рис. 9.8. Частотные характеристики ОУ:
а – АЧХ, *б* – ФЧХ

На рис. 9.8, *а* по вертикальной оси откладывается значение модуля коэффициента усиления ОУ (обычно в дБ), по горизонтальной оси отложены значения частот в логарифмическом масштабе.

Характерные точки АЧХ показывают диапазоны частот, в которых происходит изменение модуля коэффициента усиления: $f_{СР1}$, $f_{СР2}$, $f_{СР3}$ – частоты «среза» – частоты, при которых происходит заметное уменьшение коэффициента усиления; $f_{ПП}$ – частота «полосы пропускания» – показывает диапазон частот, в котором модуль коэффициента усиления уменьшается от максимального значения не более, чем на 3 дБ; f_1 – частота «единичного усиления», при

которой входной сигнал уже не усиливается. На логарифмических АЧХ (ЛАЧХ) участки характеристики показывают отрезками прямых линий, имеющих наклон, соответствующий скорости изменения модуля коэффициента усиления ОУ при изменении частоты входного сигнала (рис. 9.8, *а*). Фазочастотная характеристика на рис. 9.8, *б* представлена для случая, когда входной сигнал подан на инвертирующий вход, поэтому начальное значение угла сдвига фаз $\Psi = -180^{\circ}$. По мере роста частоты модуль угла сдвига фаз увеличивается, при некоторой частоте достигается значение -360°, что приводит к потере устойчивости работы ОУ.

С целью недопущения таких режимов производят частотную коррекцию характеристик при изготовлении ОУ (внутренняя коррекция), либо делают специальные контактные выводы в микросхеме ОУ для подключения корректирующих конденсаторов (внешняя коррекция).

Коррекцией добиваются желательного изменения АЧХ и ФЧХ
в заданном диапазоне частот усиливаемого сигнала. Особого внимания заслуживает случай, когда нагрузка ОУ носит емкостный характер, так как емкость вносит дополнительный сдвиг фаз в усилительный тракт, который может привести к самовозбуждению схемы.
С целью предотвращения самовозбуждения в цепь отрицательной обратной связи ОУ обычно включают дополнительные конденсаторы для коррекции ФЧХ и АЧХ.

9.4. Обратные связи в усилительных устройствах

Обратной связью (ОС) называют процесс передачи выходного сигнала (целиком или его части) с выхода на вход усилительного устройства с целью коррекции характеристик и параметров этого устройства.

Обратная связь осуществляется с помощью электрических цепей (устройств), соединяющих вход и выход усилительного устройства. Часто эти цепи тоже называют обратной связью и говорят, что они «охватывают» усилитель или усилительное устройство. В общем случае ОС может охватывать один усилительный каскад или несколько каскадов, поэтому можно различать *общую* и *местную* ОС.

Сигнал ОС, получаемый с выхода устройства, может на входе либо суммироваться с основным усиливаемым сигналом, либо вычитаться из него. В первом случае обратную связь называют *положительной* (ПОС), во втором – *отрицательной* (ООС). В случае сигналов переменного тока ПОС будет осуществляться при совпадении фаз основного (входного) сигнала и сигнала ОС, а ООС – при разности этих фаз, равной 180°.

Основные соотношения для усилительного устройства, охваченного цепями обратной связи, можно получить из обобщённой структурной схемы усилительного устройства, состоящего из усилительного каскада, цепи обратной связи и сумматора сигналов на входе (рис. 9.9).

Система уравнений, характеризующих структурную схему, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{ВЫХ} &= K\,U_C; \\ U_C &= U_{ВХ} + \beta U_{ВЫХ}, \end{aligned} \qquad (9.2)$$

где K – собственный коэффициент передачи усилителя;

β – коэффициент передачи цепи (звена) ОС;

$U_{ВХ}$ – входной (основной) усиливаемый сигнал;

$U_{ВЫХ}$ – выходной сигнал усилительного устройства.

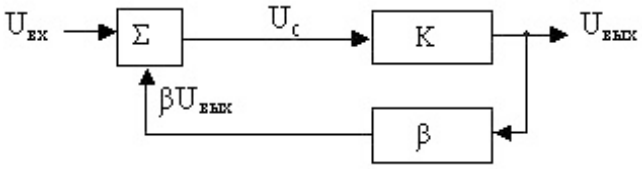


Рис. 9.9. Обобщённая структурная схема усилительного устройства с цепью обратной связи

Вычислим по общему правилу результирующий коэффициент передачи (усиления) схемы: $K_P = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$. С учётом уравнений (9.2) получим:

$$K_P = K/(1–\beta K). \qquad (9.3)$$

Полученное выражение позволяет сделать важные выводы о свойствах усилительного устройства, охваченного цепью ОС, а также выяснить степень влияния свойств звена ОС на общие свойства этого устройства.

В усилительных устройствах используют разнообразные виды обратных связей, различающихся по способам получения (формирования) сигнала ОС, по способам использования (введения) сигнала ОС на входе, по частотным свойствам и т.д. Основные названия видов ОС представлены на рис. 9.10.

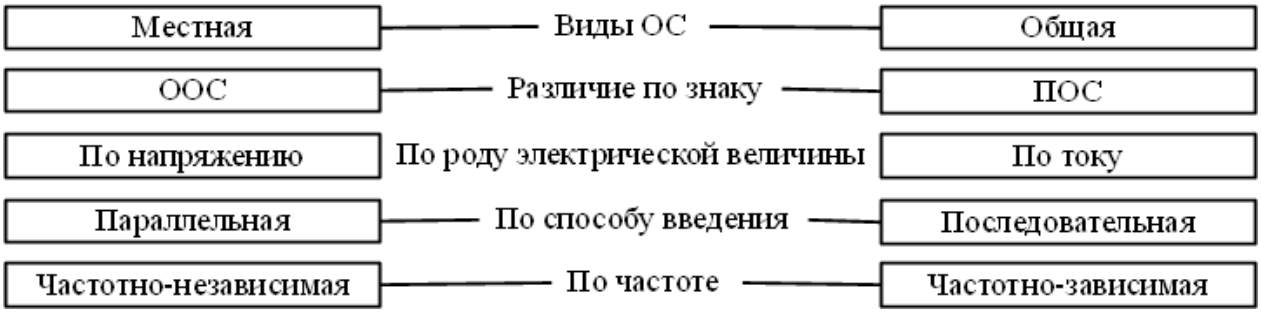


Рис. 9.10. Классификация типов обратной связи

Рассмотрим влияние обратных связей на общие свойства усилительного устройства, обобщенная схема которого изображена на рис. 9.9.

Анализ выражения (9.3) показывает, что величина результирующего коэффициента передачи схемы зависит от величины и знака коэффициента передачи звена ОС β, причём, если $\beta > 0$, а $\beta K < 1$, то $K_P > K$, т.е. коэффициент усиления схемы становится больше, чем собственный коэффициент усиления усилительного элемента (УЭ). Если $\beta < 0$, то $K_P < K$, т.е. коэффициент усиления схемы становится меньше, чем собственный коэффициент усиления УЭ.

Первый случай соответствует ПОС, второй – ООС. Если $\beta K = 1$, то теоретически результирующий коэффициент передачи увеличивается до бесконечно большой величины. На практике схема становится неработоспособной как усилитель и превращается в устройство, генерирующее (если не принять специальных мер) беспорядочные колебания выходного сигнала (говорят, что схема теряет устойчивость – «возбуждается»). Если предположить, что

собственный коэффициент усилительного звена достаточно большой, то из выражения (9.3) можно получить

$$K_p \approx -(1/\beta). \qquad (9.4)$$

Полученное соотношение свидетельствует о том, что свойства усилителя с большим собственным коэффициентом усиления будут определяться свойствами звена обратной связи. Этот факт широко используется для построения разнообразных функциональных узлов и устройств на основе ОУ.

Влияние ОС на другие параметры усилительного устройства рассмотрим на примерах изменения входных и выходных сопротивлений устройств с введением цепей ОС. Отметим два важных свойства указанных параметров:

1. Входное сопротивление устройства, охваченного цепью ОС, зависит от способа введения сигнала ОС во входную цепь и не зависит от способа получения этого сигнала.

2. Выходное сопротивление усилителя, охваченного цепью ОС, зависит от способа получения сигнала ОС и не зависит от способа введения этого сигнала во входную цепь.

Методику определения входных и выходных сопротивлений для усилительного каскада, охваченного цепью ОС, рассмотрим на примере обобщённой структурной схемы усилителя напряжения, показанной на рис. 9.11.

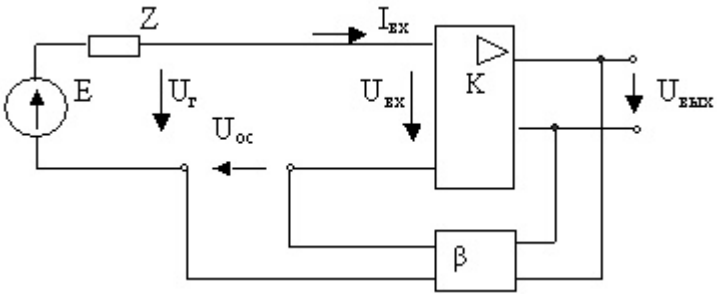


Рис. 9.11. Структурная схема усилительного устройства с ОС, введённой последовательно по напряжению

В схеме соблюдаются следующие очевидные соотношения:

$U_{ВЫХ} = KU_{ВХ}$; $U_{ОС} = \beta U_{ВЫХ}$; $U_Г = U_{ВХ} + U_{ОС}$; $U_{ВХ}/I_{ВХ} = Z_{ВХ0}$,

где $Z_{ВХ0}$ – собственное входное сопротивление усилителя, имеющего собственный коэффициент усиления K.

Определяя по общему правилу входное сопротивление всей схемы как $Z_{ВХ} = U_Г / I_{ВХ}$, получим:

$$Z_{ВХ} = Z_{ВХ0}(1+\beta K). \qquad (9.5)$$

Соотношение (9.5) показывает, что при наличии ООС входное сопротивление схемы увеличивается. Если направление напряжения $U_{ОС}$ изменить на противоположное, получим положительную обратную связь. В этом случае

$$Z_{ПВХ} = Z_{ВХ0}(1-\beta K). \qquad (9.6)$$

Анализ показывает, что в этом случае входное сопротивление схемы может быть нулевым, отрицательным либо положительным, но меньше $Z_{ВХ0}$.

Используя для анализа выходных сопротивлений соотношения, аналогичные (9.5, 9.6), можно получить следующие результаты:

1. ООС по напряжению уменьшает выходное сопротивление схемы, а ПОС либо увеличивает его, либо делает отрицательным.

2. ООС по выходному току увеличивает выходное сопротивление схемы, ПОС может это сопротивление оставить неизменным, увеличить его или сделать отрицательным.

Подробный анализ действия цепей ОС в усилительных устройствах позволяет сделать следующие общие выводы [11]:

1. Введение цепей ОС изменяет основные параметры усилительного устройства как количественно, так и качественно.

2. Действие ООС и ПОС, как правило, противоположно.

3. Введение цепей ООС стабилизирует коэффициент усиления устройства, расширяет полосу пропускания, уменьшает частотные и фазовые искажения.

4. Введение цепей ПОС сужает полосу пропускания устройства, приводит к увеличению частотных и фазовых искажений, уменьшает устойчивость схемы к изменениям параметров и характеристик элементов схемы.

5. Параметры цепей (звеньев) ОС оказывают существенное влияние на параметры и характеристики всего усилительного устройства.

9.5. Примеры использования операционных усилителей и обратных связей в некоторых схемах

Конверторы сопротивлений. ОУ позволяют строить схемы, обладающие свойствами, нехарактерными для обычных элементов. Примерами могут служить так называемые конверторы и инверторы сопротивлений и проводимостей [6]. Эти схемы позволяют изменять масштаб сопротивлений, проводимостей, ёмкостей и индуктивностей, заменять индуктивные элементы ёмкостными, изменять знак сопротивлений с положительного на отрицательный, схемно получать отрицательные ёмкости и индуктивности. Понятия отрицательной ёмкости и индуктивности связаны с комплексным представлением соответствующих проводимостей. Положительная емкость имеет комплексную проводимость $Y_C = \omega C e^{j90^\circ}$, которая показывает, что ток
в ёмкости опережает напряжение на 90°. В отрицательной ёмкости ток будет отставать от напряжения на 90°.

Известно, что в индуктивности (положительной) ток отстаёт от напряжения на 90°, а индуктивное сопротивление представляют комплексной величиной $Z_L = \omega L e^{j90^\circ}$.

Отрицательная индуктивность представляется комплексным сопротивлением, в котором ток опережает напряжение на 90°. Некоторые структурные схемы таких устройств [6] показаны на рис. 9.12.

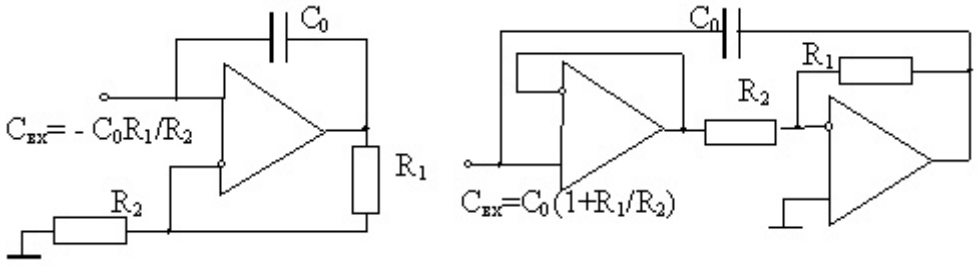


Рис. 9.12. Схемы конверторов емкостного сопротивления

Схемы сравнения на основе операционных усилителей. Большой собственный коэффициент усиления позволяет построить эффективные схемы сравнения двух напряжений, применяемые в различных устройствах автоматики [26]. На основе ОУ можно построить как однопороговые, так и гистерезисные схемы сравнения. Передаточные характеристики таких схем представлены на рис. 9.13 и 9.14.

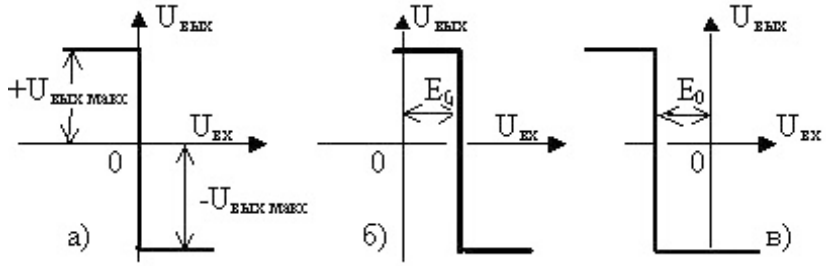


Рис. 9.13. Идеальные передаточные характеристики однопороговой схемы сравнения:
а – для идеального ОУ без внешнего смещения;
б – с положительным смещением, *в* – с отрицательным смещением

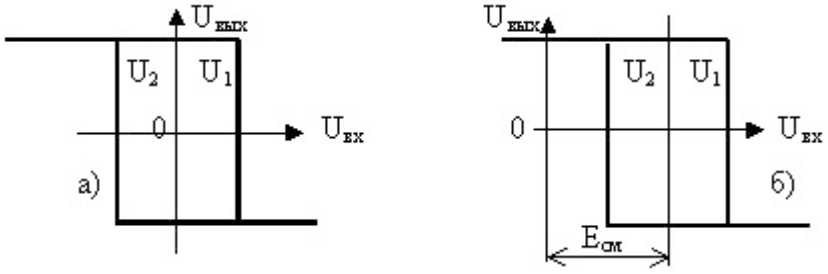


Рис. 9.14. Передаточные гистерезисные характеристики:
а – симметричная без смещения; *б* – со смещением

Передаточные характеристики, показанные на рис. 9.13 и 9.14, могут быть получены, если использовать ОУ без обратной связи или с положительной обратной связью. При этом ОУ по свойствам должен приближаться к идеальному: $K_{OY} \to \infty$, $R_{BX} \to \infty$, $R_{ВЫХ} \to 0$. Согласно основному уравнению для усилителя с обратной связью имеем:

$$K_{OC} = \frac{K_{OY}}{1 - b_{OC} \cdot K_{OY}}, \qquad (9.7)$$

где b_{OC} – коэффициент обратной связи;

$K_{OУ}$ – собственный коэффициент усиления ОУ;

K_{OC} – коэффициент усиления схемы.

Если b_{OC} = 0 (отсутствует ОС), то $K_{OC} = K_{OУ}$, причем при достаточно большом значении $K_{OУ}$ напряжение на выходе ОУ появится при нулевом значении напряжения на его входах. Работа ОУ в таком режиме имеет только теоретическое значение. Для того чтобы построить схему сравнения, нужно использовать факт перехода ОУ из одного состояния в другое при разности напряжений на входах, близкой к нулю. Сравниваемые напряжения подают на инвертирующий
и неинвертирующий входы, а момент их равенства будет зафиксирован скачкообразным изменением напряжения на выходе. Структурные схемы, позволяющие осуществить сравнение одного напряжения с другим (в том числе и с нулем), показаны на рис. 9.15.

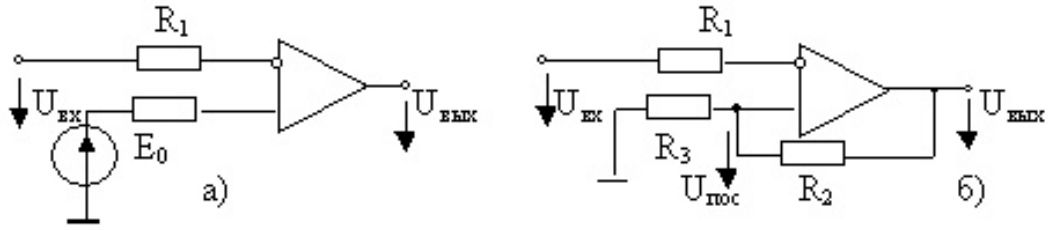
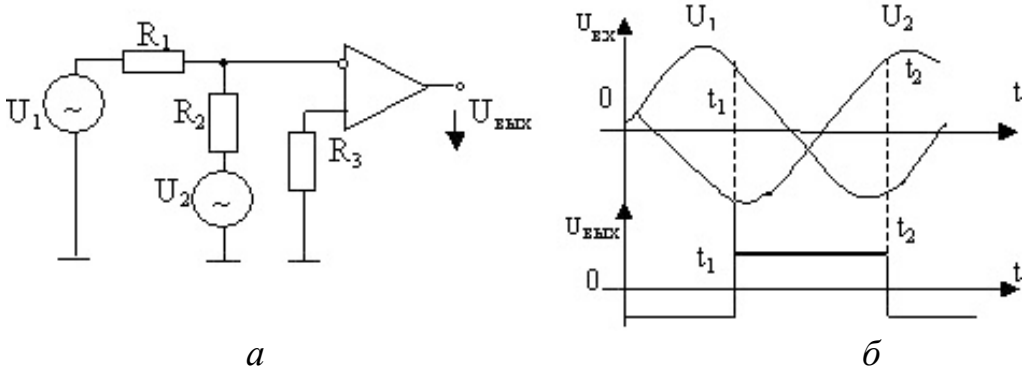


Рис. 9.15. Структурные схемы сравнения напряжений:
а – ОУ без цепи обратной связи с высоким $K_{OУ}$, *б* – ОУ с положительной ОС

В схеме на рис. 9.15, *а* входное напряжение U_{BX} сравнивается
с опорным напряжением E_0. В схеме на рис. 9.15, *б* входное напряжение U_{BX} сравнивается с напряжением $U_{ПОС}$, образованным из выходного напряжения резистивным делителем R_2R_3.

Схема сравнения может быть построена на ОУ без обратной связи при подаче сравниваемых напряжений на один неинвертирующий вход, если одно из сравниваемых напряжений (или оба) имеют знакопеременный характер изменения. Схема такого устройства сравнения приведена на рис. 9.16.



а *б*

Рис. 9.16. Структурная схема сравнения знакопеременных напряжений (*а*) и временные диаграммы сигналов (*б*)

Переключение схемы будет происходить в моменты t_1, t_2, когда

$$\frac{U_1(t)}{R_1} = \frac{U_2(t)}{R_2}, \qquad (9.8)$$

где $U_1(t)$, $U_2(t)$ – текущие (мгновенные) значения сравниваемых напряжений.

Если выбрать $R_1=R_2$, переключение будет происходить в моменты равенства абсолютных значений противоположных по знаку напряжений (в предположении, что внутренние сопротивления источников напряжений одинаковы).

Если $b_{OC} \neq 0$ и имеет положительный знак, то согласно (9.7), коэффициент передачи схемы увеличивается, при этом гистерезисную характеристику (рис. 9.14) можно получить при $b_{OC} > 1/K_{OY}$.

В схеме (рис. 9.15, *б*) на инвертирующий вход подано изменяющееся по абсолютному значению и знаку напряжение U_{BX}, а цепь ПОС образована делителем R_2R_3. На неинвертирующем входе будет образовано напряжение:

$$\left|U_{ПОС}\right| = \left|U_{ВЫХ\ МАХ}\right| \cdot \frac{R_3}{\left(R_2 + R_3\right)}. \qquad (9.9)$$

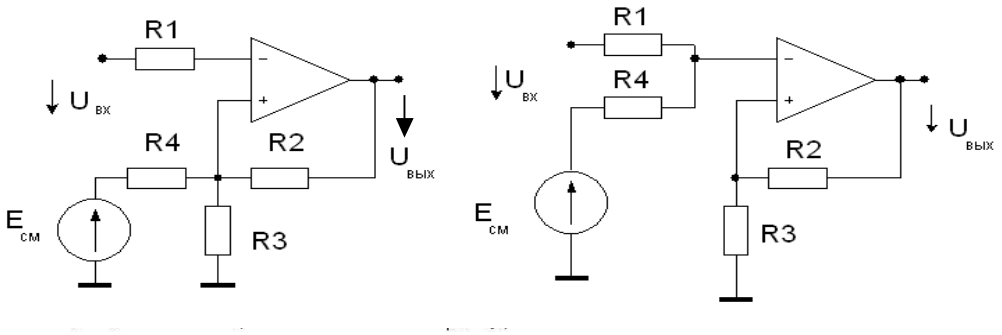
Знак этого напряжения будет определяться знаком выходного напряжения ОУ, находящегося в состоянии положительного или отрицательного ограничения. Если, например, на выходе ОУ напряжение соответствует уровню положительного ограничения (на выходе присутствует положительное $U_{ВЫХ\ МАХ}$), подача отрицательного напряжения U_{BX} не будет изменять состояние схемы до тех пор, пока $|U_{BX}|<|U_{ПОС}|$. В момент, когда $|U_{BX}|=|U_{ПОС}|$ произойдет изменение выходного напряжения ОУ от + $U_{ВЫХ\ МАХ}$ до $-$ $U_{ВЫХ\ МАХ}$, а на неинвертирующем входе установится напряжение:

$$U_{ПОС} = -U_{ВЫХ\ МАХ} \cdot \frac{R_3}{\left(R_2 + R_3\right)}. \qquad (9.10)$$

Таким образом, устойчивые состояния при наличии ПОС в рассматриваемой схеме будут устанавливаться каждый раз после перехода входного напряжения через пороговые значения $U_{ПОС}$, определяемые выражениями (9.9), (9.10). Анализ работы схемы с идеальным ОУ и цепью ПОС показывает, что передаточная характеристика будет иметь вид, представленный на рис. 9.14, *а*, где U_1 и U_2 определяются по выражению (9.10).

Смещение характеристики по горизонтальной оси относительно начала координат можно осуществить подачей дополнительного напряжения смещения на тот или иной вход. Если напряжение смещения положительное, то подача его на неинвертирующий вход смещает характеристику вправо (рис. 9.14, *б*), а подача его на инвертирующий вход смещает характеристику влево. Смещение характеристики влево можно осуществить подачей отрицательного смещения на неинвертирующий вход.

Следует заметить, что подачу напряжения смещения нужно выполнять через резистор, сопротивление которого должно быть значительно больше сопротивлений, используемых для реализации характеристик. Структурные схемы, реализующие такие характеристики, показаны на рис. 9.17.



а *б*

Рис. 9.17. Гистерезисные структурные схемы:
а – напряжение смещения подано на неинвертирующий вход;
б – напряжение смещения подано на инвертирующий вход

Аналоговый компаратор. Построение схем сравнения повышенной чувствительности на ОУ, как на дискретном элементе, встречает определенные трудности. Значительно лучшими характеристиками обладают интегральные схемы сравнения двух напряжений, называемые *аналоговыми компараторами*.

Компаратором принято называть интегральную схему, предназначенную для сравнения двух напряжений и выдачи результата сравнения в виде напряжения, соответствующего логическим уровням «0» или «1». Аналоговый компаратор служит связующим звеном между аналоговой и цифровой частями схемы.

В структурной схеме компаратора, помимо операционного усилителя, есть дополнительные элементы, обеспечивающие выполнение основной функции сравнения и функции преобразования уровня выходного напряжения в соответствии с результатом сравнения. Передаточные характеристики и упрощенная структурная схема компаратора [14] показаны ниже на рис. 9.18.

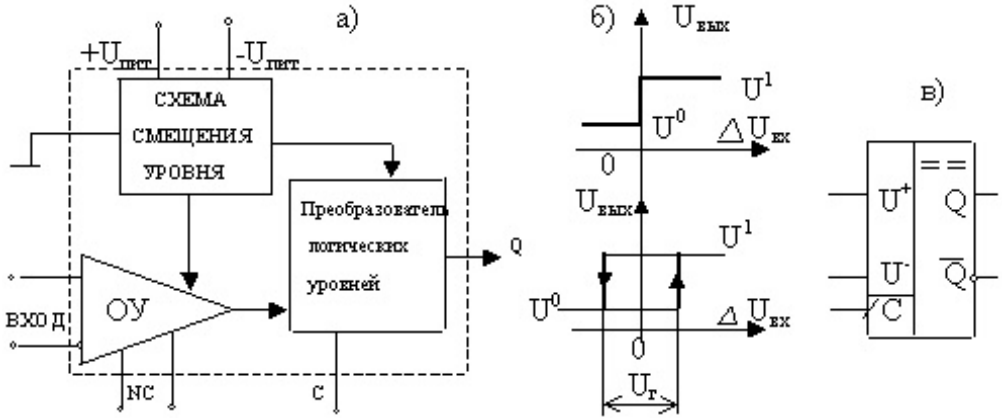


Рис. 9.18. Структурная схема (*а*), передаточные характеристики (*б*) и УГО (*в*) аналогового компаратора:
NC – выводы для коррекции нулевого уровня (балансировки); *C* – вход тактирования;
U^0, U^1 – логические уровни выходного сигнала; *Q* – обозначение выхода;
U^+, U^- – обозначения входных зажимов; $U_Г$ – ширина петли гистерезисной характеристики

Условия работы компаратора определяются следующим образом:

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} U^1, \text{при } U^+ > U^- \text{ или } \Delta U_{ВХ} > 0; \\ U^0, \text{при } U^+ < U^- \text{ или } \Delta U_{ВХ} < 0. \end{cases}$$

Наличие гистерезиса в выходной характеристике компаратора обусловлено погрешностью сравнения уровней входных напряжений, а величина напряжения $U_Г$ характеризует его чувствительность и может составлять несколько мВ. Важнейшими параметрами компаратора являются:

– пороговая чувствительность – минимальный разностный сигнал, который способен идентифицировать компаратор;

– входные и выходные токи;

– коэффициент ослабления синфазного сигнала – отношение величины синфазного напряжения к дифференциальному сигналу, вызывающему срабатывание компаратора, (измеряется в дБ);

– быстродействие (время переключения), характеризуемое промежутком времени от момента подачи входного сигнала $\Delta U_{ВХ}$ до момента достижения выходным сигналом логического уровня U^0
или U^1.

Современные аналоговые компараторы имеют время переключения несколько десятков нс при пороговой чувствительности около 0,25 мВ.

9.6. Области применения операционных усилителей в электронных схемах

Области использования ОУ весьма разнообразны. Приведенный ниже перечень устройств не охватывает все возможные случаи использования ОУ.

1. В линейных частотно-независимых и частотно-зависимых схемах:

а) инвертирующие и неинвертирующие масштабные усилители;

б) усилители с регулируемым усилением и повторители напряжения;

в) специальные дифференциальные и мостовые усилители;

г) стабилизаторы тока и напряжения;

д) усилители тока фотоэлементов и электрометрические усилители;

е) интеграторы, дифференциаторы, фазовращатели, активные фильтры;

2. Схемы с нелинейными и управляемыми обратными связями.

а) формирователи импульсов, ограничители, функциональные преобразователи;

б) прецизионные и фазочувствительные выпрямители, детекторы и компараторы;

в) логарифмические и антилогарифмические усилители;

г) аналоговые умножители и делители, широтно-импульсные модуляторы;

д) аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП);

е) автогенераторы, мультивибраторы, генераторы синусоидальных колебаний;

ж) преобразователи напряжения в частоту и частоты в напряжение.

10. ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ

10.1. Общие сведения

Генератор колебаний – это устройство, посредством которого энергия источника питания преобразуется в электрические колебания нужной формы, частоты и мощности.

Генераторы классифицируют по следующим признакам: частоте, форме колебаний, назначению, выходной мощности, типу активного элемента, виду цепей обратной связи.

По частоте различают инфранизкочастотные генераторы (частота генерации меньше 10 Гц), низкочастотные (от 10 Гц до 100 кГц), высокочастотные (от 100 кГц до 100 МГц), сверхвысокочастотные (выше 100 МГц). По форме колебаний различают генераторы гармонических и негармонических (импульсных) сигналов. По виду цепей обратной связи различают *LC*-, *RC*-, *RL*-генераторы. По используемым активным элементам генераторы подразделяют на транзисторные, ламповые, на операционных усилителях, динисторах и др. [12].

Генератор колебаний можно представить нелинейным устройством, обобщенная структурная схема которого имеет вид, показанный на рис. 10.1.

Схема содержит усилитель с коэффициентом усиления K, цепь отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи m и цепь положительной обратной связи с коэффициентом передачи β. Различают два этапа после включения питания: этап возбуждения и этап стационарного режима. На первом этапе основную роль играет цепь положительной обратной связи (ПОС), которая обычно выполняется на пассивных элементах и имеет потери.

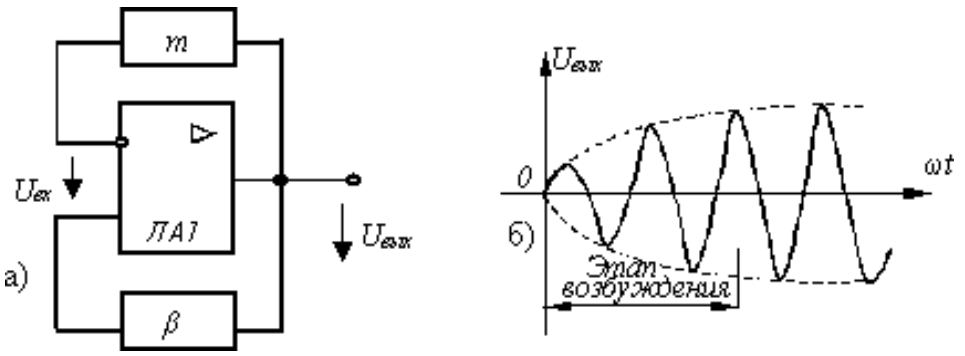


Рис. 10.1. Структурная схема генератора с внешней обратной связью (*а*) и процесс установления колебаний (*б)*

После подачи питания в схеме возникают колебания, обусловленные нестационарными (переходными) процессами – зарядом емкостей, нарастанием тока в индуктивностях, переходными процессами в транзисторах или операционных усилителях. Эти колебания появляются на входе в виде сигнала $U_{вх}$ и на выходе усилителя в виде сигнала $U_{вых} = KU_{вх}$. С выхода усилителя колебания через цепь ПОС поступают на вход усилителя, т.е.

$$U_{вх} = \beta U_{вых}.$$

Сравнение выражений для $U_{вых}$ приводит к равенству $U_{вых} = =\beta K U_{вых}$, откуда следует, что для возбуждения колебаний должно соблюдаться условие

$$\beta K = 1. \qquad (10.1)$$

Произведение βK называется *петлевым усилением* усилителя с обратной связью. Это условие распадается на два, которые называют *условиями баланса амплитуд и фаз*:

$$|K\beta| = 1; \qquad (10.2)$$

$$\arg(K\beta) = \varphi_к + \varphi_с = 0, \qquad (10.3)$$

где $\varphi_к$ и $\varphi_с$ – сдвиг по фазе, соответственно, для прямой и обратной передачи усиливаемого сигнала.

Условие (10.2) означает, что модуль коэффициента усиления усилителя должен быть равен модулю обратной величины коэффициента передачи звена ПОС, т.е. насколько сигнал ослабляется при передаче через цепь ПОС, настолько он должен быть усилен при прохождении через усилитель.

Если $K < \beta^{-1}$, то колебания в схеме генератора будут затухающими и наоборот. Цепь отрицательной обратной связи служит для точного выполнения условия баланса амплитуд.

Условие (10.3) называют условием баланса фаз. Оно означает, что полный фазовый сдвиг между колебаниями на входе и выходе в замкнутом контуре генератора должен быть равен $2\pi n$, где n – любое целое число. Если условие (10.3) соблюдается только на одной частоте, то (при выполнении условия баланса амплитуд) колебания будут гармоническими. Если условия баланса фаз выполняются для нескольких частот, колебания будут негармоническими.

10.2. Генераторы гармонических сигналов

Широкое распространение получили схемы генераторов, имеющих название трехточечных. Одна из них приведена на рис. 10.2.

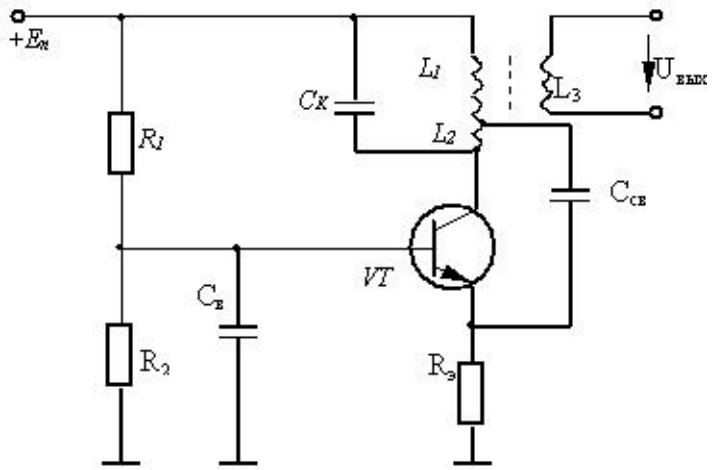


Рис. 10.2. Схема индуктивного трехточечного генератора на биполярном транзисторе

Колебания возникают в контуре $C_к$, L_1, L_2, а часть напряжения через конденсатор связи $C_{св}$ подается во входную эмиттерную цепь транзистора, образуя положительную обратную связь.

Сопротивления R_1 и R_2 обеспечивают выбор рабочей точки транзистора по постоянному току. Выходное напряжение снимается с дополнительной индуктивной обмотки. Генераторы с *LC*-контурами используются в основном на высокой частоте. На низких частотах обычно используют генераторы с *RC*-цепями в звеньях ПОС. Часто используется цепь, называемая мостом Вина, схема которой изображена на рис. 10.3.

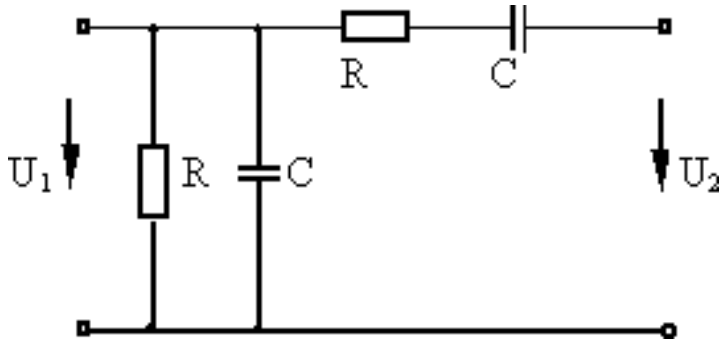


Рис. 10.3. Схема моста Вина

Мост Вина состоит из двух *RC*-звеньев: первое звено образовано последовательным соединением конденсатора и резистора и имеет сопротивление:

$$z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}.$$

Второе звено образовано параллельным соединением таких же элементов и имеет сопротивление:

$$z_2 = \frac{R\dfrac{1}{j\omega C}}{R + \dfrac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}.$$

Схема генератора гармонических колебаний с мостом Вина показана на рис. 10.4. Мост Вина образует цепь ПОС с коэффициентом передачи:

$$\beta = \frac{z_2}{z_1 + z_2} = \frac{1}{1 + \dfrac{(1 + j\omega RC)(1 + j\omega RC)}{j\omega RC}} = \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC - C^2R^2\omega^2}. \qquad (10.4)$$

Если выполнить условие $1-C^2R^2\omega^2=0$, т.е. $\omega=\frac{1}{CR}$, то фазовый сдвиг будет равен нулю, а модуль коэффициента обратной связи $\beta=\frac{1}{3}$. Частота генерации будет определяться выражением:

$$f=\frac{1}{2RC\pi}. \qquad (10.5)$$

Стабилизацию амплитуды в таком генераторе обеспечивают с помощью нелинейной цепи отрицательной обратной связи R_1, R_2. В качестве нелинейного сопротивления можно использовать миниатюрную лампочку накаливания.

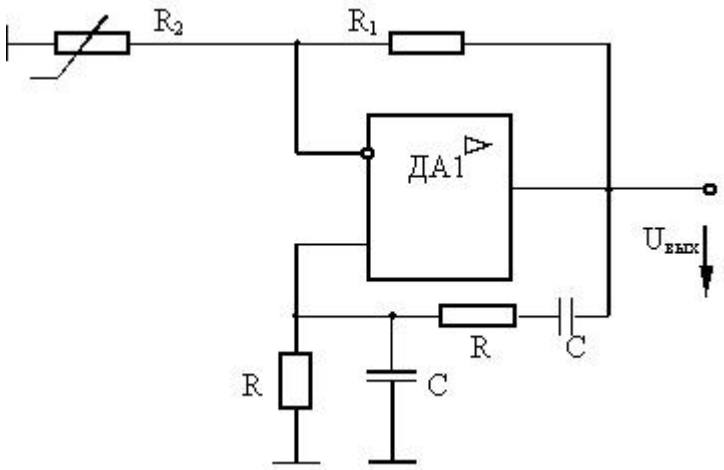


Рис. 10.4. Схема генератора с мостом Вина

При этом с увеличением выходного напряжения ток в цепи R_1, R_2 увеличивается, что приводит к увеличению сопротивления нити лампы накаливания и возрастанию глубины отрицательной обратной связи:

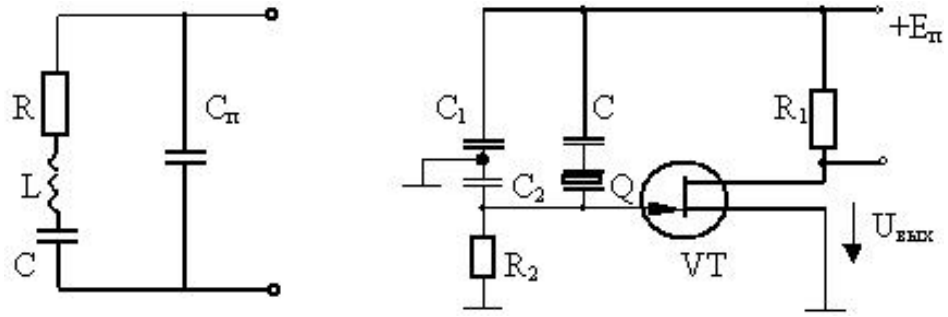
$$m = R_2/(R_1+R_2). \qquad (10.6)$$

Увеличение глубины отрицательной обратной связи приводит к замедлению увеличения выходного напряжения, в результате чего амплитуда выходного напряжения стабилизируется.

10.3. Кварцевые генераторы

В кварцевых генераторах в качестве элемента колебательного контура используется кристалл кварца (кварцевый резонатор), имеющий высокостабильную собственную резонансную частоту.

Схема замещения кварцевого резонатора представлена на рис. 10.5, *а*. Кварцевый генератор может быть построен по схеме, приведенной на рис. 10.5, *б*.



а *б*

Рис. 10.5. Схема замещения кварца (*а*)
и схема кварцевого генератора (*б*)

В схеме замещения кварцевого резонатора (рис. 10.5) L – эквивалентная индуктивность кварца, R – сопротивление потерь, C – последовательная емкость, C_n – параллельная емкость. В изображенном контуре (рис. 10.5, *а*) наблюдаются две резонансные частоты: резонанса токов и резонанса напряжений. Для кварца эти частоты практически совпадают, поэтому частотная характеристика кварцевого резонатора имеет резко выраженный максимум. В схеме кварцевого генератора (рис. 10.5, *б*) ПОС обеспечивается за счет того, что кварц вносит дополнительный фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями. Конденсаторы C_1 и C_2 включаются для улучшения условий возбуждения. Основное преимущество кварцевых генераторов – высокая стабильность частоты колебаний. Например, стабильность частоты *RC*-генераторов имеет величину около 0,1 %, *LC*-генераторов – около 0,01 %, а кварцевый генератор имеет стабильность (10^{-4} – 10^{-5}) % [14].

10.4. Генераторы колебаний прямоугольной формы (мультивибраторы)

Принцип получения сигналов с прямоугольной формой напряжения поясним на примере использования схемы *КР1006ВИ1*, называемой интегральным таймером [6]. Таймерами называют устройства, предназначенные для получения точных интервалов времени или по-

следовательности импульсов со стабильными частотами. Упрощенная схема интегрального таймера изображена на рис. 10.6.

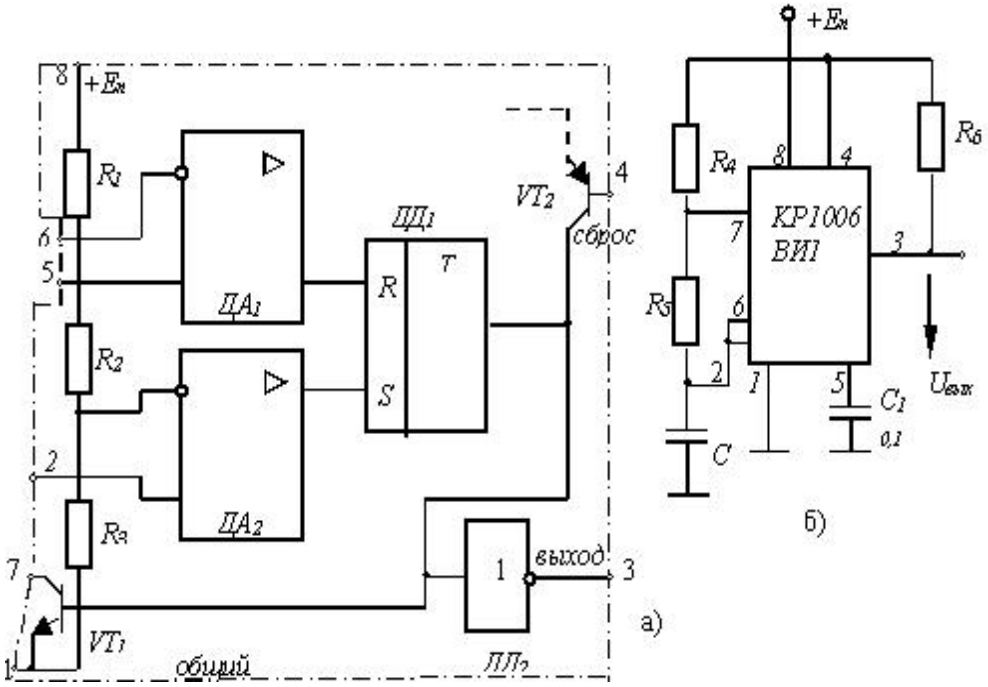


Рис. 10.6. Упрощенная схема таймера *КР1006ВИ1* (*а*) и его включение мультивибратором (*б*)

Схема содержит делитель напряжения, составленный из одинаковых резисторов R_1, R_2, R_3, два компаратора $ДА_1$, $ДА_2$, выполненные на основе схем операционных усилителей, *RS*-триггер DD_1, инвертор DD_2, разрядный ключ на транзисторе VT_1, ключ сброса VT_2 (показан условно).

При подаче напряжения на таймер конденсатор C (рис. 10.6, *б*) заряжается по цепи R_4, R_5, C до напряжения $U = \frac{2}{3}U_п$, при котором срабатывает компаратор $ДА_1$. Компаратор $ДА_1$ устанавливает триггер DD_1 в такое положение, при котором на его выходе появляется сигнал, включающий ключ VT_1. При этом обеспечивается создание цепи разряда конденсатора через резистор R_5 и транзистор VT_1. При достижении напряжением на конденсаторе значения 1/3 $E_п$ срабатывает компаратор $ДА_2$ и через вход *S* триггера DD_1 устанавливает триггер в исходное положение, при котором на его выходе образуется низкое напряжение, ключ VT_1 закрывается. Начинается заряд конденсатора до напряжения $2/3U_п$. В схеме устанавливаются устойчивые колеба-

ния. На выходе инвертора DD_2 получим прямоугольные импульсы, амплитуда которых определяется напряжением питания.

Длительность стадий заряда T_1 и разряда T_2 конденсатора C можно определить как

$$\begin{aligned} \mathrm{T}_1 &= 0{,}693\left(R_4 + R_5\right)C, \\ \mathrm{T}_2 &= 0{,}693R_5C \end{aligned} \qquad (10.7)$$

Частота генерируемых импульсов определяется выражением:

$$f = \frac{1}{\mathrm{T}_1 + \mathrm{T}_2} \approx \frac{1{,}443}{\left(2R_5 + R_4\right)C}. \qquad (10.8)$$

Скважность импульсов определяется формулой:

$$Q = R_5 /(R_4 + 2R_5). \qquad (10.9).$$

При изменении емкости конденсатора от 0,001 до 100 мкФ и суммарного сопротивления (R_4 + 2R_5) от 1 кОм до 10 мОм можно получить любые частоты в диапазоне от 0,1 Гц до 100 кГц [6].

Следует отметить, что на основе рассмотренной схемы таймера можно собрать различные устройства, такие как ждущий мультивибратор, делитель частоты, широтно-импульсный и фазо-импульсный модуляторы и другие.

Мультивибраторы на операционных усилителях и логических элементах. Генераторы прямоугольных импульсов с невысокими требованиями к стабильности могут быть выполнены на операционном усилителе. Примером может быть схема, показанная на рис. 10.7.

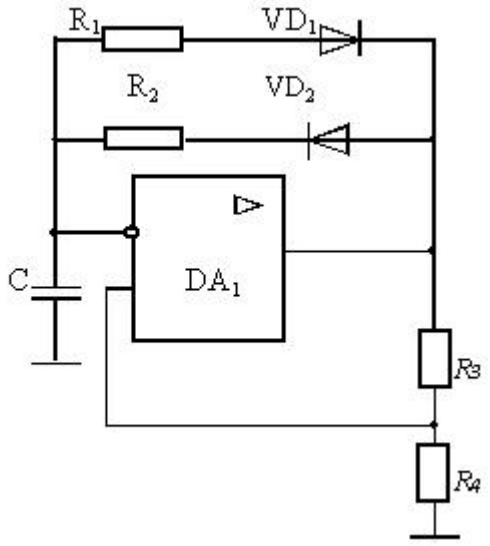


Рис. 10.7. Схема мультивибратора на операционном усилителе

Усилитель $ДА_1$ работает в режиме регенеративного компаратора, т.е. в режиме, при котором полярность и значение опорного напряжения изменяются в зависимости от полярности выходного сигнала. В схеме имеется положительная обратная связь, обеспечиваемая делителем R_3, R_4, а выходное напряжение может принимать два устойчивых значения: $U^{+}_{вых.\,max}$ и $U^{-}_{вых.\,max}$.

Коэффициент передачи цепи ПОС:

$$\gamma = \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

В зависимости от исходного состояния ОУ напряжение на неинвертирующем входе будет

$$U_1 = U^{-}_{вых.\max}\gamma \qquad (10.10)$$

или

$$U_2 = U^{+}_{вых.\max}\gamma.$$

Компаратор срабатывает в моменты, когда напряжение на конденсаторе достигает значения U_1 или U_2.

Если на выходе ОУ было отрицательное напряжение, конденсатор разряжается по цепи: общий провод – резистор R_1 – диод VD_1. Если на выходе ОУ было положительное напряжение, конденсатор перезаряжается по цепи R_2, VD_2. Время заряда и разряда определяются приближенно по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} T_1 &= R_1 C \ln \frac{U^{+}_{вых.\max} + \left|U^{-}_{вых.\max}\right|\gamma}{U^{+}_{вых.\max}(1-\gamma)}, \\ T_2 &= R_2 C \ln \frac{\left|U^{-}_{вых.\max}\right| + U^{+}_{вых.\max}\gamma}{\left|U^{-}_{вых.\max}\right|(1-\gamma)}. \end{aligned} \qquad (10.11)$$

Частота колебаний определяется по формуле:

$$f = 1/(T_1 + T_2). \qquad (10.12)$$

Мультивибратор удовлетворительно работает в диапазоне частот от нескольких Гц до 100 кГц. Выбирая параметры R_1, R_2, C, можно менять не только частоту, но и скважность выходных импульсов.

Стабильность частоты колебаний генератора на основе ОУ может быть существенно повышена, если в качестве реактивного элемента использовать кварцевый резонатор. Схема такого генератора приведена на рис. 10.8.

Кварцевый резонатор включен в цепь ООС. Глубина ООС определяется соотношением:

$$M = R_2 / (R_2 + Z), \qquad (10.13)$$

где Z – эквивалентное сопротивление параллельно соединенных резистора R_1 и кварцевого резонатора Q.

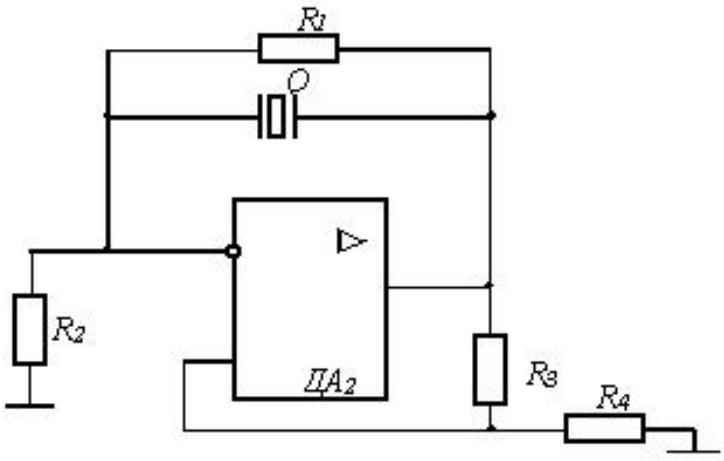


Рис. 10.8. Генератор колебаний на ОУ с кварцевым резонатором

Глубина ПОС определяется соотношением: $\gamma = R_4/(R_3 + R_4)$.

На резонансной частоте полное сопротивление кварцевого резонатора, а следовательно и эквивалентного сопротивления Z, резко увеличивается, глубина ООС уменьшается. Если результирующее значение обратной связи окажется положительным и $K\gamma > 1$, то генератор возбудится. Ограничение амплитуды осуществляется за счет свойств ОУ.

Мультивибраторы часто выполняют на логических элементах (рис. 10.9). Логические элементы (ЛЭ) схемно представляют собой усилители с большим коэффициентом усиления, у которых имеются два входных пороговых значения $U^0_{вх.пор}, U^1_{вх.пор}$. Следовательно, обеспечив положительную обратную связь, как на схеме рис. 10.7, при наличии реактивного элемента, можно получить процесс генерации колебаний подобно тому, как было рассмотрено ранее.

При этом можно использовать кварцевую стабилизацию частоты. Промышленность выпускает интегральные схемы мультивибраторов, с помощью которых можно получать колебания с частотой от долей Гц до 80 МГц [22].

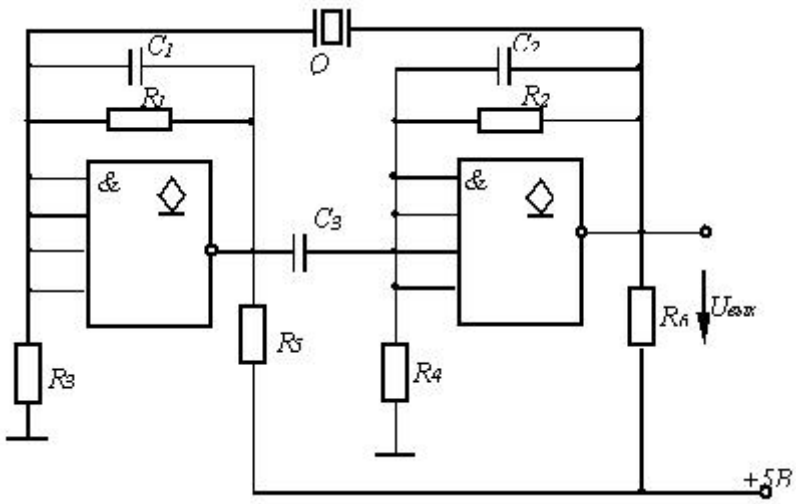


Рис. 10.9. Мультивибратор на логических элементах *К155ЛА7*

В схеме использован кварцевый резонатор для повышения стабильности частоты колебаний. ЛЭ выполняют функции усилителей. Усилители охвачены ООС, обеспечиваемой резисторами R_1, R_2 и R_3, R_4. Конденсаторы C_1 и C_2 включены для устранения паразитного возбуждения. Конденсатор C_3 введен для развязки по постоянному току выхода микросхемы DD_1 от входа микросхемы DD_2. Положительная обратная связь обеспечивается за счет фазового сдвига, осуществляемого кварцевым резонатором. Так как ЛЭ *К155ЛА7* имеет открытый коллектор, то в цепях выходов имеются резисторы R_5 и R_6. В зависимости от соотношения параметров колебания могут быть синусоидальными либо несинусоидальными. Стабильность частоты генерации при этом сохраняется.

10.5. Импульсные сигналы

Импульсный принцип построения систем занимает доминирующее положение по сравнению с аналоговым.
В импульсных системах используются сигналы (напряжение, ток) импульсной формы. Наиболее распространены импульсы, близкие по форме к прямоугольной, пилообразной и экспоненциальной, они мо-

гут быть положительной, отрицательной или чередующейся полярности (рис. 10.10).

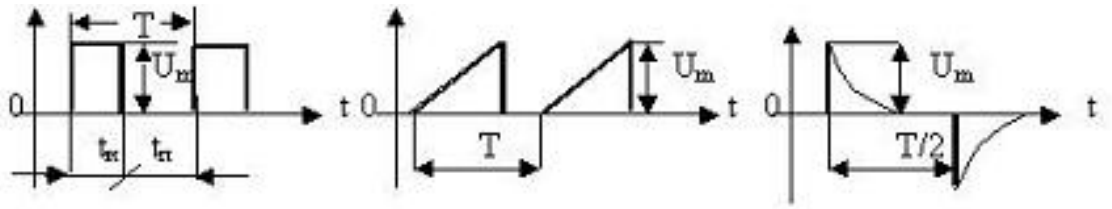


Рис. 10.10. Примеры электрических импульсов различной формы:
U_m – амплитуда, T – период импульсной последовательности,
$t_и$ – ширина (длительность) импульса,
$t_п$ – длительность паузы

Импульсными называются устройства, предназначенные для генерирования, формирования, преобразования и передачи импульсных сигналов.

Параметры электрического импульса. *Электрическим импульсом* называют кратковременное скачкообразное изменение напряжения или силы тока. Все электрические импульсы принято разделять на видеоимпульсы и радиоимпульсы (рис. 10.11).

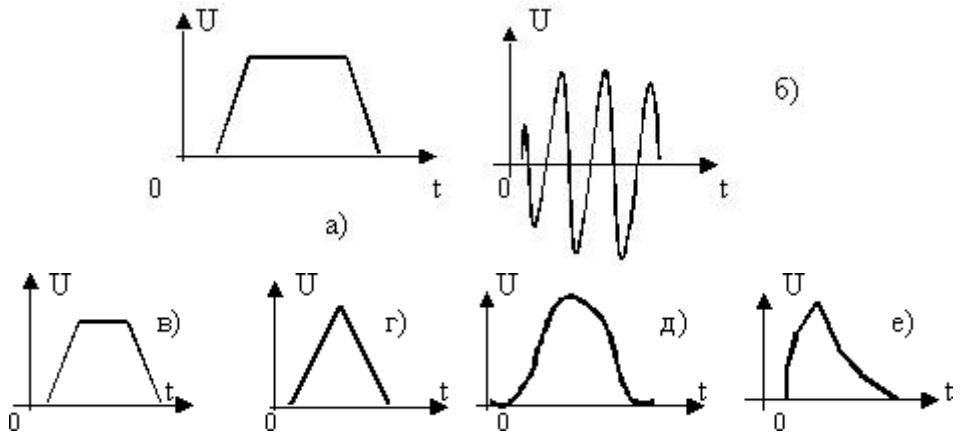


Рис. 10.11. Примеры видеоимпульсов (*а, в – е*) и радиоимпульса (*б*)

На рис. 10.11 представлены распространённые формы импульсов: трапецеидальная (*а, в*), треугольная (*г*), колоколообразная (*д*), пилообразная (*е*).

Однополярные электрические импульсы называют видеоимпульсами. Они не содержат высокочастотных колебаний. Электрические импульсы, представляющие собой ограниченные во времени

ВЧ или СВЧ электромагнитные колебания, огибающая которых имеет форму видеоимпульса, называют радиоимпульсами.

Принято различать следующие участки импульса: фронт, вершина, срез, основание. Срез называют иногда задним фронтом.

Основные параметры видеоимпульса (рис. 10.12):

1) высота импульса (амплитуда) – A;

2) спад вершины импульса – ΔA;

3) длительность импульса $t_и$, определяют на уровне $0{,}1A$;

4) время установления или нарастания фронта импульса (длительность фронта импульса) $t_ф$ – время нарастания сигнала от уровня 0,1 до уровня 0,9 своего максимального значения;

5) длительность среза $t_с$ определяется аналогично $t_ф$;

6) длительность вершины импульса $t_в$ – на уровне $0{,}9A$;

7) активная длительность импульса $t_{иа}$ – на уровне $0{,}5A$.

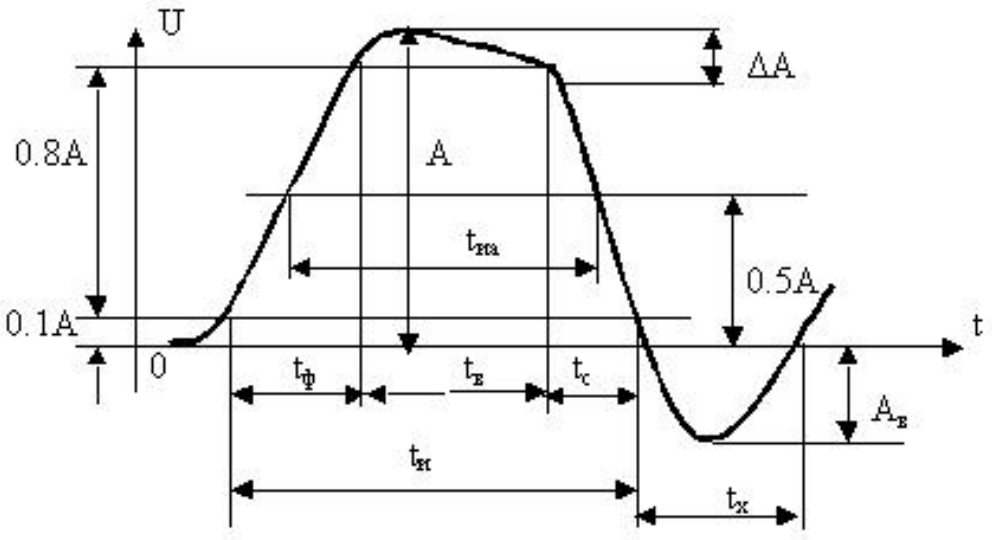


Рис. 10.12. Иллюстрация параметров видеоимпульса

Выброс, образующийся чаще всего после спада, называют хвостом импульса, который характеризуется длительностью t_x и амплитудой выброса $A_в$. В этом случае расчетная длительность среза $t_с$ должна быть увеличена. Периодическую последовательность импульсов характеризуют следующими параметрами:

1) периодом повторения импульсов T;

2) частотой повторения импульсов $f = 1/T$;

3) скважностью импульсов $Q = T/t_и$, $Q > 1$;

4) коэффициентом заполнения $K_з = 1/Q = t_и/T$, $K_з < 1$.

Устройства, в которых выполняются основные виды преобразований импульсных сигналов, разделяются на несколько видов:

а) электрические цепи, обеспечивающие неискаженную передачу импульсов – линии передачи, кабели, трансформаторы, линии задержки, усилители импульсов (видеоусилители);

б) устройства преобразования импульсов обеспечивают получение импульсов одной формы из импульсов другой формы или той же формы, но с другими параметрами:

– линейные преобразователи (интегрирующие и дифференцирующие устройства);

– нелинейные формирующие устройства (ограничители, компараторы, триггеры Шмитта, формирователи);

– преобразователи импульсов цифровых устройств, предназначенные для выполнения логических функций и преобразований одной последовательности импульсов в другую (логические элементы, триггеры, счетчики, регистры, комбинационные устройства);

в) импульсные генераторы (автогенераторы, мультивибраторы, одновибраторы, синхронизируемые генераторы, делители частоты).

Основу всех этих устройств составляют электронные ключи.

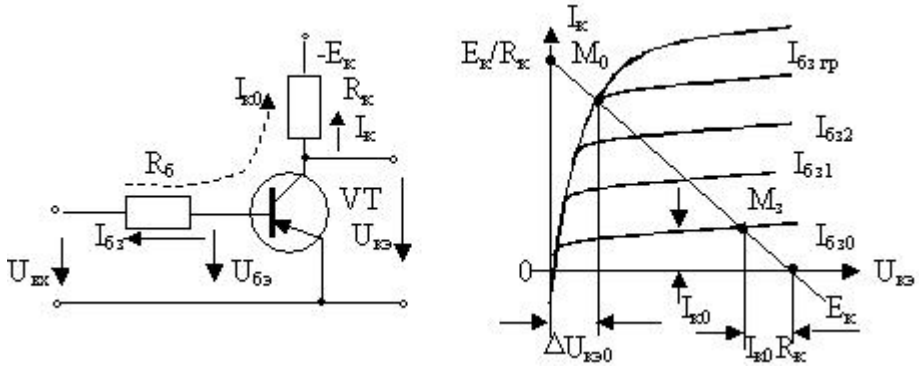
10.6. Электронные ключи

Ключи на биполярных транзисторах. Вся импульсная и цифровая техника базируется на работе транзистора в качестве *ключа* – устройства, коммутирующего электрическую цепь. Основой всех узлов и схем импульсной и цифровой техники является так называемая ключевая схема – каскад на транзисторе, работающем в ключевом режиме (рис. 10.13). Транзистор может включаться по схемам ОЭ, ОК, ОБ.

Режим запирания (отсечки) осуществляется подачей на вход транзистора напряжения положительной полярности (согласно стрелке на рис. 10.13) $U_{вх} > 0$. Эмиттерный переход под действием этого напряжения запирается и его ток равен 0. Вместе с тем через резистор $R_б$ протекает обратный (тепловой) ток коллекторного перехода $I_{к0}$. Этому режиму на выходных характеристиках транзистора соответствует точка $M_з$ (рис. 10.13). Величину запирающего входного напряжения $U_{вх.зап}$ выбирают такой, чтобы при протекающем через $R_б$ тепловом токе выполнялось условие:

$$U_{бэ} = (U_{вх.зап} - I_{к0}\, R_б) > 0. \qquad (10.14)$$

Режим открытого состояния транзистора достигается изменением полярности входного напряжения ($U_{вх} < 0$) и заданием соответствующего тока базы. С изменением полярности входного напряжения увеличению тока базы будет соответствовать увеличение тока коллектора, чему соответствует условное перемещение на характеристиках точки M из положения $M_з$ вверх по линии нагрузки, при этом $U_{кэ}$ уменьшается по модулю.



а *б*

Рис. 10.13. Схема электронного ключа (*а*) и графическая иллюстрация его состояния (*б*)

До некоторого граничного значения тока базы $I_{бзгр}$ сохраняется известная зависимость между током коллектора $I_к$ и током базы $I_{бз}$:

$$I_к \approx \beta I_{бз},$$

где β – статический (усредненный) коэффициент передачи тока транзистора в схеме ОЭ.

При токе базы $I_{бзгр}$ будет «полное» открытие транзистора. При этом в точке $M_о$: $I_к = (E_к - \Delta U_{кэ0}) / R_к$, где $\Delta U_{кэ0}$ – остаточное напряжение на транзисторе в открытом состоянии.

$\Delta U_{кэ0}$ является существенным параметром транзистора в импульсном режиме, причём оно должно быть минимальным. Обычно $\Delta U_{кэ0}$ = (0,5 – 1) В. Тогда граничное значение тока базы открытого транзистора:

$$I_{бз\,гр} = I_к / \beta \cong E_к / (R_к \cdot \beta). \qquad (10.15)$$

При дальнейшем увеличении тока базы остаточное напряжение остается практически неизменным. Режим работы открытого транзи-

стора при $I_{бз} > I_{бз\ гр}$ называют насыщенным, а отношение $S = I_{бз}/I_{бзгр}$ – *коэффициентом насыщения* транзистора. С целью надежного обеспечения режима насыщения обычно выбирают $S = (1{,}5 – 3)$.

Процессы, протекающие в ключевой схеме, при условии, что входной импульс напряжения имеет идеальную прямоугольную форму, можно представить импульсными диаграммами сигналов, показанными на рис. 10.14.

На интервале $0 – t_1$ транзистор заперт напряжением $U_{вхз}$. Напряжение на транзисторе $U_{кэ} = – (E_к – I_{кб0} \cdot R_к)$. При появлении импульса (момент t_1) ток $I_к$ начинает нарастать, а напряжение $U_{кэ}$ – уменьшаться. Для упрощения можно считать, что изменения токов и напряжений происходят по экспоненциальному закону.

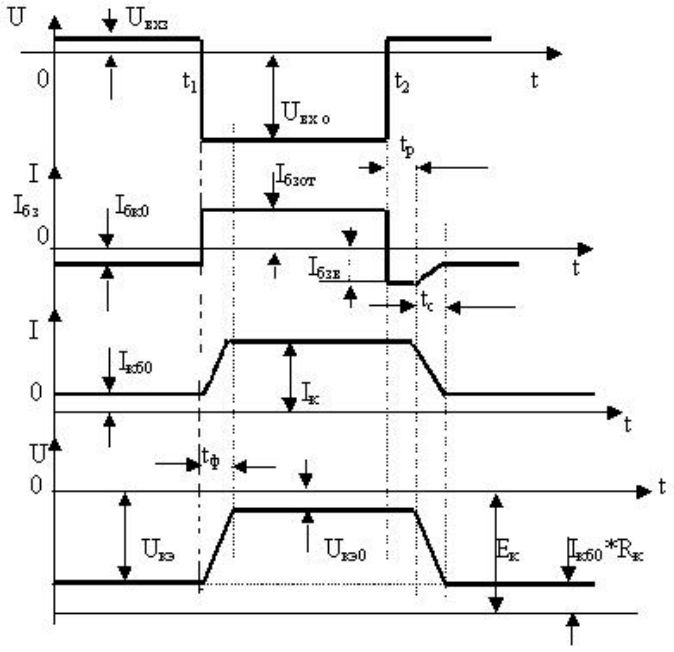


Рис. 10.14. Импульсные диаграммы сигналов транзисторного ключа

Инерционность процессов в области высоких частот можно учесть эквивалентной постоянной времени

$$T_в = T_1 + T_2,$$

где $T_1 = 1/2\pi F_{гр}$ – постоянная времени, характеризующая процессы в транзисторе, связанные с величиной граничной частоты $F_{гр}$;

T_2 – постоянная времени, зависящая от величины емкости коллекторного перехода и величины сопротивления коллекторной цепи в схеме ОЭ.

С некоторыми допущениями, полагая, что коллекторный ток возрастает по экспоненциальному закону, можно оценить длительность фронта импульса коллекторного тока:

$$t_ф = T_в \ln[S / (S – 1)], \qquad (10.16)$$

где $S = I_{бзот}/I_{бз\ гр}$ – коэффициент насыщения транзистора.

Из уравнения следует вывод, что длительность фронта импульса уменьшается с увеличением коэффициента насыщения. Происходит это потому, что в случае увеличения коэффициента S увеличивается базовый ток, заставляющий быстрее изменяться коллекторный ток. При $S = 1$ (это активный режим на грани насыщения) значение $t_ф$ следует определять по другому выражению, определяя его относительно уровней 0,1 и 0,9 установившегося значения коллекторного тока: $t_ф = T_в \ln (0{,}9/ 0{,}1) = 2{,}2\ T_в$.

Процесс запирания транзистора начинается в момент t_2, когда $U_{вхо}$ меняет знак. Однако ток коллектора и напряжение на открытом транзисторе некоторое время остаются неизменными, т.е. создается задержка в запирании транзистора. Происходит это из-за того, что необходимо какое-то время $t_р$ ухода избыточных носителей заряда из базы (время рассасывания заряда). Рассасывание происходит по цепи коллектора (за счет ухода избыточных зарядов) и по цепи базы (за счет протекания обратного тока $I_{бз0}$, вызванного запирающим напряжением). Величина этого тока ограничивается сопротивлением $R_б$ входной цепи:

$$I_{бз0} = U_{вхз} / R_б.$$

Время, в течение которого происходит рассасывание избыточного заряда в базе, называется временем рассасывания $t_р$. Это время зависит от коэффициента насыщения S. Приближенно его можно оценить по выражению $t_р = T_в/2 \cdot \ln S$. За ним следует интервал времени спада тока коллектора $t_с$ (время заднего фронта, время среза):

$$t_с = T_в \ln[1 + (I_{бз\ гр} / I_{бзв})],$$

где $I_{бзв}$ – амплитуда импульса тока базы в момент переключения (рис. 10.14).

Длительности $t_ф$, $t_р$, $t_с$ характеризуют быстродействие транзисторного ключа. Приведенные оценочные выражения показывают, что эти величины зависят от частотных свойств транзистора и параметров импульса базового тока. Порядок их величин составляет от долей единицы до единиц микросекунд.

Одним из способов повышения быстродействия транзисторных ключей является способ применения ненасыщенных ключей, в которых транзистор работает на границе активной области, например, ключ с транзистором Шоттки. Структурная схема такого ключа приведена на рис. 10.15, где обозначено: $VD_{ш}$ –диод Шоттки, $VT_{ш}$ – транзистор Шоттки.

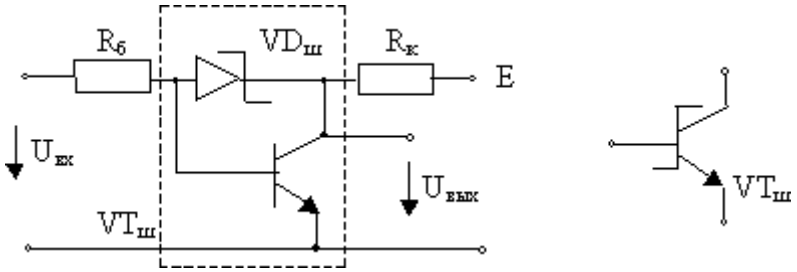


Рис. 10.15. Ключ с диодом Шоттки и УГО транзистора Шоттки

Особенность действия ключа состоит в следующем. До момента открывания диода процесс идет как обычно. В процессе открытия транзистора диод закрыт до момента, при котором вследствие уменьшения коллекторного напряжения напряжение на диоде не достигнет порогового значения. С момента открытия диода ток управления ключом замыкается на коллектор, что приводит к уменьшению тока базы в $(1 + h_{21})$ раз. В итоге избыточный заряд в базе станет намного меньше, чем в обычной схеме насыщенного ключа. Диоды Шоттки имеют малое собственное время восстановления (0,1 нс), низкое напряжение отпирания (0,25 В) и малое сопротивление в открытом состоянии (около 10 Ом).

Реальные ключи на биполярных транзисторах для обеспечения четкой работы в своем составе имеют обычно не менее двух транзисторов. Примеры схем таких ключей представлены на рис. 10.16.

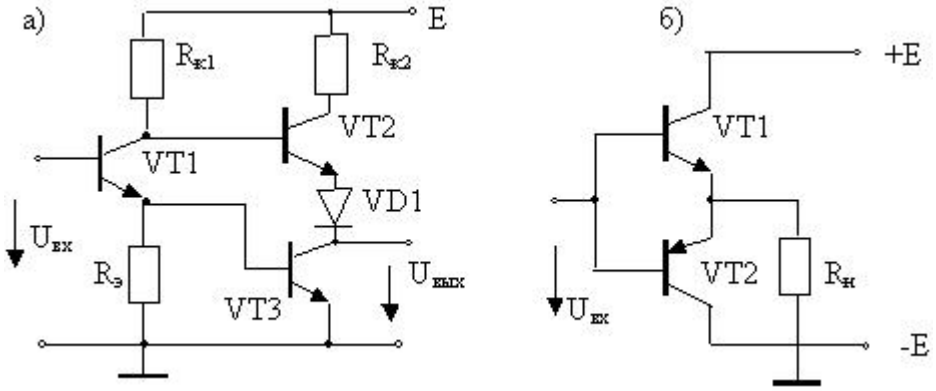


Рис. 10.16. Схемы ключей на биполярных транзисторах:
а – с управлением однополярным входным импульсом;
б – с управлением двухполярным входным импульсом

Ключевая схема, изображенная на рис. 10.16, *а*, служит простейшим выходным каскадом цифровых (логических) элементов на биполярных транзисторах (элементы серии ТТЛ).

В схеме ключа рис. 10.16, *а* при уровне входного сигнала $U_{вх} \le U_{оп}$ на выходе устанавливается выходной сигнал $U_{1п} \le U_{вых} < E$, где $U_{оп}$, $U_{1п}$ – пороговые значения соответственно низкого и высокого уровней входного сигнала. Транзисторы *VT*1, *VT*3 находятся в режиме отсечки, транзистор *VT*2 – в проводящем состоянии. При подаче на вход схемы $U_{вх} > U_{1п}$, транзистор *VT*1 открывается, транзистор *VT*3 переходит в режим насыщения, транзистор *VT*2 закрывается, на выходе устанавливается «нулевой» уровень выходного напряжения $U_{вых} \le U_{оп}$. Диод *VD*1 в схеме рис. 10.16, *а* служит для обеспечения чёткого переключения транзистора *VT*2. Схема, изображенная на рис. 10.16, *б*, часто используется как выходной каскад в операционных усилителях.

Ключи на полевых транзисторах (ПТ). Ключи на полевых транзисторах имеют широкое применение в качестве коммутаторов аналоговых сигналов (для этого используются ПТ с управляющим *p* – *n*-переходом или МОП-транзисторы с индуцированным каналом), а также для коммутации цифровых сигналов (только МОП транзисторы с индуцированным каналом). Примеры ключевых схем на полевых транзисторах разного типа представлены на рис. 10.17.

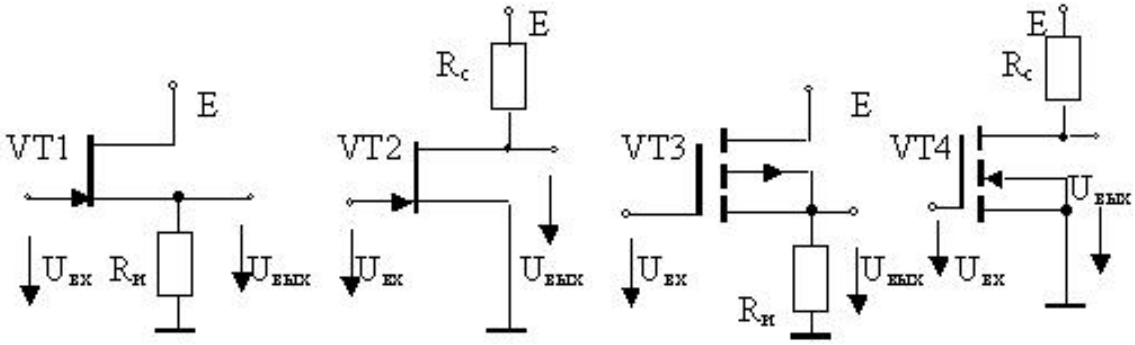


Рис. 10.17. Схемы ключей на полевых транзисторах

Основные достоинства ключей:

– малое остаточное напряжение в проводящем состоянии;

– высокое сопротивление в непроводящем состоянии;

– малая мощность управления; возможность коммутации электрических сигналов очень малого уровня.

Недостаток – сравнительно низкое быстродействие (по сравнению с ключами на биполярных транзисторах).

Для запирания ключей, выполненных на ПТ с управляющим *p–n*-переходом, к затвору следует приложить запирающее напряже- ние $U_{зап}$, по модулю большее напряжения отсечки, но меньшее допустимых для переходов затвор – исток, затвор – сток:

$$U_{зап} \geq [U_{зи\ отс} + (1 \div 3)\ В];\ U_{зап} \leq (U_{зс\ доп}, U_{зи\ доп}).$$

МОП-транзисторы с индуцированным каналом закрыты до тех пор, пока $U_{зи}$ и $U_{зс}$ меньше эффективного порогового напряжения: $(U_{зи}, U_{зс}) < U_{зи\ пор}$.

Входное сопротивление (по цепи затвора) ключей на ПТ при малой частоте коммутации составляет 10^8 – 10^9 Ом у ПТ с управляющим *p–n*-переходом, 10^{12} – 10^{14} Ом – у МОП-транзисторов. На высоких частотах сказываются емкости между стоком, истоком и затвором $C_{зс}$, $C_{зи}$, поэтому сопротивление ключа уменьшается. У МОП-транзисторов подложку обычно подключают к источнику питания требуемой полярности [подложку «*n*» – к (+*E*), подложку «*p*» – к (–*E*)].

В цифровых устройствах важно иметь стабильные уровни выходных напряжений. Для этого широко применяют ключи на комплементарных транзисторах – КМОП-ключи (рис. 10.18). Комплементарные транзисторы – это транзисторы, обладающие идентичными параметрами, но имеющие разный тип проводимости.

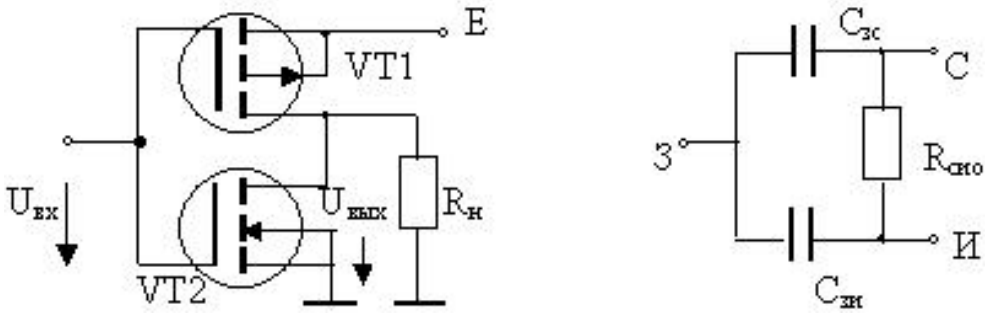


Рис. 10.18. Схема КМОП-ключа и схема замещения открытого МОП-транзистора: $R_н$ – сопротивление нагрузки; $R_{сио}$ – сопротивление сток – исток

КМОП-ключ работает следующим образом.

Если подано ($–U_{вх}$), открыт *VT*1 и резистор $R_н$ подключен к источнику питания. Если подано ($+U_{вх}$), открыт *VT*2 и вывод выходной цепи подключен к общей шине. При этом ток от источника сигнала не потребляется, т.е. в первом случае на резисторе $R_н$ устанавливается +*E*, во втором – нуль. На основе таких ключей созданы разнообразные микросхемы КМОП серий.

Эквивалентные схемы МОП-транзистора в открытом и закрытом состоянии существенно различаются, так как сопротивление сток – исток в открытом состоянии $R_{сио}$ на несколько порядков меньше, чем сопротивление $R_{сиз}$ в закрытом состоянии (рис. 10.19).

Ключи на МОП-транзисторах удобны тем, что могут пропускать ток в обоих направлениях, а цепь управления изолирована от коммутируемой цепи. Сопротивление канала открытого (нахо-дящегося в проводящем состоянии) ключа на МОП-транзисторе составляет (10 – 100) Ом, а быстродействие может достигать (3 – 5) нс [2].

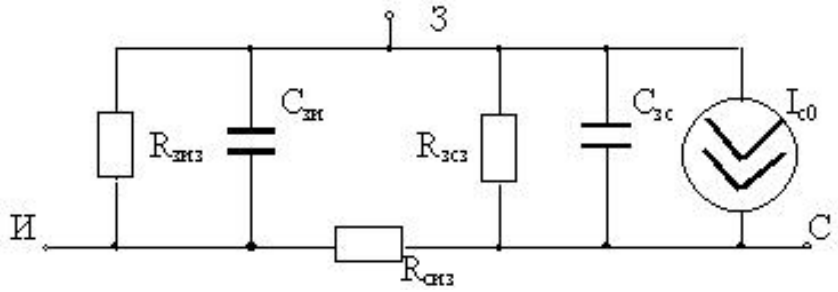


Рис. 10.19. Эквивалентная схема МОП-транзистора в закрытом состоянии

Чаще всего для построения ключей в интегральном исполнении используют КМОП-транзисторы. Это даёт возможность получить постоянное по величине сопротивление ключа в отрытом состоянии, не зависящее от величины и направления протекающего тока. Интегральное исполнение ключей позволяет в составе микросхемы сформировать элементы, необходимые для выдачи сигналов управления внешними нормированными сигналами логических элементов цифровых схем.

Сопротивление отрытого КМОП-ключа существенно зависит от температуры: оно увеличивается на (2 – 5) % на каждые 10 ºС. В закрытом состоянии через КМОП-ключ течёт обратный ток закрытого *p*–*n*-перехода [(0,1 – 10) нА при комнатной температуре], причём он увеличивается приблизительно в два раза на каждые 10 ºС.

Ключи на полевых транзисторах находят широкое применение не только как самостоятельные электронные элементы, но и как составная часть многих сложных электронных узлов. К таким узлам можно отнести аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобра-зователи, запоминающие устройства и многие другие устройства аналоговой и цифровой техники.

10.7. Использование МОП-ключей в электронных устройствах с переключаемыми конденсаторами

Как известно, основными компонентами интегральных схем (ИС) являются резисторы, конденсаторы и транзисторы (биполярные или (и) полевые), выполняющие функции усилительных и ключевых элементов.

В современной электронике наблюдается устойчивая тенденция вытеснения МОП-транзисторами других типов транзисторов практически во всех категориях ИС, кроме некоторых разновидностей прецизионных и высокочастотных аналоговых ИС. Это объясняется следующими основными преимуществами МОП-технологии ИС по сравнению с биполярными технологиями:

– существенно более высокой плотностью упаковки транзисторов на кристалле;

– простотой схемотехники и технологии изготовления МОП-ИС;

– на несколько порядков меньшей потребляемой мощностью при одинаковой функциональной сложности;

– на несколько порядков большим входным импедансом функциональных узлов ИС (что существенно упрощает сопряжение ИС между собой и управление их режимами и параметрами).

Кроме вышеперечисленных, важным преимуществом МОП-технологии ИС является простота реализации конденсаторов, функции которых при этом выполняют емкости затвор – канал МОП-транзисторов.

С другой стороны, при производстве МОП-ИС (как и биполярных) определенную сложность представляет изготовление резисторов в интегральном исполнении, а также обеспечение приемлемой точности изготовления таких резисторов и стабильности их характеристик во времени и при изменении температуры. В частности, типовая погрешность номинала резистора, изготовленного методом ионной имплантации, составляет порядка нескольких десятых процента, а его температурный коэффициент – несколько сотых долей процента на градус, в то время как аналогичные параметры для МОП-конденсатора примерно на порядок меньше [3].

В качестве радикального решения вышеуказанной проблемы было предложено реализовывать функции резисторов в МОП-ИС посредством переключаемых конденсаторов (ПК), состоящих из МОП-конденсаторов, коммутируемых ключами на МОП-транзисторах. ПК

при этом или выступают в качестве цепей прямой имитации резисторов, или (преимущественно в аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях) служат для косвенной (функциональной) замены резисторов в кодоуправляемых источниках напряжения, а также в интеграторах [3, 10]. При этом для цепей прямой имитации резисторов посредством ПК характерно постоянное переключение конденсаторов в процессе работы, а для ПК, служащих для функциональной замены резисторов – периодическое выполнение некоторого рабочего цикла, состоящего из нескольких тактов коммутации, обычно с восстановлением начальных значений зарядов на конденсаторах перед каждым рабочим циклом.

С точки зрения теории цепей электронные устройства с переключаемыми конденсаторами (ЭУПК) относятся к дискретным системам с непрерывными (аналоговыми) входными сигналами, так как изменение во времени их выходных сигналов носит дискретный характер. Это означает, что информативными являются значения указанных сигналов только в некоторые моменты времени, соответствующие окончанию очередной фазы коммутации. Поэтому рассмотрение и анализ ЭУПК должно осуществляться с учетом дискретного характера их сигналов.

Необходимо также отметить, что корректное функционирование ЭУПК, как и других типов дискретных систем с непрерывными входными сигналами, возможно только при периоде дискретизации (применительно к ЭУПК – длительности фазы коммутации), намного меньшем периода наиболее высокочастотной из спектральных компонент входного сигнала.

Технология ПК позволяет:

– строить аналоговые и аналого-цифровые ИС на основе только МОП-транзисторов (однотипных элементов), выступающих как в качестве усилительных и ключевых элементов, так и конденсаторов (роль которых при этом играет емкость между затвором и каналом МОП-транзисторов) и элементов цепей имитации или функциональной замены резисторов;

– обеспечивать повышенную точность реализации резисторов и стабильность их сопротивления по сравнению с «классическими» методами их изготовления (например, ионной имплантацией), что обусловлено значительно более высокой точностью и стабильностью емкости МОП-конденсаторов и, тем более, периода коммутации ПК

по сравнению с аналогичными параметрами резисторов в интегральном исполнении, изготовленных «классическими» методами [3];

– достаточно просто реализовывать аналоговые устройства с цифровым управлением параметрами (например, фильтры с управляемой частотой среза).

Естественно, технология ПК не свободна от недостатков, основными из которых являются [3, 10]:

– существенные погрешности имитации или функциональной замены резисторов на частотах, превышающих 10 – 20 % частоты коммутации;

– характерный для всех дискретных систем эффект наложения спектров (элайзинга), заключающийся в искажении спектра выходного сигнала ЭУПК при наличии во входном сигнале составляющих с частотами выше половины частоты коммутации;

– наличие на выходе ЭУПК наводок, обусловленных процессами коммутации; частота данных наводок совпадает с частотой коммутации, а амплитуда обычно составляет порядка единиц – десятков милливольт.

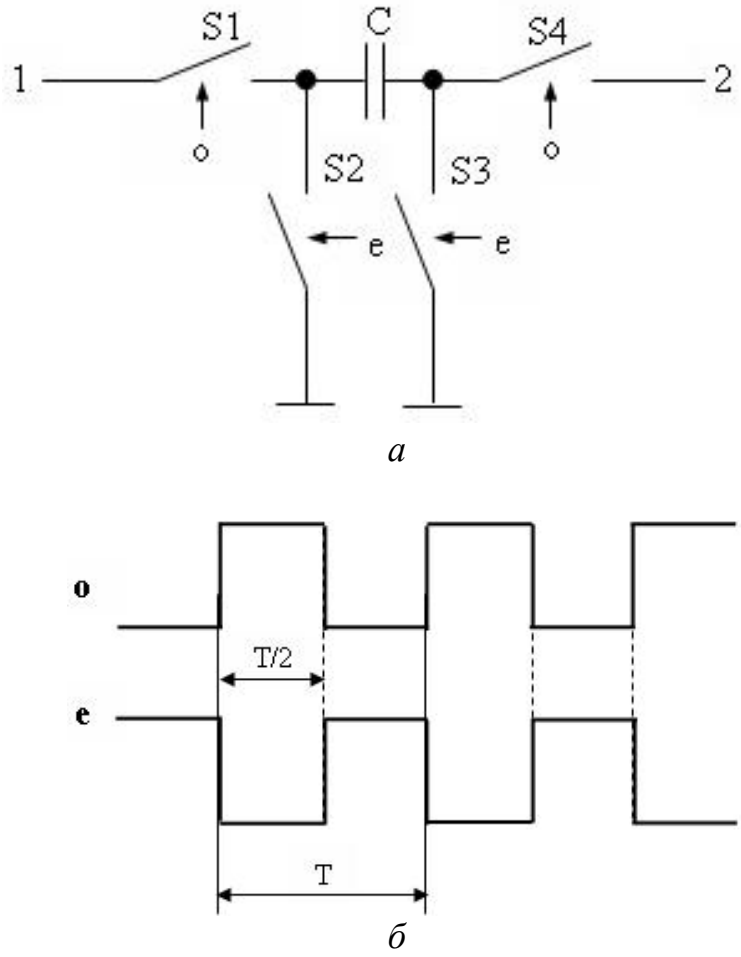
Однако ввиду того, что на практике частота коммутации на несколько порядков превышает верхнюю граничную частоту информативного входного и выходного сигнала ЭУПК, влияние перечисленных недостатков на функционирование ЭУПК достаточно легко сводится к минимуму. Эффекты, обусловленные первыми двумя из них, устраняются включением на входе ЭУПК ФНЧ (фильтра низкой частоты) с частотой среза, намного меньшей частоты коммутации, а наводки на выходе ЭУПК – включением на нем аналогичного ФНЧ. Обычно указанные ФНЧ или компоненты для их реализации входят в состав ИС на ПК.

Вышесказанное, в целом, обусловливает весьма широкое применение технологии ПК в современных аналоговых и аналого-цифровых ИС.

Рассмотрим общие принципы реализации ЭУПК, основанных как на прямой имитации, так и на косвенной замене резисторов.

ЭУПК на основе прямой имитации резисторов. Физический принцип прямой имитации резисторов посредством коммутации конденсаторов может быть пояснен на примере ПК, функциональная схема которого представлена на рис. 10.20, *а*, а временные диаграммы сигналов управления его ключами показаны на рис. 10.20, *б*. Буквами

e и *o* обозначены сигналы управления ключами, активные в течение четной и нечетной фаз коммутации, от английских слов «even» – четный и «odd» – нечетный. Длительности четной и нечетной фаз коммутации ПК всегда равны между собой, а управляющие сигналы четной и нечетной фаз взаимно инверсны.



а

б

T – период коммутации

Рис. 10.20. Пример цепи прямой имитации резистора на ПК (*а*) и временные диаграммы сигналов управления ее ключами (*б*)

В течение нечетных фаз коммутации, т.е. при замыкании ключей S1 и S4, конденсатор заряжается напряжением, приложенным между точками 1 и 2. При размыкании ключей S1 и S4 и замыкании управляемой в противофазе с ними пары ключей S2 и S3 (в течение четных фаз) конденсатор разряжается. Период циклов его заряда и разряда совпадает с периодом сигналов управления ключами, а длительности данных циклов равны половине периода указанных сигналов.

С физической точки зрения, принцип имитации резистора посредством ПК можно пояснить следующим образом. Как известно, конденсатор проводит электрический ток только в процессе заряда/разряда. Поэтому ПК, функционирующий в режиме периодического заряда с последующим разрядом можно рассматривать как структуру, способную проводить ток любой частоты, в том числе постоянный.

Определим эквивалентное сопротивление между точками 1 и 2 представленного на рис. 10.20, *а*, ПК в простейшем с точки зрения анализа случае – при пренебрежимо малом сопротивлении между каждой из указанных точек и общей шиной. Это имеет место, например, при работе данного ПК в качестве входного резистора интегратора на операционном усилителе (ОУ) [6], при пренебрежимо малом выходном сопротивлении источника входного напряжения интегратора. На рис. 10.21, *а*, и 10.21, *б*, приведены эквивалентные схемы указанного ЭУПК в каждой из двух фаз коммутации. Для упрощения полагаем, что конденсаторы, ключи и ОУ идеальны (в частности, коэффициент усиления и входное сопротивление ОУ бесконечно велики [6]).

Очевидно, эквивалентное сопротивление ПК равно отношению среднего за период коммутации значения напряжения на нем к среднему значению тока через ПК за указанный период. Среднее за период коммутации T напряжение на ПК анализируемого ЭУПК, описывается следующим выражением:

$$\underline{U}_{C1} = \frac{1}{\overline{C1}} \int_0^T i_{C1}(t) \cdot dt,$$

откуда получаем, что:

$$\overline{U_{C1}} = \frac{\overline{I_{C1}}}{C1} T,$$

где $\overline{I_{C1}}$ – среднее за период коммутации значение тока через ПК.

Следовательно, эквивалентное сопротивление анализируемого ПК равно:

$$R_{\text{Э}} = \frac{\overline{U_{C1}}}{\overline{I_{C1}}} = \frac{T}{C1}.$$

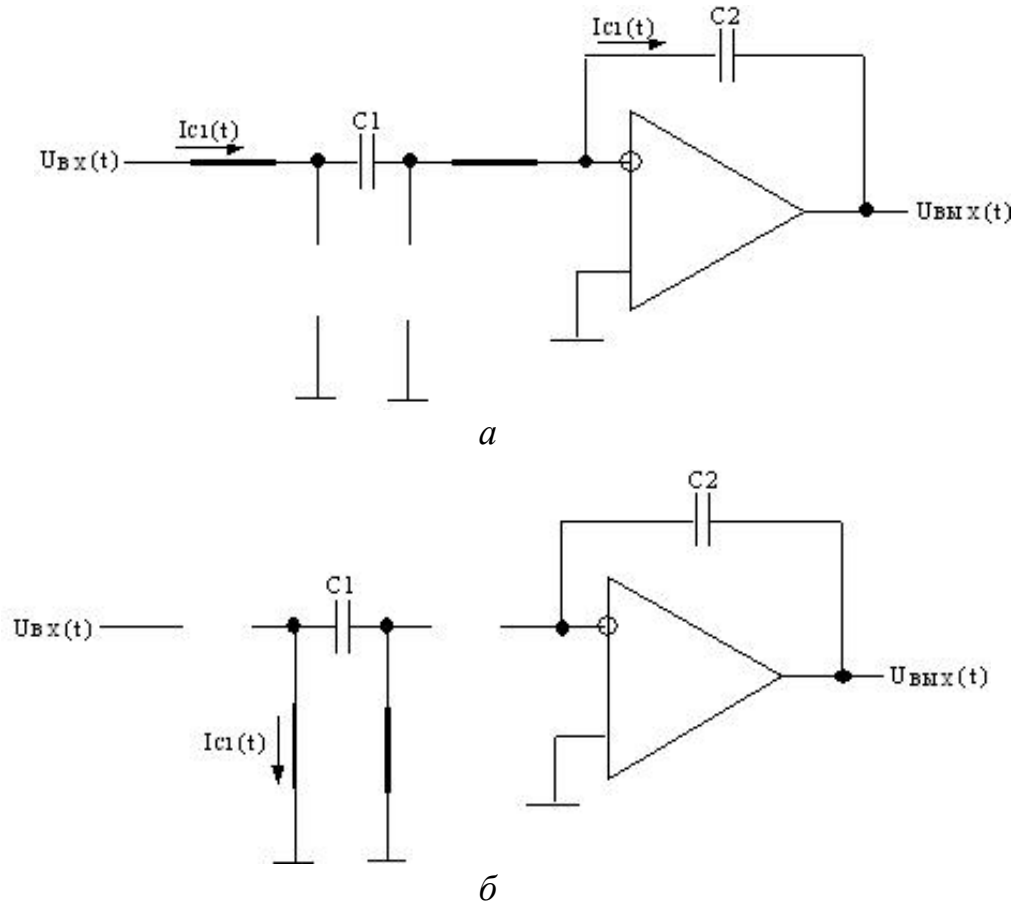


Рис. 10.21. Эквивалентные схемы интегратора на ПК в нечетных (*а*) и четных (*б*) фазах коммутации

На частотах, много меньших частоты коммутации, падение напряжения на ПК и ток через него можно приближенно считать постоянными в течение периода коммутации. Поэтому в данном частотном диапазоне верно соотношение:

$$\frac{u_{C1}(t)}{i_{C1}(t)} \approx \frac{T}{C1}.$$

Таким образом, на частотах, много меньших частоты коммутации, данный ПК эквивалентен резистору с сопротивлением, прямо пропорциональным периоду коммутации и обратно пропорцио-нальным емкости ПК.

Естественно, кроме рассмотренной выше цепи имитации резистора на ПК, известно достаточно много вариантов реализации подобных цепей.

В общем случае, на частотах, намного меньших частоты коммутации, эквивалентный импеданс цепи прямой имитации резистора на базе ПК равен kT/C, где k – коэффициент, зависящий от конкретной конфигурации ПК, а также от соотношения между емкостью ПК и выходной емкостью источника сигнала, с одной стороны, и емкостью нагрузки – с другой [10]. Необходимо также отметить, что корректное функционирование указанных цепей возможно только при емкостном характере как выходного импеданса источника сигнала, так и нагрузки [3, 10].

ЭУПК на основе косвенной замены резисторов. В ЭУПК указанного класса ПК служат преимущественно в качестве элементов кодоуправляемых источников напряжения [3, 10]. Принцип действия таких источников основан на задании их выходных напряжений путем комбинирования и перераспределения зарядов (напряжений) на коммутируемых конденсаторах, входящих в состав указанных источников.

Базовыми положениями при анализе указанных ЭУПК являются следующие [3, 10]:

– *в установившемся режиме* заряд конденсатора Q_C и приложенное к нему напряжение U_C связаны соотношением:

$$Q_C = U_C \times C, \tag{10.17}$$

общий заряд n параллельно соединенных конденсаторов равен сумме их зарядов:

$$Q_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} Q_{Ci}, \tag{10.18}$$

а при последовательном соединении n конденсаторов их заряды равны между собой:

$$Q_{C1} = Q_{C2} = \ldots = Q_{Cn}; \tag{10.19}$$

– *при коммутации* напряжение на конденсаторе не может изменяться скачкообразно.

Основными разновидностями ЭУПК на основе косвенной замены резисторов являются *цифро-аналоговые* и *аналого-цифровые преобразователи* (ЦАП и АЦП) на ПК.

Подробное изложение вопросов реализации и анализа ЭУПК на основе косвенной замены резисторов представлено в [3] и [10].

МОДУЛЬ 3. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ СХЕМОТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

11. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛОГИЧЕСКИХ (ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ) ФУНКЦИЙ

11.1. Логические функции и элементы

В подавляющем большинстве ЭВМ и цифровых устройств обрабатываемая информация представлена в виде двоичных чисел. Переменные величины и функции от них, которые могут принимать только два значения 1 и 0, называются логическими переменными и логическими (переключательными) функциями. Свойства логических функций изучает алгебра логики, а реализация логических функций осуществляется функциональными устройствами, называемыми логическими элементами.

Значениям переменных 1 и 0 ставятся в соответствие символы двоичного алфавита 1 и 0, а также физические аналоги – два хорошо различимых значения напряжения, тока, электрического сопротивления, магнитной индукции. Величина и полярность уровней (например, напряжения), которым ставятся в соответствие символы 0 и 1, выбираются из соображений удобства технической реализации и заданной помехоустойчивости.

В основе цифровой техники лежит использование логических или переключательных схем. Различают два класса логических схем [16]:

1. Комбинационные схемы, в которых значение выходной переменной зависит только от значений входных переменных в данный момент времени.

2. Последовательностные схемы, в которых значение выходной переменной зависит не только от значений входных переменных в данный момент, но и от состояний элементов памяти, заданных в предыдущих тактах работы.

Функционирование любого, сколь угодно сложного цифрового устройства можно описать двояким образом: аналитически или

с помощью таблиц. Распространены комбинационные схемы, имеющие *m* логических входов и *n* логических выходов (рис. 11.1).

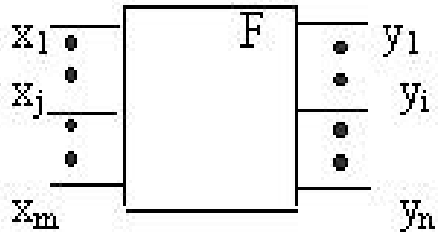


Рис. 11.1. Блок-схема цифрового устройства

Если x_1, x_2, …. x_j, … x_m – информационные значения независимых входных (управляющих) сигналов, а y_1, y_2, … y_i, ... y_n – информационные значения выходных сигналов, то комбинационная схема может быть описана системой уравнений:

$$\left\| Y_i = F(X_i) \right\|. \qquad (11.1)$$

Функцию Y_i называют логической (булевой или переключательной). При наличии m независимых входных переменных, каждая из которых может принимать два значения (1 или 0), максимальное число возможных наборов из этих переменных будет $A = 2^m$, а максимально возможное число значений функций определится соотношением $N_m = 2^A$.

Можно задать систему уравнений (11.1) в виде таблиц, называемых *таблицами истинности.* Таблицы и аналитические выражения используются для анализа и синтеза устройств с наименьшим количеством элементов [16].

В алгебре логики основными считаются такие функции (операции), при помощи которых можно записать любую сложную логическую функцию и распространить их действие на любое количество переменных. Такими основными функциями являются следующие три:

1) *инверсия* (отрицание) – операция НЕ;

2) *конъюнкция* (логическое умножение) – операция И;

3) *дизъюнкция* (логическое сложение) – операция ИЛИ.

Сущность логической операции инвертирования состоит в отрицании первичного высказывания. С помощью логической операции НЕ можно переводить прямой код в обратный и наоборот. Обратным кодом при положительном кодировании называется такой, в котором истинному логическому высказыванию соот-

ветствует нулевой сигнал (цифра 0), а ложному – единичный сигнал (цифра 1). В математической логике высказывания оцениваются двумя критериями: оно может быть «истинным» или «ложным». Этому можно поставить в соответствие цифры 1 и 0, либо сигналы, условно соответствующие этим цифрам. Аналитически операция НЕ записывается в виде $y = \bar{x}$ (читается «игрек равен не икс»). Табличное представление этой функции (таблица истинности) и условное графическое обозначение (УГО) элемента (инвертора), реализующего эту функцию, показаны на рис. 11.2.

x	$y=\bar{x}$
0	1
1	0

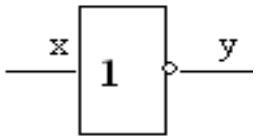


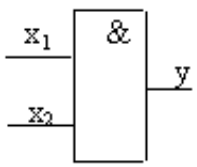
Рис. 11.2. Таблица истинности и УГО инвертора

Конъюнкция – операция И или логическое произведение, является сложным высказыванием, истинным только в единственном случае, когда истинны все элементарные высказывания. Аналитически эта операция записывается следующим образом:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot \ldots \cdot x_m. \qquad (11.2)$$

Принятая форма записи наглядно показывает, что функция «*y*» обращается в нуль, если хотя бы один из аргументов принимает нулевое значение. Таблицы истинности и условные обозначения некоторых конъюнкторов показаны на рис. 11.3.

x_1	x_2	$y=x_1 \cdot x_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



x_1	x_2	x_3	y
0	0	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
1	1	0	0

x_1	x_2	x_3	y
0	0	1	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	1	1

Рис. 11 3. Таблицы истинности для конъюнкторов с двумя и тремя аргументами и УГО двухвходового конъюнктора

Дизъюнкция – логическая сумма (операция ИЛИ) является сложным высказыванием, истинным, если истинно не менее чем одно элементарное высказывание. Аналитическое выражение этой операции имеет вид:

$$y = x_1 + x_2 + \ldots + x_n. \qquad (11.3)$$

Графическое изображение двухвходового дизъюнктора и его таблица истинности показаны на рис. 11.4.

x_1	x_2	$y=x_1+x_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

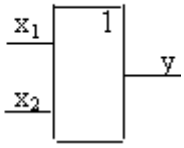


Рис. 11.4. Таблица истинности и УГО двухвходового элемента ИЛИ

Логические функции конъюнкции и дизъюнкции обладают свойством *двойственности,* которое заключается в том, что одна и та же функция в зависимости от способа кодирования уровней сигналов значениями 0 и 1 может выполнять функции либо И, либо ИЛИ. Сравнивая таблицы истинности этих функций, можно заметить, что таблица истинности для элемента И соответствует операции И для положительной логики (когда высокий уровень – «истинно» соответствует 1, а низкий – «ложно» соответствует 0). С другой стороны, эта же таблица выражает операцию ИЛИ для негативной логики (когда в качестве высокого уровня – «истинно» принят 0, а в качестве низкого уровня «ложно» принята 1). Чаще всего используется положительная логика, поэтому в дальнейшем рассматриваются функции для неё.

Для лучшего усвоения понятий конъюнкции, дизъюнкции и свойства двойственности на рис. 11.5 показаны электромеханические эквиваленты операций И и ИЛИ. Если за 1 принять наличие напряжения на резисторе, а за 0 – отсутствие напряжения (положительное кодирование), то схема на рис. 11.5, *а* реализует операцию ИЛИ, а схема на рис. 11.5, *б* – операцию И. Если за единицу принять отсутствие напряжения на резисторе, а за 0 – наличие напряжения (отрицательное кодирование), то схема на рис. 11.5, *а* реализует операцию И, а схема на рис. 11.5, *б* – операцию ИЛИ. Соответственно можно условиться, что при положительном кодировании разомкнутое положение ключа соответствует логическому нулю, а замкнутое положение – логической единице, и наоборот – при отрицательном кодировании.

Алгебра логики допускает возможность образования сложных функций, т.е. функций, аргументы которых являются функциями других двоичных аргументов. Например, если $Y = y(z_1, z_2)$,

а $z_1 = f_1(x_1, x_2)$ и $z_2 = f_2(x_3, x_4)$, то очевидно, что $Y = y(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Такая операция замены аргументов одной функции другими функциями называется *суперпозицией* функций. Эта операция дает возможность с помощью функций меньшего числа аргументов получать функции большего их числа. Набор двоичных функций, который обеспечивает представление любой другой функции посредством суперпозиции функций этого набора, называют функционально полным.

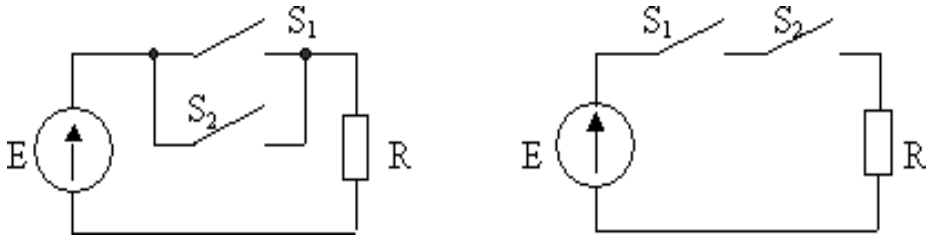


Рис. 11.5. Электромеханические эквиваленты операций ИЛИ и И

Например, из функций двух переменных можно составить значительное число различных функционально полных наборов. Так функционально полные наборы образуют функции инверсии и конъюнкции, инверсии и дизъюнкции. Сочетания этих функций широко используются при синтезе электронных устройств.

Инверсия логической суммы двух величин (элемент ИЛИ-НЕ) носит название *стрелка Пирса*, её аналитическое представление имеет вид:

$$y = \overline{x_1 + x_2} \quad \text{или} \quad y = x_1 \downarrow x_2 . \qquad (11.4)$$

Инверсия логического произведения двух величин (элемент И-НЕ) носит название *штрих Шеффера,* его аналитическое представление показано ниже:

$$y = x_1 \cdot x_2 \text{ или } y = x_1 / x_2. \qquad (11.5)$$

Набор функций дизъюнкции, конъюнкции и инверсии, рассмотренных выше, получил название основного функционально полного набора.

11.2. Аксиомы, законы, тождества и теоремы алгебры логики (булевой алгебры)

В алгебре логики любая переменная может иметь состояние «0» или «1», поэтому каждой двоичной переменной, например *X,* ставит-

ся в соответствие обратная или дополнительная к ней (инверсная) переменная, такая, что:

$$\text{если } X = 0, \text{ то } \overline{X} = 1; \text{ если } X = 1, \text{ то } \overline{X} = 0.$$

Правила (законы), характеризующие операции дизъюнкцию (логическое сложение), конъюнкцию (логическое умножение), инверсию (логическое отрицание) приведены в табл. 11.1.

Для алгебры логики, как и для обыкновенной алгебры, действительны следующие законы:

– закон коммутативности (переместительный закон) для логического сложения и умножения: $x + y = y + x$; $x \cdot y = y \cdot x$;

– закон ассоциативности (сочетательный закон) для логического сложения и умножения: $x + y + z = (x + y) + z = x + (y + z)$;

– закон дистрибутивности логического умножения по отношению к сложению (распределительный закон):

$x\,(y + z) = xy + xz$.

Следует предостеречь, что в булевой алгебре не действуют правила вычитания и деления обычной алгебры. Величины в алгебре логики не могут делиться, а потому в ней нельзя сокращать общий множитель. В булевой алгебре имеются специфические операции, отсутствующие в обычной алгебре, например, «склеивание», «поглощение».

1. Операция склеивания (правило склеивания): $xy + x\overline{y} = x$; $(x + y) \cdot (x + \overline{y}) = x$.

Второе выражение является двойственным первому. В алгебре Буля двойственные выражения получаются путем одновременной замены операций ИЛИ операциями И и наоборот – операций И на операции ИЛИ, а также заменой всех логических нулей единицами и всех единиц нулями.

2. Операция поглощения: $x + xy = x$; $x(x + y) = x$.

3. Операция (функция) неравнозначности (ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, обозначается знаками «⊕», «∇» или «∀»): $\overline{x}y + x\overline{y} = x \oplus y$.

Логическая функция, называемая ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, в отличие от операции ИЛИ («*x* или *y,* или *x* и *y* оба вместе») означает: «только *x* или только *y*». Таблица истинности для двух функций показана на рис. 11.6.

В двоичной системе операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ аналогична (по виду таблицы) результату арифметического сложения двух бинарных чисел, поэтому называется «суммой по модулю 2» или полусуммой.

A	B	S= A⊕ B	A+B
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	1

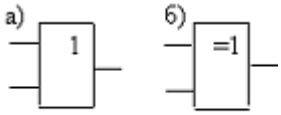
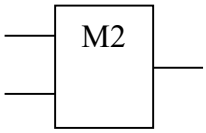


Рис. 11.6. Таблица истинности для функций двух переменных ИЛИ и ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и условные графические изображения логических элементов: *а* – элемент ИЛИ, *б* – элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

Аксиомы для логической функции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ имеют вид:

$$x \oplus 0 = x;\ x \oplus x = 0;\ x \oplus \overline{1} = x;\ \overline{x} \oplus x = 1.$$

В литературе часто используется ещё одно условное изображение элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ:



Перечень основных законов и тождеств алгебры Буля приведен в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Законы булевой алгебры

№	Название	Форма записи	
		а	*б*
1	Закон нулевого множества	$x + 0 = x$	$x \cdot 0 = 0$
2	Законы универсального множества (сложения с единицей и умножения на 1)	$x + 1 = 1$	$x \cdot 1 = x$
3	Законы инверсии (теоремы де Моргана). Инверсия суммы есть произведение слагаемых, инверсия произведения есть сумма инверсий сомножителей	$\overline{x_1 + x_2} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$; $\overline{x_1 \cdot x_2} = \overline{x_1} + \overline{x_2}$	$\overline{\overline{x_1} + \overline{x_2}} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$; $\overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}} = \overline{x_1} + \overline{x_2}$
4	Закон двойного отрицания	$\overline{\overline{x}} = x$	

Окончание табл. 11.1

№	Название	Форма записи	
		а	*б*
5	Закон тождества (повторения, тавтологии)	$x + x = x$	$x \cdot x = x$
6	Закон исключённого третьего (противоречия, дополнительности, правило отрицания)	$x + \bar{x} = 1$	$x \cdot \bar{x} = 0$
7	Закон коммутативности (переместительный)	$x_1 + x_2 = x_2 + x_1$	$x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$
8	Ассоциативный закон (сочетательный)	$x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + x_2 + x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3 = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3)$
9	Дистрибутивный закон (распределительный)	$x_1 \cdot (x_2 + x_3) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3$; $(x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3) = x_1 + x_2 \cdot x_3$	
10	Закон обращения	Если $x_1 = x_2$, то $\overline{x_1} = \overline{x_2}$	
11	Закон поглощения (абсорбции)	$x_1 + x_1 \cdot x_2 = x_1$	$x_1 \cdot (x_1 + x_2) = x_1$
12	Закон склеивания	$(x_1 + \overline{x_2}) \cdot (x_2 + x_1) = x_1$	$x_1 \cdot \overline{x_2} + x_1 \cdot x_2 = x_1$

Законы 5, 7, 8, 9, 11, 12 называют комбинационными законами [32].

11.3. Представление и преобразование логических функций

Логическая функция может быть записана аналитически различными сочетаниями логических операций. Однако с точки зрения представления логических функций и последующего синтеза логической схемы наиболее удобны формы записи, при которых функция выражается либо в виде суммы произведений переменных, либо в виде произведения их сумм.

Первая запись (сумма произведений переменных) называется дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ). Например:

$$F = x_1 + \bar{x}_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 + \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 .$$

Вторая форма (произведение сумм переменных) называется конъюнктивной нормальной формой (КНФ). Например:

$$F_1 = x_1 \cdot (x_1 + x_2) \cdot (x_2 + x_3) \cdot (\bar{x}_1 + x_2 + x_3) .$$

При этом инверсия любой функции, записанной в ДНФ, дает запись в КНФ и наоборот. Например:

$$F = x_1 + x_2 \cdot \bar{x}_3 + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3;$$

$$\bar{F} = \bar{x}_1 \cdot (\bar{x}_2 + x_3) \cdot (\bar{x}_1 + x_2 + \bar{x}_3).$$

Это доказывается с помощью *теоремы Шеннона*, обобщившего законы де Моргана. Теорема утверждает, что инверсия любой функции получается заменой каждой переменной ее инверсией и одновременно взаимной заменой символов сложения (дизъюнкции) и умножения (конъюнкции).

При применении правила следует строго придерживаться группировки членов. Например: $F = x_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot x_2 = x_1 \oplus x_2$ – функция неравнозначности.

Определение инверсии по теореме Шеннона даёт функцию равнозначности: $\bar{F} = (\bar{x}_1 + x_2) \cdot (x_1 + \bar{x}_2) = x_1 \cdot x_2 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$.

Логическую функцию, заданную любым аналитическим выражением, можно преобразовать к ДНФ и КНФ, пользуясь правилами алгебры логики, при этом может существовать несколько равносильных ДНФ и КНФ. Оказалось, что имеется только один вид ДНФ и КНФ, в которых функция может быть записана единственным образом: это так называемые *совершенные нормальные формы* – СДНФ и СКНФ.

В СДНФ каждое входящее слагаемое включает все переменные (они могут быть с инверсиями или без них) и нет одинаковых слагаемых. В СКНФ каждый сомножитель включает все переменные (они могут быть с инверсиями или без них) и нет одинаковых сомножителей.

Логическая функция наиболее наглядно и полно представляется так называемой таблицей соответствия или истинности, в которой для каждой комбинации значений переменных указывается значение функции. По сути это алгоритм работы синтезируемой цифровой системы. От табличной формы представления функции можно перейти к её аналитической записи в виде СДНФ или СКНФ. Например, функция $F(x_1, x_2, x_3)$ задана табличными значениями (табл. 11.2). Требуется записать её в виде СДНФ и СКНФ.

Анализ табл. 11.2 показывает, что для комбинаций 2, 7, 8, где $F = 1$, справедливы логические произведения: $\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 = 1$; $x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3 = 1$; $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = 1$.

Комбинации, при которых функция истинна (F = 1), называют конституентами единицы или минтермами (конституировать – устанавливать, определять состав, содержание). Представление логической функции в виде логической суммы минтермов определяет ее СДНФ: $F = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$.

Таблица 11.2

Таблица истинности функции F

x_1	x_2	x_3	F	№ комбинации
0	0	0	0	1
0	0	1	1	2
0	1	0	0	3
0	1	1	0	4
1	0	0	0	5
1	0	1	0	6
1	1	0	1	7
1	1	1	1	8

Функцию можно представить не только ее единичными, но и нулевыми значениями, как инверсиями единицы. Из таблицы видно, что $F = 0$ или $\overline{F} = 1$, если $\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} = 1$; $\overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} = 1$; $\overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 = 1$; $x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} = 1$; $x_1 \cdot x_3 \cdot \overline{x_2} = 1$.

Тогда функцию $\overline{F}$ можно представить в виде логической суммы:

$$\overline{F} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + x_1 \cdot x_3 \cdot \overline{x_2}.$$

Используя теорему Шеннона, получим произведение сумм переменных, для чего ещё раз инвертируем инверсию функции F:

$$\overline{\overline{F}} = F = (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (x_1 + \overline{x_2} + x_3) \cdot (x_1 + \overline{x_2} + \overline{x_3}) \cdot (\overline{x_1} + x_2 + x_3) \cdot (\overline{x_1} + x_3 + \overline{x_2}).$$

Каждый сомножитель в полученном выражении состоит из суммы тех переменных, для которых функция обращается в нуль в соответствии с таблицей истинности. Такие суммы называют конституентами нуля или макстермами. Произведение макстермов определяет СКНФ функции F.

11.4. Понятие о минимизации логических функций

Минимизация функции – это упрощение формы её записи с целью реализации с наименьшим числом элементов. Алгебра логи-

ки располагает приёмами, разработанными на основе её законов, позволяющими производить минимизацию достаточно просто. Если число переменных не превышает четырёх, удобен метод карт Карно. Карта Карно представляет собой графическое изображение значений всех возможных комбинаций переменных – это по сути наглядное представление всех минтермов заданного числа переменных, размещенных в клетках карты определенным образом. Для представления способов размещения минтермов изобразим карты Карно для двух, трёх и четырёх переменных и запишем в клетки соответствующие минтермы.

В карте минтермы расположены так, что минтермы соседних клеток отличаются значением только одной переменной. При этом соседними считаются также крайние клетки столбца или строки. Прямое значение переменной обозначается символом 1, инверсное – символом 0. Порядок чередования значений переменных в строках и столбцах: 00, 01, 11, 10 (как показано на рис. 11.7).

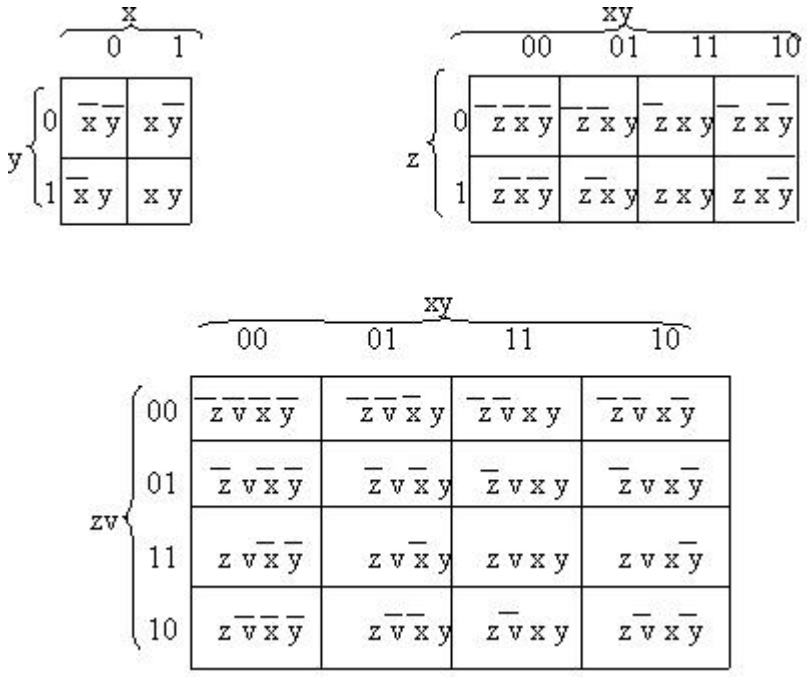


Рис. 11.7. Карты Карно для двух (x, y), трёх (z, x, y) и четырёх (z, v, x, y) переменных

Минтермы минимизируемой функции отмечают единицами в соответствующих клетках карты. Минтермы, не входящие в функцию, отмечают в клетках нулями или пустыми клетками. На основании дистрибутивного (распределительного) закона: $(x + y) \times$

$\times\cdot(x + z) = x + yz$, а также логических соотношений $x + 0 = x$, $x + 1 = 1$, $x + \bar{x} = 1$, $x \cdot \bar{x} = 0$ можно доказать, что группа из двух минтермов, находящихся в соседних клетках, может быть заменена одним логическим произведением, содержащим на одну переменную меньше. Если соседними являются две пары минтермов, то такая группа из четырех минтермов может быть заменена произведением, содержащим уже на две переменные меньше и т.д. В общем случае наличие 2^n соседних минтермов позволяет заменить их произведениями, содержащими на n ($n = 1, 2, 3$) переменных меньше. В этом и состоит суть метода минимизации с применением карт Карно (карты Карно часто называют диаграммами Вейча) [46].

Рассмотрим процесс минимизации на примере функции четырёх переменных x, y, z, v, заданной следующим логическим выражением: $F = yvz + \bar{x}yv + \bar{y}\bar{v}z + \bar{x}y\bar{z}$.

Для представления функции F в виде логической суммы минтермов преобразуем её следующим образом: каждое слагаемое умножим на единичное значение, образованное логической суммой прямого и инверсного значения той переменной, которой недостаёт для полного набора в каждом слагаемом.

$$\bar{F} = yvz(\bar{x} + x) + \bar{x}yv(z + \bar{z}) + \bar{y}\bar{v}z(x + \bar{x}) + \bar{x}y\bar{z}(v + \bar{v}) =$$

$$= \bar{x}yvz + xyvz + \bar{x}yvz + \bar{x}yv\bar{z} + x\bar{y}\bar{v}z + \bar{x}\bar{y}\bar{v}z + \bar{x}yv\bar{z} + \bar{x}y\bar{v}\bar{z}.$$

Заменяя группы повторяющихся выражений одним соответствующим выражением, получим функцию в виде СДНФ:

$$F = xyvz + \bar{x}yvz + x\bar{y}\bar{v}z + \bar{x}yv\bar{z} + xy\bar{v}\bar{z} + \bar{x}\bar{y}vz.$$

Анализ показывает, что функция четырёх переменных получена в виде суммы шести минтермов (в каждом слагаемом содержатся все переменные и нет одинаковых слагаемых). Для осуществления минимизации следует использовать карту Карно для четырёх переменных. Таким образом, в карте Карно из шестнадцати клеток функцию будут представлять минтермы, размещённые в шести клетках. Обозначая места размещения минтермов в клетках единицами, заполняем карту, как показано на рис. 11.8.

Выделяем группы соседних минтермов, учитывая, что крайние клетки столбцов и строк являются тоже соседними. На карте выделенные группы отмечены пунктирными контурами и цифрами мелкого шрифта. Первая группа: $\bar{x}yv\bar{z} + \bar{x}y\bar{v}\bar{z} = \bar{x}y\bar{z}$. Вторая группа: $xyvz + \bar{x}yvz = yvz$. Третья группа: $\bar{x}\bar{y}\bar{v}z + x\bar{y}\bar{v}z = \bar{y}\bar{v}z$.

Итак, минимизированная функция, выраженная в ДНФ, будет иметь вид:

$$F = \bar{x}y\bar{z} + yvz + \bar{y}\bar{v}z \ .$$

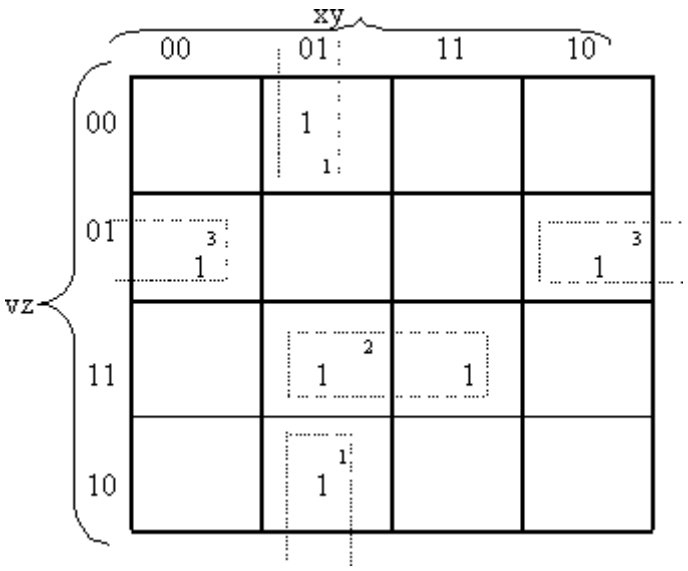


Рис. 11.8. Карта Карно для минимизируемой функции

Непосредственная реализация функции по полученному выражению требует использования четырёх инверторов, двух логических элементов ИЛИ, трёх логических элементов И с тремя входами. Такая реализация нерациональна. С точки зрения уменьшения аппаратных затрат часто желательно иметь функцию в виде произведения. Для преобразования функции воспользуемся теоремой де Моргана (Шеннона), дважды инвертируя минимизированную функцию:

$$\overline{\overline{F}} = \overline{\overline{\bar{x}y\bar{z} + yvz + \bar{y}\bar{v}z}} \ ; \ F = \overline{\overline{\bar{x}y\bar{z}} \cdot yvz \cdot \overline{\bar{y}\bar{v}z}} \ .$$

В полученном выражении отсутствуют операции логического сложения, следовательно, аппаратная реализация может быть осуществлена без логических элементов ИЛИ. Следует отметить, что минимизация логических выражений имеет целью обеспечение условий оптимальной реализации электронных устройств, использующих логические элементы. Критерии оптимальности при этом определяются конкретными условиями проектирования и использования электронных устройств. Здесь эти вопросы не рассматриваются, поэтому покажем только упрощенную структурную

схему алгоритма минимизации сложной логической функции (рис. 11.9).

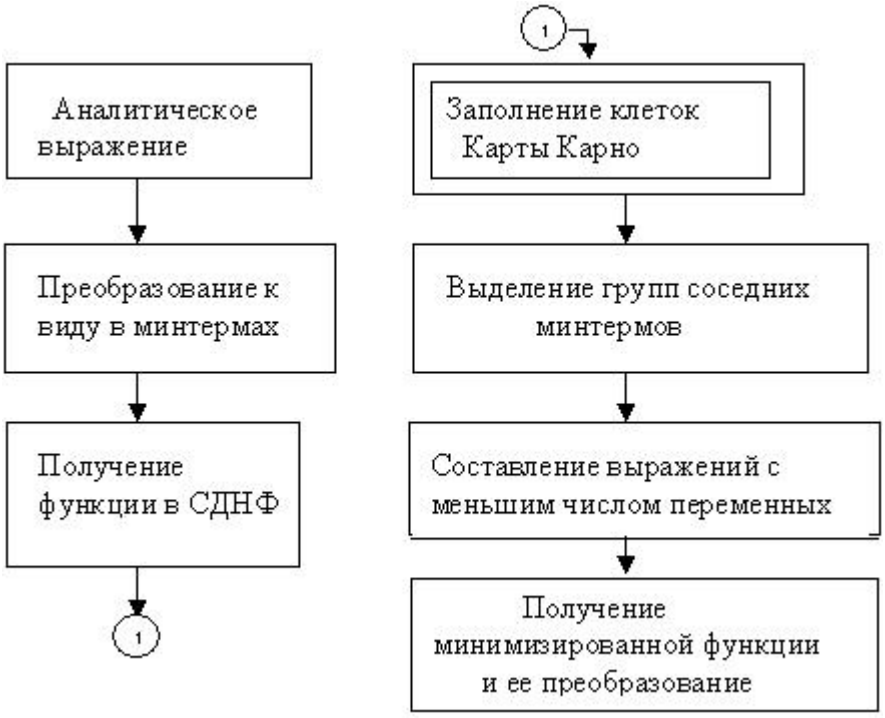


Рис. 11.9. Структурная схема алгоритма минимизации логической функции

11.5. Структура и принцип действия логических элементов

Для построения логических элементов, как устройств электронной техники, в основном используются элементы Шеффера и Пирса, которые являются основными представителями современной потенциальной системы логических элементов. Можно доказать, что достаточно иметь набор одинаковых логических элементов (И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ), чтобы только на них построить все многообразие логических схем. Однако такой способ чаще всего оказывается нерациональным, так как требует большого количества этих элементов. На практике в состав серий цифровых схем, выпускаемых промышленностью, входят не только указанные элементы (И-НЕ, ИЛИ-НЕ), но и другие элементы, обладающие большим разнообразием по способу их выполнения, по компоновке и числу входов и выходов. Логические элементы по виду реализуемой функции подразделяют на простейшие элементы одноступенчатой логики (И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ) и элементы двухступенчатой логики (И-ИЛИ, И-ИЛИ-НЕ и др.). На рис. 11.2 – 11.4 показаны

элементы одноступенчатой логики. На рис. 11.10 показаны примеры условных графических обозначений двухступенчатых элементов.

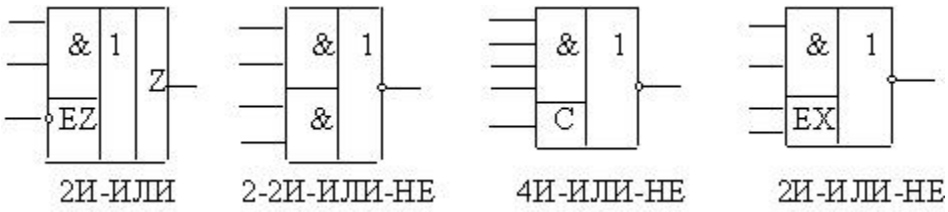


Рис. 11.10. Примеры двухступенчатых логических элементов

Обозначение элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ значит, что в составе микросхемы имеются два двухвходовых элемента И, выходы которых подключены к входам элемента ИЛИ, его выход подключен к входу элемента НЕ, выход элемента НЕ является выходом всей микросхемы. Таким образом, в одной микросхеме имеются все три основных элемента. Построение элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ с помощью простейших элементов показано на рис. 11.11.

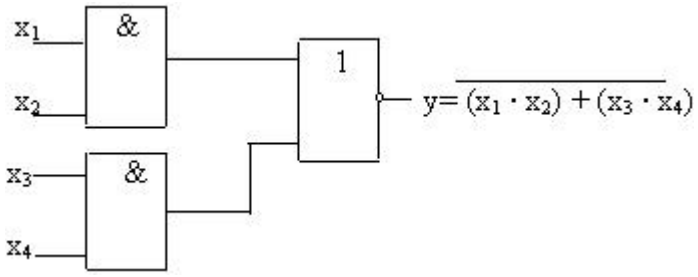
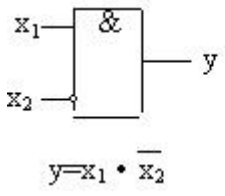


Рис. 11.11. Структурная схема элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ

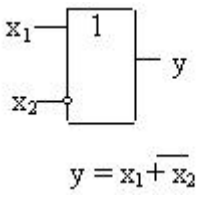
С помощью базовых операций, используемых в двухступенчатой логике, выполняются некоторые функции, нашедшие широкое применение в электронных системах. Примерами таких функций являются: ЗАПРЕТ, ИМПЛИКАЦИЯ (вовлечение), ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Таблицы истинности и УГО элементов, реализующих перечисленные функции, показаны на рис. 11.12, 11.13:

Функция ЗАПРЕТ



x1	x2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

Функция ИМПЛИКАЦИЯ



x1	x2	y
0	0	1
0	1	0
1	0	1
1	1	1

Рис. 11.12. Условные изображения, таблицы истинности и аналитическое представление дополнительных логических функций

Функция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

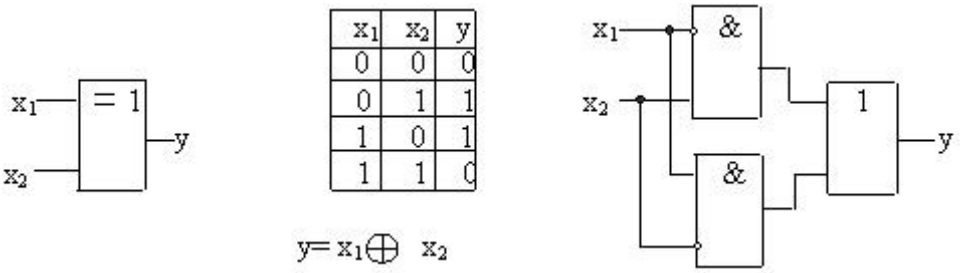


Рис. 11.13. Изображение, таблица истинности и структурная схема логического элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

Выпускается несколько серий микросхем, наибольшее распространение из которых получили серии логических элементов ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика), ТТЛШ (на транзисторах Шоттки), ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика), КМОП (на комплементарных МОП-транзисторах).

Характерной особенностью логических элементов (ЛЭ) ТТЛ является использование на входах многоэмиттерных транзисторов. Рассмотрим электрическую принципиальную схему элемента 4И-НЕ (рис. 11.14, *а*), условное графическое обозначение которого показано на рис. 11.14, *б*. Схема содержит четырехэмиттерный транзистор VT_1 на входе, промежуточный усилитель (VT_2) и выходной усилительный каскад на транзисторах VT_3, VT_4.

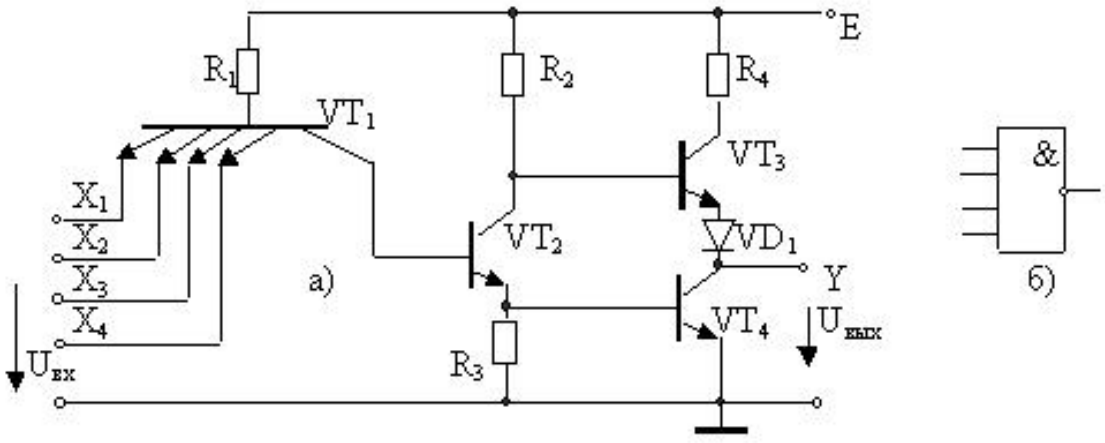


Рис. 11.14. Электрическая принципиальная схема логического элемента 4И-НЕ (*а*) и его условное обозначение (*б*)

Логический элемент работает следующим образом. Многоэмиттерный транзистор в исходном состоянии (при наличии источников входного сигнала) может находиться либо в состоянии насыщения (если хотя бы один из входных сигналов равен 0, а остальные 1), либо в состоянии отсечки, когда все входные сигналы

равны 1. Если транзистор VT_1 насыщен, то транзистор VT_2 закрыт, так как его базовое напряжение близко к нулю. Соответственно закрыт транзистор VT_4, так как его базовый ток мал.

Транзистор VT_3 открыт базовым током, протекающим через резистор R_2. Напряжение источника E через резистор R_4, открытый транзистор VT_3 и диод VD_1 попадает на выход, т.е. на выходе получим уровень, соответствующий 1. Таким образом, при появлении на входе хотя бы одного сигнала с уровнем, соответствующим логическому нулю, на выходе будем иметь уровень, соответствующий логической единице. Если на все четыре входа подать уровень сигнала, соответствующий логической единице, транзистор VT_1 окажется в режиме отсечки, однако по цепи база-коллектор VT_1 – база-эмиттер транзистора VT_2 будет протекать ток, достаточный для открытия транзистора VT_2, и, соответственно, транзистора VT_4. Открытый транзистор VT_2 шунтирует базовую цепь транзистора VT_3 и он закрывается, отсекая выход Y от источника питания. На выходе появляется низкий уровень сигнала, соответствующий логическому нулю. Следовательно, рассматриваемая схема реализует функцию И-НЕ по отношению к сигналам, подаваемым на любой (или на все) из четырех входов.

Примером микросхемы, в которой используются все три основные логические функции, может служить элемент ТТЛ 2-2И-ИЛИ-НЕ, принципиальная схема которого показана на рис. 11.15.

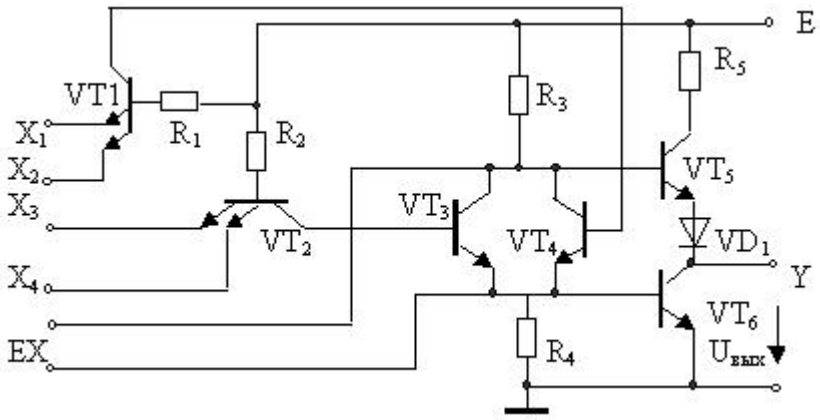


Рис. 11.15. Электрическая принципиальная схема элемента 2-2И-ИЛИ-НЕ

Функцию И в этой схеме выполняют двухэмиттерные транзисторы VT_1 и VT_2, функцию ИЛИ – транзисторы VT_3, VT_4. Принцип действия каждой пары транзисторов (VT_1, VT_2), (VT_3, VT_4) практически не

отличается от работы транзисторов VT_1, VT_2 схемы рис. 11.14, *а*. Для появления сигнала 0 на выходе логического элемента безразлично, открыт только один из транзисторов VT_1, VT_2 или открыты оба, что соответствует реализации функции ИЛИ. Выводы, обозначенные *EX*, служат для подключения специальных схем (расширителей по входу), с помощью которых можно увеличить количество входных сигналов [1, 2].

11.6. Основные параметры и характеристики логических элементов

Схемотехническая реализация цифровых логических устройств осуществляется на основе типовых (базовых) функциональных элементов. Классификацию параметров и характеристик логических элементов можно произвести по следующим признакам:

1. Функциональные признаки:

а) реализуемая логическая функция;

б) нагрузочная способность (коэффициент разветвления по выходу) $K_р$;

в) коэффициент объединения по входу $K_о$.

2. Статические характеристики:

а) входные;

б) выходные;

в) передаточная;

г) уровни сигналов, соответствующих логической единице и логическому нулю;

д) статическая помехоустойчивость.

3. Импульсные и переходные характеристики (динамические):

а) среднее время задержки распространения сигнала;

б) предельная рабочая частота;

в) необходимая скорость нарастания управляющего напряжения на входе логического элемента;

г) динамическая помехоустойчивость.

4. Требования к источнику питания:

а) потребляемая мощность;

б) входные токи при входных напряжениях низкого и высокого уровня;

в) напряжение источника питания и допустимые отклонения от номинального значения.

5. Климатические признаки:

а) диапазон рабочих температур;

б) влагоустойчивость и др.

6. Конструктивные и другие признаки:

а) вес;

б) габариты;

в) стоимость и т.д.

Краткое описание основных параметров и характеристик. Нагрузочная способность логического элемента характеризуется коэффициентом разветвления $K_р$, который показывает, какое число логических входов устройств этой же серии может быть одновременно присоединено к выходу данного логического элемента без нарушения его работоспособности. Увеличение $K_р$ расширяет логические возможности элемента, позволяет уменьшить число элементов в цифровом устройстве. Однако это увеличение ухудшает другие параметры: быстродействие, помехоустойчивость, увеличи-вает потребляемую мощность. По этой причине в составы серий цифровых интегральных схем часто входят логические элементы с различной нагрузочной способностью: основные с $K_р = 4 – 10$ и буферные с $K_р = 20 – 50$. Это позволяет более гибко проектировать цифровые устройства, достигая оптимальных показателей по потребляемой мощности и количеству логических элементов.

Коэффициент объединения по входу $K_о$ характеризует максимальное число логических входов функционального элемента. С увеличением $K_о$ расширяются логические возможности схемы за счет выполнения функций с большим числом аргументов на одном базовом логическом элементе, однако это ухудшает нагрузочную способность, помехоустойчивость и быстродействие. Обычно логические элементы выполняются с $K_о = 2 – 8$. Увеличение $K_о$ сверх восьми обеспечивается за счет применения специальных логических расширителей.

Статические характеристики рассмотрим на примере характеристик базового элемента серии 155 [22] (серия устаревшая).

Передаточная и входная характеристики базового элемента ТТЛ серии 155 приведены на рис. 11.16.

На характеристиках можно отметить следующие параметры: $U_{вх1п} \approx 1{,}5$ В; $U_{вх0п} \approx 0{,}8$ В; $U_{вых1} \approx 4$ В; $U_{вых0} \approx 0{,}4$ В, где $U_{вх1п}$, $U_{вх0п}$ – пороговые напряжения соответственно высокого и низкого уровней – это наименьшее ($U_{вх1п}$) или наибольшее ($U_{вх0п}$) значения соответствующих уровней, при которых начинается переход логического элемента в другое состояние.

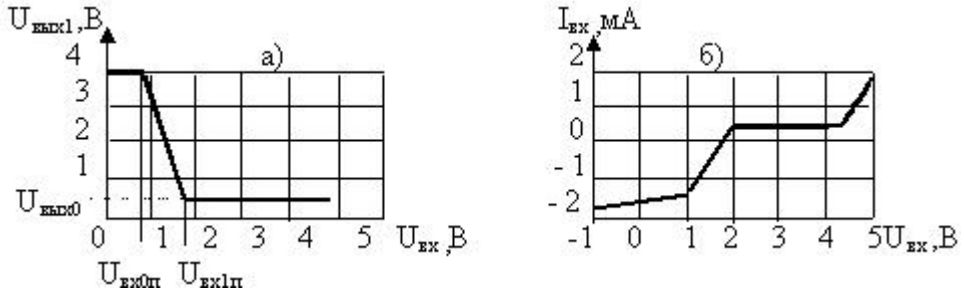


Рис. 11.16. Характеристики логического элемента ТТЛ:
а – передаточная; *б* – входная

Входная характеристика (рис. 11.16, *б*) показывает, что при $U_{вх} > 4$ В начинается заметный рост входного тока. По этой причине для логических элементов серии ТТЛ недопустимо увеличение $U_{вх}$ свыше 5 В. Выходные характеристики элементов ТТЛ имеют вид, показанный на рис. 11.17.

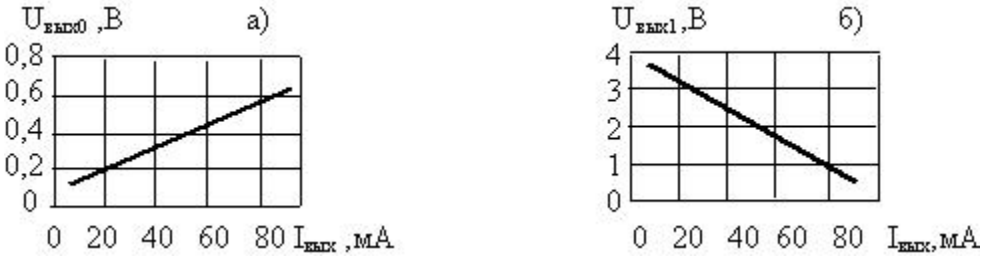


Рис. 11.17. Выходные характеристики логических элементов ТТЛ:
а - для сигналов низкого уровня; *б* – для сигналов высокого уровня

По характеристикам видно, что уровень выходного сигнала существенно зависит от величины сопротивления нагрузки. При заданных допустимых значениях уровней выходных напряжений нагрузка не должна превышать допустимых значений. Поэтому в составе серий микросхем различают микросхемы с нормальной и повышенной нагрузочной способностью. Например, в серии 155 микросхемы с $I_{вых0} \leq 16$ мА, $K_р \leq 10$ относятся к микросхемам

с нормальной нагрузочной способностью, а схемы с повышенной нагрузочной способностью имеют $I_{вых0}$ = 48 мА. По выходным характеристикам можно определить, что выходные сопротивления логических элементов ТТЛ имеют небольшую величину. По этой причине нельзя объединять между собой выходы нескольких ТТЛ ЛЭ, так как в случае разных уровней выходных сигналов через выходные транзисторы ЛЭ (рис. 11.15) будут протекать большие токи. Чтобы осуществлять непосредственное соединение выводов нескольких логических элементов между собой и получать разные уровни выходного сигнала используют схемы с «открытым» электродом, например, коллектором, т.е. схемы, на выходе которых установлен транзистор, чья коллекторная цепь оставлена свободной [22]. Следует заметить, что «открытым» может быть не только коллектор, но и эмиттер у биполярных транзисторов, а также сток или исток у полевых.

Быстродействие логического элемента характеризуется временем задержки распространения сигналов при включении $t_{з10}$, выключении $t_{з01}$ и средним временем $t_{зс}$ (рис. 11.18).

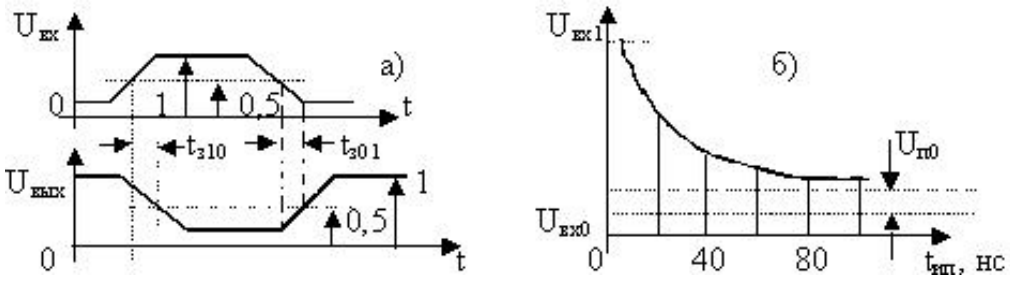


Рис. 11.18. Определение времени задержки распространения сигнала (*а*) и изменение амплитуды импульсной помехи с изменением её длительности (*б*)

Время задержки распространения сигнала при включении ЛЭ – это интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе выходного напряжения от уровня логической единицы к уровню логического нуля, измеренный на уровне 0,5 амплитуды.

Аналогично время задержки распространения сигнала при выключении ЛЭ - это интервал времени между входным и выходным импульсами при переходе выходного напряжения от уровня логического нуля к уровню логической единицы, измеренный на уровне 0,5 (рис. 11.18, *а*). Среднее время задержки распространения – это интер-

вал времени, равный полусумме времен задержки распространения сигнала при включении и выключении логического элемента:

$$t_{зс} = (t_{з01} + t_{з10})/2. \qquad (11.6)$$

Помехоустойчивость логического элемента различается статическая и динамическая. Статическая помехоустойчивость определяется как минимальная разность между значениями выходного и входного сигналов данного логического уровня:

$$U_{п1} = U_{вых1} - U_{вх1},$$
$$U_{п0} = U_{вх0} - U_{вых0}. \qquad (11.7)$$

Из (11.7) можно заключить, что статическая помехоустойчивость – это минимальное значение напряжения помехи на выходе ЛЭ, которое может вызвать срабатывание подключенного к нему ЛЭ.

Помехи могут быть импульсными. При малых длительностях помехи, меньших или соизмеримых с $t_{зс}$, этот импульс напряжения может быть значительно больше напряжения статической помехи и не вызывать срабатывания ЛЭ. Это объясняется наличием емкостей между элементами микросхемы, емкостей полупроводниковых структур, проявляющимися при больших частотах сигналов. Динамическую помехоустойчивость обычно характеризуют графиком, связывающим длительность и амплитуду допустимой помехи (рис. 11.18, *б*).

Важным параметром логического элемента является потребляемая мощность $P_п$ или ток потребления $I_п$, которые приводятся в справочных данных. В целях сравнения между собой микросхем отдельных серий иногда используют интегральный параметр, называемый энергией переключения:

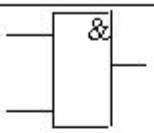
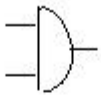
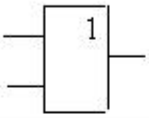
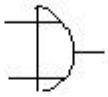
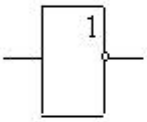
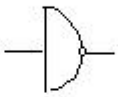
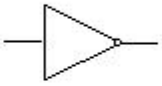
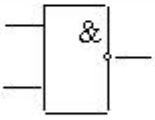
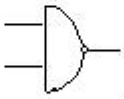
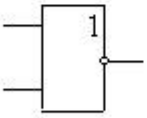
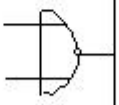
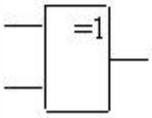
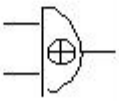
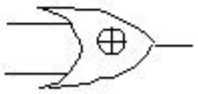
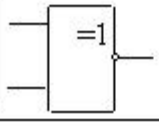
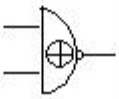
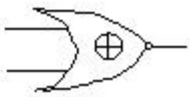
$$Э_п = P_п \cdot t_{зс}. \qquad (11.8)$$

Смысл этого параметра в том, что он характеризует работу, затрачиваемую на выполнение одного переключения.

Условные графические обозначения логических элементов в нашей стране и за рубежом разные, поэтому их соответствие приведено в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Условные графические обозначения
логических элементов

Вид операции	УГО		
1	2	3	4
	Российское	Зарубежное	
		Общее	Интегральное исполнение
И			
ИЛИ			
НЕ			
И-НЕ			
ИЛИ-НЕ			
ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ			
ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ-НЕ			

12. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Ранее уже отмечалось, что к комбинационным устройствам относятся функциональные узлы, в которых отсутствуют элементы памяти. Состояние комбинационного узла однозначно определяется комбинацией входных сигналов в данный момент и не зависит от предыдущего состояния. К таким узлам относятся шифраторы, дешифраторы, сумматоры, мультиплексоры, демультиплексоры, компараторы, преобразователи кодов и другие.

12.1. Шифраторы и дешифраторы

Шифратор – это функциональный узел, преобразующий поступающие на его входы сигналы (команды) в n-разрядный двоичный код. «Командами» могут быть, например, десятичные цифры. Построим шифратор, преобразующий десятичные цифры в нормальный двоичный код (НДК). Функциональное описание такого шифратора представим в виде таблицы истинности, в которой кодируемые цифры обозначим переменной x_n , где n = 0 … 9, а в качестве кода, присваемового кодируемым цифрам, выберем четырехразрядный двоичный код.

Таблица 12.1

Таблица истинности шифратора

Число	Код			
	a_3	a_2	a_1	a_0
x_0	0	0	0	0
x_1	0	0	0	1
x_2	0	0	1	0
x_3	0	0	1	1
x_4	0	1	0	0
x_5	0	1	0	1
x_6	0	1	1	0
x_7	0	1	1	1
x_8	1	0	0	0
x_9	1	0	0	1

В табл. 12.1 числа $a_0 \ldots a_3$ представлены как функции аргументов x_n, принимающих различные значения десятичных цифр. Для синтеза схемы, реализующей указанные функции, записываем их представления в аналитической форме по табличным данным: $a_0 = x_1 + x_3 + x_5 + x_7 + x_9$; $a_1 = x_2 + x_3 + x_6 + x_7$; $a_2 = x_4 + x_5 + x_6 + x_7$; $a_3 = x_8 + x_9$. В полученных выражениях знак + обозначает логическую операцию ИЛИ, поэтому очевидная (не минимизированная) структура устройства должна содержать четыре дизъюнктора, каждый из которых имеет разное число входов (рис. 12.1).

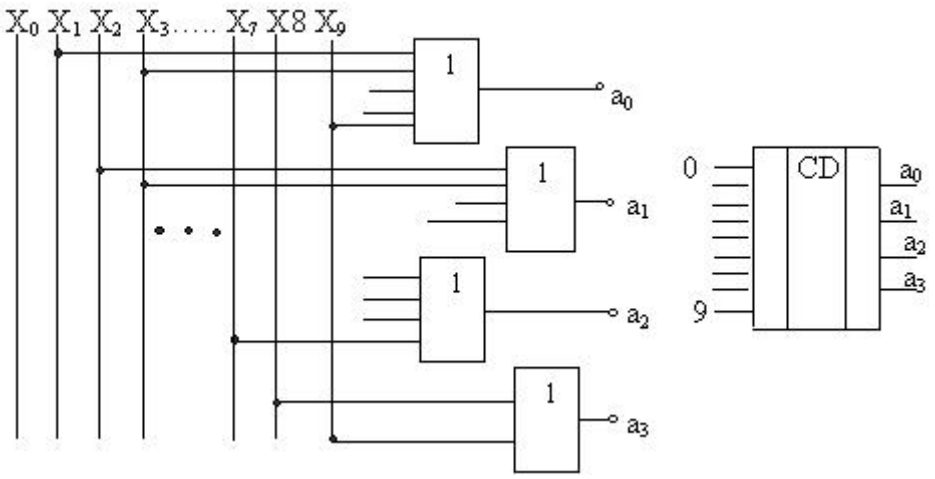


Рис. 12.1. Структурная схема и интегральное изображение шифратора

Дешифратор – это функциональный узел, преобразующий *n*-разрядный двоичный код в комбинацию выходных сигналов (команд). Этот *n*-разрядный код дает 2^n наборов входных переменных, которые могут превратиться в 2^n выходных сигналов. В этом случае дешифратор называют полным. Если число выходных сигналов меньше 2^n, то дешифратор неполный.

Рассмотрим методику построения простейшего дешифратора, имеющего два входа и четыре выхода (дешифратор 2 – 4) (табл. 12.2). Составляем таблицу функционирования дешифратора, исходя из его функционального назначения: 2-разрядный код, подаваемый на вход, может быть превращен на выходе в четыре выходных сигнала. Пусть таким выходным сигналом будет позиционный код, в котором значение определяется положением «1» в цепочке «0».

Рассматривая логические переменные «*x*» как функции входных логических переменных «*a*», запишем логические выражения для выходных сигналов: $x_0 = \overline{a_0} \cdot \overline{a_1}$; $x_1 = \overline{a_0} \cdot a_1$; $x_2 = a_0 \cdot \overline{a_1}$; $x_3 = a_0 \cdot a_1$.

Таблица 12.2

Таблица истинности дешифратора

Входной код		Выходной сигнал			
a_1	a_0	x_0	x_1	x_2	x_3
0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Анализ полученных выражений показывает, что структурная схема, реализующая функцию разрабатываемого дешифратора, должна содержать два инвертора и четыре двухвходовых конъюнктора. Син-

тезированная таким способом структурная схема и её интегральное изображение показаны на рис. 12.2.

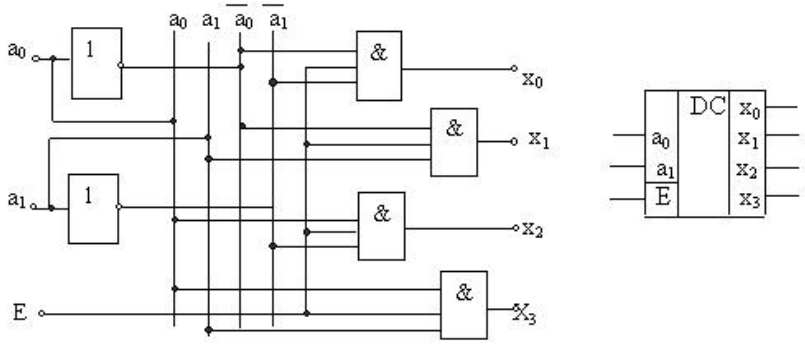


Рис. 12.2. Структурная схема дешифратора 2 – 4 и его интегральное изображение

Реальные дешифраторы обычно снабжены дополнительным входом, разрешающим или запрещающим выполнение основной функции. Например, в схеме (рис. 12.2) можно снабдить каждый конъюнктор дополнительным входом, объединить эти входы и обеспечить внешний доступ к ним (обычно этот дополнительный вход обозначают буквой E). Если на вход E подать логический 0, функции дешифратора будут запрещены, а на выходах установится инверсный (нулевой) уровень выходного сигнала. Логическая 1, установленная на дополнительном входе E, не препятствует работе дешифратора. Аналогичным способом можно синтезировать дешифраторы (1 – 2), (3 – 8) и т.д.

Более сложные дешифраторы можно построить на основе каскадного соединения простых. В качестве примера рассмотрим структурную схему дешифратора (4 – 16), построенного на основе дешифратора (2 – 4) (рис. 12.3).

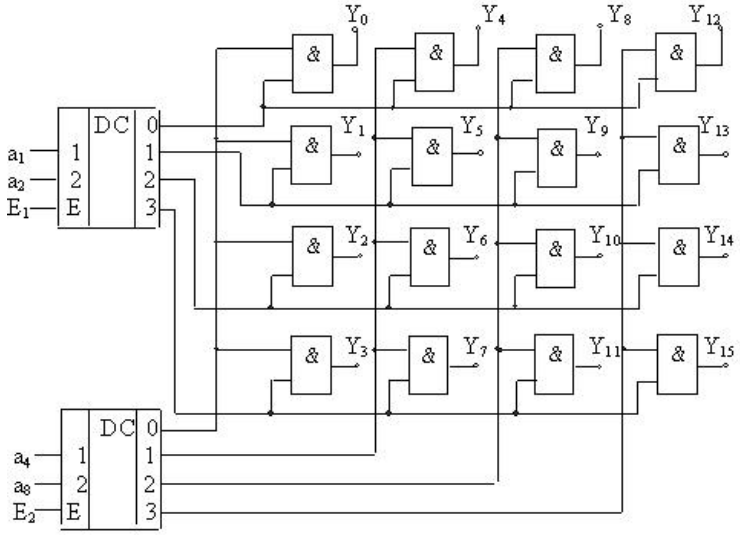


Рис. 12.3. Дешифратор (4 – 16) на основе дешифраторов (2 – 4)

В этом дешифраторе вторая ступень выполнена на матрице двух-входовых конъюнкторов, активируемых сигналами, поступа-ющими с выходов дешифраторов (2 – 4). Запрещение работы дешифратора может осуществляться либо по вертикальным, либо по горизонталь-ным шинам, при этом на одном из входов разрешения E_1, E_2 должен присутствовать сигнал логического 0. Дешифратор (5 – 32) может быть составлен из одного дешифратора (2 – 4) и четырех дешифрато-ров (3 – 8), управляемых по входу разрешения выходными сигналами дешифратора (2 – 4) [20].

12.2. Мультиплексоры и демультиплексоры

Мультиплексор – это функциональный узел, который осуществ-ляет управляемую коммутацию логических сигналов с входных линий на одну выходную линию. Коммутация определен-ной входной линии осуществляется в соответствии с двоичным адресным кодом, установленным на адресных входах мультиплексора.

Если адресный код имеет n разрядов, то можно осуществить 2^n коммутаций входных линий на одну выходную, следовательно, мультиплексор с n-разрядным адресным входом может иметь любое число входных линий, не превышающее 2^n.

В качестве примера рассмотрим методику построения мультип-лексора, осуществляющего коммутацию четырех входных линий x_0, x_1, x_2, x_3 на выходную линию Y. Число разрядов адресных входов оп-ределяется по выражению $n = \log_2 N$, где N – число входных линий, (n округляется в сторону увеличения). В нашем случае $n = 2$. Для опре-деления структуры составляем таблицу функционирования мультип-лексора, обозначив адресные входы символами a_0, a_1 (табл. 12.3).

По данным таблицы можно записать характеристическое уравне-ние данного мультиплексора:

$$Y = \overline{a_0}\,\overline{a_1}x_0 + \overline{a_0}a_1x_1 + a_0\overline{a_1}x_2 + a_0a_1x_3.$$

Таблица 12.3

Таблица истинности мультиплексора

a_0	a_1	Y
0	0	x_0
0	1	x_1
1	0	x_2
1	1	x_3

Анализ уравнения показывает, что структура мультиплексора должна содержать два инвертора, четыре конъюнктора и один четырехвходовый дизъюнктор. Синтезированная по таким признакам схема показана на рис. 12.4.

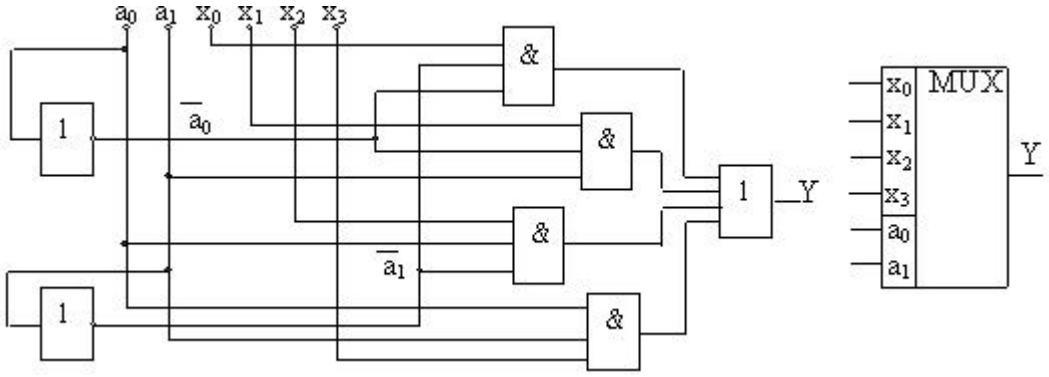


Рис. 12.4. Структурная схема мультиплексора 4 – 1
и его интегральное изображение

Наращивание размерности мультиплексора возможно с помощью пирамидальной структуры из нескольких мультиплексоров меньшей размерности. В этом случае первый каскад должен содержать столько мультиплексоров, сколько необходимо для обеспечения нужного (суммарного) количества входных линий. Мультиплексоры первого каскада адресуются одним и тем же кодом, составленным из соответствующего числа младших разрядов общего адресного кода. Если число адресных разрядов мультиплексоров первого каскада n_1, а общее число адресных разрядов – n (соответствует суммарному числу адресуемых входных линий 2^n), то мультиплексор второго каскада должен иметь $(n - n_1)$ адресных разрядов.

Например, для построения мультиплексора 32 – 1 на мультиплексорах меньшей размерности, в первом каскаде можно использовать четыре мультиплексора 8 – 1, а во втором каскаде – один мультиплексор 4 – 1. При этом в пятиразрядном адресном коде ($2^5 = 32$) два старших разряда принадлежат мультиплексору второго каскада, а три младших – объединённым адресным входам мультиплексоров первого каскада. Для мультиплексора второго каскада входными линиями являются выходные линии мультиплексоров первого каскада.

Реализация логических функций на основе мультиплексоров. С помощью мультиплексора, имеющего n адресных входов, можно последовательно адресовать на выход 2^n разрядов информационного слова, поданного на информационные входы. Для воспроизведения на выходе мультиплексора значения логической функции, имеющей

n аргументов, используется условие, согласно которому каждому набору аргументов соответствует передача на выход одного из сигналов, поданных на информационные входы. Следовательно, если на адресные входы мультиплексора подать кодовый набор аргументов функции, а на информационные входы – соответствующие значения функции, то получим устройство, воспроизводящее на выходе значения функции, соответствующие набору аргументов этой функции, установленному на адресных входах мультиплексора. На рис. 12.5 приведен пример использования мультиплексора 8 – 1 в качестве логического устройства («универсального логического элемента» согласно [20]) для реализации функции трех аргументов $F(A_4, A_2, A_1)$.

A_4	A_2	A_1	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

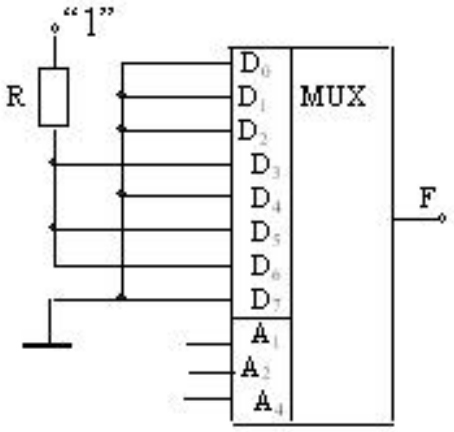


Рис. 12.5. Схема включения мультиплексора 8 – 1 для реализации функции трех аргументов, заданной таблично

Демультиплексор. Демультиплексор выполняет операцию, обратную операции мультиплексора, т.е. передаёт данные из одной входной линии в одну из нескольких выходных линий. Управление коммутацией осуществляется с помощью адресного кода, устанавливаемого на адресных входах, при этом адресуются, в отличие от мультиплексора, не входные, а выходные выводы. В общем случае число выходных линий N определяется разрядностью n-адресного кода согласно соотношению $N = 2^n$. Синтез демультиплексора рассмотрим на примере демультиплексора 1 – 4, для которого $N = 4$. Составляем таблицу истинности (таблицу функционирования), в которой адресный код обозначен символами $a_к$, выходные линии символами Y_i, а сигнал на входе обозначен символом F (табл. 12.4).

Таблица 12.4

Таблица истинности демультиплексора

0	1	0	1	2	3

В соответствии с таблицей истинности характеристические уравнения такого устройства будут: $Y_0 = \overline{a_0}\,\overline{a_1}F$; $Y_1 = \overline{a_0}a_1F$; $Y_2 = a_0\overline{a_1}F$; $Y_3 = a_0a_1F$. Соответствующая этим уравнениям структурная схема должна содержать два инвертора и четыре трёхвходовых конъюнктора (рис. 12.6).

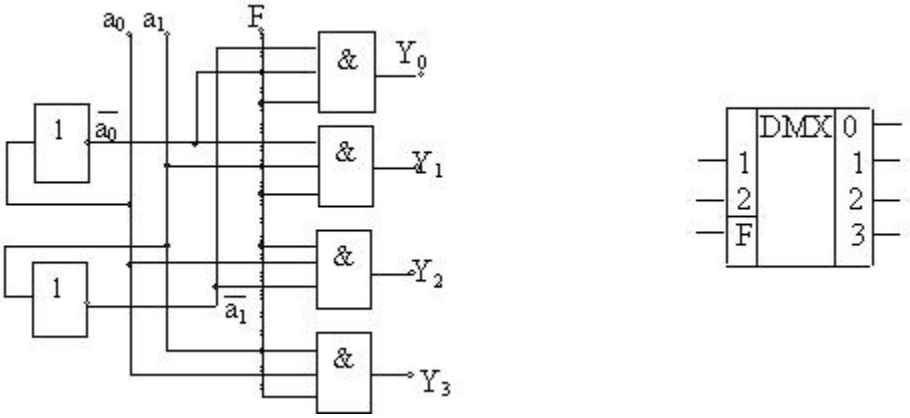


Рис. 12.6. Структурная схема демультиплексора 1 – 4 и его УГО

12.3. Сумматоры

Сумматором называется комбинационный функциональный узел, предназначенный для арифметического сложения двоичных чисел. Основным узлом сумматора является одноразрядный сумматор, на основе которого строятся многоразрядные сумматоры. Одноразрядный сумматор выполняет арифметическое сложение одноразрядных двоичных чисел a_i, b_i и бита переноса c_i из младшего разряда, образуя на выходах значения суммы S_i и бита переноса в старший разряд c_{i+1}. Сумматор, не имеющий бита переноса из младшего разряда, называют полусумматором. Он имеет два входа и два выхода в отличие от «полного» одноразрядного сумматора, имеющего три входа и два выхода. Таблицы истинности для одноразрядных сумматоров показаны в табл. 12.5.

Таблица 12.5

Таблицы истинности сумматора

a_i	b_i	c_i	S_i	c_{i+1}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

a_0	b_0	S_0	c_0
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

В соответствии с таблицами истинности можно составить характеристические уравнения для одноразрядного полного сумматора и полусумматора:

$$S_i = \overline{a_i}b_ic_i + a_i\overline{b_i}c_i + a_ib_i\overline{c_i} + a_ib_ic_i\ ;\ S_0 = a_0b_0 + a_0\overline{b_0}\ ;$$

$$c_{i+1} = \overline{a_i}b_i + \overline{a_i}c_i + b_i\overline{c_i}\ ;\ c_0 = a_0\overline{b_0}\ .$$

По полученным характеристическим уравнениям нетрудно синтезировать структурные схемы, используя нужные логические элементы. Выражение для бита переноса c_{i+1} записано после минимизации полного выражения, полученного из таблицы истинности.

Обычно сумматоры выполняются многоразрядными. Число входов и выходов такого сумматора определяется разрядностью слагаемых. Структуру многоразрядного сумматора определяет способ передачи сигнала переноса от младшего разряда к старшему. Различают два основных вида сумматоров: с последовательным и параллельным переносом. На основе этих вариантов разработано несколько видов сумматоров: для сложения параллельных и последовательных операндов, сумматоры групповой структуры, накапливающие сумматоры и др.

В сумматорах с последовательным переносом выход переноса i-разряда последовательно соединен с входом (i+1) – разряда. Структурная схема такого сумматора показана на рис. 12.7.

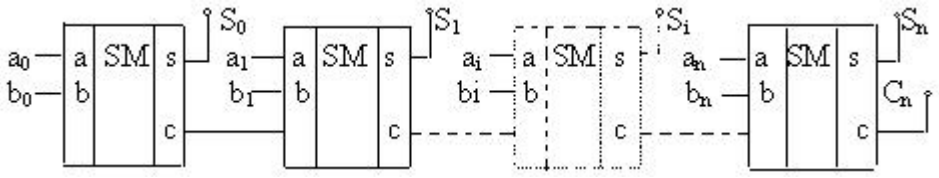


Рис. 12.7. Структурная схема многоразрядного сумматора с последовательным переносом

Важным параметром сумматора является его быстродействие. Для получения максимального быстродействия разработаны сумма-

торы для параллельных операндов с параллельным переносом. В таких сумматорах сигналы переноса для каждого разряда формируются специальными схемами, на входы которых поступают те переменные, которые необходимы для выработки бита переноса. К ним относятся внешний входной перенос (если он есть) и значения всех разрядов слагаемых, младших относительно данного.

Структурная схема сумматора для сложения двух *n*-разрядных чисел представлена на рис. 12.8, где *CR* – схемы формирования переносов.

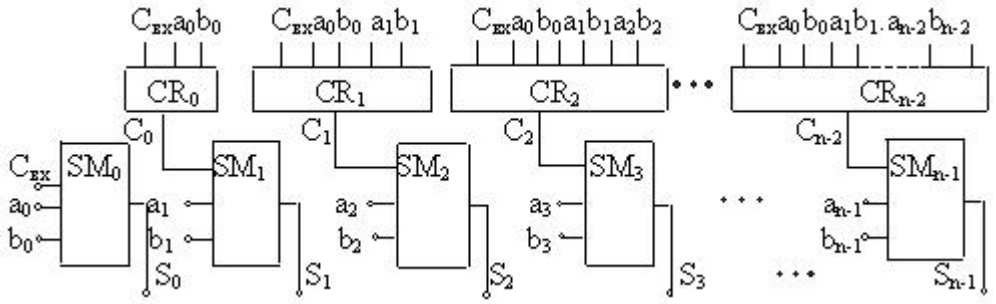


Рис. 12.8. Структурная схема сумматора для сложения двух параллельных операндов с параллельным переносом

Быстродействие в таких сумматорах достигается за счет того, что биты переносов формируются практически одновременно с формированием результата.

Накапливающий сумматор представляет собой сочетание комбинационного сумматора и тактируемого регистра, причем очередное слагаемое добавляется к содержимому сумматора и результат замещает старое значение суммы [20].

12.4. Цифровой компаратор

Компаратор (устройство сравнения) служит для определения соотношения между двумя кодовыми словами. Такими соотношениями можно считать: «меньше», «равно», «больше». Принято считать, что выходные функции, вырабатываемые компараторами, принимают единичные значения, если соблюдаются указанные выше соотношения, и равны нулю, если не соблюдаются. Например, функция равенства $F_{A=B} = 1$, если $A = B$ и равна нулю, если $A \neq B$. С учетом приня-

того соглашения таблица истинности компаратора двух одноразрядных чисел будет выглядеть так, как показано на рис. 12.9.

A	B	$F_{A<B}$	$F_{A=B}$	$F_{A>B}$
0	0	0	1	0
0	1	1	0	0
1	0	0	0	1
1	1	0	1	0

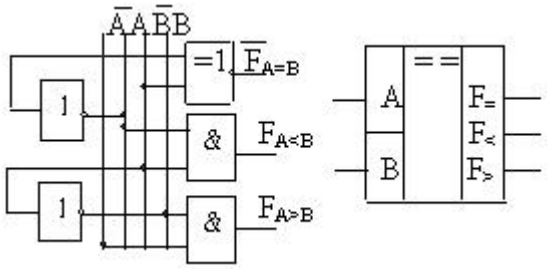


Рис. 12.9. Таблица истинности, структурная схема
и условное обозначение компаратора двух одноразрядных слов

Устройства сравнения строятся на основе поразрядных операций над одноименными разрядами обоих слов. Признак равенства разрядов $r_i = \overline{A_i \oplus B_i}$. Компараторы для слов большей разрядности получают наращиванием размерности путем использования нескольких схем компараторов. Например, для сравнения восьмиразрядных чисел можно использовать две четырехразрядные схемы. Для этой цели в четырехразрядном компараторе предусмотрены три дополнительных входа: $A > B$, $A = B$, $A < B$,
к которым подводятся соответствующие выходы схемы, выполняющей сравнение младших разрядов.

12.5. Преобразователи кодов

Преобразователи кодов используются для перевода представления информации из одного кода в другой. Необходимость такого перевода возникает потому, что для представления информации используют различные двоичные и двоично-десятичные коды. Таблицы истинности некоторых кодов для представления десятичных чисел представлены в табл. 12.6.

Синтез преобразователей кодов осуществляется в соответствии с таблицами их функционирования. В качестве примера рассмотрим синтез схемы, преобразующей двоично-десятичный код (8421) в код Айкена (2421). С этой целью каждую переменную кода Айкена будем рассматривать как функцию соответствующих коэффициентов двоично-десятичного кода. В этом случае можно в соответствии

с таблицами составить характеристические уравнения для каждой переменной кода 2421. Например, для переменной k_3 имеем:

$$k_3 = \bar{e}_3 e_2 \bar{e}_1 e_0 + e_3 \bar{e}_2 e_1 \bar{e}_0 + e_3 e_2 e_1 e_0 + e_3 \bar{e}_2 \bar{e}_1 \bar{e}_0 + e_3 \bar{e}_2 e_1 \bar{e}_0 .$$

Таблица 12.6

Таблицы истинности некоторых кодов

Десятичное	прямой код				обратный код				Дополнительный				Код Грея				Код 8-4-2-1				Код 2-4-2-1			
Число	a_3	a_2	a_1	a_0	b_3	b_2	b_1	b_0	c_3	c_2	c_1	c_0	d_3	d_2	d_1	d_0	e	e_2	e_1	e_0	k	k_2	k_1	k_0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
5	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
8	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
9	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
10	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1								
11	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0								
12	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0								
13	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1								
14	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1								
15	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0								

Составив характеристические уравнения для всех переменных кода 2421, можно упростить их по правилам логических преобразований, затем построить структурную схему преобра-зователя.

Однако более эффективным является метод структурного проектирования с использованием карт Карно. Согласно этому методу составляем карты Карно для переменных k_3, k_2, k_1, k_0, причем клетки, не заполненные значениями аргументов e_0 – e_3, заполняем значениями 1 либо 0, делаем соответствующие объединения и записываем минимизированные выражения для переменных k (рис. 12.10).

k_3

e_2e_3 \ e_0e_1	00	10	11	01
00	0	0	0	0
10	0	1	1	1
11	x	x	x	x
01	1	1	x	x

k_2

e_2e_3 \ e_0e_1	00	10	11	01
00	0	0	0	0
10	1	0	1	1
11	x	x	x	x
01	1	1	x	x

k_1

e_2e_3 \ e_0e_1	00	10	11	01
00	0	0	1	1
10	0	1	0	0
11	x	x	x	x
01	1	1	x	x

k_0

e_2e_3 \ e_0e_1	00	10	11	01
00	0	1	1	0
10	0	1	1	0
11	x	x	x	x
01	0	1	x	x

Рис. 12.10. Карты Карно для преобразователя кодов

В результате минимизации получим: $k_3 = e_3 + e_2e_1 + e_2e_0$; $k_2 = e_3 + e_2e_1 + e_2\bar{e}_0$; $k_1 = e_3 + \bar{e}_2e_1 + e_2\bar{e}_1e_0$; $k_0 = e_0$.

Полученные выражения полностью определяют структуру и состав элементов преобразователя. Однако технологически более

рациональны структуры, выполненные на однотипных логических элементах, например, на элементах И-НЕ. Структурная схема такого преобразователя представлена на рис. 12.11.

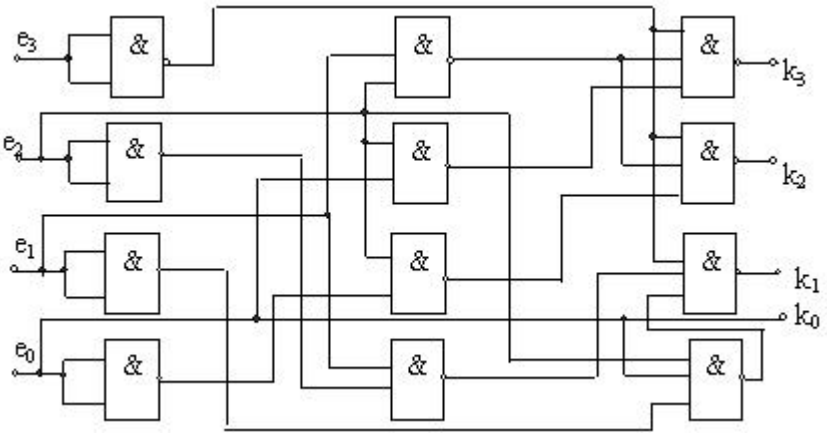


Рис. 12.11. Структурная схема преобразователя кода 8421 в код 2421

12.6. Арифметико-логическое устройство

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) – это функциональный узел, предназначенный для реализации арифметических и логических операций по обработке цифровой информации. Типичное АЛУ (обычно четырёхразрядное) имеет входы операндов A и B, входы выбора операций S, вход переноса C_i и вход M (*Mode*), сигнал на котором задает тип выполняемых операций: логические ($M = 1$) или арифметико-логические ($M = 0$). Перечень выполняемых АЛУ операций приведен на рис. 12.12 [20].

Набор логических операций АЛУ позволяет воспроизводить все функции двух переменных. В арифметико-логических операциях сочетаются логические и арифметические операции одновременно. Выражение типа $A \vee \overline{B} + AB$ следует понимать следующим образом: вначале поразрядно выполняется операция инвертирования ($\overline{B}$), затем логическое сложение ($A \vee \overline{B}$), умножение (AB) и последующее арифметическое сложение.

Для выполнения операций над словами большой размерности АЛУ соединяются друг с другом путем последовательных или параллельных переносов. Организацию параллельных переносов осуществляют с помощью специальных схем-блоков ускоренного переноса, для чего в схеме АЛУ (рис. 12.12) предусмотрены два дополни-

тельных выхода (*G*, *H*), позволяющих организовать параллельный перенос.

№	S	Логические функции (M=1)	Арифметико-логические функции(M=0)
0	0000	$\overline{A}$	$A+C_i$
1	0001	$A \vee B$	$A \vee \overline{B} + C_i$
2	0010	$\overline{A}B$	$A \vee \overline{B} + C_i$
3	0011	0000	$1111+C_i$
4	0100	$A\overline{B}$	$A + A\overline{B} + C_i$
5	0101	$\overline{B}$	$A \vee \overline{B} + A\overline{B} + C_i$
6	0110	$A \oplus B$	$A-B+C_i$
7	0111	$A\overline{B}$	$A\overline{B}+1111+C_i$
8	1000	$\overline{A} \vee B$	$A+AB+C_i$
9	1001	$\overline{A \oplus B}$	$A+B+C_i$
10	1010	B	$A \vee \overline{B} + AB + C_i$
11	1011	AB	$AB+1111+C_i$
12	1100	1111	$A+A+C_i$
13	1101	$A \vee \overline{B}$	$A \vee B+A+C_i$
14	1110	$A \vee B$	$A \vee \overline{B}+A+C_i$
15	1111	A	$A+1111+C_i$

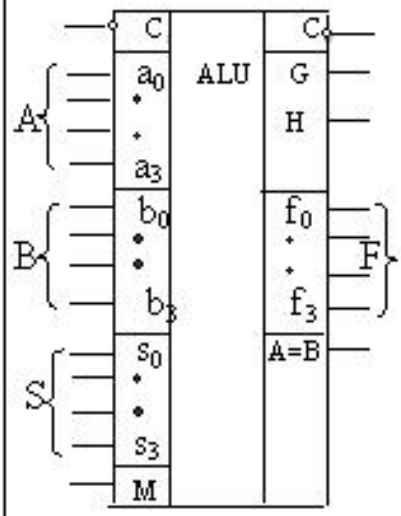


Рис. 12.12. Таблица функций и условное изображение 4-разрядного АЛУ

13. ТРИГГЕРЫ И ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТЫ

Триггер – устройство, имеющее два устойчивых состояния, у которого переход из одного состояния в другое происходит при воздействии управляющего сигнала вследствие регенеративного процесса.

Слово триггер означает спусковое устройство − «курок». Отличительной способностью симметричного триггера является свойство запоминания двоичной информации, т.е. *триггер обладает памятью*, под которой подразумевают способность оставаться в одном из двух состояний и после прекращения действия переключающего (управляющего) сигнала. Приняв одно из состояний за «1», а другое за «0», можно считать, что триггер может хранить (помнить) один разряд числа, записанного в двоичном коде, (1 бит).

Регенеративным обычно называют процесс, сопровождающийся самовозбуждением, (самостимулированием). Такой процесс наблюдается в электрической цепи, охваченной положительной обратной связью с петлевым усилением $K\gamma > 1$, он характеризуется резким изменением токов и напряжений в цепи.

13.1. Триггерная схема на двух усилительных каскадах

Рассмотрим принцип действия триггера, для чего возьмем два простейших усилителя и соединим их так, чтобы они были охвачены ПОС (рис. 13.1).

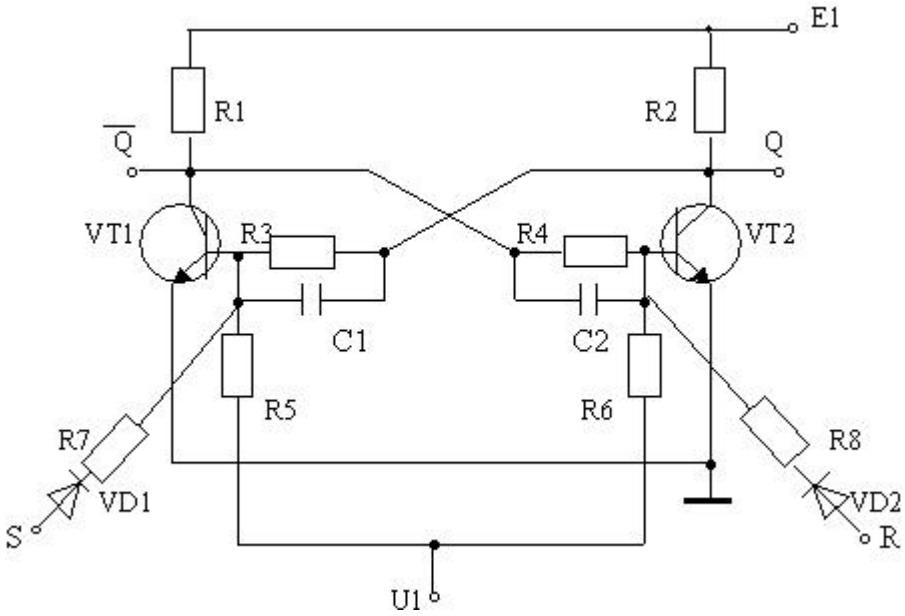


Рис. 13.1. Триггерная схема на двух транзисторах

В схеме (рис. 13.1) возможны теоретически четыре состояния:

1) оба транзистора открыты;
2) оба транзистора закрыты;
3) открыт VT1, VT2 – закрыт;
4) VT2 открыт, VT1 – закрыт.

Особенность схемы в том, что первые два состояния являются неустойчивыми.

Предположим, что оба транзистора открыты и находятся в активном режиме. Ввиду симметрии схемы должны быть равны токи коллекторов и токи базы. Неизбежны малейшие флуктуации тока. Например, увеличится чуть-чуть ток коллектора VT1 – это повлечет за собой обязательное уменьшение напряжения на этом коллекторе,

а оно вызовет уменьшение базового тока транзистора VT2, что вызывает увеличение коллекторного напряжения транзистора VT2. В свою очередь это увеличение приведет к увеличению базового тока транзистора VT1, которое вызовет увеличение степени открытия VT1, т.е. дальнейшее уменьшение коллекторного напряжения и увеличение коллекторного тока транзистора VT1. Процесс носит лавинообразный характер и будет продолжаться до тех пор, пока не прекратится действие положительной обратной связи. Это произойдет, когда транзистор VT1 войдет в режим насыщения, а транзистор VT2 – в режим отсечки. Триггерная схема (триггер) окажется в устойчивом состоянии.

Совершенно аналогично будут проходить процессы, если начнет изменяться ток транзистора VT2. Параметры схемы могут быть подобраны так, что открытый транзистор насыщен, либо находится на границе активной области и не входит в режим насыщения. В первом случае триггер называется насыщенным, во втором – ненасыщенным.

В одном из устойчивых состояний триггер может находиться как угодно долго до момента, пока не поступит сигнал от внешнего источника управляющего напряжения. Управляющее напряжение можно вводить различными способами, например, через входные диоды VD1, VD2.

Пусть транзистор VT2 – закрыт, а VT1 – открыт. Подадим открывающий импульс в цепь базы транзистора VT2. Как только появится ток коллектора VT2, транзистор VT1 выйдет из насыщения, возникнет регенеративный процесс, приводящий к опрокидыванию триггера, т.е. транзистор VT2 откроется, VT1 закроется. Конденсаторы, показанные в схеме, не изменяя сути процесса, предназначены для ускорения этого процесса.

Чтобы перевести триггер в другое устойчивое состояние, нужно подать управляющий импульс теперь на базу другого транзистора (VT1), который находится в состоянии отсечки. Процесс пройдет аналогично. Если бы вместо этого мы подали открывающий импульс вновь на транзистор уже открытый, это не изменило бы состояния триггера.

Если подать открывающие импульсы на оба транзистора, они оба могут открыться, но после снятия импульса возникнет неопределенность, так как любой из транзисторов окажется в запертом состоянии. Следовательно, такая комбинация управляющих импульсов должна быть запрещена.

У рассматриваемого триггера два информационных входа и два выхода. Они имеют специфические названия: один из выходов называют прямым и обозначают буквой Q (quit – покидать, оставлять), другой – инверсным и обозначают $\overline{Q}$, т.е. сигнал противоположен первому. Состояние триггера чаще всего отождествляют с сигналом на прямом выходе. Считается, что триггер «установлен», если $Q = 1$, ($\overline{Q} = 0$), т.е. находится в единичном состоянии.

Триггер «сброшен», «погашен», т.е. находится в нулевом состоянии, если $Q = 0$, ($\overline{Q} = 1$). Когда управляющие входы (R и S) не активны (в данном случае R= 0, S = 0), триггер находится в режиме хранения. Различают три состояния триггера: установлен, сброшен, хранение. Вход, по которому триггер устанавливается в единичное состояние, обозначают входом S (set – установка). Вход, по которому триггер устанавливается в нулевое состояние, обозначают R (reset − возврат). В нашем случае, если мы обозначили Q и $\overline{Q}$ вход S будет на схеме слева, а вход R − справа.

13.2. RS-триггеры на логических элементах

Триггерную схему, рассмотренную выше, называют *RS-триггером*. Проще всего триггер можно построить на логических элементах, соединяя их по кольцевой схеме так, что вход одного логического элемента является выходом второго, как показано на рис. 13.2.

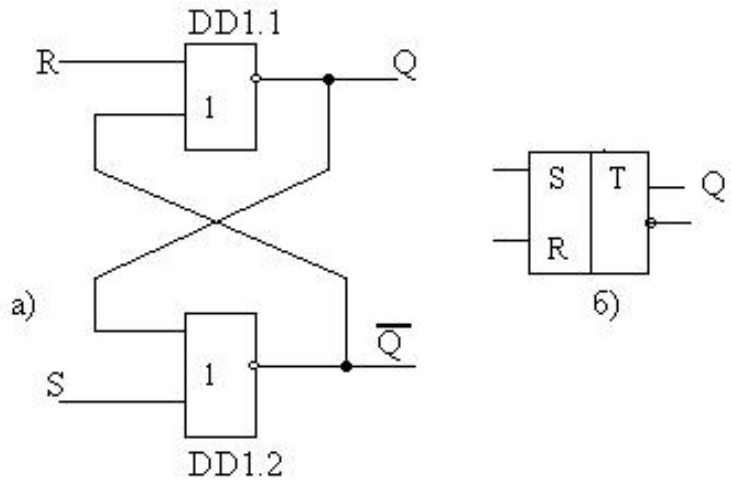


Рис. 13.2. RS-триггер на элементах ИЛИ-НЕ:
а – структурная схема, *б* – условное графическое обозначение (УГО)

Предположим, что $Q = 1$, $R = 0$, $S = 0$, тогда на входах DD1.2 есть сигналы $Q = 1$, $S = 0$, на выходе будет $\overline{Q} = 0$; на входах DD1.1 будут $R = 0$, $\overline{Q} = 0$, на выходе $Q = 1$, т.е. такое состояние будет устойчивым и поддерживать само себя.

Подадим на вход сигнал $R = 1$, тогда на выходе микросхемы DD1.1 получим $\overline{Q} = 0$, на входе DD1.2 будем иметь Q=0, S=0 − на выходе $\overline{Q}$=1, этот сигнал поступит на вход DD1, будем на входе иметь R=1, $\overline{Q}$=1, на выходе Q=0, т.е. подтверждаем новое состояние. Если теперь сделать R=0, положение не изменится: на выходе DD1.1 Q=0, на выходе DD1.2 $\overline{Q}$=1, т.е. триггер принял состояние «сброшен». Рассуждая аналогично, придем к выводу, что при подаче на вход сигнала S=1 триггер установится в состояние «1». Последовательность изменения состояний на выходах триггера после подачи сигналов управления на его входы можно показать на диаграммах сигналов.

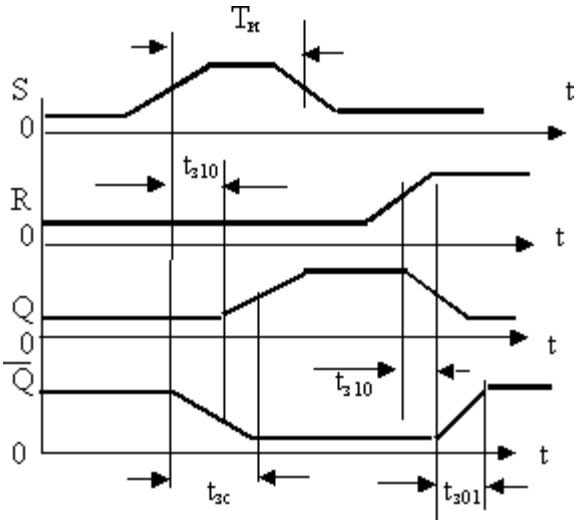


Рис. 13.3. Диаграммы сигналов RS-триггера

На рис. 13.3 обозначено:

$t_{з10}$ – время задержки переключения логического элемента DD1.2 из «1» в «0» под действием сигнала S, либо переключения логического элемента DD1.1 под действием сигнала R;

$t_{з01}$ – время задержки переключения логического элемента DD1.1 из «0» в «1» под действием сигнала R;

$t_{зс}$ – среднее время перехода сигнала на выходе триггера из одного состояния в другое.

Условно считается, что действие переключающего сигнала по изменению состояния других сигналов начинается с момента достиже-

ния этим сигналом половины своего уровня. Анализируя при этих условиях диаграммы сигналов, изображенные на рис. 13.3, можно сделать следующие выводы:

1. Для надежного переключения триггера входными сигналами минимальная длительность импульса $T_и$ должна выбираться из условия:

$$T_и = 2\ t_{зс}.$$

2. Учитывая разброс средних значений времени задержки и появления сигналов на входах, для предотвращения сбоев, т.е. нарушения порядка переключения, следует обеспечивать паузу между фронтами и срезами управляющих сигналов. С этой целью для триггера должно быть определено «разрешающее» время – минимальный интервал времени между моментами посылок входных импульсов:

$$T_р = 3\ t_{зс}.$$

3. Максимальная частота переключения может быть определена как величина обратная разрешающему времени:

$f_{мах} = 1/\ T_р = 1/\ 3t_{зс}$, (если $t_{зс}$ измерять в мкс, то $f_{мах}$ – в МГц).

Состояние триггера обычно отражают в таблицах состояния. Для RS-триггера на логических элементах ИЛИ-НЕ эта таблица будет выглядеть так, как показано в табл. 13.1, где t, $(t+1)$ – дискретные моменты времени до и после воздействия входных сигналов; Q^n, Q^{n+1} – состояния до переключения и после него; X – неопределенное состояние. В табл. 13.1 видно, что при наличии или подаче «0» на входы R и S на выходе будет сохраняться предыдущее значение Q^n.

Таблица 13.1

Таблица состояний RS-триггера

t		t+1
R	S	Q^{n+1}
0	0	Q^n
0	0	1
1	1	0
1	1	X

Часто можно встретить в литературе упрощенные временные диаграммы, в которых не показывают наклоны фронтов и спадов сигналов. Такие диаграммы можно использовать для определения общей картины, но для подробного анализа они мало пригодны (рис. 13.4).

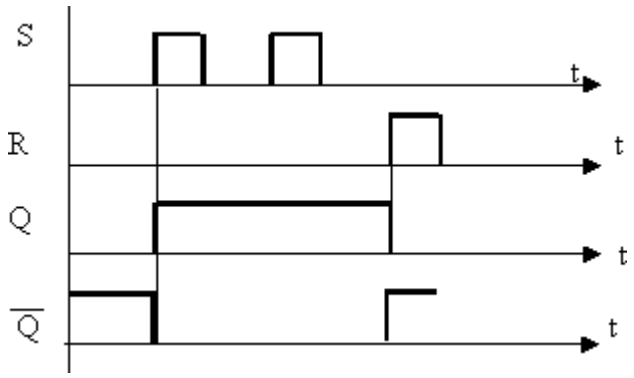


Рис. 13.4. Упрощенные временные диаграммы сигналов RS-триггера

RS-триггер может быть построен не только на логических элементах ИЛИ-НЕ, но и на элементах И-НЕ (рис. 13.5), причём управление таким триггером осуществляется логическим сигналом низкого уровня.

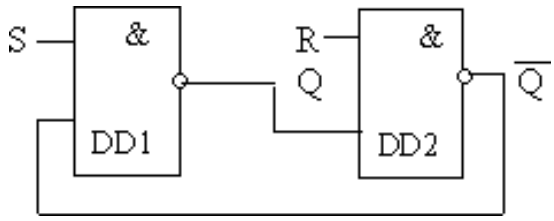


Рис. 13.5. Структурная схема RS-триггера на логических элементах И-НЕ

Состояния триггера при различных сочетаниях входных сигналов показаны в табл. 13.2. Анализ структурной схемы и таблицы показывает, что «активным», т.е. изменяющим состояние триггера логическим уровнем в рассматриваемом триггере является уровень «0».

Таблица 13.2

Таблица состояний RS-триггера на логических элементах И-НЕ

t		t+1
R	S	Q^{n+1}
1	1	Q^n
1	0	1
0	1	0
0	0	X

Упрощенные диаграммы сигналов будут выглядеть следующим образом (рис. 13.6):

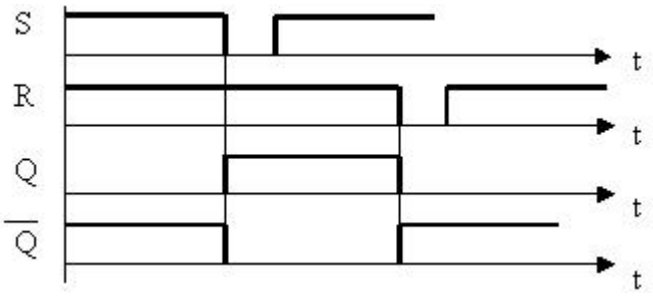


Рис. 13.6. Диаграммы сигналов RS-триггера на элементах И-НЕ

Триггеры являются схемной реализацией элементарных *цифровых автоматов*, т.е. устройств, которые можно описать с помощью конечных множеств входных сигналов x (t) (входного алфавита), выходных сигналов Υ(t) (выходного алфавита), функций переходов F_n, конечного множества внутренних состояний q(t) и функций выходов $F_{вых}$ [19]. При этом используется понятие дискретного времени t, $(t + 1)$, $(t – 1)$ и т.д., т.е. моменты текущий, последующий и предыдущий (подробнее см. п. 13.7). Если текущее состояние Q (t) , то $Q(t+1) = F_n$ $[Q$ $(t$ $), x(t)]$, $\Upsilon(t) = F_{вых}$ $[Q(t), x(t)]$, где: $x(t)$ – входной сигнал; $\Upsilon(t)$ – выходной сигнал.

Например, анализируя таблицы состояний рассмотренных ранее триггеров, можно записать их функции переходов:

– RS-триггер на элементах ИЛИ-НЕ: $Q(t+1) = S(t) + Q(t)$ $R(t)$; $RS= 0$.

– RS-триггер на элементах И-НЕ: $Q(t+1) = S\overline{(t)} + Q(t)$ $R(t)$;

$R+S = 1$.

Функциональное назначение RS-триггера – реализация задержки на такт или запоминание значения двоичной переменной.

Рассмотренные RS-триггеры являются *асинхронными*, т.е. такими, в которых переключения ЛЭ (логических элементов) происходят только как следствие изменения сигналов на входе. Физически после каждого переключения входного сигнала имеет место переходный процесс, состоящий в переключении связанных между собой ЛЭ, и этот процесс заканчивается переходом триггера в новое состояние, сохраняющееся до нового переключения. Поэтому можно условно принять временной интервал между двумя соседними переключениями на входе, равный условной единице (t = 1). Тогда к началу каждо-

го переключения условное (дискретное) время принимает целочисленные значения, для которых состояние триггера можно предсказать, так как к моменту нового переключения переходный процесс предыдущего переключения уже завершен. Этим объясняется форма записи функций переходов триггера.

Асинхронные RS-триггеры используются и как самостоятельные изделия, но чаще всего в составе более сложных триггерных схем.

Помимо асинхронных RS-триггеров очень часто используются *тактируемые (синхронизированные)* RS-триггеры. Тактируемые триггеры имеют на входе ЛЭ, входы которых соединены так, чтобы образовать вход С-*тактовый вход* (рис. 13.7).

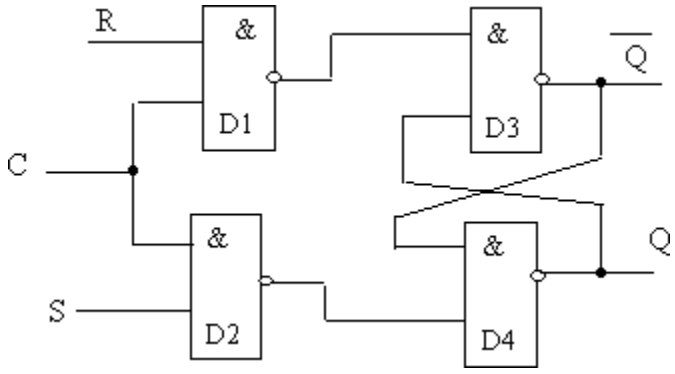


Рис. 13.7. Структурная схема тактируемого уровнем сигнала RS-триггера

Пусть S =1, C=1, R = 0, тогда должно быть. Q = 1, ($\overline{Q}$=0), так как асинхронный триггер D3, D4 устанавливается в 1 сигналом 0.

Тактируемые RS-триггеры при наличии тактового импульса действуют как асинхронные, поэтому смена сигналов на информационных входах должна происходить только в паузах между тактовыми импульсами, иначе возникнут нарушения в работе – сбои. Как отмечалось ранее, для RS-триггера есть сочетание входных сигналов, после снятия которых триггер может принять любое из двух состояний, причем это состояние заранее не определено.

13.3. Разновидности RS-триггеров

Подключая к входам RS-триггера схему управления из ЛЭ, включенных определенным образом, можно обеспечить такое положение, что при всех комбинациях входных сигналов сигналы на вы-

ходе будут иметь заведомо известные состояния. В литературе можно встретить S-триггеры, R-триггеры, E-триггеры, как разновидности RS-триггеров. S-триггер принимает единичное состояние при запрещенной для RS-триггера комбинации; R-триггер принимает нулевое состояние; E-триггер принимает состояние, в котором он был до подачи запрещенной комбинации. Триггер, меняющий свое состояние на противоположное после действия запрещенной для RS-триггера комбинации, относится к JK-триггерам, причем вход J соответствует входу S, а вход K – входу R. Каждый из этих триггеров может быть асинхронным либо тактируемым. Кроме того они могут быть с прямым, либо с инверсным управлением, тогда их можно обозначить как $\overline{S}$-триггер, $\overline{R}$ -триггер, $\overline{E}$ -триггер, $\overline{JK}$ -триггер. Сводная таблица асинхронных RS-триггеров (табл. 13.3) и структурные схемы E и R-триггеров (рис. 13.8) представлены ниже (прямое управление триггерами).

Таблица 13.3

Сводная таблица RS-триггеров

Такт n		Такт (n+1)			
S	R	Тип триггера			
(J)	(K)	S-триггер	R-триггер	E-триггер	JK-триггер
0	0	Q_n	Q_n	Q_n	Q_n
0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	Q_n	Q_n

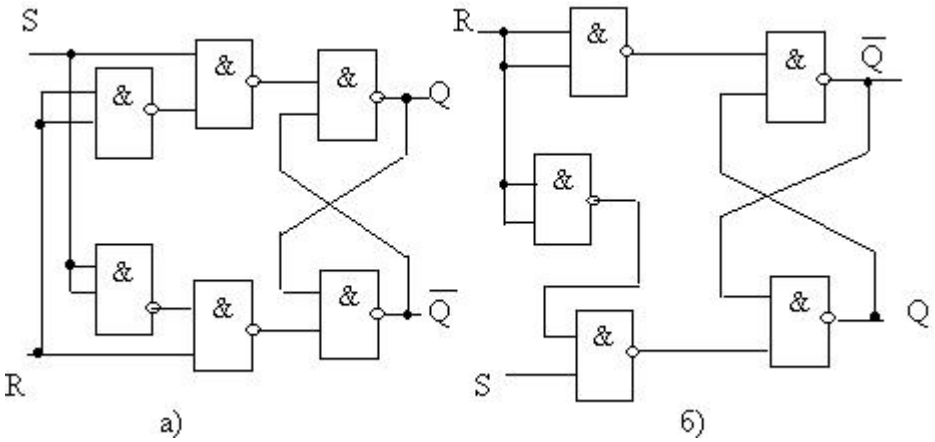


Рис. 13.8. Структурные схемы E-триггера (а), R-триггера (б)

Двухступенчатый RS-триггер (MS-триггер). MS-триггер состоит из двух последовательно включенных синхронных RS-триггеров. Один из триггеров называют M-триггер (master − хозяин), другой S-триггер (slave − раб) (рис. 13.9).

Благодаря общему синхросигналу C вся схема функционирует как единое целое и называется двухступенчатым или MS-триггером (flip-flop). В этом триггере при C = 1 разрешается действие M-схемы: она действует как синхронизируемый RS-триггер, однако $\overline{C}$ обеспечивает режим хранения на выходах Q_s, $\overline{Q_S}$.

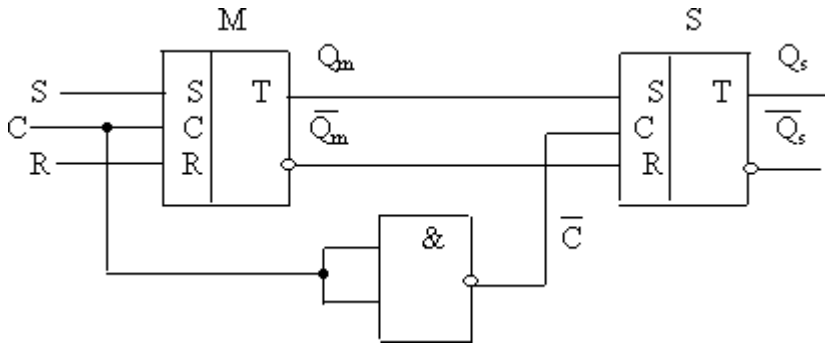


Рис. 13.9. Структурная схема MS-триггера

При C = 0 обеспечивается режим хранения на выходах Q_m, $\overline{Q_m}$, а вторая ступень действует как синхронизируемый RS-триггер, так как C = 1 и на выходах Q_s, $\overline{Q_S}$ будут устанавливаться значения, соответствующие предыдущему состоянию Q_m, $\overline{Q_m}$. Работу MS-триггера можно показать с помощью упрощенных временных диаграмм сигналов (рис. 13.10).

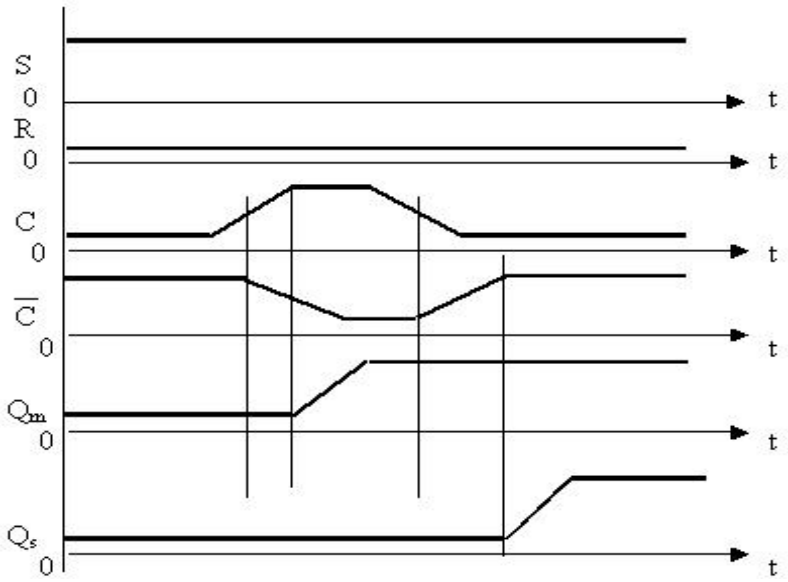


Рис. 13.10. Временные диаграммы сигналов двухступенчатого RS-триггера

На входах R и S уровни сигналов должны быть установлены заранее, а управление делается сигналом С. Анализ диаграмм (рис. 13.10) показывает, что информация, поступившая на входы R и S принимается в М-триггер, когда сигнал С изменится от 0 к 1 (по фронту). Но пока С = 1, эта информация не приходит в S-триггер, так как инверсией $\overline{C} = 0$ закрыты входные конъюнкторы S-схемы. Эти коньюнкторы откроются лишь тогда, когда сигнал $\overline{C} = 0$ изменится от 0 к 1, т.е. по спаду синхронного сигнала С. Только после этого информация с выхода Q_m попадет на выход Q_s, т.е. триггер меняет свое состояние по срезу С-сигнала.

Срезу С-сигнала должен предшествовать интервал подготовки, в течение которого входные сигналы на входах R и S не должны меняться. Иначе, если срез С-сигнала наложится на процесс переключения М-схемы, правильную работу гарантировать нельзя. Так как входные коньюнкторы закрываются срезом синхроимпульса, то они не пропустят никаких изменений входного сигнала после этого, т.е. управляющие сигналы можно обновлять тоже по срезу (сразу после него) синхроимпульса. Рассмотренный принцип построения двухступенчатого триггера лежит в основе принципа динамического управления триггером, при котором существенно повышается помехоустойчивость триггерной системы.

Действие рассмотренных триггеров аналитически описывается так называемыми уравнениями состояний, в которых показано, под действием каких сочетаний входных логических сигналов триггер изменяет состояние на выходе. Для несинхронизируемых триггеров эти уравнения показаны ниже:

RS-триггер: $Q(t+1) = \underline{S}(t) + Q(t)\,\overline{R}(t)$, RS=0;

RS-триггер: $Q(t+1) = S(t) \pm Q(t)\,\underline{R}(t)$, R + S =1;

IK-триггер: $Q(t+1) = I(t)\,Q(t) + K(t)\,Q(t)$.

Рассмотрев основные принципы построения триггеров можем сделать классификацию триггеров. Триггеры классифицируют по способу записи информации и функциональному признаку. По способу записи различают *тактируемые* (синхронизируемые) и *асинхронные* (несинхронизируемые) триггеры. У асинхронного триггера изменение его состояния происходит непосредственно с приходом управляющего сигнала. В синхронизируемых триггерах кроме информационных входов имеются так называемые *входы синхронизации (тактовые входы).* Изменение состояния тактируемого триггера при наличии на входах информационных сигналов может произойти

только после подачи на тактовые входы соответствующих разрешающих сигналов. Причем разрешающий сигнал может быть подан либо в виде потенциала (статическое управление), либо в виде перепада (динамическое управление). Классификация триггеров по функциональному признаку представлена на рис. 13.11:

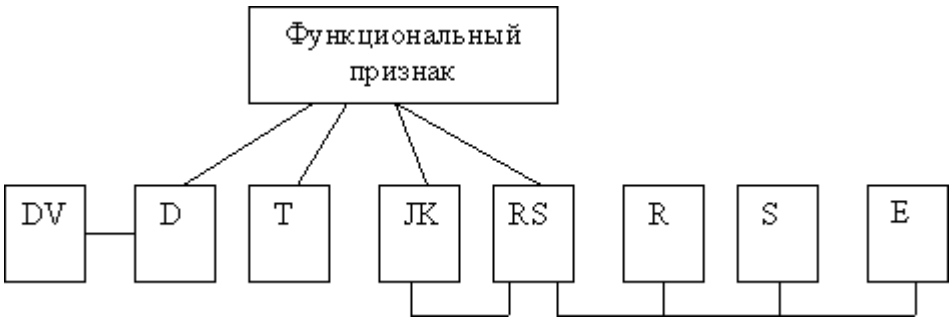


Рис. 13.11. Классификация триггеров

Основой классификации по функциональному признаку является способ организации логических связей между входами и выходами в определенные (дискретные) моменты времени (t, t+1, t – 1). Название триггера отражает особенности его управления и характеризует вид логического уравнения (уравнение состояния), описывающего его функционирование при подаче соответствующих сигналов.

Ввиду разнообразия различных видов триггеров общеприняты обозначения входов и выходов триггеров, которые применяются в основных видах УГО (условных графических обозначений). Ранее было отмечено, что состояние триггера отождествляют с сигналом на его прямом выходе: триггер находится в единичном состоянии (установлен) при $Q = 1$ ($\overline{Q} = 0$) и в нулевом состоянии («сброшен»), если $Q = 0$ ($Q = 1$). Входы имеют следующие обозначения:

S − вход для раздельной установки триггера в состояние 1;

R − вход для раздельной установки триггера в состояние 0;

J − вход для установки триггера в состояние 1;

K − вход для сброса этого триггера;

T − счетный вход;

D − информационный вход для установки или сброса триггера;

C − тактовый вход;

E − дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации (ранее был V-вход согласно ГОСТ2743-72, отсюда остались названия DV, TV-триггеры).

Срабатывание по фронту либо по спаду импульса отмечается знаками:

− срабатывание по фронту (перепаду от 0 к 1, ⊣/);

− срабатывание по спаду (перепаду от 1 к 0, ⊣\).

Если триггер управляется инверсным сигналом (логическим нулем), то это показывается кружком, располагаемым на конце входного вывода.

Если требуется указать инверсный выход, то кружок ставят в начале выходного вывода: вход − ⊸⊣ , ⊢⊸ − выход.

Выходы всегда указываются с правой стороны прямоугольника, изображающего триггер (рис. 13.12).

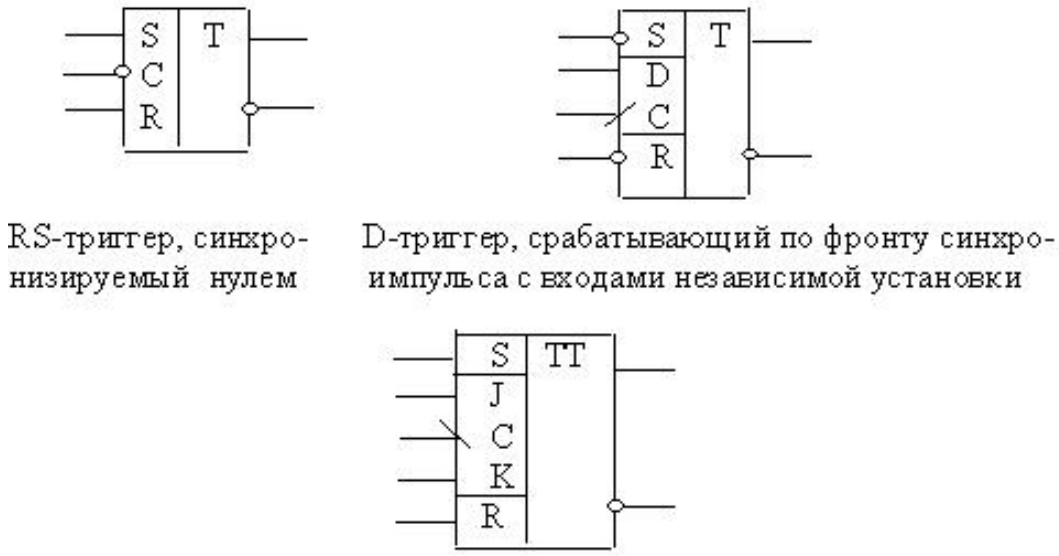


Рис. 13.12. Примеры УГО триггеров

13.4. JK-триггеры

JK-триггер носит название универсального триггера, так как используется во многих устройствах (регистры, счетчики, делители частоты и т.п.) чаще других за счет того, что легко преобразуется в триггеры других видов.

JK-триггер с потенциальным (статическим) управлением может быть построен на базе RS-триггера (рис. 13.13) путем введения дополнительных элементов и цепей обратной связи.

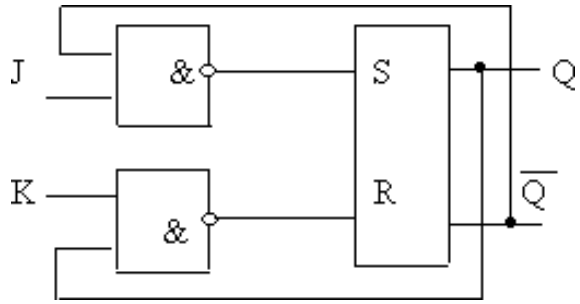


Рис. 13.13. Структурная схема JK-триггера
со статическим управлением

Функция переходов (уравнение состояния) имеет вид:

$$Q(t+1) = J(t)\,Q(t) + K(t)\,Q(t).$$

JK-триггеры обычно выполняются синхронными и двухступенчатыми, что расширяет их возможности и повышает помехоустойчивость. Логическая структура двухступенчатого JK-триггера представлена на рис. 13.14. Эта структура отличается от рассмотренной ранее двухступенчатой структуры RS-триггера наличием обратных связей с выхода на вход.

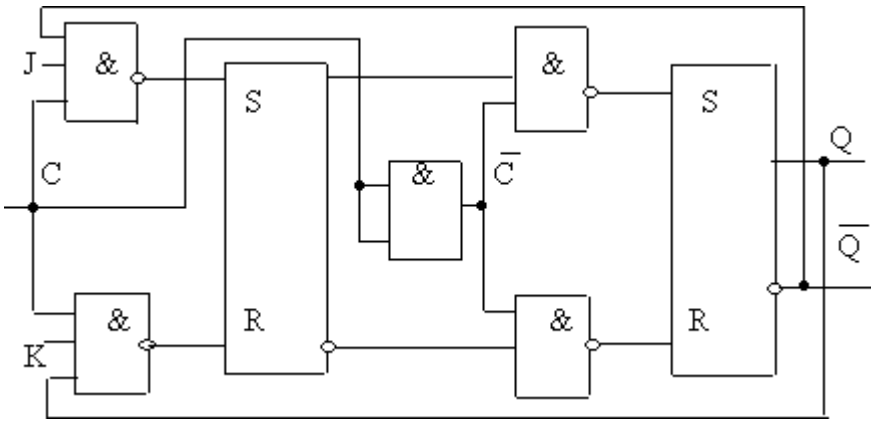


Рис. 13.14. Структурная схема двухступенчатого JK-триггера,
срабатывающего по спаду синхроимпульса

Можно видеть, что схема отличается от MS-триггера наличием цепей обратной связи и трехвходовыми элементами И в первой ступени (в М-схеме). При любом состоянии триггера сигналы обратной связи открывают для С-сигнала (при J = K = 1) именно тот конъюнктор, пройдя через который С-сигнал переведет триггер в противоположное состояние. Данные о функционировании JK-триггера приведены в табл. 13.4.

Таблица 13.4

Таблица функционирования JK-триггера

C	J	K	Q (t+1)	Режим
X	0	0	Q(t)	Хранение
↓	0	1	0	Сброс
↓	1	0	1	Установка
↓	1	1	Q(t)	Счетный

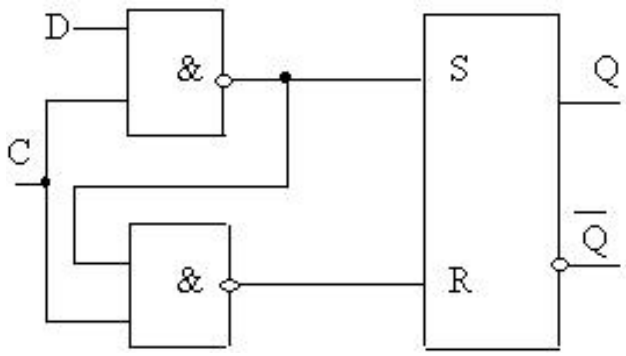
Главное условие правильной работы остается прежним: во время изменения синхросигнала не должны меняться сигналы на информационных входах J, K.

13.5. D-триггер и T-триггер

D-триггер. D-триггер имеет один информационный вход; сигнал на выходе D-триггера повторяет сигнал на входе D, существовавший в предыдущем такте, т.е. D-триггер «запоминает» этот сигнал до следующего такта. Функция переходов имеет вид:

$$Q\ (t+1) = D(t).$$

Можно сказать, что D-триггер задерживает на один такт информацию, существовавшую на входе D. D-триггеры выполняются тактируемыми. Логическая структура D-триггера со статическим управлением, построенного на базе RS-триггера с тактированием потенциалом (уровнем) синхронизирующего сигнала, представлена на рис. 13.15.



C	D(t)	Q(t+1)
0	0	Q(t)
0	1	Q(t)
1	0	0
1	1	1

Рис. 13.15. Структурная схема и таблица функционирования D-триггера с потенциальным управлением

Принцип действия рассматриваемого D-триггера поясняется диаграммами сигналов, приведенными на рис. 13.16.

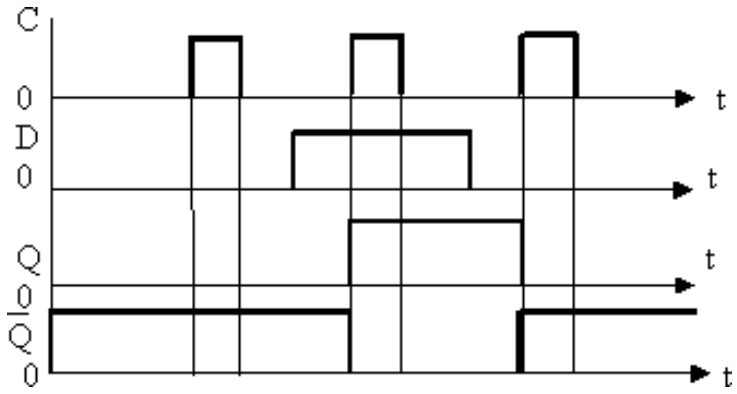


Рис. 13.16. Диаграммы сигналов D-триггера

Из диаграмм видно, что D-триггер осуществляет «задержку» появления, (исчезновения) импульса на выходе на промежутки времени между фронтом импульса и фронтом (спадом) сигнала на D-входе.

D-триггер, как и любой другой, может быть построен не только на элементах И-НЕ, но и на других: ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ-НЕ. При этом удается совместить функции триггерной ячейки и комбинационной логической схемы. Примером может служить DV-триггер на элементах И-ИЛИ-НЕ (рис. 13.17).

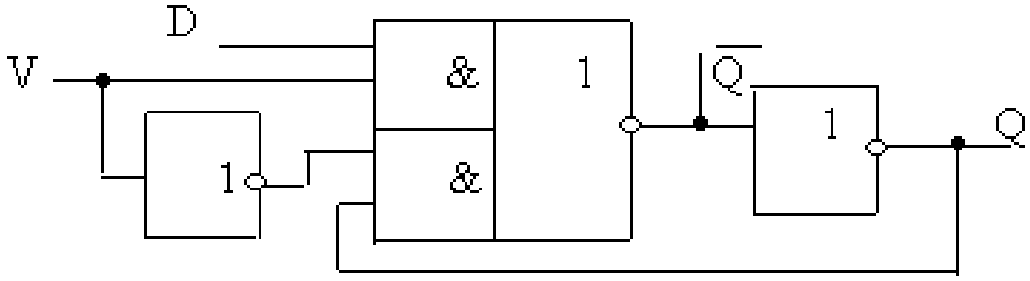


Рис. 13.17. Структурная схема DV-триггера

Характеристическое уравнение для DV-триггера имеет вид:

$$Q(t+1) = V(t)\,D(t) + \overline{V(t)}\,Q(t).$$

DV-триггер позволяет получить: при $V = 1$ $Q(t+1) = D(t)$;
при $V = 0$ $Q(t+1) = Q(t)$.

Лучшими функциональными характеристиками обладает D-триггер с динамическим управлением, так называемый шестиэлементный триггер (триггер Вебба) (рис. 13.18) [22].

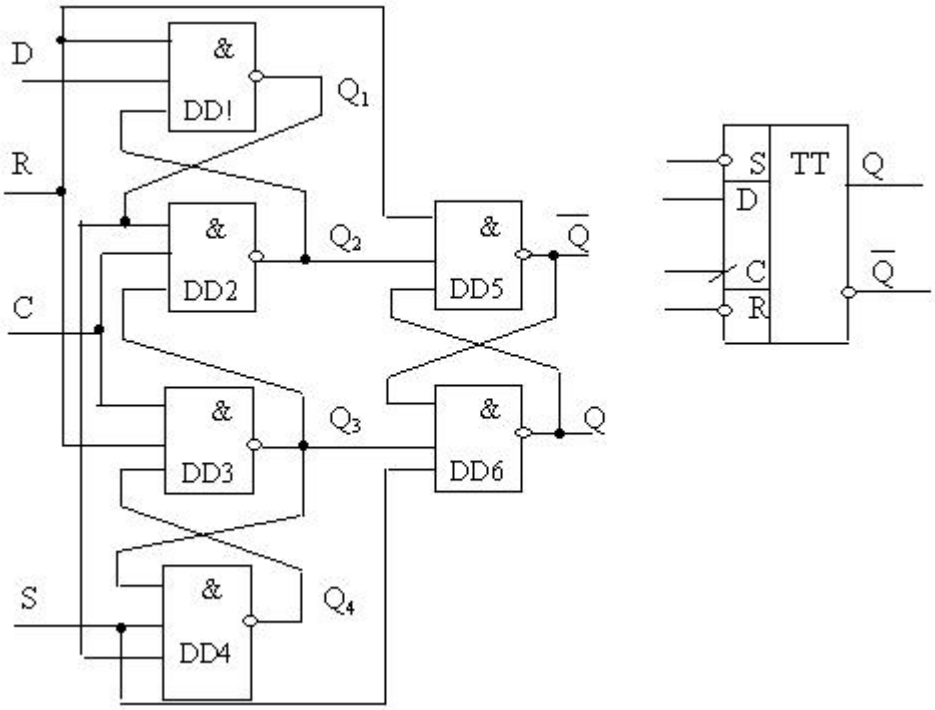


Рис. 13.18. Структурная схема и УГО шестиэлементного D-триггера

В структуре (рис. 13.18) имеются шесть элементов И-НЕ, образующих попарно три элементарных триггера. Дополнительные входы асинхронного управления R, S действуют независимо от D-входа и служат для асинхронной установки или сброса триггера.

Если C=0, на выходе $Q_2 = Q_3 = 1$ и триггер DD5, DD6 находится в режиме хранения Q =Q(t). Состояние элементов DD1 и DD4 определяется сигналами D(t): если D = 0, то $Q_1 = 1$, $Q_4 = Q_3 \cdot Q_1 = 0$; если D = 1, то $Q_1 = Q_2 \cdot D = 0$, $Q_4 = 1$.

Если C = 0, а сигнал на входе D изменится, то это отразится лишь на состоянии Q_1, Q_4, но на выходах схемы это не отразится.

С приходом сигнала C =1 (при изменении от 0 до 1) возникает такая комбинация сигналов Q_2, Q_3, которая приводит выходную триггерную ячейку в состояние, которое было на входе D(t). УГО триггера отражает тот факт, что «активным» уровнем для входов R, S является низкий логический уровень входного сигнала.

Режимы работы триггера отражены в таблице состояний (табл. 13.5).

D-триггеры очень часто используются в различных схемах: регистрах, счетчиках. Это объясняется тем, что D-триггеры позволяют построить схемы с малой вероятностью ложных срабатываний.

Таблица 13.5

Таблица состояний шестиэлементного D-триггера

Операция	Вход				Выход	Режим
	S	R	C	D(t)	Q(t+1)	
Загрузка 0 Загрузка 1	1 1	1 1	↑	0 1	0 1	Синхронный
Хранение Хранение Хранение	1 1 1	1 1 1	↓ 0 1	X X X	Q(t) Q(t) Q(t)	Хранение
Установка 1 Установка 0	0 1	1 0	X X	X X	1 0	Асинхронный

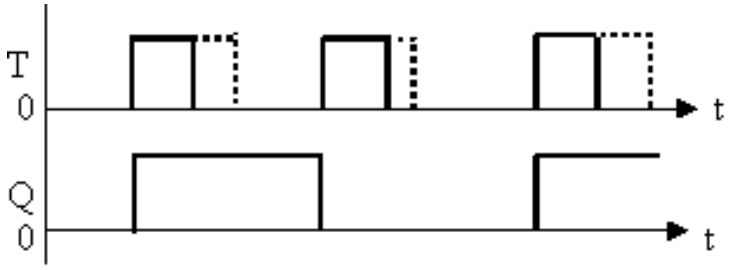
Т-триггер. Т-триггер − это логическая схема с двумя устойчивыми состояниями и одним информационным входом, изменяющая свое состояние на противоположное всякий раз, когда на вход Т поступает управляющий сигнал.

Т-триггер – единственный вид триггера, состояние которого в текущий период определяется собственным состоянием в предыдущем периоде. Самостоятельных Т-триггеров не выпускают. Основной способ построения Т-триггеров – введение соответствующих обратных связей в тактируемых – RS, JK, D-триггерах.

Т-триггер называют также *счетным триггером* (триггером со счетным входом). Его применяют в основном для счета входных импульсов и деления частоты этих импульсов. Применение Т-триггеров в счетчиках обусловлено тем, что каждому входному импульсу соответствует одно срабатывание, т.е. число срабатываний триггера соответствует числу импульсов.

Деление частоты Т-триггером следует из принципа его действия. Каждому периоду изменения входного сигнала соответствует половина периода на выходе (двум периодам соответствует один), т.е. частота выходного сигнала оказывается в два раза ниже частоты входного. Импульсы на выходе Т-триггера имеют равные длительность паузы и ширину импульса независимо от скважности входного

периодического сигнала. Последовательность таких импульсов называют *меандром.* Диаграммы сигналов и таблица состояний Т-триггера показаны на рис. 13.19.



T(t)	Q(t+1)
0	Q(t)
1	$\overline{Q(t)}$

Рис. 13.19. Диаграммы сигналов и таблица состояний Т-триггера

Уравнение состояний (функция переходов) Т-триггера имеет вид:

$$Q(t+1) = \overline{T(t)} \cdot Q(t) + T(t) \cdot \overline{Q(t)} = T(t) \otimes Q(t),$$

где знак $\otimes$ обозначает функцию ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

Имея функцию переходов, можно определить способы получения Т-триггеров из других. Например, если в уравнении состояний JK-триггера положить J=K, то получим уравнение, идентичное уравнению Т-триггера. На практике это означает, что если соединить между собой входы J и K и подавать на них импульсы, JK-триггер будет выполнять функцию Т-триггера.

13.6. Несимметричные триггеры

Такие триггеры часто называют триггерами Шмитта [1]. По своим свойствам они существенно отличаются от симметричных триггеров, так как у них нет «памяти» о предыдущем состоянии.

Несимметричный триггер – это регенеративное устройство, имеющее гистерезисную передаточную характеристику, у которого выходной сигнал может принимать два значения.

Переход от одного уровня выходного напряжения к другому происходит скачкообразно при определенном значении входного сигнала – напряжении срабатывания $U_{сраб}$. Возвращение в исходное состояние происходит при другом уровне входного сигнала – напряжении отпускания $U_{отп}$ (рис. 13.20).

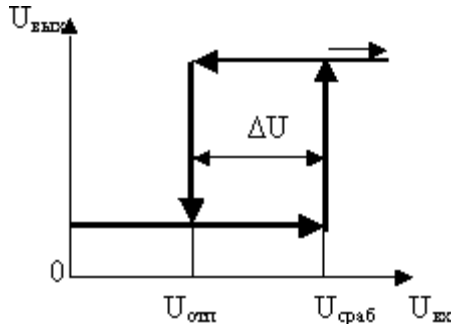


Рис. 13.20. Амплитудная характеристика триггера Шмитта

Характеристика имеет вид гистерезисной петли с шириной Δ*U*.

Триггер Шмитта используется для формирования резких перепадов напряжения из медленно меняющихся входных сигналов. Принцип действия триггера Шмитта поясняется схемой, составленной из дискретных элементов (рис. 13.21).

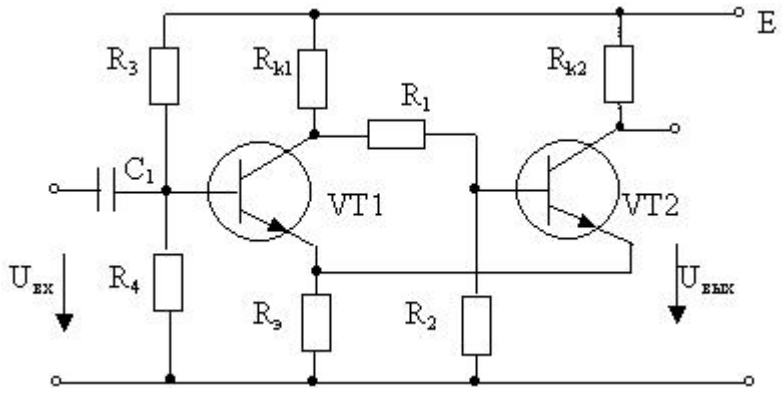


Рис. 13.21. Схема триггера Шмитта на биполярных транзисторах

Работа схемы происходит следующим образом.

Пусть транзистор VT2 открыт при Uвх = 0 и насыщен. Ток, протекающий в цепи E – $R_{к2}$ – $R_э$ создает падение напряжения на резисторе $R_э$, препятствующее открыванию транзистора VT1. При этом в исходном состоянии VT1 будет находиться в состоянии отсечки, если управляющее напряжение $U_{бэ1}$ меньше порогового напряжения открытия $U_{пор}$ для данного транзистора. При подаче входного напряжения VT1 открывается в тот момент, когда $U_{бэ1} = U_{пор}$, потенциал его коллектора понижается, следовательно понижается потенциал и ток базы VT2. Транзистор VT2 из режима насыщения начнет переходить в активный режим, т.е. ток через него понижается, что приводит к уменьшению падения напряжения на резисторе Rэ. Послед-

нее увеличивает ток через VT1 и еще более снижает потенциал его коллектора, что ведет к переходу его из активной области в режим насыщения. Процесс идет лавинообразно. В результате транзистор VT2 переходит в область отсечки, а транзистор VT1 – в область насыщения. Напряжение, при котором происходит переключение, называется напряжением срабатывания. Дальнейшее увеличение входного напряжения только увеличивает глубину насыщения транзистора VT1. Если уменьшить входное напряжение, то возврат схемы в исходное положение будет при меньшем входном напряжении. Схема представляет собой двухкаскадный усилитель, охваченный слабой положительной обратной связью. Параметры элементов схемы выбирают так, чтобы ток насыщения транзистора VT2 был больше тока насыщения транзистора VT1. Это условие выполняется, если

$$E/(R_{к2} + R_э) > E/(R_{к1} + R_э);\ R_{к1} > R_{к2}.$$

Различие в уровнях срабатывания и отпускания является необходимым условием работы схемы в триггерном режиме. Логические элементы со свойствами триггера Шмитта имеют внутреннюю ПОС, глубина которой подобрана так, чтобы получить передаточную характеристику со значительным гистерезисом. Триггеры Шмитта в интегральном исполнении широко используются во входных цепях электронных средств.

Триггер Шмитта на основе операционного усилителя (ОУ). Достоинство триггера Шмитта на основе ОУ – возможность получения заданных стабильных уровней напряжений срабатывания и отпускания и возможность регулирования ширины петли гистерезиса. Уровень входного сигнала срабатывания определяется опорным напряжением, которое можно регулировать в широких пределах. Одна из схем показана на рис. 13.22.

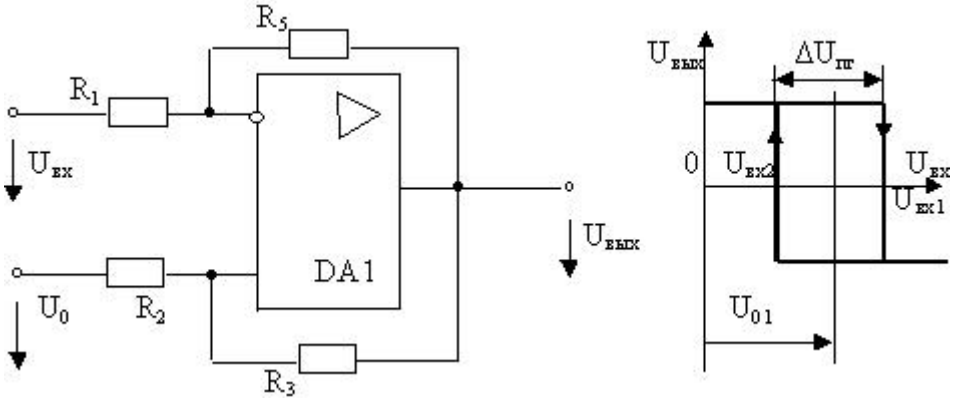


Рис. 13.22. Схема триггера Шмитта на основе ОУ и его амплитудная (выходная) характеристика

Триггер представляет собой ОУ, охваченный ПОС (положительной обратной связью) с помощью резисторов R_2 и R_3. Коэффициент ПОС:

$$\gamma = R_2 / (R_2 + R_3).$$

Известно, что усилитель, охваченный ПОС, переходит в генераторный режим или становится регенеративным устройством, если $K\gamma \geq 1$, где K – собственный коэффициент усиления ОУ.

Если $R_2 / (R_2 + R_3) > 1/K$, то устройство будет обладать регенеративными свойствами и выходная характеристика будет иметь вид релейной, т.е. имеет скачкообразный характер. Смещение центра петли гистерезиса:

$$U_{01} = U_0 \cdot R_3 / (R_2 + R_3).$$

Ширина петли гистерезиса $\Delta U_{пг} = (U^+_м + |U^-_м|) \cdot (\gamma - 1/K)$, где $U^+_м$ – максимальное положительное выходное напряжение ОУ; $|U^-_м|$ – модуль максимального отрицательного выходного напряжения ОУ.

13.7. Цифровые автоматы

В электронных системах и устройствах управления различными объектами широкое применение находят функциональные узлы, называемые цифровыми автоматами (ЦА) [2].

В общем случае цифровым автоматом называют цифровое устройство с памятью, предназначенное для преобразования входной цифровой информации в выходные сигналы управления различными объектами.

Поведение цифрового автомата определяется:

– множеством входных сигналов $X = (x_1, x_2, \ldots, x_l)$;

– множеством выходных сигналов $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$;

– множеством внутренних состояний $Z = (z_1, z_2, \ldots z_s)$;

– начальным состоянием $z_i^{(t=0)} \in Z$;

– функцией переходов $z^{(t+1)} = f(z^{(t)}; x^{(t)})$;

– функцией выходов: $y^{(t)} = \phi\,(z^{(t)}; x^{(t)})$ – для ЦА Мили;

$y^{(t)} = \phi\,(z^{(t)})$ – для ЦА Мура.

Разница между автоматами Мили и Мура состоит в разной форме зависимости функций выходов: в автоматах Мили функция выходов зависит от входных сигналов и внутреннего состояния, а в автоматах Мура функция выходов однозначно определяется его внутренним состоянием.

Функционирование ЦА может быть представлено в виде:

– словесного (текстового описания);

– таблиц переходов и выходов;

– графа функционирования.

Структурно ЦА может быть представлен в виде трех функциональных устройств (рис. 13.23).

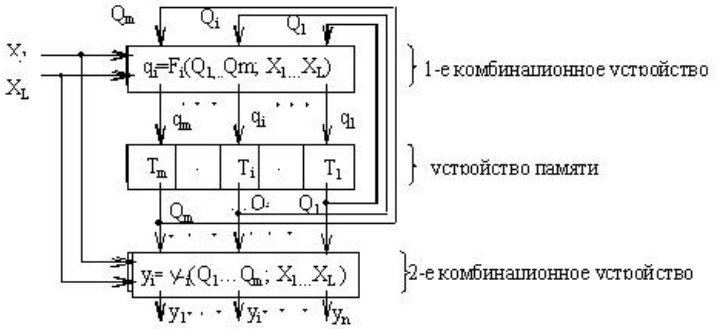
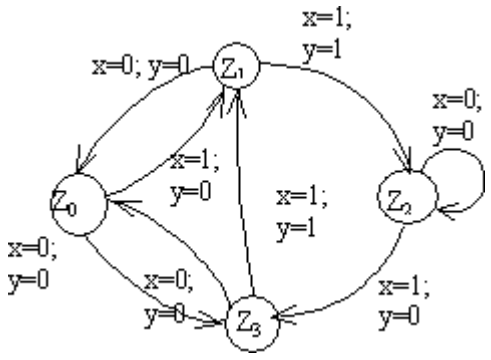


Рис. 13.23. Структурная схема ЦА Мили

Как следует из структурной схемы, первое комбинационное устройство формирует сигналы управления памятью, а второе комбинационное устройство вырабатывает выходные сигналы *Y*. ЦА содержит *m* триггеров, поэтому может иметь 2^m состояний, соответствующих *m*-разрядному двоичному слову. Разрядность *n* выходного слова *Y* может отличаться от значения *m*.

Синтез цифрового автомата. Выполнение этапов синтеза ЦА показано на примере гипотетического ЦА Мили, функционирование которого задано графом и таблицей переходов (выходов): (z)/(y) (рис. 13.24).



Входные сигналы	Состояния *ЦА*			
	z_0	z_1	z_2	Z_3
$x_1(x = 0)$	$z_3/0$	$z_0/0$	$z_2/0$	$z_0/0$
$x_2(x = 1)$	$z_1/0$	$z_2/1$	$z_3/0$	$z_1/1$

Рис. 13.24. Граф и таблица переходов ЦА

Этапы синтеза ЦА:

1. Определяем структуру памяти ЦА – число и тип триггеров. Число триггеров *m* зависит от числа состояний ЦА *S* и в данном примере равно $m=[\log_2 S]=[\log_2 4]=2$. В качестве триггеров выбираем JK-триггеры.

2. Производим кодирование S состояний ЦА состояниями JK-триггеров (табл. 13.7).

Таблица 13.7

Кодирование состояний ЦА

Состояние ЦА – Z	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3
Состояние триггера T_0 (Q_0)	0	1	0	*1*
Состояние триггера T_1 (Q_1)	*0*	*0*	*1*	*1*

3. Составляем таблицу функционирования ЦА, учитывающую функцию переходов $z^{(t+1)} = f(z^{(t)}; x^{(t)})$, функцию выходов $y^{(t)} = \phi\ (z^{(t)}; x^{(t)})$ и тип триггеров-JK (табл. 13.8).

Таблица 13.8

Таблица функционирования ЦА

Входной сигнал	Предыдущее состояние ЦА			Новое состояние ЦА			Сигналы управления триггерами				Выходной сигнал
x	$Z^{(t)}$	$Q_1^{(t)}$	$Q_0^{(t)}$	$Z^{(t+1)}$	$Q_1^{(t+1)}$	$Q_0^{(t+1)}$	J_1	K_1	J_0	K_0	$y^{(t)}$
0	Z_0	*0*	*0*	Z_3	*1*	*1*	*1*	*	*1*	*	*0*
0	Z_1	*0*	*1*	Z_0	*0*	*0*	*0*	*	*	*1*	*0*
0	Z_2	*1*	*0*	Z_2	*1*	*0*	*	*0*	*0*	*	*0*
0	Z_3	*1*	*1*	Z_0	*0*	*0*	*	*1*	*	*1*	*0*
1	Z_0	*0*	*0*	Z_1	*0*	*1*	*0*	*	*1*	*	*0*
1	Z_1	*0*	*1*	Z_2	*1*	*0*	*1*	*	*	*1*	*1*
1	Z_2	*1*	*0*	Z_3	*1*	*1*	*	*0*	*1*	*	*0*
1	Z_3	*1*	*1*	Z_1	*0*	*1*	*	*1*	*	*0*	*1*

4. Пользуясь данными таблицы функционирования с помощью карт Карно (рис. 13.25) определяем минимизированные ЛФ (логические функции) для построения схем комбинационных устройств, формирующих сигналы управления триггерами J_1, K_1, J_0, K_0 и выходной сигнал *Y*:

$$J_1 = \overline{x} \cdot \overline{Q_0} + x \cdot Q_0; \quad K_1 = Q_0;$$

$$J_0 = \overline{Q_1} + x; \qquad K_0 = \overline{Q_1} + \overline{x};$$

$$Y = Q_0 \cdot x.$$

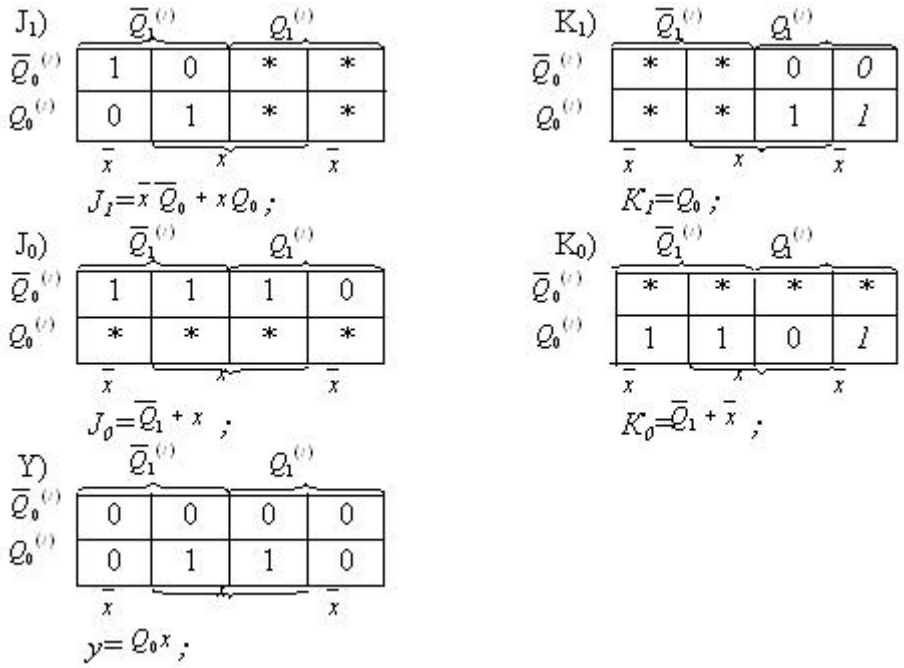


Рис. 13.25. Карты Карно и минимизированные логические функции для управляющих входов и выхода ЦА

5. На основании полученных ЛФ строим логическую схему ЦА (рис. 13.26).

Следует заметить, что схема синтезируемого ЦА может быть построена на триггерах любого типа, поэтому критерии выбора типа триггеров могут быть самыми разными, зависящими от конкретных условий. Можно, например, исходить из условия минимального количества логических элементов в комбинационной части ЦА и т.п.

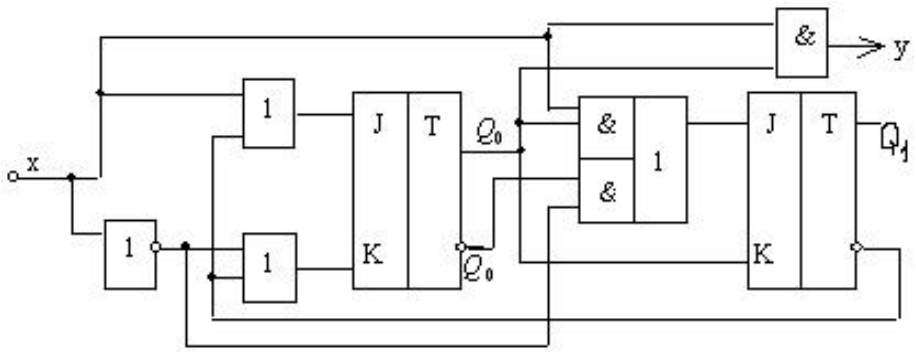


Рис. 13.26. Логическая схема синтезируемого ЦА

Пользуясь данными таблицы функционирования, получим, например, ЛФ для комбинационной части при реализации ЦА на D-триггерах, для чего составим карты Карно для сигналов управле- ния D-триггерами D_0 и D_1 (рис. 13.27).

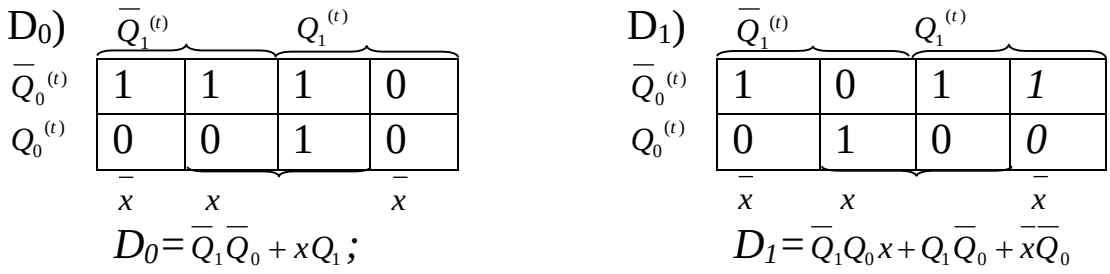


Рис. 13.27. Карты Карно и логические функции для D-входов ЦА

Подсчёт по полученным ЛФ сложности реализации логических схем управления триггерами даёт для реализации:

а) на JK-триггерах требуется шесть элементов на 13 входов;

б) на D-триггерах потребуется другое количество элементов.

На основании сравнения выбранных критериев сложности реализации синтезируемых схем можно, например, сделать вывод о предпочтительности выбора того или иного вида триггера или набора логических элементов.

14. РЕГИСТРЫ И СЧЁТЧИКИ

14.1. Общие сведения о регистрах

Регистр − это функциональный узел, предназначенный для записи, обработки и хранения цифровых слов. Над словами выполняются следующие операции: приём, выдача, хранение, сдвиг, поразрядные логические операции.

Главным классификационным признаком для регистров является способ приёма и выдачи данных. По этому признаку различают регистры *параллельные* (статические), *последовательные* (регистры сдвига) и *параллельно-последовательные* (универсальные). В параллельных регистрах приём и выдача слов производятся по всем разрядам одновременно. В последовательных регистрах слова принимаются и выдаются разряд за разрядом. Эти регистры называют *сдвигающими,* так как в них под действием тактирующих импульсов слова перемещаются в разрядной сетке с шагом в один разряд.

Параллельно-последовательные регистры имеют одновременно как последовательные так и параллельные входы и (или) выходы. Существуют варианты с возможностью любого сочетания способов приёма и выдачи слов.

Структурно любой регистр представляет собой несколько триггеров (по числу разрядов обрабатываемых слов), объединённых общими цепями тактирования (синхронизации), сброса и установки, разрешения приёма (записи) или выдачи (чтения) слов. Важнейшие характеристики регистров − *разрядность* и *быстродействие*. Разрядность определяется количеством триггеров для хранения слов, быстродействие характеризуется максимальной тактовой частотой, с которой может производиться запись, чтение или сдвиг информации. Для построения регистров используются D-триггеры, JK и RS-триггеры. Однако в современной схемотехнике, согласно [20], характерно построение регистров именно на D-триггерах, преимущественно с динамическим управлением. Достоинство регистров на D-триггерах состоит в существенном уменьшении числа соединений в узле, кроме того D-триггер повышает устойчивость регистра к помехам.

Пример структурной схемы статического (параллельного) регистра показан на рис. 14.1.

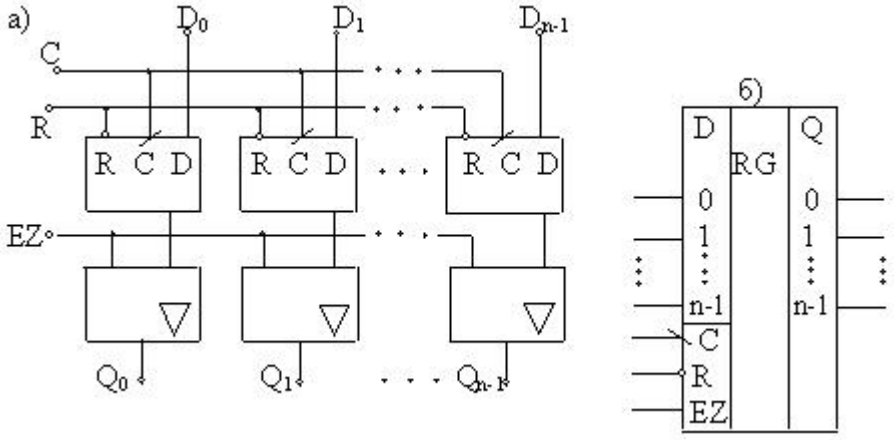


Рис. 14.1. Структурная схема (*а*) и условное изображение статического *n*-разрядного регистра (*б*)

В структурной схеме приняты следующие обозначения:

C − вход сигнала тактирования;

R − вход сигнала сброса («очистки») − установка логического нуля во всех разрядах выходного слова;

D_0…..D_{n-1} – *n*-разрядное слово, подаваемое на входы данных D;

EZ – вход разрешения третьего состояния на выходе;

Q_0…..Q_{n-1} − *n*-разрядное слово, образованное на выходах Q.

Режимы работы регистра (рис. 14.1) определяются совокупностью трех управляющих сигналов: «тактирование» – C, «сброс (очистка)» – R, «третье состояние на выходе» – EZ в соответствии с таблицей функционирования (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Таблица функционирования регистра

Режим работы	Управляющие сигналы			Выходные сигналы
	C	R	EZ	
Очистка	1	0	1	$Q_0 \bullet\bullet\bullet Q_{n-1}$
Запись	↓	1	1	$Q_0 \bullet\bullet\bullet Q_{n-1}$
Хранение	1	1	1	$Q_0 \bullet\bullet\bullet Q_{n-1}$
Чтение	↓	1	0	$D_0 \bullet\bullet\bullet D_{n-1}$

По принципу хранения информации регистры делят на *статические* и *динамические.* С этой точки зрения статические регистры – это регистры, которые строят на триггерах, способных хранить информацию сколь угодно долго (конечно, при наличии напряжения питания).

Динамические регистры строят на таких элементах памяти, как конденсатор, причем в качестве конденсатора обычно используется входная ёмкость МОП-транзистора. Подобный элемент памяти может хранить информацию лишь в течение небольшого промежутка времени (несколько мс), поэтому в динамических регистрах записанная информация требует постоянной *регенерации*.

Из статических регистров можно составить блоки, называемые регистровыми файлами. Регистровые файлы позволяют хранить несколько многоразрядных слов с возможностью независимой и одновременной записи одного слова и чтения другого. Схема управления регистровым файлом позволяет легко наращивать размерность регистровой памяти, составляя блоки памяти из нескольких микросхем. Пример схемы регистрового файла показан на рис. 14.2 [20].

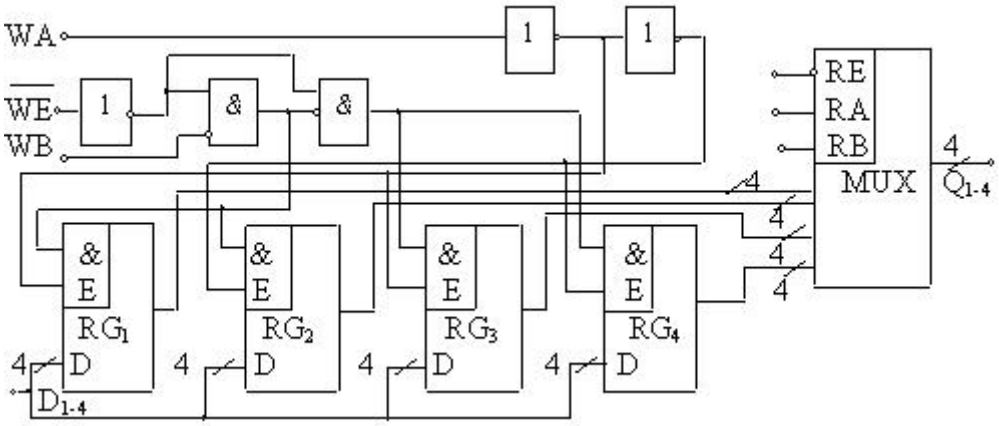


Рис. 14.2. Структурная схема четырёхразрядного регистрового файла

14.2. Сдвиговые регистры

Сдвиговый регистр – это устройство, состоящее из нескольких триггеров, соединенных между собой определенным образом и предназначенное для обработки и кратковременного хранения цифровой информации.

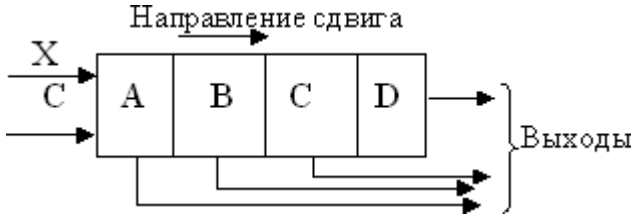


Рис. 14.3. Иллюстрация действия сдвигового регистра

Принцип действия сдвигового регистра можно представить следующим образом [5]. Пусть имеется, например, четыре триггерных ячейки, соединенных между собой последовательно (рис. 14.3). На вход первой ячейки будем подавать двоичную информацию X, считая, что триггеры тактируются тактовыми импульсами C. Символы A, B, C, D представляют триггеры регистра. Соединения внутри выполнены так, что после каждого тактового импульса каждый триггер фиксирует информацию предыдущего триггера.

Составим таблицу состояний на выходах триггеров при поступлении на вход X (рис. 14.3) двоичной информации. Примем для определенности, что до подачи тактовых импульсов исходное состояние триггеров было A=0, B=0, C=0, D=0 (табл. 14.2).

Таблица 14.2

Таблица состояний регистра

№ такта	X	A	B	C	D
-	-	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	1	1	0	1	0
4	1	1	1	0	1

Регистры сдвига могут быть построены на триггерах разного вида, но наиболее распространены регистры на JK и D-триггерах. Структурные схемы таких регистров показаны на рис. 14.4, 14.5.

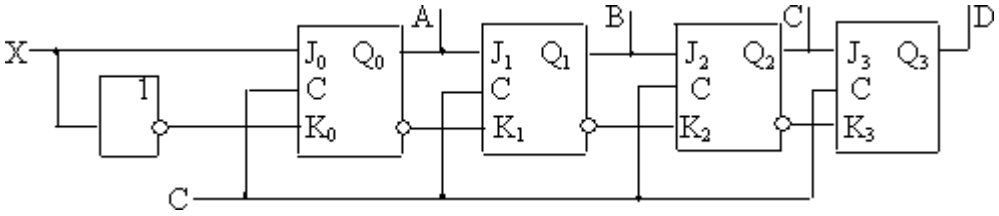


Рис. 14.4. Структурная схема сдвигового регистра на JK-триггерах

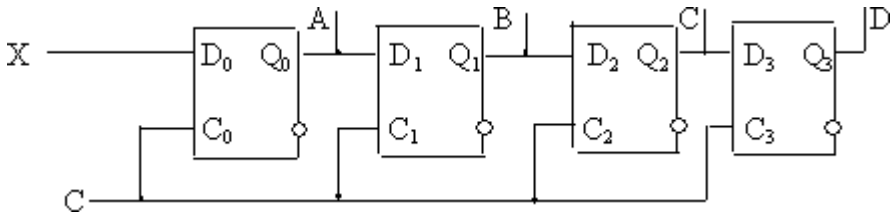


Рис. 14.5. Структурная схема сдвигового регистра на D-триггерах

В показанных схемах используется последовательный ввод и вывод информации. На практике часто используют комбинации видов ввода и вывода: последовательный ввод и параллельный вывод, параллельный ввод и последовательный вывод. Кроме этого сдвиговый регистр можно построить таким образом, что информацию, загруженную в него, возможно сдвигать в двух направлениях: либо вправо (в сторону младших разрядов сдвигаемого числа), либо влево (в сторону старших разрядов сдвигаемого числа). Такие сдвиговые регистры называют *реверсивными*. Все эти возможности обеспечиваются дополнительными логическими элементами, которые соединяются между собой и с триггерами таким образом, чтобы обеспечить необ-

ходимую структуру регистра как единого целого. Пример структурной схемы реверсивного сдвигового регистра показан на рис. 14.6.

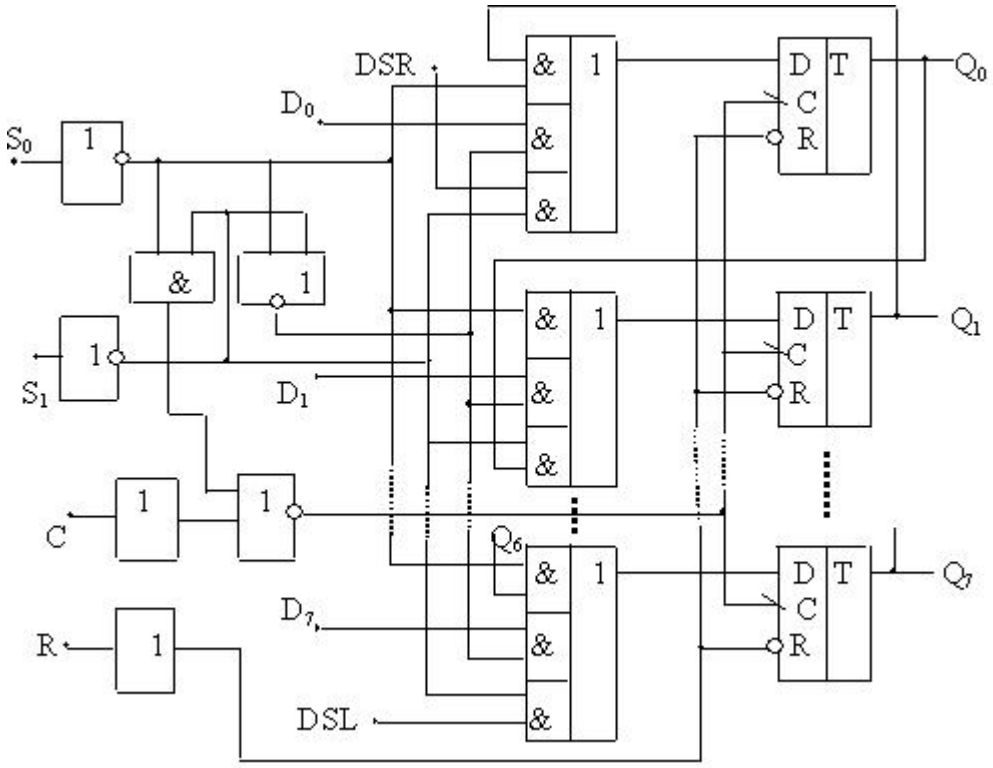


Рис. 14.6. Структурная схема универсального сдвигового регистра (регистр реверсивный, с параллельным выводом)

Условное графическое обозначение универсального регистра КР 1533 ИР13 показано на рис. 14.7.

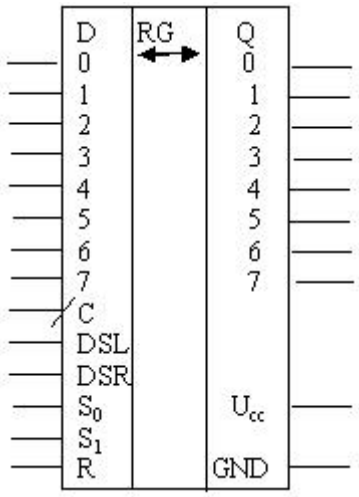


Рис. 14.7. Условное графическое обозначение регистра КР1533ИР13

Функциональные возможности регистра отражены в его таблице функционирования (табл. 14.3).

Таблица 14.3

Таблица функционирования реверсивного регистра

Режимы	Входы							Выходы				
	C	R	S_0	S_1	DSR	DSL	D_n	Q_0	Q_1	….	Q_6	Q_7
Сброс	x	0	x	x	x	x	x	0	0	….	0	0
Хранение	↑	1	0	0	x	x	x	Q_0	Q_1	….	Q_6	Q_7
Сдвиг влево	↑	1	1	0	x	0	x	Q_1	Q_2	….	Q_7	0
		1	1	0	x	1	x	Q_1	Q_2	….	Q_7	1
Сдвиг вправо	↑	1	0	1	0	x	x	0	Q_0	….	Q_5	Q_6
		1	0	1	1	x	x	1	Q_0	….	Q_5	Q_6
Параллельная загрузка	↑	1	1	1	x	x	D_n	D_0	D_1	….	D_5	D_6

14.3. Синхронные сдвиговые регистры с обратными связями

Обратные связи в сдвиговых регистрах осуществляют, соединяя выходы регистра с управляющими входами триггеров, образующих структуру регистра, с использованием дополнительных комбинационных схем.

В простейшем случае обратную связь образуют соединением выхода комбинационной схемы с первым каскадом сдвигового регистра, как показано на рис. 14.8, где обозначено: A, B, C….N − цепочка триггеров; ТИ − тактовые импульсы; F − логическая функция обратной связи.

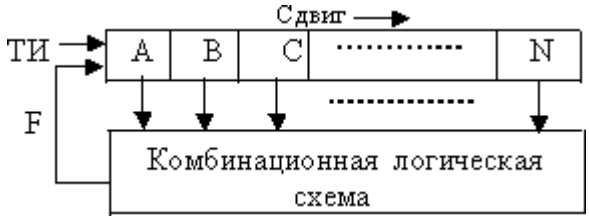


Рис. 14.8. Структурная схема организации обратной связи для сдвигового регистра

Принцип действия и возможности трехразрядного регистра сдвига с обратной связью и числом каскадов N=3 выясняются при построении его диаграммы состояний. Следует учесть, что трехразряд-

ное двоичное число может принимать восемь значений. Принцип построения диаграммы состоит в том, что необходимо назначить исходное состояние регистра, а следующее состояние будет зависеть от того, какое значение имеет функция обратной связи F. Если, например, исходное состояние ABC=000, а F=0, то состояние регистра не изменится; если F=1, то следующее состояние регистра будет ABC= 100 и т.д. (рис. 14.9).

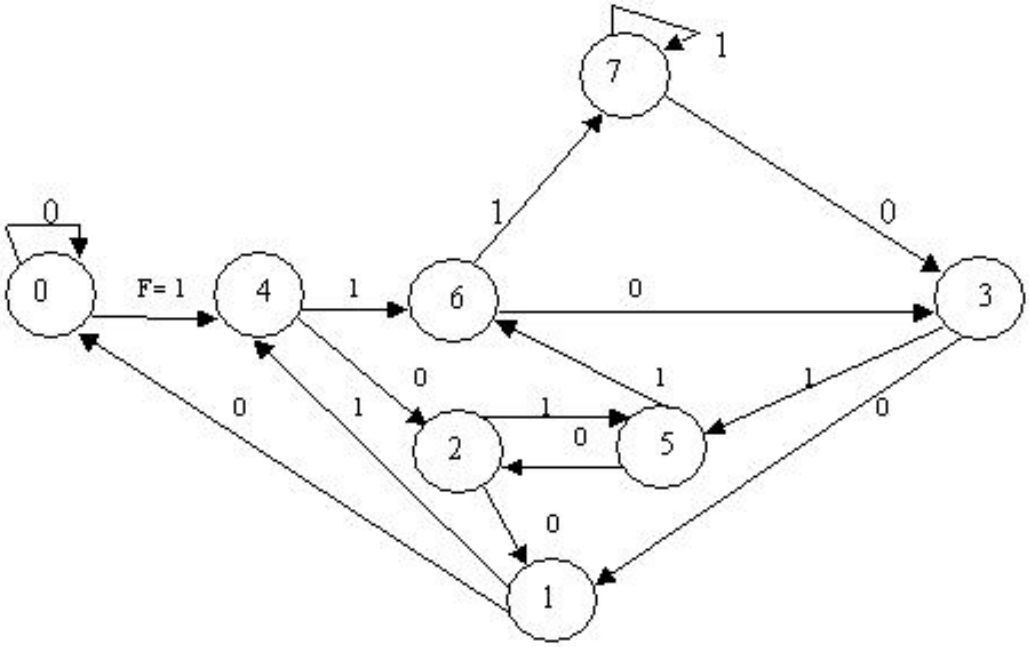


Рис. 14.9. Диаграмма состояний трехразрядного регистра сдвига с обратной связью

На диаграмме состояния регистра обозначены цифрами в кружках, причем значения цифр соответствуют десятичным значениям двоичных чисел, образующихся в регистре после очередного сдвига. Диаграмма показывает, что регистр позволяет выполнить несколько циклов сдвига, однако максимальная длина цикла равна 2^3=8. Для синтеза логической функции *F*, обеспечивающей выбранный цикл сдвига, нужно составить таблицу состояний регистра. С этой целью в таблицу записываем исходное сочетание логических переменных для трех выходов триггеров ABC. Справа записываем значение функции обратной связи, изменяющей исходное состояние, в следующей строке записываем новое состояние, в котором окажется регистр после сдвига и т.д.

№ состояния	A	B	C	F
0	0	0	0	1
4	1	0	0	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0
3	0	1	1	1
5	1	0	1	0
2	0	1	0	0
1	0	0	1	0

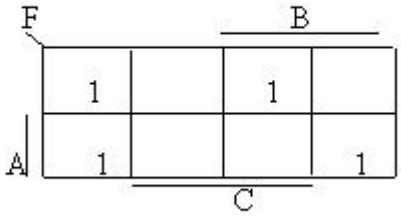


Рис. 14.10. Таблица состояний и карта Карно для сдвигового трехразрядного регистра

Используя карту Карно, получим логическое выражение для функции *F*:

$$F = \bar{B}C + A\bar{C} + AB\bar{C}.$$

По найденному выражению, используя логические элементы, синтезируется часть схемы сдвигового регистра, образующая функцию обратной связи F в соответствии с таблицей состояний, при этом следует учитывать конкретный вид триггеров регистра. Следует отметить, что функция обратной связи значительно усложняется с увеличением числа разрядов регистра, так как зависит от состояния всех триггеров, образующих регистр.

14.4. Функциональные узлы на базе регистров сдвига

На основе сдвигового регистра, синтезируя нужные схемы управления, можно реализовать разнообразные цифровые функциональные узлы. Примеры реализации приведены ниже [5].

Сдвиговый регистр-кольцевой счетчик. На практике обычно используется цикл с одной единицей, циркулирующей в кольце, образованном сдвиговым регистром с логическими цепями, формирующими функцию обратной связи. Максимальная длина цикла в этом случае $L=n$, где n – число каскадов регистра.

В качестве примера рассмотрим методику синтеза трехканального распределителя тактов, выполненного на сдвиговом регистре, замкнутом в кольцо (такой распределитель можно назвать счетчиком в коде «*1* из *n*»).

В диаграмме состояний трехразрядного регистра (рис. 14.11) следует выбрать для реализации цикла только те состояния, в коде которых имеется лишь одна единица. Остальные состояния должны быть

исключены, так как в нашем случае они являются ложными (на диаграмме их изобразим не в кружках, а в прямоугольниках). Диаграмме состояний соответствует таблица истинности, в которой нужно отразить конкретные значения логических переменных на выходах триггеров синтезируемого устройства при поступлении тактирующих импульсов на входы синхронизации регистра. Синтез схемы управления триггерами делается по таблице после выбора вида используемых триггеров.

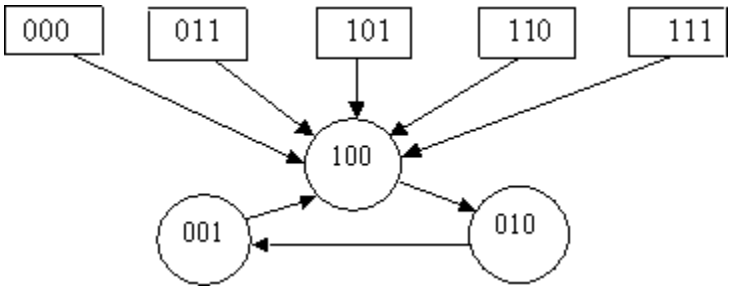


Рис. 14.11. Диаграмма состояний трехканального распределителя на кольцевом регистре

Таблица истинности для рассматриваемого случая показана в табл. 14.4.

Таблица 14.4

Таблица истинности регистра-кольцевого счётчика

Q_1	Q_2	Q_3	Q_{1t}	Q_{2t}	Q_{3t}
0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0

Диаграмма состояний и таблица истинности показывают, что при случайном попадании сдвигового регистра в одно из состояний, показанных в прямоугольниках (рис. 14.11), система управления вернет регистр в состояние 100, с которого начнется очередной цикл сдвига.

Реализация схемы наиболее простой получается при использовании триггеров типа D. Функция возбуждения (переключения) для них: $D_n = Q_{nt}$.

Анализ таблицы с помощью карт Карно дает:

$D_1 = Q_2Q_1 + Q_2Q_1 + Q_3$; $D_2 = Q_1Q_2Q_3$; $D_3 = Q_1Q_2Q_3$.

Полученные логические соотношения позволяют синтезировать структурную схему распределителя импульсов на кольцевом регистре (рис. 14.12).

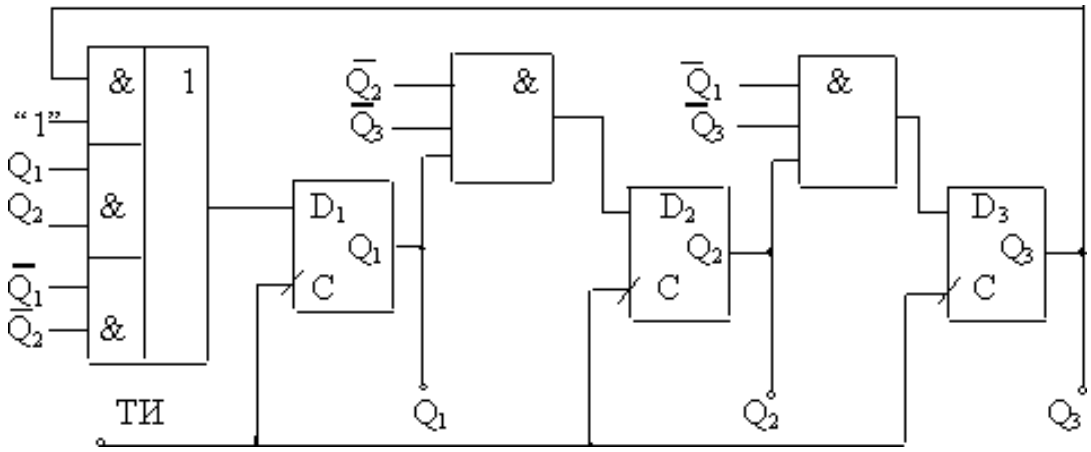


Рис. 14.12. Структурная схема трехканального распределителя импульсов (инверсные выходы и входы сброса триггеров не показаны)

Методика синтеза кольцевых регистров сдвига – распределителей импульсов для большего количества каналов не отличается от рассмотренной выше.

Сдвиговый регистр-счетчик Джонсона. Кольцевой регистр с перекрестной обратной связью, замкнутой на первый триггер от инверсного выхода последнего триггера, известен как счетчик Джонсона [5]. Достоинство счетчика Джонсона в простоте структуры, обеспечивающей к тому же и простоту схем преобразования его выходного кода в код «1 из N» для получения выходов распределителя импульсов. Структурная схема счетчика и временные диаграммы его работы показаны на рис. 14.13.

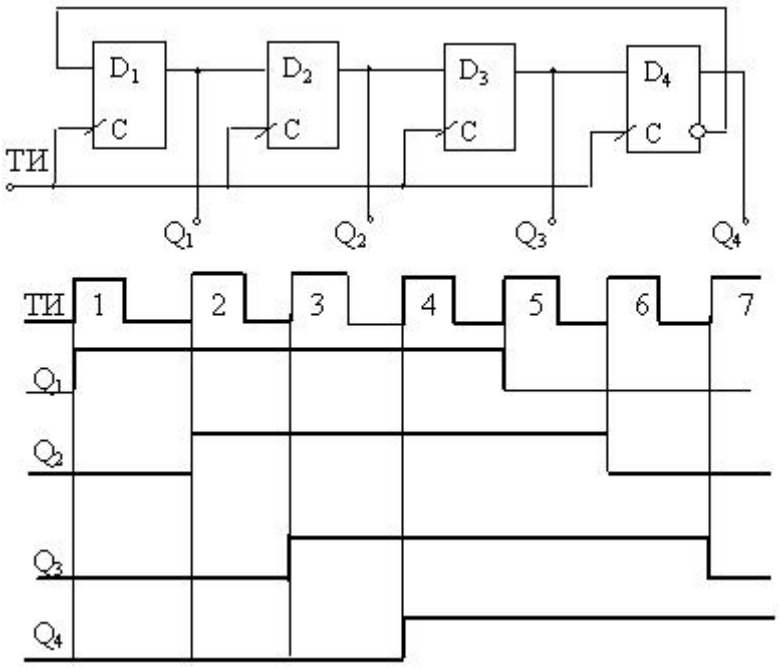


Рис. 14.13. Структурная схема четырехразрядного счетчика Джонсона и временные диаграммы его работы

Одно из отличительных свойств счетчика Джонсона – он имеет 2*n* состояний, т.е. в два раза больше, чем обычный кольцевой сдвиговый регистр.

Преобразование выходного кода счетчика в код «1 из N» производится добавлением одного двухвходового элемента И либо И-НЕ на каждый выход. На основе счетчика Джонсона изготовляются интегральные схемы распределителей в сериях элементов КМОП, например ИС К561ИЕ8 [22].

Генераторы псевдослучайных последовательностей (ГПСП). ГПСП используются в устройствах тестового диагностирования цифровых устройств, при моделировании систем с учетом случайного разброса параметров их элементов и т.п. Наиболее простые реализации ГПСП представлены так называемыми генераторами М-последовательностей, которые способны формировать последовательности с периодом $2^n - 1$, где n − число разрядов сдвигового регистра [5]. Для генерации М-последовательностей необходимо организовать обратную связь с выходов первого и n-го триггеров регистра через элемент сложения по модулю 2 на вход первого триггера. Упрощенная структурная схема генератора М-последовательности с периодом $2^4 - 1 = 15$ показана на рис. 14.14.

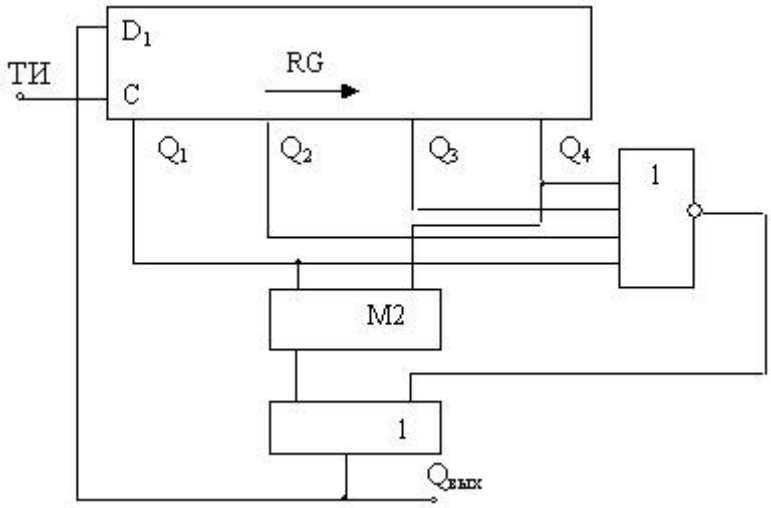


Рис. 14.14. Генератор 15-разрядной последовательности двоичных символов

Процесс генерации поясняется табл. 14.5. Образование выходной последовательности происходит после запуска генератора согласно логическому выражению $Q_{вых} = D_1 = Q_1 \otimes Q_4$. Исходное состояние обеспечивается логическими элементами 2И и 4И-НЕ после активизации схемы, т.е. после подачи питания и начального сброса триггеров регистра.

Таблица 14.5

Таблица истинности для генератора

№ ТИ	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	$Q_{вых}$	№ТИ	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	$Q_{вых}$
0	0	0	0	0	1	9	1	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1	10	0	1	1	0	0
2	0	0	1	1	1	11	1	1	0	0	1
3	0	1	1	1	1	12	1	0	0	1	0
4	1	1	1	1	0	13	0	0	1	0	0
5	1	1	1	0	1	14	0	1	0	0	0
6	1	1	0	1	0	15	1	0	0	0	1
7	1	0	1	0	1	16	0	0	0	1	1
8	0	1	0	1	1						

Анализ табл. 14.5 показывает, что после вхождения в рабочий цикл, начиная с тактового импульса (ТИ № 1), повтор состояния на выходах триггеров будет наблюдаться на 16-м ТИ, следовательно генерируется последовательность 111101011001000. Эта последовательность повторяется со сдвигом на выходе каждого триггера.

Сдвиговый регистр как устройство деления полиномов. Если в схеме ГПСП ввести дополнительный вход на элемент сложения по модулю 2, то получится устройство для аппаратного выполнения операции деления полиномов по правилам арифметики по модулю 2. Такое устройство применяется для построения средств тестового диагностирования, построения и анализа циклических кодов. В частности, сдвиговый регистр, выполняющий деление полиномов, широко используется в сигнатурных анализаторах.

В этих устройствах входная двоичная последовательность подается на дополнительный вход элемента сложения по модулю 2 и трактуется как полином, который с помощью сдвигового регистра делится на другой полином, структура которого определяется схемой обратных связей, подающих сигналы выходов триггеров на входы элемента сложения по модулю 2. Этот полином часто называют порождающим. В результате деления в регистре образуется остаток от деления входной двоичной последовательности на двоичную последовательность, соответствующую структуре порождающего полинома. Этот остаток в сигнатурном анализаторе называют *сигнатурой* и применяют для диагностирования цифровых устройств.

В качестве примера рассмотрим процесс образования сигнатуры в 8-разрядном сдвиговом регистре для заданной 12-разрядной тестовой последовательности. Структурная схема устройства представлена на рис. 14.15.

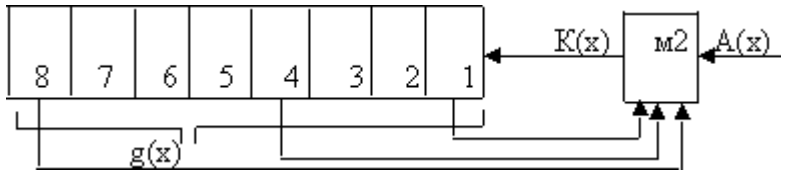


Рис. 14.15. Структурная схема делителя полиномов

В структурной схеме триггеры показаны условно, а три отвода от выходов триггеров № 1, 4, 8 образуют обратные связи и включены к входам схемы сложения по модулю 2. 12-разрядная двоичная последовательность A(x) подается на дополнительный вход схемы м2. В такой N-структуре на вход первого триггера подается комбинация $K(x) = A(x) \oplus Q_8 \oplus Q_4 \oplus Q_1$, а образующий полином в этом случае

будет g(x)= 10001001. Образование остатка от деления полиномов показано в табл. 14.6.

Таблица 14.6

Образование остатка от деления

8	7	6	5	4	3	2	1	K(x)	A(x)	№ такта
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	4
0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	5
0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	6
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	7
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	8
0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	9
0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	10
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	11
1	1	1	1	0	0	0	1	-	-	12

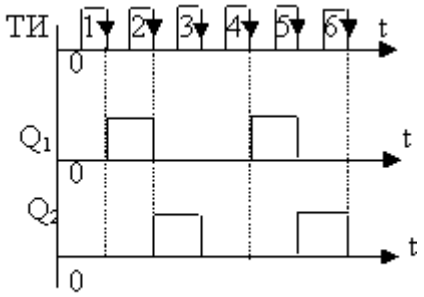
Предполагается, что регистр сдвига реализован на D-триггерах, двоичная последовательность A(x) = 110110011111. Остаток от деления − Q(x)=11110001 (последняя строка в табл. 14.6).

Делители частоты с нечетным коэффициентом деления. Известно, что цепочка из последовательно соединенных Т-триггеров обеспечивает деление частоты входных импульсов в 2^n раз, где n − число триггеров. Для построения делителей частоты с нечетным коэффициентом деления можно использовать сдвиговый регистр на JK-триггерах с внешними обратными связями [5]. Реализация структурной схемы осуществляется после синтеза таблицы состояний, отражающей переключение триггеров в процессе тактирования. Таблица строится после принятия исходного состояния выходов триггеров и управляющих сигналов на входах триггеров, соответствующих принятым состояниям (удобно принять Q_1=0……Q_n=0). Построим, например, делитель частоты входных импульсов на 3. При синтезе таблицы следует помнить, что для JK-триггеров комбинация J=1, K=1 при тактировании соответствует счетному режиму работы, комбинация J=0, K=1 – установке 0. Синтезированная таблица и соответствующие ей временные диаграммы сигналов показаны в табл. 14.7.

Таблица 14.7

Таблица состояний делителя частоты и диограммы сигналов

№ТИ	J_1	K_1	Q_1	$\overline{Q_1}$	J_2	K_2	Q_2	$\overline{Q_2}$
0	1	1	0	1	0	1	0	1
1	1	1	1	0	1	0	0	1
2	0	1	0	1	0	1	1	0
3	1	1	0	1	0	1	0	1
4	1	1	1	0	1	0	0	1
5	0	1	0	1	0	1	1	0
6	1	1	0	1	0	1	0	1
7	1	1	1	0	1	0	0	1



Анализ таблицы дает соотношения: $J_1=\overline{Q_2}$, $K_1=1$, $J_2=Q_1$, $K_2=\overline{Q_1}$. Синтезированная схема представлена на рис. 14.16.

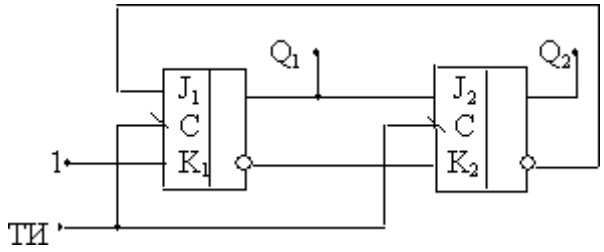


Рис. 14.16. Структурная схема делителя частоты тактовых импульсов на 3 (ТИ − вход тактового импульса)

Аналогичным способом можно синтезировать схему делителя частоты на сдвиговом регистре с любым нечетным коэффициентом деления.

Преобразователь кодов на сдвиговом регистре. Преобразователи параллельного кода в последовательный или последовательного в параллельный имеют разнотипные входы и выходы и строятся на регистрах сдвига. В качестве примера рассмотрим схему преобразователя параллельного кода в последовательный на основе 8-разрядного регистра с параллельным входом и последовательным выходом [5] (рис. 14.17).

Преобразователь работает следующим образом. В исходном состоянии DSR=1, D_0=0, C=1, St=1, на входе присутствует преобразуемое информационное слово (D_1…D_7). Загрузка в регистр информации осуществляется при подаче на вход St кратковременного (короткого) импульса низкого уровня.

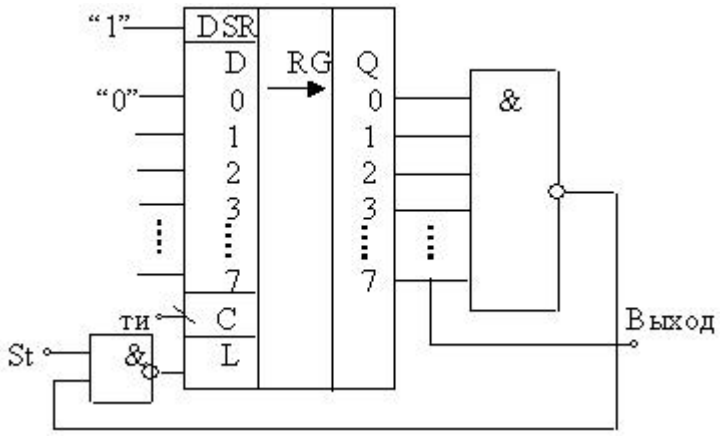


Рис. 14.17. Преобразователь параллельного кода в последовательный

Образующийся на входе L короткий единичный импульс разрешает загрузку входного информационного слова в разряды (1….7), а в нулевой разряд – «0». По мере поступления тактовых импульсов на вход С загруженное слово с каждым спадом импульса сдвигается вправо (от разряда 0 к разряду 7). На выходе слово будет появляться поразрядно в последовательном виде, начиная с седьмого разряда. После первого разряда идет логический нуль, а за ним появится цепочка логических единиц, так как логическая единица постоянно присутствует на входе DSR. В момент появления логических единиц на всех входах 8-входового элемента И-НЕ на его выходе формируется сигнал низкого уровня, разрешающий со стартовым сигналом St загрузку очередного информационного слова.

14.5. Электронные счетчики

Счетчиками называют функциональные узлы, в которых выходной код отражает число импульсов, поступающих на его входы. Счетчики, как и регистры, строятся на основе триггеров, соединяемых последовательно с помощью комбинационных схем, формирующих сигналы управления триггерами. Отличительной особенностью счетчика является возможность выполнения двух операций над кодовыми словами: *инкремент* − увеличение кодового слова на единицу и (или) *декремент* – уменьшение слова на единицу. Вместе с этим счетчики могут выполнять операции над кодовыми словами, характерные для регистров: установку в исходное состояние, запись входного слова, хранение и выдачу хранимой информации.

Основным параметром счетчика является *модуль счета М* – это максимальное число кодовых комбинаций на выходе счетчика, после которого счетчик возвращается в исходное состояние. Быстродействие счетчика характеризуется временем установления выходного кода – интервалом времени между моментом подачи входного сигнала и моментом установления нового кода на выходе.

Краткая классификация счетчиков. По направлению счета счетчики делятся на *суммирующие* (прямого счета), *вычитающие* (обратного счета) и *реверсивные* (с изменением направления счета). У суммирующего счетчика его выходной код по мере поступления счетных импульсов изменяется в сторону увеличения его числового эквивалента.

По значению модуля счета счетчики подразделяют на *двоичные,* модуль счета которых равен целой степени числа 2 ($M=2^n$), и *двоично-кодированные*, у которых модуль счета не равен целой степени числа 2. Помимо двоичных различают ещё счетчики Джонсона, счетчики с кодом «1 из N» и другие.

По способу организации межразрядных связей счетчики делятся на счетчики с последовательным, параллельным и комбинированным переносом. У счетчиков с последовательным переносом переключение триггеров происходит последовательно один за другим. У счетчиков с параллельным переносом переключение триггеров разрядных схем осуществляется по сигналу синхронизации одновременно.

Счетчик, как функциональный узел, относится к классу автоматов, поэтому по принадлежности к тому или другому виду автоматов различают *синхронные* и *асинхронные* счетчики.

Двоичные счетчики. Вид структурной схемы двоичного счетчика определяется из анализа его таблицы истинности, представляющей собой последовательность двоичных чисел от нуля до М-1. Анализ показывает, что младший разряд счетчика переключается от каждого входного импульса, следующий по старшинству разряд переключается с частотой, в два раза меньшей и т.д. Известно, что простейшим делителем частоты в два раза является счетный триггер (Т-триггер). Таким образом, двоичный счетчик должен содержать цепочку соединенных между собой последовательно счетных триггеров.

Число триггеров определяется по условию $n = \log_2 M$. Например, двоичный счетчик с модулем счета М=8 будет содержать три счетных триггера, с модулем М=16 – четыре триггера и т.д. Структурная

схема двоичного счетчика с модулем М=8 и временные диаграммы его работы показаны на рис. 14.18.

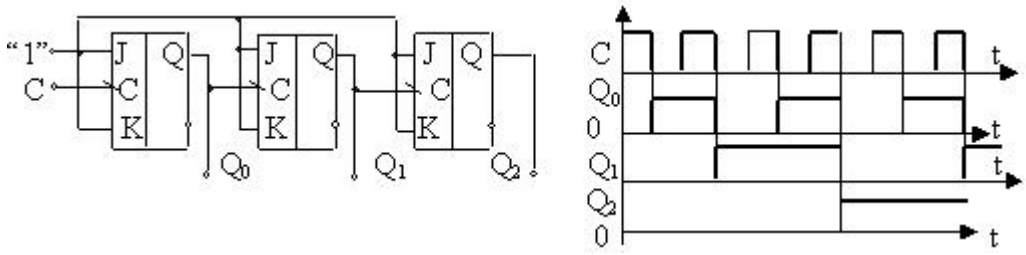


Рис. 14.18. Структурная схема суммирующего двоичного счетчика с модулем счета М=8 и временные диаграммы его работы

Отличие вычитающего счетчика (счетчика обратного счета) от суммирующего состоит в направлении переключения предыдущего разряда, вызывающего переключение последующего. У суммирующего счетчика это переключение происходит от «1» к «0», а у вычитающего – от «0» к «1».

Если схема строится на счетных триггерах с прямым динамическим управлением (срабатывание триггера по «фронту»), то характер подключения следующих триггеров к предыдущим для получения счетчика обратного счета будет таким же, как на рис. 14.18.

В структуре реверсивного счетчика для реализации его на триггерах с прямым динамическим управлением в межрегистровые связи необходимо вставить логические переключатели соединительных линий, как показано на рис. 14.19.

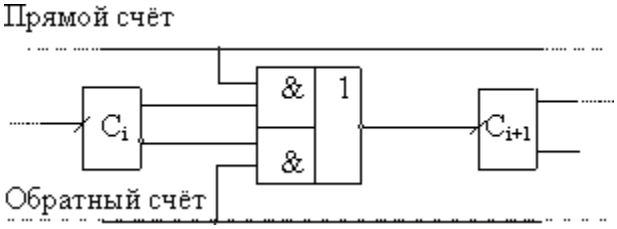


Рис. 14.19. Структурная схема межрегистровой связи в реверсивном двоичном счетчике (триггеры показаны условно)

Рассмотренные выше структуры относятся к асинхронным счетчикам, так как в них переключение триггеров происходит не одновременно, а последовательно один за другим. Время установления кода в асинхронном счетчике составит величину $t_y = n \cdot t_{mp}$, где t_{mp} – собственное время переключения триггера. Для получения максимального быстродействия используют синхронные счетчики с параллельным переносом. Время установления нового кода на выходе та-

ких счетчиков теоретически не зависит от их разрядности и приближенно равно $t_{тр}$. В структурных схемах таких счетчиков сигнал синхронизации подаётся одновременно на все разрядные триггеры, а межразрядные связи осуществляются с помощью конъюнкторов.

Счетчики такого типа имеют ещё одно название – *счетчики со сквозным переносом*. Пример схемы показан на рис. 14.20.

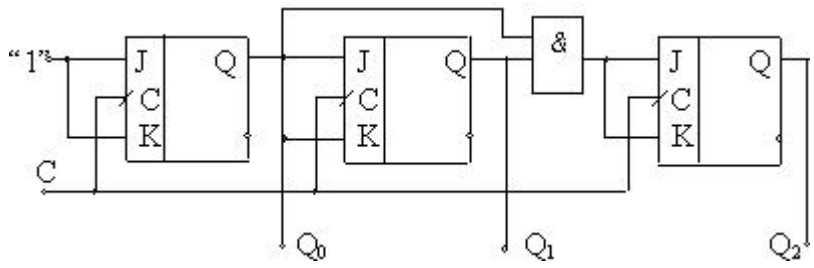


Рис. 14.20. Структурная схема синхронного (параллельного) счетчика прямого счета с модулем M=8

Двоично-кодированные счетчики с произвольным модулем. Двоично-кодированные счетчики строятся на основе двоичных, но их разрядность определяется из условия $n =]\log M[$, где $][$ − знак округления до ближайшего большего числа. В этом случае двоичный счетчик будет иметь некоторое число лишних состояний $L = 2^n - M$, которые необходимо исключить. В схемах с естественным порядком счета (с нулевым начальным состоянием счетчика) обычно исключают последние состояния. Существуют два основных способа построения счетчиков с произвольным модулем счета: *модификация межразрядных связей и управление сбросом*.

При синтезе счетчика на основе модификации межразрядных связей в таблице функционирования исключаются лишние состояния, а функции возбуждения для триггеров определяются обычным для синтеза автоматов способом. При управлении сбросом выявляется момент достижения содержимым счетчика значения (M – 1), что является сигналом сброса в следующем такте. После сброса начинается новый цикл счета. Этот вариант построения счетчиков удобен тем, что для изменения модуля счета требуется лишь изменение кода, с которым сравнивается содержимое счетчика для определения момента сброса. В качестве примера построим структурную схему счетчика с M=5 методом модификации межразрядных связей. Функционирование счётчика отражено в табл. 14.8.

Таблица 14.8

Таблица функционирования счётчика

Исходное состояние			Следующее состояние			Функции возбуждения					
Q_2	Q_1	Q_0	Q_2	Q_1	Q_0	J_2	K_2	J_1	K_1	J_0	K_0
0	0	0	0	0	1	0	x	0	x	1	x
0	0	1	0	1	0	0	x	1	x	x	1
0	1	0	0	1	1	0	x	x	0	1	x
0	1	1	1	0	0	1	x	x	1	x	1
1	0	0	0	0	0	x	1	0	x	0	x

Для синтеза схемы используем карты Карно, полагая функции возбуждения зависимыми от трёх переменных исходного состояния (рис. 14.21).

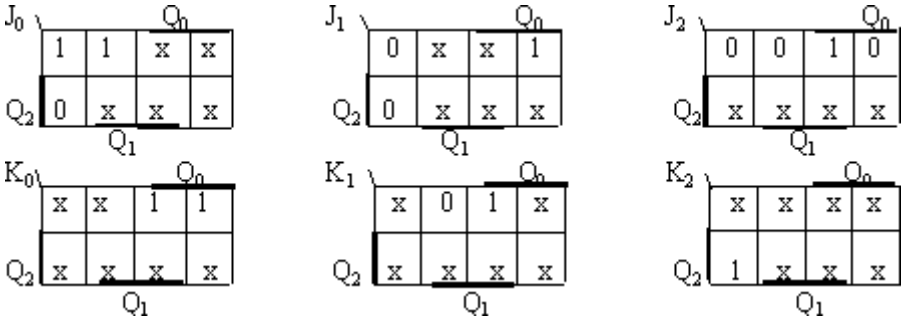


Рис. 14.21. Карты Карно для функций возбуждения триггеров счетчика

По картам получаем аналитические соотношения следующего вида:

$$J_0=\overline{Q_2};\ K_0=K_2=1;\ J_1=K_1=Q_0;\ J_2=Q_1Q_0.$$

Синтезированная согласно полученным результатам схема показана на рис. 14.22.

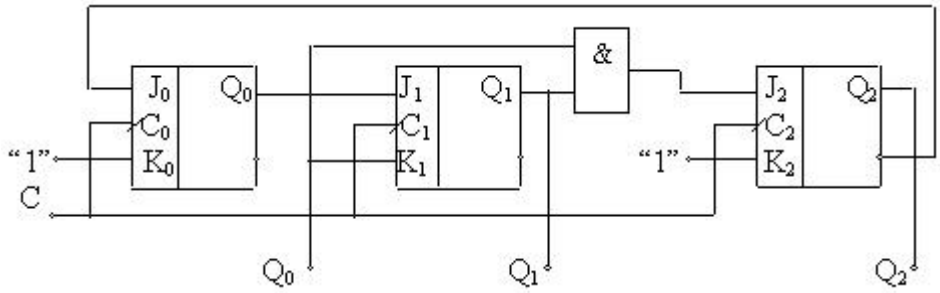


Рис. 14.22. Структура синхронного счетчика с модулем счета M=5

Синтез счетчика методом управляемого сброса. Если триггеры счетчика со сквозным переносом снабдить входами сброса и добавить дополнительный многовходовой конъюнктор, то, используя метод управляемого сброса, можно построить устройство с любым модулем

счета. Основная идея метода управляемого сброса состоит в принудительном формировании сигнала сброса в момент, когда достигается нужное значение модуля счета.

Иллюстрацией использования рассматриваемого метода может служить преобразование двоичного 4-разрядного счетчика со сквозным переносом (M=16) в двоично-десятичный счетчик (рис. 14.23) [5].

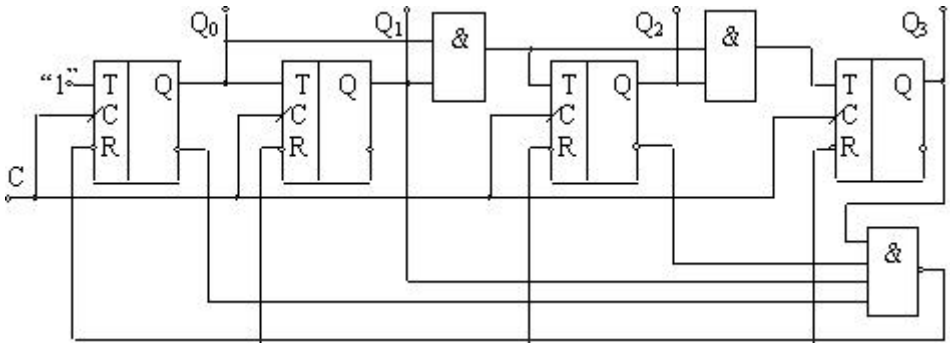


Рис. 14.23. Структурная схема 4-разрядного двоично-десятичного счетчика, синтезированного методом управляемого сброса

15. ЗАПОМИНАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Проектирование сложных цифровых устройств не обходится без применения запоминающих устройств (ЗУ), которые могут сохранять цифровую информацию.

Для кратковременного хранения используют регистры, состоящие из множества триггерных ячеек. Если необходимо длительное время хранить большие объемы информации, то необходимо использовать специально предназначенные для этого устройства, в частности микросхемы ЗУ. Это позволяет существенно упростить аппаратную часть электронных устройств.

Для целей хранения цифровой информации сейчас разработано большое число технических решений, причем эта часть электроники бурно развивается по пути увеличения объемов информации, уменьшения габаритов устройств, повышения надежности долговременного хранения (CD-диски, брелки и т.п.). В конспекте лекций будут рассмотрены только принципы построения и использования полупроводниковых ЗУ, т.е. устройств, выполненных в виде интегральных микро-схем [17].

15.1. Основные параметры и виды запоминающих устройств

К основным параметрам ЗУ относятся:

1. Емкость ЗУ. Единица измерения – 1 бит (разряд), 8-битное слово – байт. 2^{10}бит = 1024 бит = 1 Кбит; 2^{20}бит = 1048576 бит = = 1 Мбит.

2. Организация ЗУ – это число кодовых слов с указанием их разрядности (длины). M = NL, где N – число кодовых слов, L – число разрядов в коде. Например: M = 256 бит: это могут быть ЗУ с организацией 32x8, 256x1, 64x4. Структура этих ЗУ будет разная, разная цоколёвка корпуса микросхемы и разные схемы соединения с другими элементами.

3. Динамические параметры ЗУ характеризуются многими временными параметрами. Из них наиболее важными являются следующие:

а) время выборки – время от момента подачи на вход ЗУ команды на выдачу информации до момента установления данных на выходе;

б) время выборки адреса, t_A, н.с.;

в) время выбора микросхемы, t_{CS}, н.с.;

г) время цикла записи, t_{CYWR}, н.с. − время от подачи до установления сигналов на управляющих входах в режиме записи;

д) время цикла считывания (чтения) − время от подачи до установления сигналов на управляющих входах в режиме считывания t_{CYRD} , н.с.;

е) емкости: входная C_1, pF; выходная Co, pF; емкость нагрузки, C_L, pF.

Следует помнить, что прежде чем считать информацию из ЗУ, требуется найти ее местоположение, т.е. определить координаты ячеек, где эта информация находится. Аналогично при записи: прежде чем записать (запомнить) нужно указать адрес, куда эта информация должна попасть. Алгоритмы управления процессами записи и считывания можно показать на временных диаграммах изменения сигналов управления (рис. 15.1).

а *б*

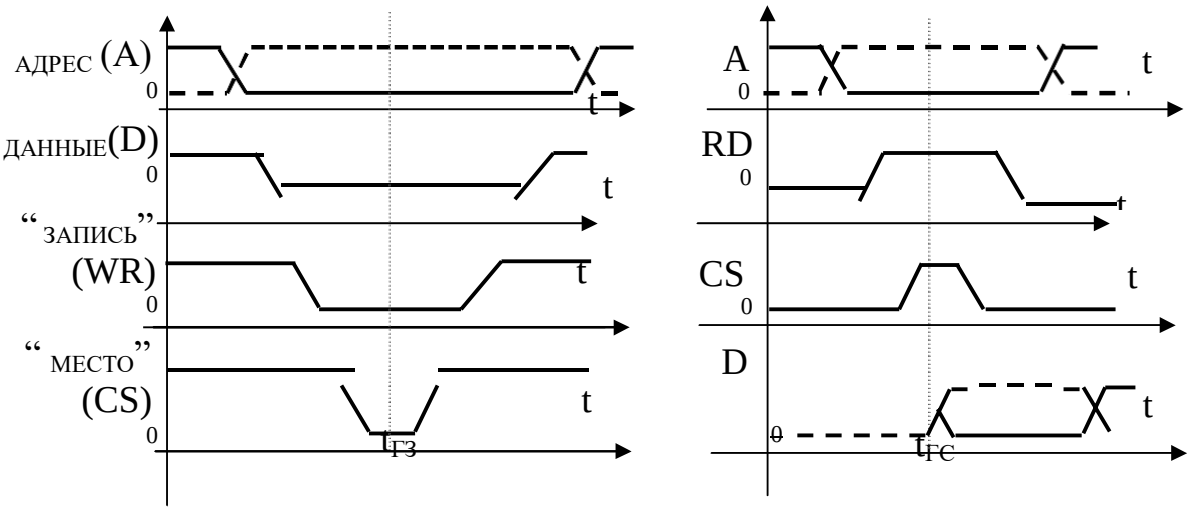


Рис. 15.1. Временные диаграммы изменения сигналов управления записью информации в ЗУ (*а*) и считыванием (*б*)

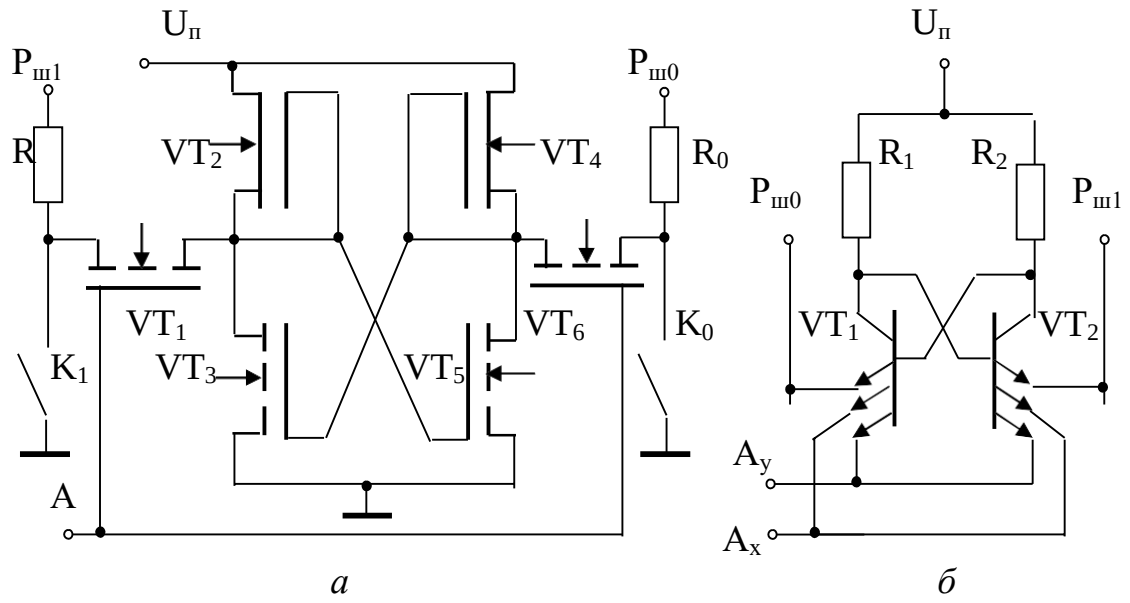
На диаграммах обозначено: A − адрес ячейки памяти; D − команда на выставление (при записи) или получение (при считывании) данных; WR − сигнал готовности к записи; RD − сигнал готовности к чтению (считыванию); CS − сигнал, определяющий микросхему, с которой нужно работать в данный момент времени; $t_{ГЗ}$ − момент готовности к записи; $t_{ГС}$ − момент готовности к считыванию. На диаграммах видно, что в ЗУ операции с данными осуществляются только в те моменты времени, когда на входах управления установлены все необходимые логические сигналы. Это необходимо для обеспечения надежной работы ЗУ. По выполняемым функциям различают: *оперативные* запоминающие устройства (ОЗУ) и *постоянные* запоминающие устройства − ПЗУ (соответствующая английская аббревиатура − RAM и ROM). Оперативные ЗУ используют для временного хранения информации, полученной в процессе работы. ОЗУ могут быть статическими и динамическими. В статических ОЗУ записанная информация хранится в виде состояния триггерных ячеек памяти и при ее считывании не разрушается. Она разрушается, когда выключается напряжение питания или ее принудительно удаляют (стирают). В динамических ОЗУ информация хранится в виде заряда конденсатора и постоянно циркулирует в массиве конденсаторов, выделенном для её хранения. Считывание из динамического ОЗУ разрушает информацию и для восстановления её нужно периодически перезаписывать (осуществлять регенерацию − «подкачку»). Широко распространенные простые запоминающие ячейки статических ОЗУ в виде триггерных схем выполняют на МОП − транзисторах либо на

биполярных транзисторах. Для обеспечения доступа к ячейкам памяти триггерные схемы снабжаются адресными и разрядными шинами (проводниками) и шинами питания. Совокупность сигналов, подаваемых извне на эти шины схемами управления, должна обеспечивать выполнение следующих режимов работы ОЗУ: «*хранение*», «*считывание*», «*запись*». Для динамических ячеек памяти к этим режимам добавляется «*регенерация*».

15.2. Статические оперативные запоминающие устройства

Упрощенные структурные схемы триггерных ячеек статических ОЗУ показаны на рис. 15.2.

В схеме (рис. 15.2, *а*) VT_1,VT_6,VT_3 и VT_5 (МОП-транзисторы с индуцированным каналом *n*-типа) работают в ключевом режиме. VT_2, VT_4 (МОП-транзисторы со встроенным каналом *n*-типа) выполняют роль резисторов в триггерной схеме, так как обладают начальной проводимостью. Работа ячейки поясняется таблицей истинности (табл. 15.1).

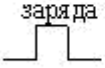


а *б*

Рис. 15.2. Структурные схемы триггерных ячеек памяти на МОП-транзисторах (*а*) и на биполярных транзисторах (*б*)

Таблица 15.1

Таблица истинности ячейки

Режим	Потенциал шины Рш1	Потенциал шины Рш0	A	VT_1, VT_6	VT_3	VT_5
Хранение нуля	0	0	0	закрыты	закрыт	открыт
Хранение единицы	0	0	0	закрыты	открыт	закрыт
(Пример) Считыв. «1»	Импульс заряда	Импульс заряда 	1	VT_1 открыт	открыт	закрыт
Запись «0» (Пример)	1 (ключ K_1 разомкнут)	0 (ключ K_0 замкнут)	1	открыты оба	закрыт	открыт

В режиме хранения: на адресной шине − «нуль» (A=0), VT_1 и VT_6 закрыты, ячейка отсоединена от $Р_{Ш1}$ и $Р_{Ш0}$. При этом на разрядных шинах потенциал равен 0, так как ключи $К_1$ и $К_0$ замкнуты. Пусть в режиме «Хранение единицы» VT_3 открыт, а VT_5 – закрыт, так как потенциал затвора VT_5 равен потенциалу стока VT_3 (это подтверждение принятого положения). В режиме считывания сначала импульсом заряжаются до уровня «1» разрядные шины $Р_{ш1}$, $Р_{ш0}$, затем подается потенциал «1» на адресную шину (A=1), транзистор VT_1 открывается и подключает $Р_{ш1}$ к точке управления триггером (к стоку транзистора VT_3) при этом открытый транзистор VT_3 подключается к разрядной шине $Р_{ш1}$. Заряд, присутствовавший на $Р_{ш1}$, создает импульс тока в цепи разрядная шина − общая шина через открытые транзисторы VT_1, VT_3. Протекание импульса тока является признаком считывания «1» для усилителя считывания, подключенного к разрядным шинам (на схеме не показан).

Режим записи: например, при записи «0» на $Р_{ш0}$ устанавливается «0», на $Р_{ш1}$ – «1», т.е. ключ К1 размыкается, ключ К0 – замыкается. Затем подается «1» на шину А, VT_1 и VT_6 открываются и подключают соответствующие электроды (сток VT_6 и затвор VT_3) к потенциалу «0». VT_3 закрывается, напряжение на его стоке увеличивается – открывается VT_5, при этом закрывается и VT_1 (на его электродах напряжения сравниваются). Ячейка приняла положение записанного «0». Смена потенциала «1» адресной шины на нулевой потенциал (установка «0») переводит ячейку в режим «Хранение нуля», так как транзисторы VT_1, VT_6 отключают ячейку от $Р_{ш0}$ и $Р_{ш1}$.

Запоминающий (статический) элемент ОЗУ на биполярных транзисторах (рис. 15.2, *б*) также представляет собой триггерную ячейку,

собранную на двух многоэмиттерных транзисторах с перекрестными базовыми связями. Различные сочетания управляющих сигналов, подаваемых на шины A_x, A_y, $P_{ш1}$, $P_{ш0}$, позволяют устанавливать режимы записи, хранения и считывания.

15.3. Динамические ОЗУ

В динамических ОЗУ используют ячейки памяти, в которых уровень «1» или «0» отождествляется с наличием или отсутствием заряда конденсатора, образованного структурой транзисторов при обратных смещениях. Так как заряд не может долго храниться, следует периодически производить регенерацию зарядов, что осуществляется специально организованным управлением. По этой причине для таких ОЗУ нужно иметь режимы: хранение, считывание, запись и регенерация. Основное достоинство динамических ОЗУ – более высокая информационная емкость (почти в четыре раза). Недостаток – усложнение управления из-за необходимости регенерации.

Простейший запоминающий элемент динамического ОЗУ может быть построен на одном МОП-транзисторе (рис. 15.3, *а*). Используется заряд-разряд конденсатора ёмкостью ≤ 0,1pF. Величина приращения напряжения оказывается очень малой: 0,2 – 0,25 В. Поэтому это напряжение должно быть хорошо усилено – это влечет усложнение усилителей считывания. При считывании происходит разрушение информации, поэтому ее надо восстанавливать.

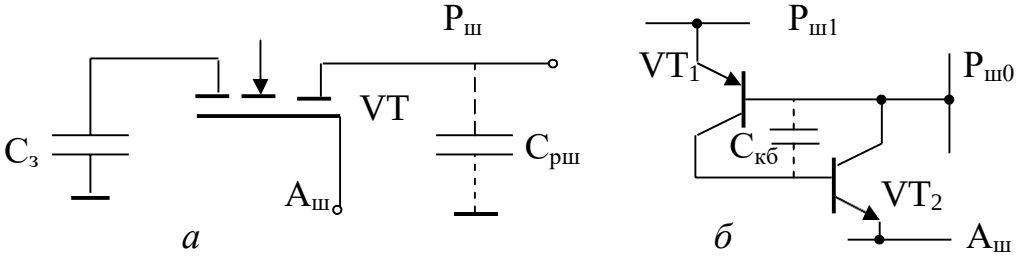


Рис. 15.3. Простейшие ячейки памяти динамических ОЗУ:
а – на МДП- транзисторе; *б* – на биполярном составном транзисторе

В схеме рис. 15.3, *а* запоминание «1» или «0» – это наличие или отсутствие заряда на конденсаторе $C_з$. В режиме записи сигнал, поданный на адресную шину $A_ш$, разрешает доступ к $C_з$ (транзистор открыт), заряд с разрядной шины $P_ш$ переходит на $C_з$ (больший заряд считается «1», меньший – «0»). В режиме считывания заряд с $C_з$ переходит на емкость $C_{рш}$ (которая является паразитной ёмкостью раз-

рядной шины), причем $C_{рш} >> C_з$ и равна нескольким pF. Такое построение позволяет получить ОЗУ, обладающее большой информационной емкостью (несколько Мбит), но невысокой надежностью.

Для построения динамических ОЗУ на биполярных транзисторах используется специальная технология, при которой на кристалле формируется запоминающий элемент в виде емкости коллектор – база сдвоенного транзистора (рис. 15.3, *б*). Величина ёмкости $C_{кб}$ − около 1pF. В период хранения «конденсатор» хранит поданный на него заряд, а в режиме считывания − отдаёт его на разрядную шину.

15.4. Энергонезависимые оперативные запоминающие устройства

Основной недостаток ОЗУ − разрушение информации при снятии напряжения питания. Очевидный (и самый неэффективный) способ преодоления этого недостатка − сочетание ОЗУ и встроенной литиевой батарейки в одном корпусе микросхемы. Оригинальнее выглядит использование «запоминающих конденсаторов», которые способны сохранять электрическую поляризацию после снятия приложенного электрического напряжения (сегнето − электрический эффект). При смене направления вектора напряженности поля в таких конденсаторах меняется направление электрической поляризации кристаллического вещества. Конденсатор при этом имеет два устойчивых состояния и два различных пороговых напряжения перехода из одного состояния в другое и наоборот. Такими свойствами обладают, например, пленки цирконата – титана – свинца (PZT-керамика, ε = 1200). Недостаток – ограниченное число циклов перезарядки, (приблизительно 10^{10}циклов). Ячейку памяти с таким конденсатором можно представить так, как показано на рис. 15.4.

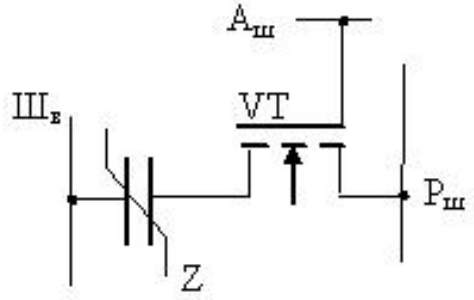


Рис. 15.4. Структурная схема ячейки памяти
на основе «запоминающего» конденсатора:
Шв − шина импульсного возбуждения, *Аш* – адресная шина,

$P_{ш}$ – разрядная шина

Можно так построить схемы управления, что при снятии питания конденсатор будет поляризоваться таким образом, чтобы его состояние соответствовало состоянию запоминающей ячейки до отключения питания. Время поляризации примерно 10 – 20 н.с., что значительно меньше времени разрушения информации в триггере.

Более перспективными являются ЗУ, сочетающие в себе свойства быстродействия, компактности, технологичности, простоты управления при обеспечении энергонезависимости, т.е. неразрушения информации в условиях исчезновения напряжения питания. К таким ЗУ относятся, в частности, ОЗУ, называемые в международной терминологии FRAM, MRAM, PFRAM [20].

FRAM – это ЗУ ферроэлектрического типа, PFRAM – разновидность ЗУ ферроэлектрического типа, в которых используются полимерные ферроэлектрические материалы (тонкие плёнки), обладающие свойством образования диполей в своей структуре. Участки с ориентированными диполями служат запоминающими элементами и в зависимости от направления поляризации хранят биты информации. Следует заметить, что ЗУ типа PFRAM для построения ОЗУ считаются менее перспективными вследствие их относительно небольшого быстродействия [20].

MRAM − это магниторезистивные ЗУ. В них запоминающим элементом является участок магнитного материала, способный сохранять приданное ему состояние намагниченности независимо от наличия или отсутствия питания схемы.

15.5. Основные структуры оперативных запоминающих устройств

Микросхемы ОЗУ могут иметь одноразрядную и многоразрядную (словарную) организацию. В структуре одноразрядной организации данные записываются и считываются по одному биту последовательным кодом, что позволяет уменьшить до минимума число вводов и выводов данных.

Структура микросхемы статического ОЗУ с одноразрядной организацией имеет вид, показанный на рис. 15.5.

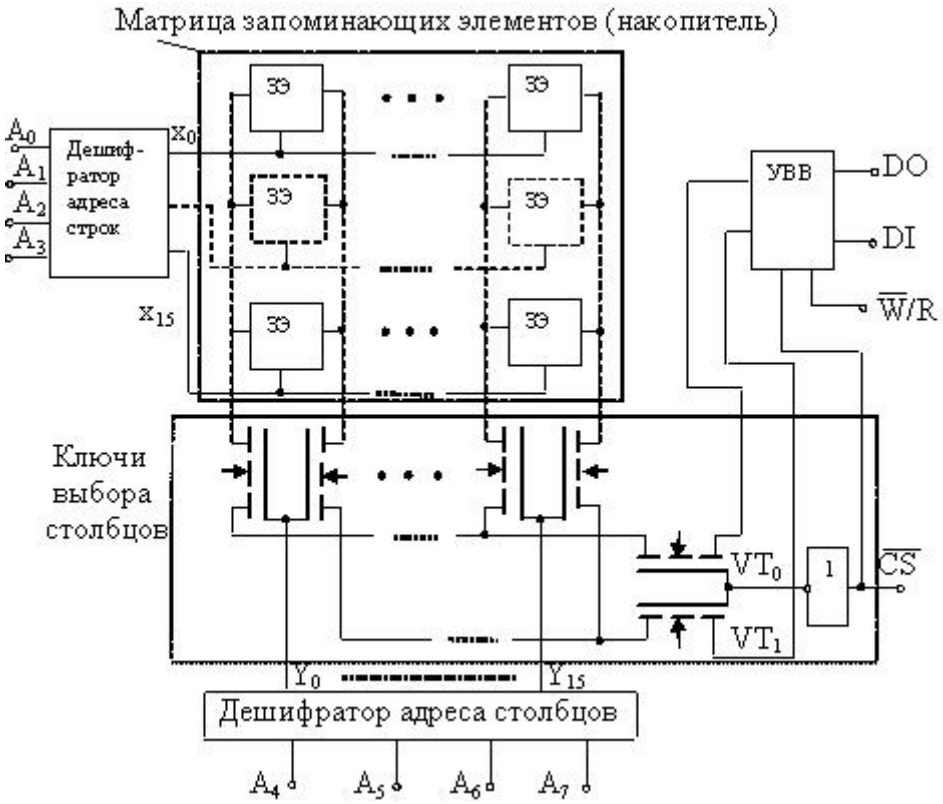


Рис. 15.5. Структурная схема одноразрядного статического ОЗУ

На рис. 15.5 обозначено: (A_0 − A_3) − адресные входы строк накопительной матрицы; (A_4 − A_7) − адресные входы столбцов матрицы; DO − выход данных при чтении (считывании); DI − вход данных при записи; W/R – вход сигнала «Запись»/ «Чтение»; CS – выбор микросхемы; УВВ – устройство ввода-вывода.

Запоминающий элемент (ЗЭ) представляет собой, например, триггерную схему, изображенную на рис. 15.2, *а*, причем в рассматриваемой схеме ключи выбора столбцов исполняют роль коммутаторов разрядных шин, изображенных на рисунке справа и слева возле каждого ЗЭ.

Транзисторы ЗЭ, затворами соединенные с адресной шиной элемента, подключены к шинам возбуждения строк, которые являются выходами дешифратора строк. При возбуждении строки сигналом выборки x_0-x_{15}, снимаемым с выхода дешифратора адреса строк, ключевые транзисторы открываются и подключают входы-выходы триггера к разрядным шинам. При отсутствии сигнала выборки строк (x = 0) ключевые транзисторы закрыты и триггер изолирован от разрядных шин. Для сохранения информации требуется источник питания, т.е. ОЗУ – энергозависимое.

Особенность МОП (КМДП)-триггеров заключается в том, что в режиме хранения они потребляют незначительную мощность от источника питания. В режиме обращения, когда переключаются элементы матрицы, дешифраторы и другие функциональные узлы микросхемы, уровень энергопотребления возрастает на два – три порядка.

Доступ к разрядным шинам столбца со стороны УВВ обеспечивается сигналом CS = 1, открывающим ключи VT0, VT1. Настройку УВВ на прием сигнала для записи со входа DI осуществляет сигнал $\overline{W}/R = 1$.

В большинстве микросхем памяти УВВ содержит выходной ключевой усилитель – формирователь, способный принимать три состояния на выходе: «0», «1» и третье состояние (высокоомное), имеющее обозначение «Z».

По способу управления различают асинхронные и синхронизируемые (тактируемые) ОЗУ. У асинхронных статических ОЗУ сигналы управления могут быть поданы в виде уровней напряжений, соответственно 0 и 1, у тактируемых – в форме импульса.

Структура микросхемы статического ОЗУ со словарной организацией представлена на рис. 15.6.

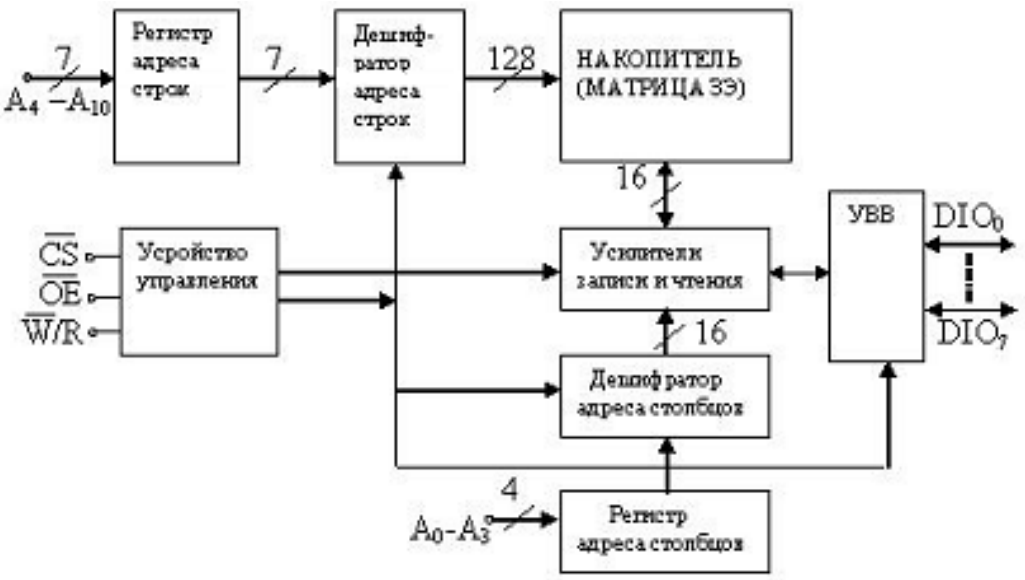


Рис. 15.6. *Структурная схема статического*

ОЗУ со словарной организацией

Сигнал разрешения выхода $\overline{OE}$ позволяет в режиме хранения запрещать вывод информации: при OE = 1 входы-выходы DIO_0 – DIO_7 принимают третье состояние, информация на выходе отсутствует. В представленной схеме запись и чтение информации производится восьмиразрядными кодовыми словами, что повышает быстродействие устройства. По количеству адресуемых слов и их разрядности можно определить, что ёмкость рассматриваемого ЗУ составляет 2048 байт (2 КБ) или 16 Кбит.

Выбор определенного типа ЗУ при проектировании основывается на оценке их классификационных и статических параметров, перечисленных ниже.

Классификационные параметры:

– информационная емкость – число бит;

– число разрядов адреса – число слов адреса;

– число разрядов слова в ЗУ;

– $К_р$ – коэффициент разветвления по выходу (нагрузочная способность);

– число циклов перепрограммирования;

– $Р_{потр.}$ – мощность потребления в рабочем режиме;

– $Р_{нагр.}$ – мощность потребления в режиме хранения;

– время хранения информации (быстродействие).

Статические параметры:

– U_{cc} – напряжение источника питания;

– I_{cc} – ток потребления;

– U_{ccs} – напряжение питания в режиме хранения;

– I_{ccs} – ток питания в режиме хранения;

– U_1 – уровень логической 1;

– U_0 – уровень логического нуля.

15.6. Постоянные запоминающие устройства

Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) предназначены для хранения информации, остающейся неизменной в течение длительного времени или всего времени эксплуатации устройства. Такая

информация обычно представляет собой либо кодовые преобразования, либо последовательности кодов управления согласно заданному алгоритму, либо константы, которые требуются для определенных вычислений.

В зависимости от технологии записи информации различают три подкласса ПЗУ: *масочные* ПЗУ, *программируемые* (прожигаемые) ПЗУ, *репрограммируемые* ПЗУ. ПЗУ обозначают на схемах аббревиатурой ROM.

В масочные ПЗУ, или ROM(M), информация записывается в процессе изготовления микросхем с помощью шаблона (маски). Прожигаемые ПЗУ – это однократно программируемые ПЗУ (программирование может делать пользователь). Репрограммируемые ПЗУ − ПЗУ, способные к многократному перепрограммированию.

В масочных ПЗУ используется простой принцип программирования: заготовка микросхемы (кристалл) формируется со всеми соединениями между элементами, а затем ненужные соединения ликвидируются. Элементом связи могут быть диоды, транзисторы, металлические перемычки и т.п. Фрагмент структуры диодного ROM(M) показан на рис. 15.7.

Принцип представления информации в таких ЗУ состоит в том, что информация представляется в виде наличия или отсутствия соединения между шинами адреса и шинами данных. Используя указанный принцип, разработаем структуру диодного ПЗУ, реализующего произвольную таблицу истинности, представленную в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Таблица истинности ПЗУ

Вход		Выход								Сигнал шины А
A_1	A_0	DO_0	DO_1	DO_2	DO_3	DO_4	DO_5	DO_6	DO_7	
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	$A_{ш0}$
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	$A_{ш1}$
1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	$A_{ш2}$
1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	$A_{ш3}$

Анализ табл. 15.2 показывает, что ЗУ должно содержать 32 бита двоичной информации и иметь восьмиразрядный выход, при этом выходное слово должно появляться на выходе при обращении к ЗУ с помощью двухразрядного слова. На основании анализа строим структурную схему на базе координатной сетки, содержащей восемь

столбцов и четыре строки. Используем дешифратор 2 − 4 для создания адресных шин координатной сетки (рис. 15.7).

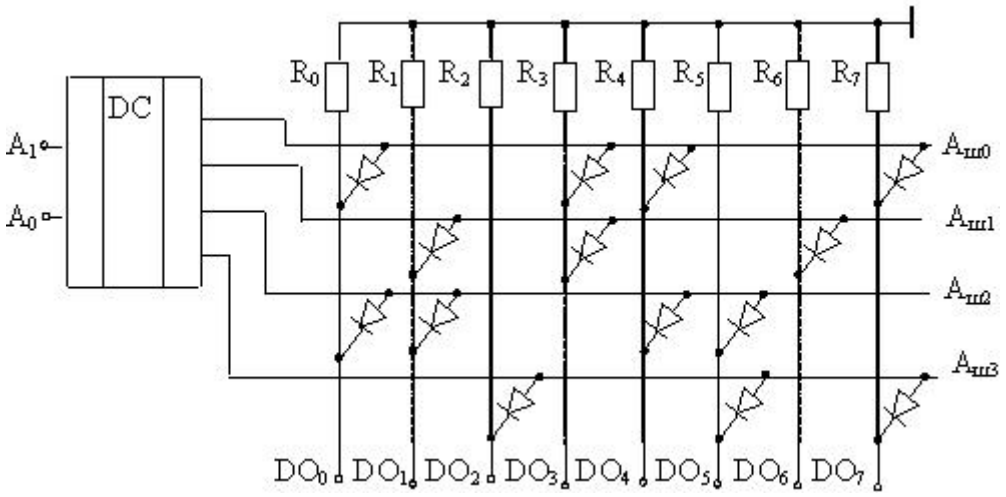


Рис. 15.7. Структурная схема масочного диодного ПЗУ

Масочные ПЗУ применяются для хранения информации, имеющей широкий круг потребителей. В частности, масочные ЗУ используют в качестве знакогенераторов кодов для букв различных алфавитов, как таблицы типовых функций и т.п.

Другим видом однократно программируемого ЗУ являются ЗУ типа PROM. Микросхемы PROM программируются удалением или созданием специальных перемычек. Принцип программирования похож на таковой для масочных ЗУ. В структурах с плавкими перемычками при программировании лишние перемычки удаляются путем расплавления импульсом тока. Плавкие перемычки (металлические или поликристаллические) включаются в цепи диодов или транзисторов.

В исходном состоянии запоминающий элемент хранит логическую единицу. После разрушения перемычки запоминающий элемент будет хранить логический нуль.

Схемы с создаваемыми перемычками в качестве исходных имеют непроводящие соединители в виде двух встречно включенных диодов либо тонкого диэлектрического слоя. При программировании импульсом повышенного напряжения в первом случае пробивается один из диодов, а во втором − диэлектрический слой, после чего в месте пробоя возникает проводящая перемычка. Принцип программирования в ЗУ типа PROM можно пояснить рис. 15.8.

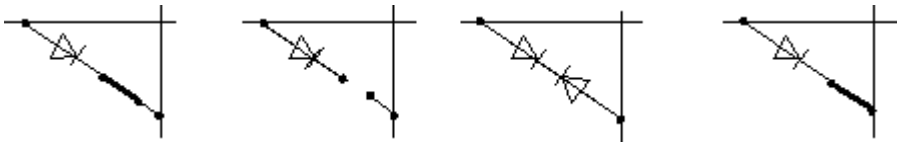


Рис. 15.8. Состояние соединений до и после программирования в структурах с удаляемыми и создаваемыми перемычками

ПЗУ типа ROM(М) и PROM после программирования становятся для потребителя постоянными в буквальном смысле, так как изменить их содержание нельзя. Более широкие возможности предоставляют ПЗУ, содержимое которых может изменять сам пользователь с помощью специального оборудования (программаторов). Различают несколько типов таких ПЗУ: EPROM, EEPROM, FLASH, в которых содержимое может быть изменено путем стирания старой информации и записи новой.

В ЗУ типа EPROM стирание выполняется ультрафиолетовым облучением кристалла в специальных устройствах, поэтому на русском языке такие ПЗУ носят название РПЗУ-УФ. В ЗУ типа EEPROM стирание производится электрическим сигналом, поэтому русское название таких микросхем – РПЗУ-ЭС (репрограммируемое ПЗУ с электрическим стиранием), либо ЭСППЗУ (электрически стираемое программируемое ПЗУ). Запись в EPROM и EEPROM производится электрическим сигналом. Следует заметить, что микросхемы EEPROM позволяют осуществить их программирование, не изымая микросхему из устройства, в котором они используются.

Флэш-память (ЗУ типа FLASH) по основным принципам работы подобна рассмотренным выше ЗУ. Запоминающие элементы памяти FLASH подобны применяемым в EPROM и EEPROM, но ЗУ типа FLASH имеют структурные и технологические особенности, существенно улучшающие общие свойства репрограммируемых ЗУ [20].

В РПЗУ носителем информации (запоминающим элементом) является МОП-транзистор, поэтому используются два вида запоминающих элементов на:

− МОП-транзисторах с плавающим затвором (в РПЗУ-УФ);

− МНОП (МНДП)-транзисторах (в РПЗУ-ЭС).

За счет этого обеспечивается возможность неоднократной записи и считывания информации. РПЗУ способны к многократному (от 25 до 10000 раз) перепрограммированию без потери работоспособности.

Это достигается применением «управляемых перемычек», функции которых выполняют МНОП-транзисторы и транзисторы *n*-МОП с плавающим затвором с использованием механизма лавинной инжекции заряда (ЛИЗМОП).

Виды структур элементов памяти РПЗУ – структуры транзисторов типа МНОП (МНДП) и ЛИЗМОП представлены на рис. 15.9.

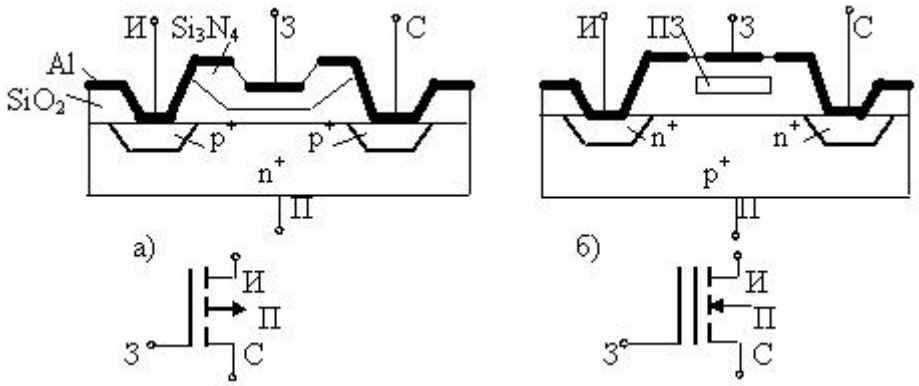


Рис. 15.9. Структура и условные обозначения полевых транзисторов:
а – типа МНОП, *б* – с двумя затворами (плавающим и управляющим)

В рассматриваемых структурах процесс программирования – это занесение заряда под затвор. Для этого, например, в транзисторах типа *p*-МОП между затвором и подложкой дается импульс напряжения отрицательной полярности с амплитудой 30 – 40 В. При этом под действием сильного электрического поля электроны преодолевают тонкий слой SiO_2 и скапливаются у границы слоя Si_3N_4. Накопленный заряд снижает пороговое напряжение открытия транзистора, снижая сопротивление канала между истоком и стоком. Наличие заряда под затвором соответствует состоянию логической «1». Логическому «0» соответствует состояние транзистора без заряда в диэлектрике под затвором. Для того, чтобы этого достигнуть подают на затвор импульс положительной полярности с амплитудой (30 – 40) В. Электроны при этом вытесняются в подложку. Передаточная характеристика смещается в область высоких пороговых напряжений. Таким образом, вытеснение заряда из подзатворного диэлектрика – это *режим стирания*.

Режимы программирования и стирания можно осуществить с помощью напряжения одной полярности (отрицательной для *p*-МНОП, положительной для *n*-МНОП). В этом случае используется явление лавинной инжекции электронов под затвор, которая происходит, если (для *p*-МНОП) к истоку и стоку приложить импульс отрицатель-

ного напряжения (30 – 40) В, а затвор и подложку соединить с корпусом. В результате электрического пробоя переходов исток-подложка и сток-подложка происходит лавинное размножение электронов и инжекция некоторых из них, обладающих достаточной энергией, на границу между слоями диэлектрика. В результате происходит «запись единицы», т.е. снижение порогового напряжения открытия транзистора. Для стирания достаточно подать импульс отрицательного напряжения на затвор. При этом электроны вытесняются в подложку, что вызывает увеличение модуля порогового напряжения открытия транзистора (возникает состояние логического «0»).

В *режиме считывания* на затвор подают напряжение, значение которого лежит между двумя пороговыми уровнями. Если в запоминающий элемент была записана логическая «1», транзистор откроется, если логический «0» − нет.

Вариант элемента памяти (ЭП) по структуре ЛИЗМОП с двойным затвором (рис. 15.9, *б*) представляет собой *n*-МОП-транзистор, у которого в подзатворной области диэлектрика SiO_2 сформирована область из металла или поликристаллического кремния − «плавающий» затвор (ПЗ).

В режиме *программирование* на управляющий затвор, исток и сток подают напряжение (21 – 25) В положительной полярности. В обратно смещенных *p*–*n*-переходах возникает процесс лавинного размножения носителей заряда и часть электронов инжектируется в ПЗ. В результате накопления на ПЗ отрицательного заряда передаточная характеристика транзистора смещается в область высокого порогового напряжения (пороговое напряжение открытия транзистора увеличивается), что соответствует записи логического «0».

В режиме *стирание* происходит вытеснение заряда из области ПЗ: в РПЗУ-ЭС – электрическим сигналом, в РПЗУ-УФ – с помощью облучения ультрафиолетовыми лучами. В первом случае импульсом положительного напряжения, подаваемым на управляющий затвор, снимают заряд электронов с ПЗ, восстанавливая низкий уровень порогового напряжения, что соответствует состоянию логической «1». В структурах РПЗУ-УФ при облучении электроны рассасываются с ПЗ в подложку вследствие усиления теплового движения за счет энергии, полученной от источника УФ излучения. Режим с*читывание* осуществляется также, как в ЭП на МНОП-структурах.

Режим *хранение* обеспечивается отсутствием напряжений на электродах ЭП с тем, чтобы исключить рассасывание заряда, имею-

щегося в диэлектрической среде. Время сохранения заряда для некоторых схем составляет от нескольких тысяч часов до нескольких лет. Например, микросхема РПЗУ-УФ типа К573РФ6 имеет гарантийный срок хранения информации без питания пять лет.

15.7. Структурная схема РПЗУ-ЭС (EPROM)

В РПЗУ-ЭС обеспечиваются четыре режима работы: *хранение, считывание, стирание, запись (программирование*). Для выполнения этих режимов РПЗУ содержит все элементы, необходимые для работы микросхемы в качестве ПЗУ: матрицу элементов памяти (ЭП), дешифраторы кода адреса строк и столбцов, устройство ввода-вывода (УВВ), устройство управления. Кроме этих узлов в схеме имеются функциональные узлы, обеспечивающие работу схемы в режимах стирания и программирования (записи): селектор (блок ключей выбора столбцов), коммутаторы режимов и формирователи импульсов напряжения требуемой амплитуды и длительности из напряжения программирования U_{PR} (рис. 15.10). Сигналы управления имеют следующее назначение:

– PR – разрешение режима записи (программирования);
– RD – разрешение чтения (считывания);
– ER – разрешение стирания;
– CS – выбор микросхемы.

Селектор выбирает из 128-разрядного кода на своем входе восемь разрядов, выдаваемых на выход через УВВ. Селектором управляют четыре младшие разряда адресного кода, которые после дешифрации обеспечивают выборку одного восьмиразрядного слова из 16 слов, содержащихся в выбранной строке.

Многие микросхемы группы ЭС допускают адресное стирание (избирательное построчное стирание по адресу).

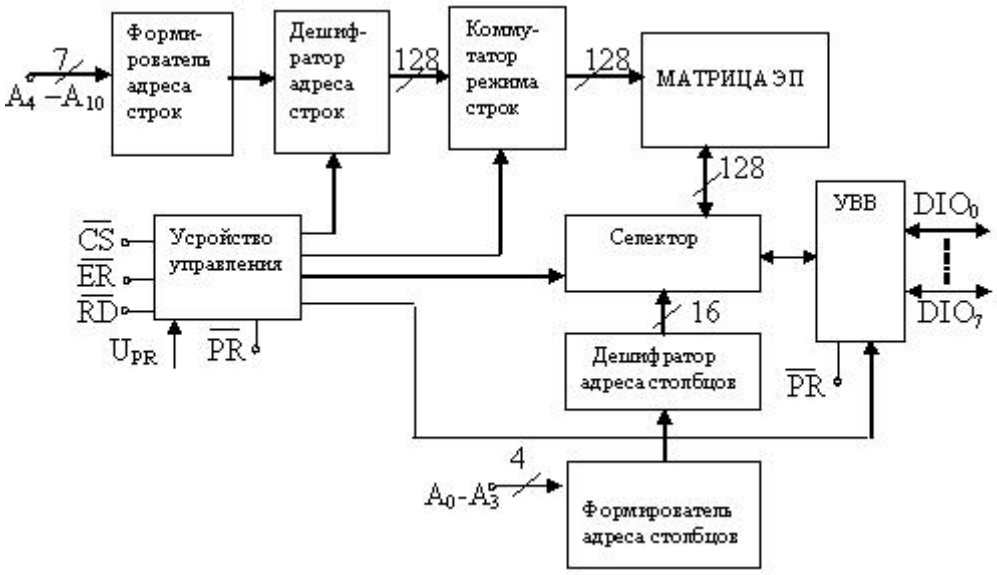


Рис. 15.10. Структурная схема репрограммируемого ПЗУ с электрической записью и стиранием (EEPROM) (микросхема КР1601РР3)

При эксплуатации микросхем РПЗУ необходимо обеспечить требуемый порядок включения и выключения напряжений питания и программирования. Например, для микросхемы КР1601РР3 в режиме программирования при включении вначале подают + 5 В, затем – 12 В и последним – напряжение программирования. При выключении последовательность меняется на противоположную.

15.8. Постоянные запоминающие устройства РПЗУ-УФ

РПЗУ-УФ имеют устройство и режимы работы похожие на рассмотренные выше, однако процесс стирания существенно отличается.

Для стирания микросхему нужно извлечь из контактного устройства, замкнуть все выводы полоской фольги и поместить под источник излучения, обеспечив охлаждение корпуса. Источники ультрафиолетового излучения − ртутные лампы и лампы с парами ртути в кварцевых баллонах: РДТ-220, ДРТ-375, ДБ-8, ДБ-60 и др. Время стирания 30 – 60 минут. Расстояние от корпуса до баллона лампы должно быть 2,5 см. Необходимо обеспечить чистоту стекла корпуса микросхемы, иначе стирание может быть неполным. Режимы работы обеспечивают сигналами управления подобными рассмотренным, однако у некоторых микросхем есть режим контроля записи, который

реализуется вслед за программированием. Группа м/схем РПЗУ-УФ в отечественной комплектации была представлена серией К573РФ [17]. Наиболее сложную структуру имеет микросхема К573РФ3 с организацией (4к ·16). Она имеет встроенные интерфейсные средства для обеспечения режима обмена со стандартной магистралью. Кроме того, у нее есть встроенное программируемое адресное устройство, которое позволяет без дополнительных средств объединять до восьми микросхем в блок ПЗУ.

15.9. Условные обозначения микросхем и сигналов управления запоминающими устройствами (примеры УГО ЗУ)

1. Микросхемы оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) представлены на рис. 15.11.

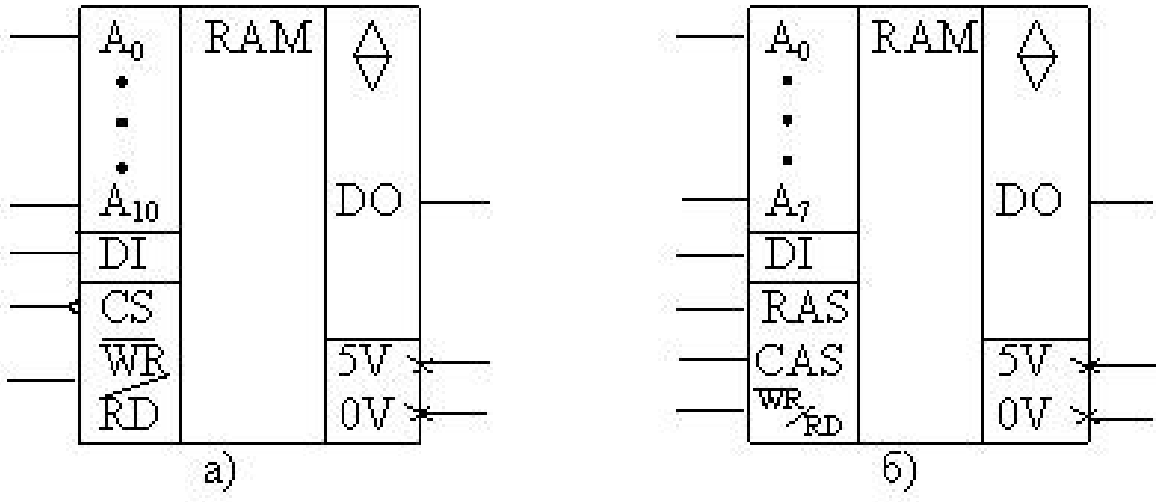


Рис. 15.11. Условные обозначения статического (*а*) и динамического (*б*) ОЗУ

2. Микросхемы постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) представлены на рис. 15.12.

На рис. 15.11 и 15.12 изображены ЗУ со знаком на выходе микросхем. Этот знак показывает, что выходные цепи ЗУ выполнены по

схеме с третьим состоянием, т.е. на выходе информация появится только тогда, когда на входе CS будет установлен *активный уровень* сигнала.

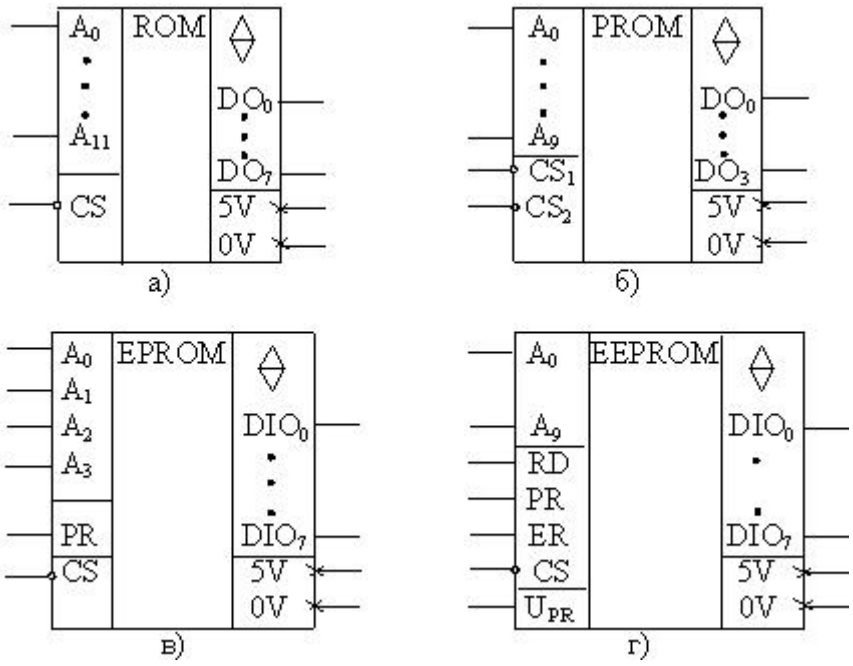


Рис. 15.12. Условные обозначения постоянных запоминающих устройств:
а – масочное ПЗУ; *б* – «прожигаемое» ПЗУ; *в* – репрограммируемое ПЗУ со стиранием ультрафиолетовым излучением;
г – ПЗУ с электрическим стирание

На выходе микросхемы могут быть изображены другие значки, указывающие тип выхода ЗУ:

– выход с 3-м состоянием;

– выходные цепи имеют открытый коллектор;

– выходные цепи имеют открытый эмиттер.

Обозначения сигналов и выводов микросхем ЗУ имеют следующий смысл:

A_0 –A_n – обозначение адресных входов, номер соответствует разряду двоичного кода в адресном кодовом слове;

DI, DO – обозначение выводов входа и выхода данных;

DIO_0 – DIO_n – обозначение выводов, которые могут быть либо входами, либо выходами данных, номер соответствует разряду двоичного кода в выходном кодовом слове;

CS – выбор микросхемы;

WR/RD – сигнал запись (считывание);

RAS – строб адреса строк;

CAS – строб адреса столбцов;

PR – сигнал программирования;
U_{PR} – напряжение программирования;
RD – сигнал считывания (чтения);
ER – сигнал стирания.

15.10. Флэш-память

Флэш-память (Flach-Memory) по принципам работы и типу запоминающих элементов подобна ЗУ типа EEPROM с программированием МОП-транзисторов с плавающим затвором.

В схемах Flach данные стираются электрическими сигналами. За счет упрощения структуры и процедур стирания в схемах Flach достигается высокий уровень интеграции и быстродействия. Запоминание данных осуществляется с помощью зарядов-разрядов плавающих затворов матрицы МОП-транзисторов. Заряд производится с помощью лавинной инжекции электронов в область плавающего затвора, а при стирании используется туннелирование электронов через тонкий слой диэлектрика. При этом в качестве запоминающего элемента используются модифицированные МОП-транзисторы, например, МОП-транзисторы с многоуровневым хранением заряда, либо МОП-транзисторы с зеркальным битом [20].

Технологически проще выполняется структура МОП-транзистора с *зеркальным битом*. Основой структуры флэш-памяти является матрица запоминающих элементов из МОП-транзисторов на основе ячеек ИЛИ-НЕ либо И-НЕ (рис. 15.13).

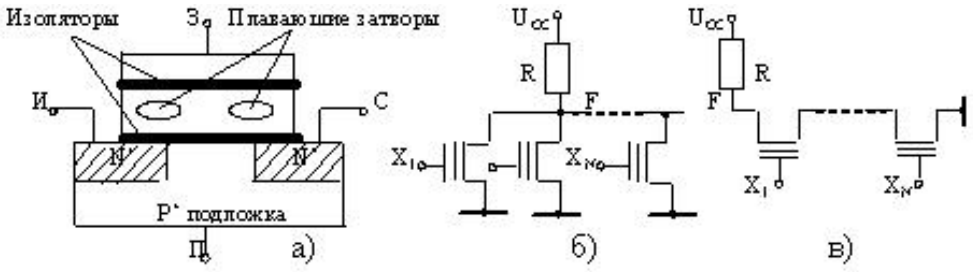


Рис. 15.13. Структура запоминающего элемента
с зеркальным битом (а) и схемы ячеек ИЛИ-НЕ (б), И-НЕ (в)

В запоминающем элементе с зеркальным битом области истока и стока идентичны, а запоминающая область выполнена так, что

группы электронов (плавающие затворы) могут длительно храниться независимо друг от друга.

Структура микросхем Flach-памяти содержит матрицу ячеек логических элементов, построенных на запоминающих МНОП-транзисторах (рис. 15.13, *б, в*). Считается, что ячейки И-НЕ обеспечивают большую компактность, но имеют меньшее быстродействие по сравнению с ячейками ИЛИ-НЕ. Ячейки ИЛИ-НЕ обеспечивают более быстрый доступ к словам при произвольной выборке.

Структура матрицы накопителя Flach-памяти представлена на рис. 15.14.

В накопителе каждый столбец матрицы представляет собой совокупность параллельно соединенных МНОП-транзисторов. На словарные линии выборки (строки) в процессе выборки подают уровень напряжения, при котором транзисторы могут открыться (высокий логический уровень). Транзисторы невыбранных строк будут заперты. В выбранной строке откроются те транзисторы, в плавающих затворах которых отсутствует заряд электронов. Открывшиеся транзисторы передадут высокий логический уровень напряжения на разрядные линии считывания.

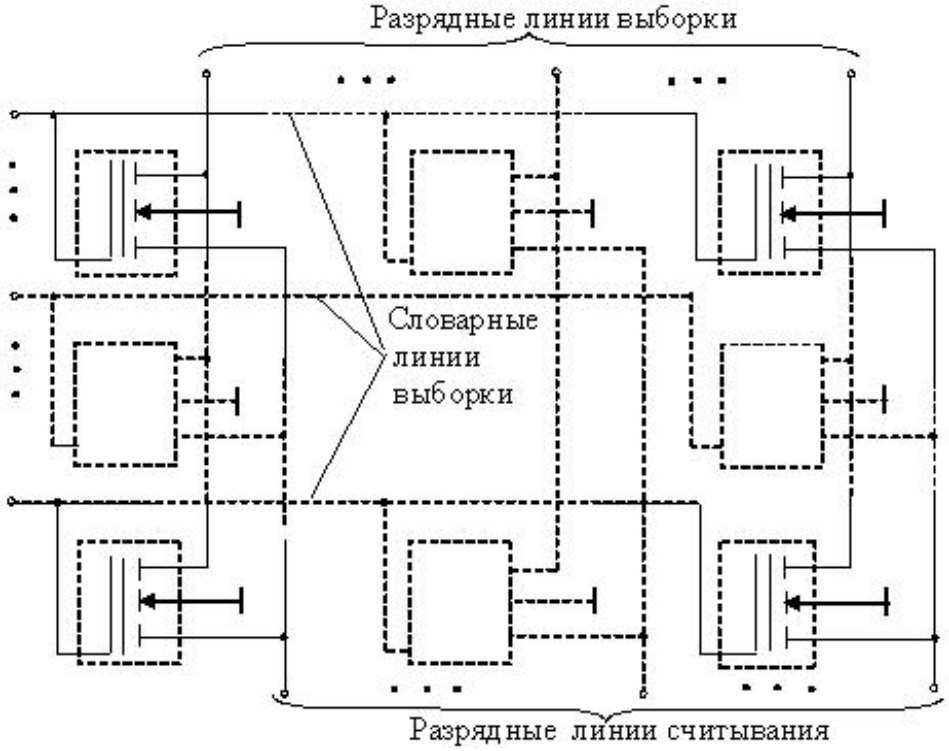


Рис. 15.14. Структура матрицы накопителя Flach-памяти на основе ячеек ИЛИ-НЕ

Управление микросхемами Flach-памяти имеет более сложный характер по сравнению с традиционным способом управления схема-

ми памяти с помощью адресных и управляющих сигналов. Flach-память имеет управление словами-командами, предварительно записанными в специальный внутренний командный регистр. Слова-команды имеют в своём составе команды, обеспечивающие подготовку и выполнение операций стирания, программирования и проверки, чтения и сброса.

Команда сброса является средством устранения действия команд стирания и программирования, что повышает надежность хранения информации.

Флэш-память имеет две разновидности, обусловленные двумя основными направлениями использования. Первая – хранение не очень часто изменяемых данных. Вторая – замена памяти на жёстких магнитных дисках. Микросхемы первого направления имеют блочную несимметричную структуру. В составе этих микросхем имеется так называемый загрузочный блок (Boot-блок), в котором информация надежно защищена аппаратными средствами от случайного стирания.

В Boot-блоке хранятся программы инициализации системы, позволяющие ввести её в работу после подачи питания. Микросхемы второго направления имеют блочную симметричную структуру с идентичными блоками и более развитые средства перезаписи информации. Такую Flach-память называют файловой. Она служит основным средством замены традиционного сочетания жёсткий диск + динамическое ОЗУ на Flach-память + статическое ОЗУ, что особенно эффективно в портативных компьютерах.

Пример условного обозначения (внешняя организация) файловой Flach-памяти показан на рис. 15.15 [20].

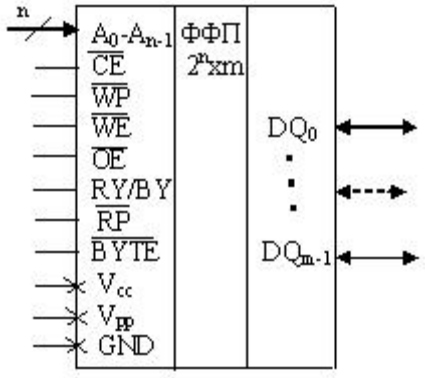


Рис. 15.15. *Пример условного обозначения*

микросхемы файловой флэш-памяти

Обозначения выводов и сигналов, показанных на рис. 15.15, имеют следующий смысл: A_0 – младший бит адреса, A_{n-1} – старший бит адреса, n – число разрядов адреса; DQ_0 – младший бит выходных данных; DQ_{m-1} – старший бит выходных данных на двунаправленной шине данных. Сигнал $\overline{CE}$ – разрешение (выбор) кристалла; OE – перевод (установка) выхода в третье состояние; сигнал WE управляет доступом к внутреннему автомату управления процессами стирания/(записи); сигнал WP – разрешение защиты записи в блоках (каждый блок имеет бит запрещения записи);

сигнал RY/$\overline{B}$Y – индицирует состояние внутреннего автомата записи; с$\overline{игнал}$ RP – установка режима малой мощности потребления; сигнал BYTE вводит схему либо в байтовый, либо в словарный режим.

Микросхемы файловой флэш-памяти в настоящее время имеют информационную ёмкость несколько Гбит при байтовой разрядности 8/16 бит и напряжении питания от 5 до 1,8 В.

16. НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Перспективы и направления развития электроники зависят в первую очередь от научных достижений в области физики, химии, математики и техники полупроводников. Электроника, связанная с нарастающими информационными потоками, давно уже перешла в область микроэлектроники, где достигнуты впечатляющие успехи благодаря миниатюризации, снижению потребления энергии, повышению быстродействия, расширению функциональных возможностей электронных средств.

В настоящее время наблюдается переход от микроструктур к наноструктурам, что сулит дальнейшее увеличение степени интеграции полупроводниковых приборов и улучшение энергетических параметров базовых элементов электроники, в первую очередь транзисторов, а на их основе – всех других функциональных узлов электроники. По мнению ведущих ученых наноструктуры будут основной элементной базой в ближайшие 30 – 50 лет [23]. Следует при этом заметить, что технология изготовления наноструктурных электронных чипов существенно сложнее технологии изготовления микроструктурных чипов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якубовский, С.В. Аналоговые и цифровые интегральные схемы / С.В. Якубовский, Н.А. Барканов, Б.П. Кудряшов; под ред. С.В. Якубовского. – М.: Сов. радио, 1979. – 336 с.: ил.

2. Опадчий, Е.Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 768 с.: ил.

3. Аллен, Ф. Электронные схемы с переключаемыми конденсаторами / Ф. Аллен, Э. Санчес-Синенсио.– М.: Мир, 1989.– 205 с.: ил.

4. Быстров, Ю.А. Электронные приборы для отображения информации / Ю.А. Быстров, И.И. Литвак, Г.М. Персианов. – М.: Радио и связь, 1985. – 240 с.: ил.

5. Будинский, Я. Логические цепи в цифровой технике / К. Юнга; под ред. Б.А. Калабекова; пер. с чешск. – М.: Связь, 1977. – 392 с.: ил.

6. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах учебное пособие/ В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.: ил.

7. Гусев, В.Г. Электроника: учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 2-е изд.– М.: Высш. шк., 1991. – 662 с.: ил.

8. Ефимов, И.Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов. – М.: Высш. шк., 1986. – 464 с.: ил.

9. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.: ил.

10. Мулявка, Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами / Я. Мулявка. – М.: Мир, 1992.–205с.: ил.

11. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.

12. Основы промышленной электроники: учебник для вузов / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.: ил.

13. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 744 с.: ил.

14. Прянишников, В.А. Электроника: курс лекций / В.А. Прянишников. – СПб.: Корона принт, 1998. – 400 с.: ил.

15. Полупроводниковые приборы: Транзисторы: справочник / В.Л. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 904 с.: ил.

16. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах: учебное пособие для вузов / Под ред. С.Я. Шаца. – М.: Сов. радио, 1976. – 312 с.: ил.

17. Полупроводниковые БИС запоминающих устройств: справочник / В.В. Баранов, Н.В. Бекин, А.Ю. Гордонов и др.; под ред. А.Ю. Гордонова и Ю.Н. Дьякова. – М.: Радио и связь, 1987. – 360 с.: ил.

18. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем учебник / И.П. Степаненко. – М.: Энергия, 1973. – 608 с.: ил.

19. Токхейм, Р. Основы цифровой электроники / Р. Токхейм; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.: ил.

20. Угрюмов, Е.П. Цифровая схемотехника: учебное пособие для вузов/ Е.П. Угрюмов.– СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.: ил.

21. Цыкин, Г.С. Электронные усилители / Г.С. Цыкин. – М.: Связь, 1965. – 511 с.: ил.

22. Шило, В.Л. Популярные цифровые микросхемы: справочник / В.Л. Шило. – М.: Радио и связь, 1987. – 352 с.: ил.

23. Щука, А.А. Наноэлектроника /А.А. Щука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.: ил.

24. Электротехника: программирование учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов / В.Г. Герасимов, Х.Э. Зайдель, В.В. Коген-Далин и др.; под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1983. – 480 с.: ил.

25. Электроника. Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Колесников. – М.: Советская энциклопедия, 1991. – 688 с.: ил.

26. Ялышев, А.У. Многофункциональные аналоговые регулирующие устройства автоматики / А.У. Ялышев, О.И. Разорёнов. – М.: Машиностроение, 1981. – 399 с.: ил.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры технической механики
(протокол № 1 от 15.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. Б. Волков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.09.15 ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА МЕХАТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Специальность –
21.05.04 Горное дело
Специализация –
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Лекция 1. Общие понятия об информационной поддержке мехатронных производств 7
1.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий 9
1.2. Системный подход к информационной поддержке сложных систем: анализ, синтез, моделирование, оптимизация [2, 3] 14
Контрольные вопросы 27

Лекция 2. Машиностроительные и металлообрабатывающие производства 29
2.1. Гибкие автоматизированные системы и производства 30
2.2. Автоматизированные линии 38
2.3. Гибкие производственные системы механообрабатывающего производства 50
Контрольные вопросы 53

Лекция 3. Введение в процесс проектирования мехатронных систем 55
3.1. Основные принципы проектирования 56
3.2. Схема процесса проектирования 60
3.3. Системный подход к проектированию 67
Контрольные вопросы 76

Лекция 4. Системы автоматизированного проектирования в машиностроении 78
4.1. Общая характеристика систем автоматизированного проектирования 78
4.2. Структура и разновидности систем автоматизированного проектирования 113
4.3. Программные системы проектирования (примеры программ) [3] 116
Контрольные вопросы 124

Лекция 5. Интегрированный подход к разработке мехатронных систем 125
5.1. Системы PDM 126

5.2. Метод обмена данными 129
5.3. Тенденции в развитии интегрированных систем [10, 11] . . . 132
Контрольные вопросы 133

Лекция 6. Концептуальное проектирование и модернизация мехатронных систем 135
6.1. Основные положения 135
6.2. Инструментальные средства концептуального проектирования и модернизации систем 139
Контрольные вопросы 148

Лекция 7. Информационная поддержка жизненного цикла мехатронных систем 150
7.1. CALS-технологии (основные понятия) [1, 3] 150
7.2. STEP-стандарты [5] 158
7.3. Организация в STEP информационных обменов [1] 160
7.4. Проблемы практического использования CALS-технологий 162
Контрольные вопросы 165

Лекция 8. Основные прикладные методы и средства построения интегрированных мехатронных систем 167
8.1. Формирование общих проектных решений [3, 12, 13] 167
8.2. Построение модели процесса разработки мехатронных систем 170
Контрольные вопросы 188

Лекция 9. Автоматизированные системы управления мехатронными производствами [1, 3, 18] 190
9.1. Автоматизация управления предприятиями (АСУП) 190
9.2. Автоматизация управления технологическими процессами (АСУТП) 192
9.3. Информационные логистические системы 194
9.4. Автоматизированные системы делопроизводства 197
Контрольные вопросы 198

Заключение 200

Библиографический список 201

ВВЕДЕНИЕ

Информационная поддержка процессов создания и эксплуатации мехатронных (сложных) производств базируется на широком классе универсальных автоматизированных систем, предназначенных для использования на всех этапах жизненного цикла изделий (ЖЦИ). На этапах проектирования и подготовки производства используются интегрированные САПР – CAD, CAM, CAE, PDM, CAPP и др.; на этапа производства и реализации изделий – SCADA, CNC, MRP, ERP, MES и др.; на этапе эксплуатации и утилизации изделий – CRM, SQSM, MES.

Мировой опыт промышленного производства сложных изделий на современном уровне свидетельствует, что их создание невозможно без использования информационных систем поддержки производственных процессов. Такая поддержка получила название CALS (русская аббревиатура КСПИ) – Continuous Acquisition and Lifecycle Support (компьютерное сопровождение и поддержка жизненного цикла изделий). Данная система поддержки производственных процессов призвана заменить традиционную технологию создания и эксплуатации производственных процессов, которая отличается фрагментарным использованием автоматизированных систем. Она допускает дублирование и несогласованность данных, возможность рассмотрения недостаточно перспективных вариантов производственных процессов, в то время как лучший вариант остается нерассмотренным. При этом возможно недостаточно эффективное использование знаний, накопленных в процессе создания и эксплуатации производственных процессов [19].

Основное назначение CALS-технологий – обеспечение единого информационного пространства (ЕИП) и технологий для предоставления необходимой информации в нужное время, в нужном виде, в конкретном месте любому из участников жизненного цикла (ЖЦ) производственного процесса.

CALS-технологии развиваются прежде всего на базе САПР (на стадии создания мехатронных систем), хотя при этом рассматриваются также вопросы моделирования приложений: на начальных этапах моделирования сложных слабоструктурированных приложений используются методы функционального (IDEF0) и информационного (IDEF1X) моделирования систем и методы объективного моделирования на базе среды UML.

Информационная поддержка производственных процессов на стадии их эксплуатации осуществляется за счет применения автоматизированных систем управления мехатронными производствами (АСУП, АСУТП, логистических систем, автоматизированных систем делопроизводства).

Для успешного применения современных информационных технологий в промышленности и других отраслях народного хозяйства необходимо иметь квалифицированные кадры, знающие и умеющие использовать информационные технологии создания и эксплуатации сложных систем различного назначения.

Данный курс лекций направлен на базовую подготовку таких специалистов.

Курс лекций «Информационная поддержка мехатронных комплексов и производств» предназначен в первую очередь для бакалавров и магистров по направлению подготовки 15.03.06 – Мехатроника и робототехника, а также других технических направлений и специальностей, связанных с созданием и управлением сложными техническими системами.

В основу данных лекций положен опыт преподавания информационных технологий (отраженных в учебниках, монографиях и публикациях в научно-технических журналах) в ряде ведущих университетов России – МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ «Станкин», УГАТУ (г. Уфа), МИРЭА и других.

Курс содержит 9 лекций, в которых отражены отдельные аспекты информационной поддержки сложных мехатронных систем и производств.

Авторы выражают благодарность рецензентам и всем коллегам за советы и рекомендации при обсуждении материала лекций.

Лекция 1
ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКЕ МЕХАТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Современные производства сложной техники являются базой инновационной экономики, основанной для создания и производства наукоемких изделий, конкурентоспособных на мировых рынках.

Сложные производства базируются на согласованной работе многих предприятий. В свою очередь успешная производственная деятельность на каждом отдельном предприятии осуществляется с помощью автоматизированных систем управления производством и предполагает необходимость информационного взаимодействия этих систем. Такое же информационное взаимодействие должно существовать и между отдельными предприятиями при выпуске сложной продукции.

Мехатронная производственная система, представляющая единый комплекс электромеханических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта, является научной и технической базой для создания современного производства сложной техники и физико-технических систем и процессов различного назначения с принципиально новыми функциями и свойствами.

Для обеспечения согласованной работы мехатронных производственных систем создается соответствующая информационная поддержка между элементами производственной системы по всей цепочке жизненного цикла промышленных изделий:

маркетинг > проектирование > подготовка производства > производство > реализация > эксплуатация > утилизация.

Форма, характер, содержание и назначение информационной поддержки различаются на каждом этапе жизненного цикла изделий. Кроме того, для взаимодействия автоматизированных систем разных предприятий нужна унификация не только формы, но и содержания проектной, технологической, эксплуатационной и другой информации о совместно производимой продукции.

Информационная поддержка сложных мехатронных производств на стадиях проектирования и управления действующими производствами обеспечивается за счет:

– стандартизации структуры проектной, технологической и эксплуатационной документации, а также языков ее представления;

– создания единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников жизненного цикла изделия, в котором предусмотрено хранение, обработка и передача информации в объединенных компьютерных средах, а также обеспечен оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте;

– создания интегрированных компьютеризированных производств и охватывающей их интегрированной автоматизированной информационной системы;

– применения технологии представления данных об изделии (набора методов для представления в электронном виде данных об изделии, относящихся к отдельным процессам жизненного цикла изделия);

– использования автоматизированных систем, называемых системами управления данными об изделии (проектными данными) – PDM (Product Data Management);

– набора методов информационного обеспечения реструктуризации и реинжиниринга производственных процессов (и бизнес-процессов) в целях повышения их эффективности.

В данном курсе лекций основное внимание будет уделено вопросам информационной поддержки методов проектирования и автоматизации управления предприятиями и технологическими процессами.

1.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий

Достижение поставленных целей на современных предприятиях, выпускающих сложные промышленные изделия, оказывается невозможным без широкого использования автоматизированных систем (АС), основанных на применении компьютеров и предназначенных для создания, переработки и использования всей необходимой информации о свойствах изделий и сопровождающих процессов. Специфика задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий, обусловливает разнообразие применяемых АС.

Все задачи, решаемые и выполняемые в процессе разработки и производства продукции, называются жизненным циклом (ЖЦ) промышленной продукции (изделий) (product life cycle). Основные этапы жизненного цикла промышленной продукции представлены на рис. 1.1. К ним относятся этапы проектирования, технологической подготовки производства (ТПП), производства, реализации продукции, эксплуатации и утилизации [1].

Этапы жизненного цикла для информационных систем или программного обеспечения (ПО) могут отличаться от приведенных на рис. 1.1.

На всех этапах жизненного цикла изделий имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. На этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение технического задания (ТЗ) при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики.

Под эффективностью понимают не только снижение себестоимости продукции и сокращение сроков проектирования и производства, но и обеспечение удобства освоения и снижение затрат на будущую эксплуатацию изделий. Особую важность требование удобства эксплуатации имеет для сложной техники, например в таких отраслях, как авиа- или автомобилестроение.

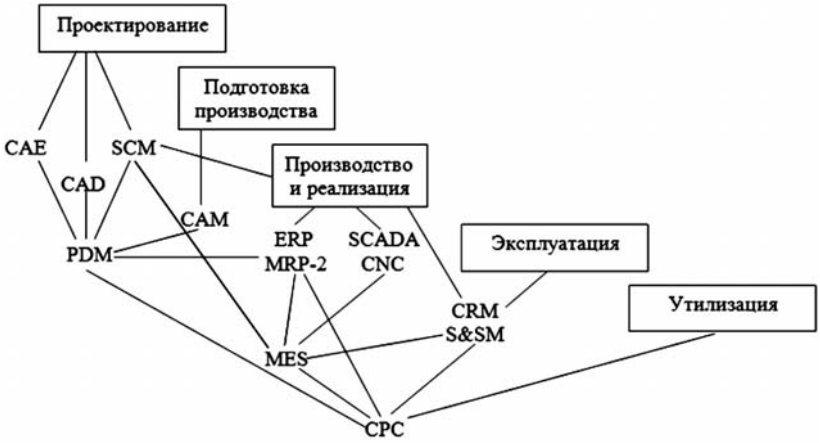


Рис. 1.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

Основные типы АС с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий указаны на рис. 1.1:

– CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);

– CAD – Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);

– CAM–$5omputer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства);

– PDM – Product Data Management (управление проектными данными);

– ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);

– MRP-2 – Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производства);

– MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);

– SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок);

– CRM–$5ustomer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);

– SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);

– CNC–$5omputer Numerical Control (компьютерное числовое управление);

– S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);

– CPC–$5ollaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес);

– PLM – Product Lifecycle Management (управление жизненным циклом изделий).

Современные САПР (или система CAE/CAD), обеспечивающие сквозное проектирование сложных изделий или, по крайней мере, выполняющие большинство проектных процедур, имеют многомодульную структуру. Модули различаются своей ориентацией на те или иные проектные задачи применительно к тем или иным типам устройств и конструкций. При этом возникают естественные проблемы, связанные с построением общих баз данных, с выбором протоколов, форматов данных и интерфейсов разнородных подсистем, с организацией совместного использования модулей при групповой работе. Эти проблемы усугубляются на предприятиях, производящих сложные изделия, в частности, с механическими и радиоэлектронными подсистемами, поскольку САПР машиностроения и радиоэлектроники до недавнего времени развивались самостоятельно, в отрыве друг от друга.

Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения разрабатываются системы управления проектными данными – системы PDM. Они либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Уже на этапе проектирования требуются услуги системы SCM, иногда называемой системой управления поставками комплектующих (Component Supplier Management), которая на этапе производства обеспечивает поставки необходимых материалов и комплектующих.

АСТПП, составляющие основу системы CAM, выполняют синтез технологических процессов и программ для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), выбор технологического оборудования, инструмента, оснастки, расчет норм времени и т. п. Модули систем CAM обычно входят в состав развитых САПР, и потому интегрированные САПР часто называют системами CAE/CAD/CAM/PDM.

Функции управления на промышленных предприятиях выполняются автоматизированными системами на нескольких иерархических уровнях. Автоматизацию управления на верхних уровнях от корпорации (производственных объединений предприятий) до цеха осуществляют АСУП, классифицируемые как системы ERP или MRP-2.

Наиболее известные системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов и т. п. Системы MRP-2 ориентированы главным образом на бизнес-функции, непосредственно связанные с производством.

АСУТП контролируют и используют данные, характеризующие состояние технологического оборудования и протекание технологических процессов. Именно их чаще всего называют системами промышленной автоматизации.

Для выполнения диспетчерских функций (сбора и обработки данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и разработки программного обеспечения для встроенного оборудования в состав АСУТП вводят систему SCADA. Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы CNC на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), встроенных в технологическое оборудование.

На этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые к выпуску изделия. Эти задачи решаются

с помощью системы CRM. Маркетинговые функции иногда возлагаются на систему S&SM, которая, кроме того, служит для решения проблем обслуживания.

На этапе эксплуатации применяются специализированные компьютерные системы, предназначенные для ремонта, контроля, диагностики эксплуатируемых систем. Обслуживающий персонал использует интерактивные учебные пособия и технические руководства, а также средства для дистанционного консультирования при поиске неисправностей, программы для автоматизированного заказа деталей взамен отказавших.

Следует отметить, что функции некоторых автоматизированных систем часто перекрываются. В частности, это относится к системам ERP и MRP-2. Управление маркетингом может быть поручено как системе ERP, так и системе CRM или S&SM.

На решение оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом ориентированы системы MES. Они близки по некоторым выполняемым функциям к системам ERP, PDM, SCM, S&SM и отличаются от них именно оперативностью, принятием решений в реальном времени, причем большое значение придается оптимизации этих решений с учетом текущей информации о состоянии оборудования и процессов.

Перечисленные автоматизированные системы могут работать автономно, что в настоящее время обычно и происходит. Однако эффективность автоматизации будет заметно выше, если данные, генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными.

Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание единого информационного пространства не только на отдельных предприятиях, но и, что более важно, в рамках объединения предприятий (системы CPC или PLM – Product Lifecycle Management).

Единое информационное пространство обеспечивается благодаря унификации как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла. Унификация формы достигается использованием стандартных

форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании, т. е. применением так называемых CALS (Continious Acquisition and Lifecycle Support) – технологий, которые будут рассмотрены ниже.

Более подробно основные функции, проектные процедуры и программное обеспечение АС различных этапов жизненного цикла промышленных изделий (см. рис. 1.1) будут описаны в последующих лекциях.

1.2. Системный подход к информационной поддержке сложных систем: анализ, синтез, моделирование, оптимизация [2, 3]

Системный подход

Системный подход является общим подходом, выражающим основные идеи и принципы, используемые при создании и управлении сложными техническими системами. Системный подход включает в себя самостоятельные математические дисциплины, такие как «Системный анализ» и «Теория систем».

В широком смысле системный анализ – это дисциплина, занимающаяся проблемами принятия решений, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы. Системный анализ возник в связи с необходимостью вести исследования междисциплинарного характера при создании сложных систем (технических, экономических, экологических). Основы системного анализа лежат в дисциплинах, занимающихся проблемами принятия решений, – теории исследования операций и общей теории управления.

В узком смысле системный анализ включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей (группировка связей по характерным принципам), определение свойств (атрибутов) системы, анализ влияния внешней среды и разработку системы управления.

В отличие от системного анализа теория систем носит прикладной характер, ориентированный на решение конкретных прикладных задач.

В технике дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы и их проектирование, чаще всего называют «Системотехникой» (вместо «Теория систем» и «Системный анализ»). Предметом системотехники являются, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, а во-вторых, методы их проектирования и исследования.

Следуя [3], рассмотрим ряд основных понятий и терминов системотехники.

Система – множество элементов, находящихся в отношениях и связях между собой.

Элемент – такая часть системы, представление о которой нецелесообразно подвергать при проектировании дальнейшему членению.

Сложная система – система, характеризуемая большим числом элементов и, что наиболее важно, большим числом взаимосвязей элементов. Сложность системы определяется также видом взаимосвязей элементов, свойствами целенаправленности, целостности, членимости, иерархичности, многоаспектности. Очевидно, что современные автоматизированные информационные системы и, в частности, САПР являются сложными в силу наличия у них перечисленных свойств и признаков.

Подсистема – часть системы (подмножество элементов и их взаимосвязей), которая имеет свойства системы.

Надсистема – система, по отношению к которой рассматриваемая система является подсистемой.

Структура – отображение совокупности элементов системы и их взаимосвязей; понятие структуры отличается от понятия самой системы также тем, что при описании структуры принимают во внимание лишь типы элементов и связей без конкретизации значений их параметров.

Параметр – величина, выражающая свойство или системы, или ее части, или влияющей на систему среды. Обычно в моделях

систем в качестве параметров рассматривают величины, не изменяющиеся в процессе исследования системы. Параметры подразделяют на внешние, внутренние и выходные, выражающие свойства элементов системы, самой системы, внешней среды соответственно. Векторы внутренних, выходных и внешних параметров далее обозначены $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_m)$, $Q = (q_1, q_2, \ldots, q_k)$ соответственно.

Фазовая переменная – величина, характеризующая энергетическое или информационное наполнение элемента или подсистемы.

Состояние – совокупность значений фазовых переменных, зафиксированных в одной временной точке процесса функционирования (событие).

Поведение (динамика) системы – изменение состояния системы в процессе функционирования.

Система без последействия – ее поведение при $t > t_0$ определяется заданием состояния в момент t_0 и вектором внешних воздействий $Q(t)$. В системах с последействием, кроме того, нужно знать предысторию поведения, т. е. состояния системы в моменты, предшествующие t_0.

Вектор переменных V, характеризующих состояние (вектор переменных состояния), – неизбыточное множество фазовых переменных, задание значений которых в некоторый момент времени полностью определяет поведение системы в дальнейшем (в автономных системах без последействия).

Пространство состояний – множество возможных значений вектора переменных состояния.

Фазовая траектория – представление процесса (зависимости $V(t)$) в виде последовательности точек в пространстве состояний.

К характеристикам сложных систем, как сказано выше, часто относят следующие понятия.

Целенаправленность – свойство искусственной системы, выражающее назначение системы. Это свойство необходимо для оценки эффективности вариантов системы.

Целостность – свойство системы, характеризующее взаимосвязанность элементов и наличие зависимости выходных пара-

метров от параметров элементов, при этом большинство выходных параметров не является простым повторением или суммой параметров элементов.

Иерархичность – свойство сложной системы, выражающее возможность и целесообразность ее иерархического описания, т. е. представления в виде нескольких уровней, между компонентами которых имеются отношения целое-часть.

В качестве примера сложной системы рассмотрим «Компьютер».

Компьютер является сложной системой в силу наличия у него большого числа элементов, разнообразных связей между элементами и подсистемами, свойств целенаправленности, целостности, иерархичности. К подсистемам компьютера относятся процессор (процессоры), оперативная память, кэш-память, шины, устройства ввода-вывода. В качестве надсистемы могут выступать вычислительная сеть, автоматизированная и (или) организационная система, к которым принадлежит компьютер. Внутренние параметры – времена выполнения арифметических операций, чтения (записи) в накопителях, пропускная способность шин и др. Выходные параметры – производительность компьютера, емкость оперативной и внешней памяти, себестоимость, время наработки на отказ и др. Внешние параметры – напряжение питания сети и его стабильность, температура окружающей среды и др.

Анализ, синтез, моделирование и оптимизация систем

Изучение сложных систем опирается на методы анализа, синтеза, моделирования и оптимизации систем.

Составными частями системотехники являются следующие основные разделы:

– иерархическая структура системы;

– анализ и моделирование систем;

– синтез и оптимизация систем.

Необходимость иерархической организации в технических системах – следствие их сложности, когда централизованная

обработка информации либо просто невозможна, либо требует такой затраты времени (или средств), которая недопустима по техническим условиям. Основная задача иерархической организации – распределение функций обработки информации и принятия решений между отдельными элементами системы.

Представление о производственной системе расчленяют на иерархические уровни. На верхнем уровне используются только самые общие черты и особенности производственной системы. На следующих – степень подробности описания возрастает (при этом рассматриваются уже отдельные блоки системы с учетом их взаимодействия), что позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности.

Для большинства приложений характерны следующие иерархические уровни:

– ***системный уровень***, на котором решаются наиболее общие задачи проектирования систем, машин и процессов; результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования и т. д.;

– ***макроуровень***, на котором исследуются отдельные устройства, узлы машин и приборов; результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. д.;

– ***микроуровень***, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В каждом приложении число выделяемых уровней и их наименований может быть различным (в радиотехнике, вычислительной технике, машиностроении и т. п.). В машиностроении имеются уровни деталей, узлов, машин и комплексов.

В широком смысле ***анализ*** – это изучение конкретных фактов, вскрытие тонкой структуры явления (системы). ***Синтез*** – объединение различных факторов, построение структуры системы, развитие того или иного процесса, установление его связи с другими явлениями с учетом их взаимной обусловленности.

Основная задача научного анализа – выделить реальные взаимодействия (зависимости) материальных объектов из

множества мысленно допустимых и сформулировать принципы их отбора. Описание этих принципов отбора (в терминах и переменных, которые наиболее полно характеризуют изучаемый предмет) является предметом ***моделирования*** процессов (систем).

Моделирование имеет две четкие различимые задачи:

– создание моделей сложных систем (в англоязычном написании – modelind);

– анализ свойств систем на основе исследования их моделей (simulation).

Моделирование можно разделить на аналитическое и физическое. К аналитическому моделированию относятся математическое и имитационное моделирование, геометрическое, а также виртуальное моделирование. Физическое моделирование реализует физическую модель объекта (например, технология быстрого прототипирования – rapid prototyping).

В данной лекции рассмотрим только математическое и имитационное моделирование. Остальные виды моделирования будут рассмотрены в последующих лекциях.

Построение математических моделей является основой всего системного анализа. Это – центральный этап исследования или проектирования любой системы. От качества модели зависит судьба всего последующего анализа.

В качестве примера рассмотрим модель, которая используется для оптимизации некоторых действий.

Модель динамического процесса описывается дифференциальным уравнением вида

$$\dot{\chi} = f(x,t,u), \tag{1.1}$$

где вектор функции $U(t, x)$ называется управлением;

$x = (x_1, x_2, \ldots x_n)$ – вектор состояния системы.

Управление $U(t, x)$ выбирается из условия достижения некоторой цели. Весьма распространенный класс задач с помощью модели (1.1) можно описать следующим образом: за время T перевести систему из состояния

$$x(0) = x_0 \tag{1.2}$$

в состояние

$$x(T) = x_T \tag{1.3}$$

так, чтобы целевая функция $F(x,t,u)$ была минимальной, т. е.

$$\int_0^T F(x,t,u)dt \to \min. \tag{1.4}$$

Ограничения (1.2), (1.3) и целевую функцию (1.4) мы не включаем в понятие модели (1.1) (для одной и той же модели могут ставиться разные задачи).

Потребность и точность выбираемой или составляемой математической модели должны находиться в соответствии с требуемым качеством решения задачи. Излишняя подробность модели приводит к неоправданному увеличению машинного времени, недостающая – к неправильному результату. Весьма желательна проверка адекватности принятой модели.

Применение математических моделей для исследования и проектирования сложных систем связано с рядом принципиальных трудностей:

– отсутствие законченной постановки задачи исследования при незаконченном процессе познания объекта моделирования;

– сложные и трудные математические процедуры применения аналитических методов решения проблемных задача;

– необходимость изучать новые ситуации в сложных системах, о которых мало что известно;

– невозможность введения в изучаемую систему новых компонентов и т. д.

Для решения подобных задач мало наличие доброкачественной модели, необходима также надежная исходная информация. Но и информации еще не достаточно. Необходим определенный сервис. Так, система моделей должна быть доступна исследователю, варианты расчетов должны проходить достаточно быстро, должна хорошо функционировать система визуализации результатов. Должен быть предельно облегчен ввод новой информации, переход к новым вариантам расчета и т. д. Другими словами,

должна быть создана специальная «имитационная система». Отсюда следует, что «имитационная система – это совокупность моделей, имитирующих протекание изучаемого процесса, объединенная со специальной системой вспомогательных программ и информационной базой, позволяющих достаточно просто и оперативно развивать варианты расчетов. Имитационной системе присуща определенная архитектура, и она должна быть снабжена четкими продуктами ее использования» [2]. Имитационные системы могут быть успешно использованы в сложных задачах оптимизации.

Имитационное моделирование (ИМ) предполагает проведение численных экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение систем, с привлечением для этого ЭВМ. Таким образом, имитационная модель представляет собой машинный аналог сложной системы, она позволяет заменить эксперимент с реальной системой экспериментом с математической моделью этой системы в ЭВМ. Поэтому ИМ так широко применяется для проектирования сложных объектов и для изучения сложных систем, особенно в тех случаях, когда реальный эксперимент слишком дорог или вообще невозможен.

Имитационное моделирование позволяет использовать как точную количественную информацию, так и информацию, полученную от экспертов с учетом оценок, суждений и различных эвристик. В этом состоит главное преимущество ИМ перед математическими моделями.

Имитационную модель сложной системы (СС) можно использовать при решении задач в следующих случаях:

– если не существует законченной постановки задачи исследования – идет процесс познания объекта моделирования; имитационная модель служит средством изучения явления;

– если аналитические методы имеются, но математические процедуры столь сложны и трудоемки, то имитационное моделирование дает более простой способ решения задачи;

– когда кроме оценки влияния параметров СС желательно наблюдение за поведением компонентов СС в течение определенного периода;

– если имитационное моделирование оказывается единственным способом исследования сложной системы из-за невозможности наблюдения явлений в реальных условиях;

– когда необходимо контролировать протекание процессов в СС путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации;

– при подготовке специалистов и освоении новой техники, когда наимитационной модели обеспечивается возможность приобретения необходимых навыков в эксплуатации новой техники;

– когда изучаются новые ситуации в СС, о которых мало что известно или не известно ничего; в этом случае имитация служит для предварительной проверки новых стратегий и правил принятия решений перед проведением экспериментов на реальной системе;

– когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемой СС и модель используется для предсказания «узких» мест в функционировании системы и других трудностей, появляющихся в поведении СС при введении в нее новых компонентов.

Недостатки ИМ: разработка хорошего ИМ часто обходится дороже создания математической модели и требует больших временных затрат; ИМ не может точно отражать реальную сложную систему (быть полностью адекватной сложной системе).

На рис. 1.2 показаны основные этапы имитационного моделирования.

Создание системы начинается с выбора ее структуры. Под структурой в общем случае принято понимать вид элементов, из которых состоит объект, и отношений между элементами. Так, завод как объект состоит из цехов, отделов, служб и т. д. Структура объекта может быть различной в зависимости от назначения объекта.

Синтез объекта (производственного процесса) в значительной степени определяет потребительские свойства будущей продукции. Следует отметить, что анализ и синтез непрерывно связаны друг с другом, так как анализ позволяет получить необходимую информацию для целенаправленного выполнения процедур синтеза в итерационном процессе разработки производственного процесса.

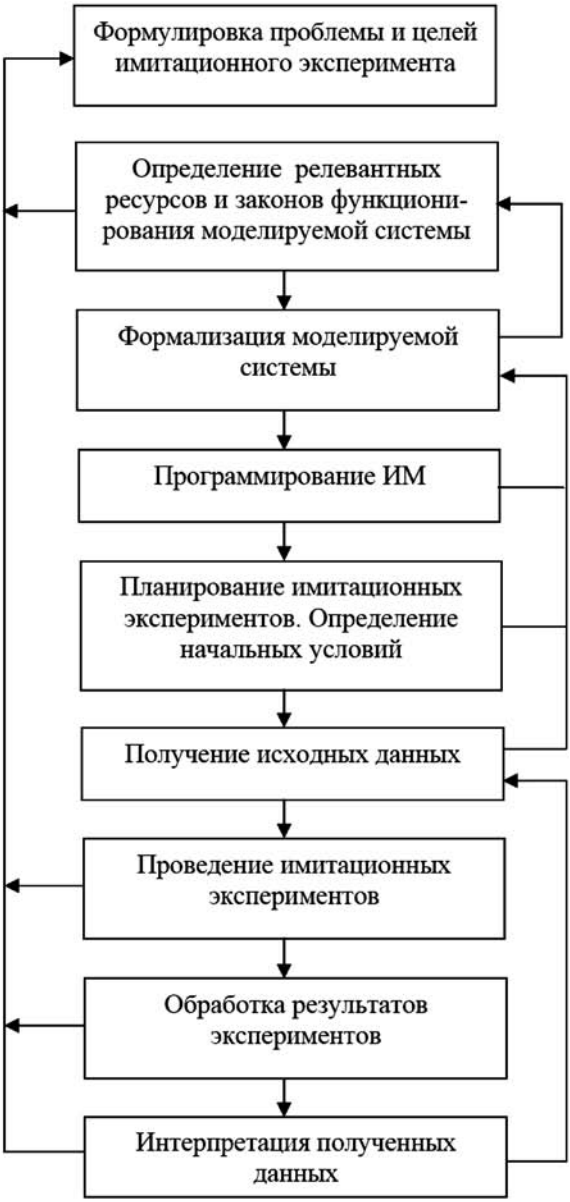


Рис. 1.2. Этапы имитационного моделирования

Синтез, как и анализ, подразделяется на две задачи:

– синтез структуры производственных процессов (систем) – *структурный синтез*;

– выбор численных значений параметров элементов систем – *параметрический синтез*.

Задача структурного синтеза формулируется в системотехнике как задача принятия решения (ЗПР). Ее суть заключается в выборе решения среди множества возможных решений и ограничивающих условий. Принятие решения охватывает широкий круг задач и процедур – от выбора вариантов в конечных и обозримых множествах до задач творческого характера, не имеющих формальных способов решения.

Задачи синтеза структур объектов относятся к наиболее трудно формализуемым. Существует ряд общих подходов к постановке этих задач, однако практическая реализация большинства из них не очевидна. Именно по этой причине структурный синтез, как правило, выполняют в интерактивном режиме при решающей роли инженера-разработчика, а ЭВМ играет вспомогательную роль: выполнение отдельных расчетов, предоставление необходимых справочных данных, фиксация промежуточных и окончательных данных. Имеются лишь отдельные примеры успешной автоматизации структурного синтеза технологических процессов и управляющих программ для механообработки в машиностроении, проектирования печатных плат и кристаллов БИС и некоторые другие. В целом постановки и методы решения задач структурного синтеза в связи с трудностями формализации не достигли степени обобщения и детализации, свойственной математическому обеспечению процессов анализа. Достигнутая степень обобщения выражается в установленной типичной последовательности действий и видов описания при их использовании в САПР. Большое значение для развития подсистем синтеза в САПР имеют разработка и унификация языков представления описаний (спецификаций).

Создание системы (производственного процесса) всегда начинается со *структурного синтеза*, который определяет общий облик будущей системы (одну из конструкций механизма, схему

технологического процесса). Но эти конструкции и схемы выбирают в параметрическом виде, т. е. без указания числовых значений параметров элементов. Поэтому нужно задать или рассчитать значения этих параметров, т. е. выполнить *параметрический синтез*. Примерами результатов параметрического синтеза могут служить, например, рабочие режимы (параметры) технологических операций производственного процесса.

В случае если по результатам анализа проектное решение признается неокончательным, то начинается процесс последовательных приближений к приемлемому варианту проекта. Во многих приложениях для этого удобно варьировать значения параметров элементов, т. е. использовать параметрический синтез на базе многовариантного анализа. При этом задача параметрического синтеза при неизменной структуре объекта может быть сформулирована как задача параметрической оптимизации (или просто оптимизации). Если параметрический синтез не приводит к успеху, то повторяют процедуру структурного синтеза (корректируют или перебирают структуру объекта).

Следуя [3], рассмотрим постановку задач параметрического и структурного синтеза.

Базовая задача параметрического синтеза (приведенная к задаче оптимизации) ставится как задача математического программирования:

$$\begin{gathered} extr\, F(X), \\ X \in Dx \\ Dx = \left\{ X \,/\, y(X) > 0,\ \ \psi(X) = 0 \right\}, \end{gathered} \tag{1.5}$$

где $F(X)$ – целевая функция; X – вектор управляемых (проектных) параметров; $y(X)$ и $\psi(X)$ – функции ограничения; Dx – допустимая область в пространстве управляемых параметров.

Запись (1.5) интерпретируется как задача поиска экстремума целевой функции путем варьирования управляемых параметров в пределах допустимой области. Таким образом, для выполнения расчета номинальных значений параметров необходимо,

во-первых, сформулировать задачу в виде (1.5), во-вторых, решить задачу поиска экстремума $F(X)$.

Базовая задача структурного синтеза формулируется как *задача принятия решения* (ЗПР) следующим образом:

$$ЗПР = \langle A, Y, Мод., П \rangle, \qquad (1.6)$$

где A – множество альтернатив проектного решения; $Y = (y_1, y_2, ..., y_m)$ – множество критериев (выходных параметров), по которым оценивается соответствие альтернативы поставленным целям; $Мод$: $A \rightarrow Y$ – модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев; $П$ – решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многокритериальной ситуации.

В свою очередь, каждой альтернативе конкретного приложения можно поставить в соответствие значение упорядоченного множества (набора) атрибутов $X = x_1, x_2, ..., x_n$, характеризующих свойство альтернативы. Множество X называют *записью* (в теории баз данных), *фреймом* (в искусственном интеллекте) или *хромосомой* (в генетических алгоритмах).

Во многих случаях удается построить в виде алгоритма математическую модель, позволяющую по заданному множеству X и заданной структуре объекта рассчитать вектор критериев Y. Такие модели получаются автоматически в программах анализа типа Spice Adams или ПА-9 для объектов, исследуемых на макроуровне. Для построения таких моделей можно использовать методы планирования экспериментов или подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей.

Если же математическая модель $A \rightarrow Y$ остается неизвестной, то ее создают на основе *экспертных систем*. В [3] описано большое число методов, входящих в состав математического обеспечения анализа и синтеза проектных решений.

Математический аппарат для каждого из иерархических уровней проектирования имеет свои особенности. На *микроуровне* типичные математические модели представлены дифференциальными уравнениями в частных производных вместе с краевыми условиями (такие модели называются распределенными).

Объектами исследования здесь являются поля различных физических величин (напряжений, температур, скоростей и т. д.).

Моделями *макроуровня* (*сосредоточенными* моделями) являются системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений.

Моделями *системного* уровня моделирования сложных объектов (типа сложных производственных систем) является аппарат теории массового обслуживания, сетей Петри или имитационного моделирования.

Постановки и методы решения задач *структурного синтеза* относятся к наиболее трудно формализуемым и выполняются, как правило, в интерактивном режиме инженером-разработчиком. Процесс формального описания структурного синтеза (как было отмечено выше) часто сводится к задаче принятия решения или генетическим методам и алгоритмам.

Процедуры *параметрического синтеза* выполняются либо человеком в процессе многовариантного анализа (в интерактивном режиме), либо решаются на базе формальных методов оптимизации (как было описано выше). В последнем случае находят применение несколько постановок задач оптимизации в виде (1.5).

Последние достижения анализа и синтеза сложных производственных систем, базирующихся на принципах использования современных информационных технологий и программных комплексов, будут рассмотрены в последующих лекциях, посвященных проектированию и управлению производственными процессами.

Контрольные вопросы

1. Форма, характер, содержание и назначение информационной поддержки мехатронных производств.

2. Дайте характеристику этапов жизненного цикла промышленных изделий.

3. Назовите основные типы автоматизированных систем (АС) с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий.

4. Дайте определение «сквозного проектирования» сложных изделий и возникающих при этом проблем.

5. Дайте краткое определение АСТПП, АСУП и АСУТП.

6. Дайте определение понятия «Системный подход» в широком и узком смыслах.

7. Опишите основные понятия и термины системотехники (не цитируя дословно текст лекции).

8. Назовите признаки, присущие сложной системе, приведите собственный пример сложной системы.

9. Обоснуйте необходимость иерархической организации в сложных технических системах, укажите иерархические уровни производственных систем.

10. Укажите основные части (разделы) системотехники, назначение и задачи анализа и моделирования систем.

11. Опишите суть (основное содержание) аналитического и физического моделирования.

12. Обоснуйте необходимость применения математических моделей для исследования и проектирования сложных систем (принципиальные трудности моделирования).

13. Укажите требования, предъявляемые к математическим моделям (на примере имитационной модели).

14. Опишите основное назначение и область применения имитационного моделирования.

15. Основная задача синтеза и оптимизации сложных систем (структурный и параметрический синтез).

16. Порядок создания сложных систем (производственных процессов), постановка задачи параметрического и структурного синтеза.

Лекция 2
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ И МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЕ ПРОИЗВОДСТВА

Металлургия, химическая промышленность, машиностроение и металлообработка являются взаимосвязанными базовыми производствами обрабатывающей отрасли промышленности. Машиностроение во многом определяет состояние производственного потенциала страны, являясь базой технического перевооружения всего общественного производства. Удельный вес продукции машиностроения и металлообработки в общем объеме промышленного производства в России составляет около 20 %.

Основными видами промышленного производства являются следующие производства: одиночное, мелкосерийное, серийное и крупносерийное, массовое, а также непрерывное и дискретное. Под дискретным производством понимается изготовление продукта, проходящего через конечное число технологических и сборочных операций. Непрерывное производство подразумевает изготовление продукта, претерпевающего непрерывные изменения, в результате которых заготовка превращается в готовую деталь. Вид производства оказывает существенное влияние на структуру, систему управления и стоимость продукции (эффективность), технологических процессов данных производств. Кроме того, вид производства определяет необходимый уровень гибкости производства. Под гибкостью производства понимается способность быстро и без существенных затрат труда и средств перестраиваться на изготовление новой или модернизированной продукции и на новые технологические процессы с новой их организацией. По сути дела, речь идет о новых организационных формах решения стратегических задач развития производства, его интенсификации

при ограниченных трудовых, материальных и энергетических ресурсов. Решения таких задач возможно только при условии полной автоматизации машиностроительного производства за счет создания комплексно автоматизированных производств, эффективность которых в первую очередь зависит от гибкости и степени интегрированности их структурных составляющих.

Высшей формой развития комплексно-автоматизированных производств являются гибкие производственные системы (ГПС) и гибкие автоматизированные производства (ГАП) [4].

2.1. Гибкие автоматизированные системы и производства

Такие производства позволяют быстро переходить на выпуск новой продукции, осуществлять ее модернизацию, совершенствовать технологию производства, прежде всего путем смены управляющих программ. Антиподом ГПС и ГАП в отношении гибкости являются автоматические линии (АЛ) с так называемой жесткой автоматизацией. Эффективность АЛ и ГПС зависит от видов производств (рис. 2.1).

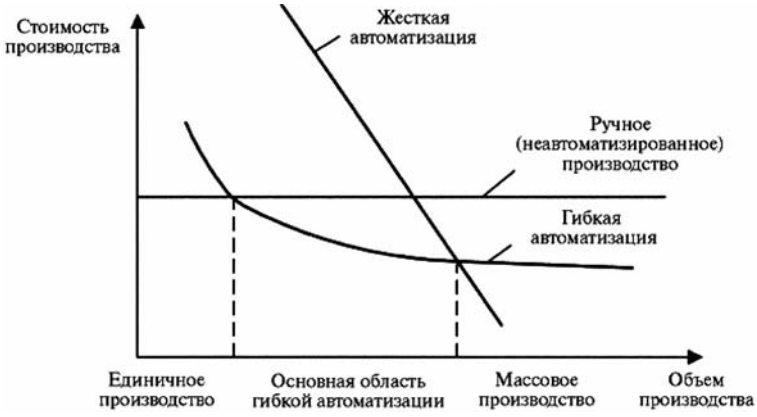


Рис. 2.1. Зависимость стоимости продукции от объема ее выпуска для различных видов производства [5]

Типовой состав ГАП в наиболее полном виде состоит из двух частей, приведенных на рис. 2.2:

– гибкая производственная система (ГПС), которая непосредственно реализует технологический процесс изготовления изделий;

– автоматизированные системы проектирования, подлежащих изготовлению изделий и технологической подготовки их производства, реализуемые с помощью показанных в нижней части рисунка автоматизированных рабочих мест (АРМ).

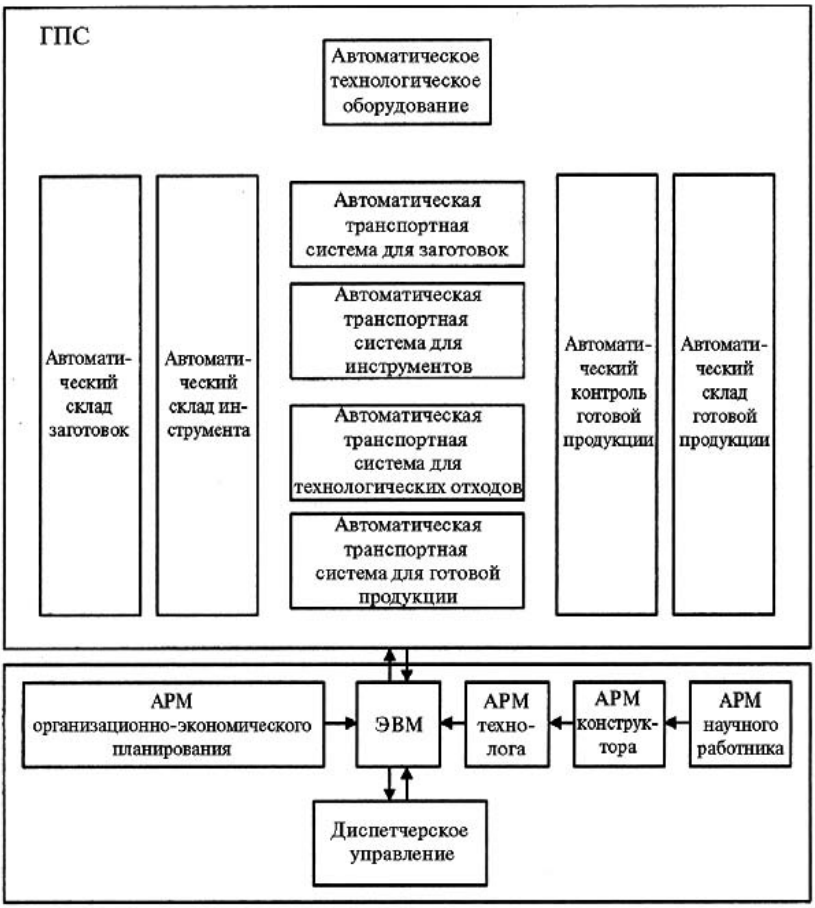


Рис. 2.2. Состав гибкого автоматизированного производства [5]

Части объединены общей автоматизированной системой управления (АСУ) на базе локальной компьютерной сети.

Предел, к которому стремится процесс гибкой автоматизации производства, можно кратко определить так:

– автоматическое производство изделий сколь угодно малыми партиями;

– себестоимость и производительность, близкие к достигнутым в современном массовом производстве;

– практически безлюдное производство – количество работающих, по сравнению с существующим, меньше на два порядка;

– комплексная автоматизация всех частей производства, включая технологические процессы, подготовку производства, разработку документации на выпускаемые изделия, планирование и управление производства в целом.

Таким образом, в максимально полном исполнении ГАП на его вход поступают технические задания на очередное изделие, а на выходе – готовая продукция. Весь процесс может происходить непрерывно на основе машинных носителей информации, т. е. без бумажной документации.

Для мелкосерийного производства степень его гибкости характеризуется количеством типов изделий, которые могут изготавливаться путем смены только программ. Типичные значения этой величины для современных ГАП металлообработки – десятки типов деталей и сотни их модификаций.

В мире внедрение гибкой автоматизации связывают со следующими конкретными достоинствами:

– повышение конкурентоспособности продукции (за счет более быстрой сменяемости выпускаемых изделий, повышения их качества, экономии ресурсов и труда);

– рост производительности;

– стабилизация производства и ускорение оборачиваемости капитала;

– повышение эффективности использования рабочей силы;

– создание новых технологических процессов и производств.

Основной принцип построения гибких производств – компоновка их из комплектно поставляемых унифицированных модулей. В соответствии с составом ГАП, показанным на рис. 2.2,

основными такими модулями являются технологические модули-ячейки, модули транспортные (в том числе на базе транспортных навесных и напольных роботов), складские (в том числе с роботами-штамбелерами), модули контроля качества продукции и технической диагностики оборудования. Последние модули образуют систему автоматического контроля качества, без которой невозможна автоматическая работа всего комплекса. В задачи таких систем входят собственно измерение контролируемых параметров, регистрация результатов этих измерений, визуализация их на терминалах, подача управляющих воздействий в системы управления оборудованием, когда по этим параметрам необходима автоматическая корректировка технологических процессов (например, в случае адаптивного управления станками, учитывающего износ инструмента, изменение размеров заготовок и т. п.). Примером оборудования, используемого в системах автоматического контроля ГАП, являются робототехнические контрольно-измерительные машины.

В ГПС, входящих в состав ГАП (см. рис. 2.2), используют прогрессивное оборудование для перемещения материала, управления станками, формообразования, а также для перспективных методов обработки. Степень необходимой гибкости системы зависит главным образом от объема производства и разнообразия деталей. Так, фирма Comau (США) изготовляет станки для обработки 3…40 деталей в час; на одной линии обрабатывается до 40 разнообразных деталей.

ГПС позволяют преодолеть трудности, связанные с производством групп деталей среднего объема. Эти системы объединяют станки с ЧПУ и автоматическое оборудование для перемещения материала. Система в целом и сам процесс обработки управляются с ЭВМ.

ГПС состоит из нескольких обрабатывающих модулей с ЧПУ; средств для транспортировки палет, размещения зажимов и хранения на участке; централизованного устройства управления движением палет и обрабатывающих операций; различных систем для контроля, наладки инструмента и коррекции, удаления стружки, промывки и продувки.

ГПС, по сравнению со специализированными станочными линиями, легко настраиваются на изменение номенклатуры деталей; новые детали можно обрабатывать при минимальных затратах времени и стоимости необходимого специализированного оборудования.

Основные преимущества ГПС – мгновенная реакция на потребности рынка сбыта, снижение затрат на производство деталей за счет сокращения времени, экономии площади и уменьшения капиталовложений, а также экономия за счет отказа от поступления запчастей извне. Способность обрабатывать детали различной конфигурации позволяет изготовителю осуществлять массовое производство за счет сочетания операций при изготовлении малых и средних партий деталей. Возможность обработки деталей произвольного ассортимента исключает необходимость складирования деталей в ожидании переналадки системы, в результате чего снижаются запасы промежуточных продуктов, потребность в площадях и обеспечивается гибкость планирования производства. Кроме того, к преимуществам ГПС следует отнести и то, что если один участок (или модуль с ЧУ) имеет отклонение от заданного режима работы, то это не влечет за собой отключения всей системы, так как операции неработоспособного модуля распределяются между оставшимися роботами. В результате темп производства снижается, но оно не останавливается. При использовании ГПС имеется возможность экономии производственных площадей за счет исключения специализированного оборудования, сокращения потребности в рабочей силе и снижения степени зависимости от операторов, улучшения условий труда и техники безопасности.

К преимуществам ГПС, по сравнению с обрабатывающими центрами, можно отнести:

– повышение коэффициента использования станков и возможность использования высокопроизводительных рабочих устройств (многошпиндельных головок);

– управление процессами от ЭВМ, обеспечивающее максимальную производительность или максимальный ассортимент обрабатываемых деталей;

– сокращение производственных площадей на 25…30 %;

– сокращение заделов (для некоторых операций и полное их исключение);

– возможность улучшения условий труда, снижение шума.

Чтобы обеспечить оборудованием производство групп деталей без дополнительных капиталовложений (на приобретение специализированного оборудования), фирма Comau запатентовала ГПС, основанную на следующих концепциях использования:

– специальные автономные модули ЧПУ, каждый из которых предназначен для конкретного типа обработки. Специализированный характер таких модулей снижает капиталовложения, упрощает и оптимизирует обработку (обрабатывающий центр, наоборот, представляет собой технический компромисс);

– модульный транспорт между станками;

– стандартизированные палеты; базирование и зажим специальными приспособлениями;

– оборудование модульной конструкции.

Примерами станочных модулей с ЧПУ являются фрезерный модуль MILL, модуль для сверления и нарезания резьбы метчиком DRILL-INDEX, модуль смены многошпиндельной головки MULTIFLEX (MFX), многоцелевой модуль MULTI-STORE (MSR), многоцелевой модуль с наклоняемым шпинделем MULTI-STORE-TILTING, токарный модуль TURN-INDEX.

Фрезерный модуль MILL имеет горизонтально обрабатывающее устройство с ЧПУ, шпиндель и подвижную стойку; движение по осям X, Y и Z обеспечивается антифрикционными направляющими плоского типа, приводимыми в действие серводвигателями; точность позиционирования по осям X и Y составляет ±0,05 мм по всей длине перемещения (для оси Z ± 0,03 мм). Фрезерная головка приводится в действие двигателем постоянного тока мощностью 1,5 кВт через двухскоростную коробку передач.

Модуль для сверления и нарезания резьбы содержит индивидуальный привод для шестипозиционной горизонтальной поворотной головки. Стойка движется по осям X и Y, перемещение по осям X, Y и Z обеспечивается плоскими направляющими, приводимыми в действие серводвигателем. Точность позиционирования

по осям X, Y и Z ±0,05 мм по всей длине хода. Шестипозиционная поворотная револьверная головка приводится в действие двигателем с постоянным крутящим моментом; двигатель постоянного тока мощностью 11 кВт (имеется три скорости). Модуль оснащен инфракрасным датчиком для контроля инструмента.

Модуль TAP-INDEX оснащен шестипозиционной поворотной револьверной головкой, установленной на подвижной стойке. Время смены инструмента 3 с. Точность позиционирования осей X, Y и Z ± 0,1 мм. Двигатель постоянного тока с постоянным крутящим моментом мощностью 5 кВт приводит в действие горизонтальный шпиндель, стандартная коробка передач обеспечивает две скорости. Инфракрасный датчик контролирует износ инструмента.

Модуль смены многошпиндельной головки MULTI-FLEX состоит из устройства для горизонтальной обработки с направляющими и ЧПУ; мощность привода шпинделя 11 кВт. На передней поверхности направляющих расположены установочные и зажимные устройства, а также устройство соединения привода шпиндельной головки. Горизонтальные механизмы барабанного типа емкостью до 6 головок располагаются по обе стороны направляющего устройства. При работе направляющих контроллер ЧПУ подает команду следующей (по последовательности операций) головке для поворота в положение загрузки. Второй барабан получает команду на поворот свободного гнезда в положение разгрузки. При возврате направляющих обе головки (в рабочем положении и положении ожидания) разжимаются и двигаются горизонтально. Затем головки зажимаются, приводится в действие привод, и цикл повторяется. Важно отметить, что головки из магазина могут использоваться произвольно, что позволит главной ЭВМ оптимизировать рабочую загрузку системы в целом. Модуль может использовать щуп; если используется поворотный стол и палета, которые могут поворачиваться на 180 °C, то зондирование производится щупом с несколькими головками, управляемыми от ЭВМ. Размер головки 600 × 600 мм.

Многоцелевой модуль MULTI-STORE состоит из обрабатывающего модуля с ЧПУ с подвижной стойкой и горизонтального

шпинделя с гидравлической балансировкой. Имеется автоматическая система смены инструмента с магазином емкостью 30 инструментов; время смены от 6 до 9 с. Движение по осям X, Y и Z осуществляется с помощью роликовых направляющих плоского типа, точность позиционирования ± 0,015 мм по всей длине перемещения обеспечивается прецизионными шариковыми парами. Система управления позиционированием использует позиционный преобразователь типа индуктосина, который после фиксирования оси зажимается во избежание сдвига. Шпиндель приводится в действие двигателем постоянного тока мощностью 11 кВт с коробкой передач на 2 скорости. Постоянная температура обеспечивается масляной системой охлаждения.

Транспортная система. В каждой ГПС существует, по крайней мере, один загрузочно-разгрузочный участок. В зависимости от вида обработки детали это может быть загрузочно-перегрузочно-разгрузочный участок, который включает в себя автоматические электромеханические затяжные устройства (горизонтальные и вертикальные), зажимающие деталь в палете; верхний специальный зажим (универсальный для большей части деталей); нижнюю стандартную часть палеты (общую для всех деталей стандартного перемещения). Все палеты транспортируются через систему с помощью рольганга модульного исполнения с цепным приводом. На каждом рабочем участке палеты устанавливаются, идентифицируются и получают от ЭВМ команду о направлении дальнейшего движения. Если участок занят или на нем выполняется операция, ЭВМ подает команду палете о перемещении к другому модулю или об обратном движении и возвращении на этот участок через какой-то период времени. Гидравлическая перемещающаяся штанга подает палету к возвращающемуся столу обрабатывающего модуля или отводит от него.

Контроль и управление ГПС. ГПС обычно имеет два основных уровня ЧПУ. При каждом обрабатывающем модуле система ЧПУ типа CNC или PCNC подает на станок команду о выборе требуемого инструмента с учетом последовательности обработки и вспомогательных функций. Второй уровень включает одну или две ЭВМ-супервизора. На этом уровне обеспечивается

координация всех модулей в системе. При введении в систему для обработки новой детали ЭВМ-супервизор проверяет наличие соответствующей программы по этой детали и наличие требуемых инструментов; если ЭВМ определяет, что система не может обрабатывать новую деталь, то деталь и ее палета не получают доступа в систему.

После установки детали в систему ЭВМ-супервизор оптимизирует прохождение детали по системе. Палета останавливается и опознается на каждом участке. Если модуль на ее пути занят или не работает, палета получает команду пропустить, обойти модуль и пройти механообработку на последующих модулях или повторно пройти весь путь и вернуться к этому модулю позже. ЭВМ-супервизор также управляет сменой инструментов в модуле, временем их работы и режимом. Составляются и регулярно печатаются отчеты, выводимые на дисплей, информируя оператора о необходимости замены инструмента. Если емкость магазина позволяет, ЭВМ разрешает использовать инструмент для заранее установленного числа циклов, а затем заменяет его запасным. Кроме того, ЭВМ-супервизор может контролировать и выдавать информацию о выпуске продукции, использовании станка, продолжительности работы, времени простоя и результатах контроля.

2.2. Автоматизированные линии

В качестве примера рассмотрим несколько автоматизированных линий заготовительного производства, по своим характеристикам приближающихся к ГПС кузнечно-прессового производства. Автоматизированная линия горячей штамповки показана на рис. 2.3 [4]. Линия предназначена для получения крупных изделий из крупнотоннажных слитков, производство которых в настоящее время хорошо освоено промышленностью. Линия содержит печь *1* для нагрева крупнотоннажных слитков; автоматизированный ковочный комплекс, состоящий из ковочного пресса *3* и двух манипуляторов *2* с интегрированной системой управления; пресс-ножницы *4* с выдвижным столом для

разделения поковок на мерные длины; печь *5* для нагрева поковок мерной длины для ковки на радиально-ковочной машине *6* с манипуляторами *2*; печь *7* для подогрева длинномерных поковок перед разделением их на заготовки мерной длины на пресс-ножницах *8*; весы *9* для взвешивания заготовок; кольцевую печь *10* для нагрева заготовок перед предварительной штамповкой на заготовительном прессе *11*; печь *12* для нагрева заготовок перед штамповкой на прессе *13* для изотермической штамповки. Линия работает под управлением автоматизированной системы управления *15* и содержит два накопителя *14*, которые выполняют роль буферного устройства.

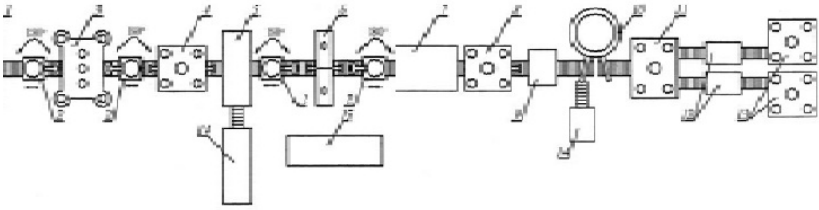


Рис. 2.3. Линия горячей штамповки:
1 – печь для нагрева крупных слитков; *2* – манипуляторы;
3 – ковочный пресс; *4* – пресс-ножницы для разделения поковок;
5 – печь для нагрева поковок; *6* – радиально-ковочная машина;
7 – печь для нагрева поковок перед резкой; *8* – пресс-ножницы; *9* – весы;
10 – кольцевая печь для нагрева заготовок; *11* – заготовительный пресс для штамповки; *12* – проходная печь; *13* – пресс для изотермической штамповки; *14* – накопитель; *15* – пульт управления

Автоматизированный ковочный комплекс (АКК), входящий в линию, предназначен для ковки крупных слитков на заданный размер. Режимы ковки обеспечивают равномерную «проработку» металла по объему поковки. В соответствии с заказом на пресс-ножницах осуществляют разделение поковки на мерные длины для последующей их ковки на радиально-ковочной машине (РКМ). Режим обжатий на РКМ выбирается из условия получения заданной длины поковки, которая в дальнейшем разделяется на пресс-ножницах на конечное число мерных заготовок

(с учетом удаления концевых остатков). Масса мерных заготовок контролируется на весах, установленных в линии. На заготовительном прессе используется фасонный инструмент для «проработки» центральной части заготовок, которая может быть недостаточно хорошо «проработана» на АКК и РКМ. Далее фасонные заготовки поступают на пресс для изотермической штамповки.

АКК и РКМ оборудованы поворотными манипуляторами, которые могут перемещаться вдоль оси линии. Два накопителя, оборудованные около пресс-ножниц, позволяют в случае необходимости разрывать непрерывный технологический поток и использовать только отдельные участки линии. Пресс-ножницы оборудованы датчиками для измерения размеров поковок, позволяющими получать мерные заготовки одинаковой массы (в случае колебания размеров поковок). Линия сконструирована на базе достаточно хорошо отработанного оборудования для отдельных технологических переделов, прошедшего апробацию в промышленности.

Автоматизированная линия изотермического прессования представлена на рис. 2.4 [4]. Линия содержит печь *I* для нагрева заготовок, на выходе которой установлены датчики *1* температуры; многопозиционное скальпирующее устройство *II* для зачистки поверхности заготовки перед прессованием, снабженное датчиками *2* размеров заготовки и датчиками *3* и *4*, определяющими состояние поверхности заготовки на входе и выходе; универсальный гидравлический пресс *III* для прямого и обратного методов прессования, оборудованный датчиками температуры *5* и *7*, контролирующими температуру прессуемого изделия на выходе из очка матрицы, датчиками *6* скорости движения и положения пресс-штемпеля; электроподогревающее устройство *IV* для дополнительного подогрева прессуемого изделия до температуры закалки, снабженное датчиками *7* и *9* температуры на его входе и выходе; закалочное устройство *V*, обеспечивающее скорость охлаждения, необходимую для закалки изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов, снабженное на входе датчиками *8* для определения габаритных размеров прессуемых изделий; правильное устройство *VI* со сканирующим датчиком *10* качества

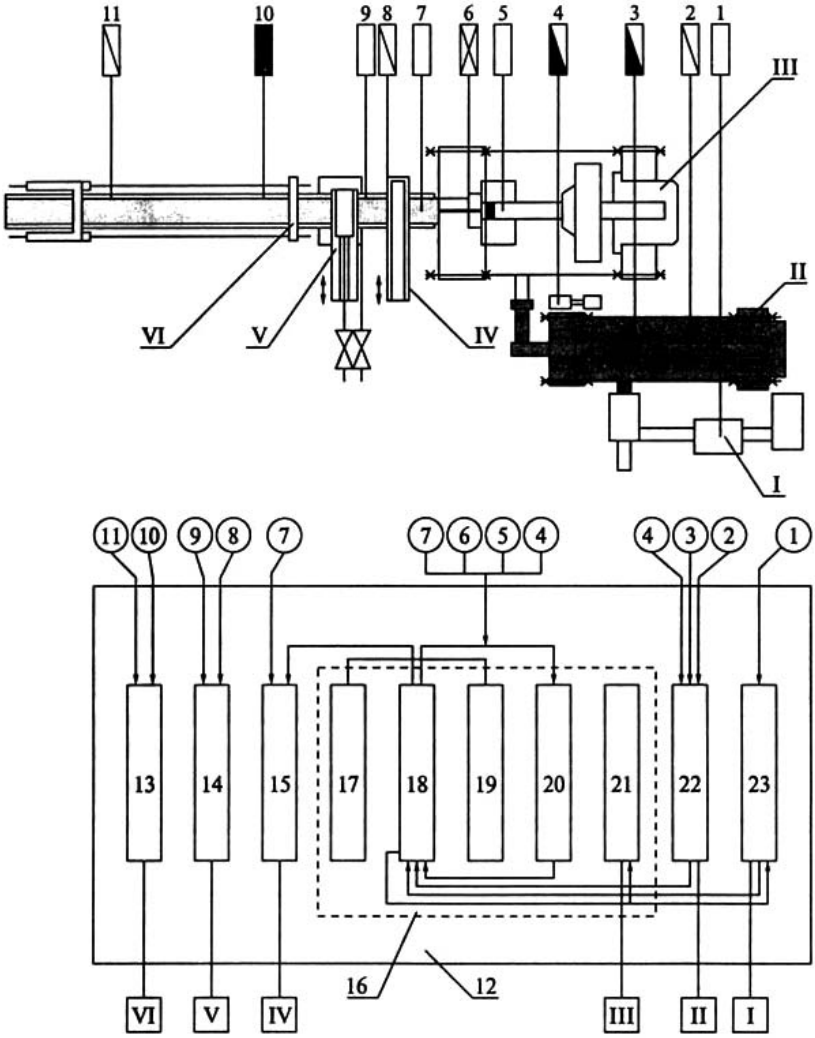


Рис. 2.4. Схема автоматизированной линии изотермического прессования

изделий и датчиками *II*, определяющими размеры элементов прессуемых изделий сложной конфигурации.

Техническая характеристика механического оборудования линии приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Техническая характеристика механического оборудования линии

Характеристика	Единица измерения	Величина
Печь для нагрева заготовки		
– температура нагрева	°С	До 500
– время нагрева	с	120
Многопозиционное скальпирующее устройство		
– номинальное усилие	МН	8
– диаметр заготовок	м	0,2…0,5
– длина заготовок	м	0,4…1,0
– скорость рабочего хода главного плунжера	мм/с	до 50
– привод скальпирующего устройства		НАС
– рабочее давление жидкости	МПа	32
– допустимая несоосность заготовок на матрицы при скальпировании	мм	1,0
Универсальный горизонтальный гидравлический пресс для прямого и обратного прессования		
– номинальное усилие	МН	50
– количество ступеней усилия		3
– I ступень	МН	18
– II ступень	МН	32
– III ступень	МН	50
– скорость рабочего хода:		
с плавным регулированием скорости	мм/с	0,1…10,0
со стабилизацией	мм/с	0,1…20,0
– длина контейнера	м	1,2
– внутренний диаметр втулок контейнера	м	0,42 0,36 0,31 0,27 0,225
высота пресс-остатка:		
– минимальная	м	0,04
– максимальная	м	0,2
давление рабочей жидкости	МПа	32
привод		НАС
Правильно-растяжное устройство		
– номинальное усилие	МН	7
– длина профилей	м	3,0…28,0

Стол пресса оборудован нагревательным и закалочным устройствами, а также устройством для резки изделий (на рис. 2.4 устройство не показано).

Технические показатели линии могут быть изменены в зависимости от применяемого оборудования. Управление технологической линией осуществляется системой управления *12*, которая состоит из блока *13* управления правильно-растяжным устройством, блока *14* управления закалочным устройством, блока *15* управления электроподогревательным устройством. Кроме того, система управления содержит блок *16* управления прессом, который, в свою очередь, состоит из блока *17* адаптации, блока *18* моделирования, блока *19* анализатора текущей ситуации, блока *20* управления градиентным нагревом заготовки в контейнере пресса и блока *21* управления исполнительными органами пресса. Управление скальпирующим устройством и температурой нагрева заготовки перед прессованием осуществляется соответственно блоками *22* и *23*.

Отличительная особенность системы управления – согласованное двухступенчатое регулирование температуры прессуемого изделия путем управления как скоростью движения пресс-штемпеля, так и дополнительным подогревом прессуемого изделия в электроподогревающем устройстве (перед закалкой), установленном на выходе пресса.

Линия работает следующим образом. Перед началом прессования в автоматизированную систему управления линией вводят основные технологические параметры для прессования конкретного изделия. Затем нагретая в печи *I* до определенной температуры заготовка поступает на многопозиционное скальпирующее устройство *II*, где осуществляют зачистку поверхности заготовки (при этом толщина снимаемого слоя металла зависит от размеров и состояния поверхности заготовки). Качество зачищенной поверхности контролирует датчик *4*. Далее зачищенная заготовка поступает на пресс *III*. В процессе прессования результаты измерения температуры поверхности изделия датчиком *7* начинают поступать в блок *19* анализатора текущей ситуации. Исходя из результатов измерений (после их фильтрации и прогнозирования

величины температуры на последующие моменты времени) анализатор текущей ситуации определяет момент, когда продолжение прессования с прежней скоростью может привести к нарушению одной из границ изотермического интервала. В этом случае анализатор устанавливает признак изменения скорости. По этому признаку блок *18* моделирования определяет требуемую скорость прессования на основании текущей оценки параметра, связывающего изменение скорости прессования с изменением температуры выходящего изделия. Вычисленную скорость подают на вход регулятора, поддерживающего заданную величину скорости, воздействуя на исполнительные органы пресса. По окончании теплового переходного процесса, вызванного изменением скорости, блок *17* адаптации корректирует параметр температурно-скоростной зависимости процесса в соответствии с рассогласованием между измеренным и предсказанным значениями температуры. При расчете скорости прессования могут использоваться результаты измерения положения и скорости пресс-штемпеля, что позволяет сделать более гибким алгоритм адаптивного управления. Изделие, выходящее из пресса, поступает в электроподогревающее устройство *IV*, в котором осуществляют (в случае необходимости) дополнительный подогрев прессуемого изделия до температуры закалки, кроме того, благодаря этому устройству продляется зона высокой температуры металла изделия.

Далее прессуемое изделие поступает в закалочное устройство *V*. Для предотвращения деформации закалку изделия осуществляют в процессе прессования под нагрузкой.

По окончании прессования и закалки задний конец прессуемого изделия закрепляют в неподвижной траверсе правильно-растяжного устройства *VI* и осуществляют правку изделия растяжением. Процесс правки (величина растяжения, скоростной, режим правки) контролирует блок *13* управления правильным устройством.

Таким образом, в непрерывном потоке на одном автоматизированном технологическом комплексе осуществляют все основные технологические операции по производству изделий

сложной конфигурации из высокопрочных алюминиевых сплавов, а после небольших изменений и для производства изделий из малолегированных алюминиевых сплавов и тяжелых цветных металлов.

На базе линии изотермического прессования ОАО «Уралмаш» разработан автоматизированный технологический комплекс на базе универсального пресса усилием 50 МН, предназначенный для производства сплошных профилей периодического и постоянного по длине сечений с диаметром описанной окружности до 350 мм.

В состав комплекса входят устройство для зачистки поверхности литых заготовок (скальпирующее устройство) с комплексом автоматики и механизации, горизонтальный гидравлический пресс усилием 50 МН, приемный стол пресса с приводом и устройством для вытягивания отпрессованного изделия из мундштука пресса, устройство для резки изделий на столе пресса, перекладчик отпрессованной продукции с приемного стола пресса на транспортер-холодильник, устройство съема и накопления изделий, автоматизированная система управления температурно-скоростными режимами прессования.

Система управления обеспечивает следующие режимы прессования: изотермическое прессование профилей постоянного сечения; программное изменение скорости прессования для профилей периодического сечения; прессование профилей периодического сечения с постоянной скоростью; программное изменение скорости прессования профилей постоянного сечения. Диапазон изменения и регулирования скорости движения пресс-штемпеля от 0,1 до 10 мм/с, погрешность – 5 %.

Приемный стол пресса – роликовый с приводными роликами. Длина прессуемых профилей: максимальная – 16 м, минимальная – 4,5 м. Устройство для резки изделий на приемном столе пресса обеспечивает резку изделий и пучка изделий. Резке подвергается профиль с диаметром описанной окружности до 350 мм и максимальной толщиной 60 мм. Допустимый диаметр описанной окружности пучка профилей – 250 мм, количество профилей в пучке 1…4 шт.

Комплекс обслуживают три человека: один – на пульте управления, один – на входной стороне комплекса (обслуживает работу индукционной печи и скальпирующего устройства, обеспечивает подачу заготовок и уборку отходов скальпирования), один – осуществляет смену инструмента, уборку партий профилей из накопителя.

Автоматизированные комплексы и линии изотермического прессования позволяют ликвидировать ряд трудоемких технологических операций (повторный нагрев изделий под закалку, закалку изделий, ряд транспортных и подготовительных операций), осуществлять закалку длинномерных изделий определенного сортамента без создания дорогостоящих крупногабаритных закалочных устройств, снизить трудоемкость процесса на 9…10 чел·ч на одну тонну годной продукции; сократить на 350…500 кВт·ч расход электроэнергии на одну тонну изделий; повысить выход годной продукции (за счет снижения отходов) на 2…4 %, что, например, для прутково-профильного пресса усилием 50 МН (при производительности 9000 тонн в год) составит около 300 тонн в год; повысить производительность процесса на 50…60 кг годных изделий в час (за счет повышения скорости прессования); сократить производственные площади; сократить на 2…3 человека обслуживающий персонал; повысить равномерность механических свойств и качество поверхности по всей длине прессуемого изделия за счет изотермического режима прессования и предварительной зачистки поверхности заготовок в многопозиционном скальпирующем устройстве; решить проблему адаптации системы управления скоростью прессования к изменяющимся условиям прессования длинномерных изделий сложной конфигурации.

Описанные выше автоматизированная линия и комплекс изотермического прессования защищены пятью авторскими свидетельствами и патентами ФРГ, Японии, Италии, Турции и Индии.

Схема линии по производству крупногабаритных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов, разработанная ОАО «Уралмаш», показана на рис. 2.5. В состав линии входит следующее уникальное оборудование. Мощный горизонтальный

гидравлический многоцилиндровый пресс, предназначенный для прессования прямым и обратным способами крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов.

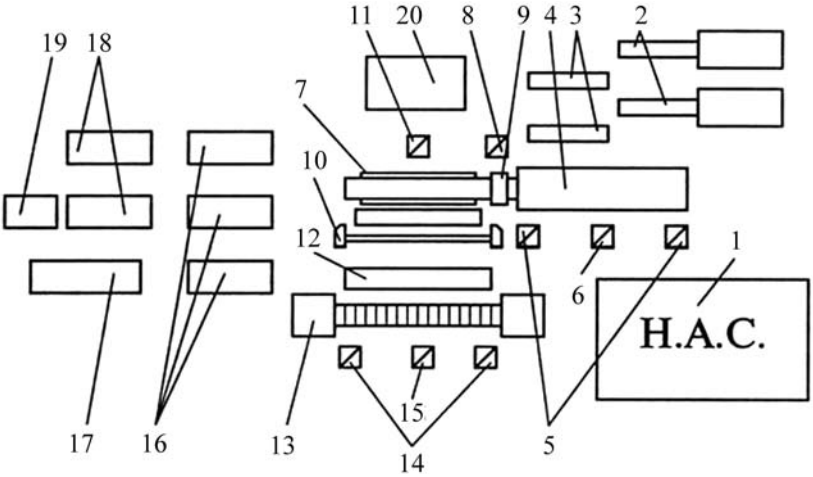


Рис. 2.5. Линия по производству длинномерных крупногабаритных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов:
1 – насосно-аккумуляторная станция; *2* – печи для нагрева слитков; *3* – устройство для зачистки слитков; *4* – горизонтальный гидравлический пресс; *5* – датчики температуры на входе и выходе пресса; *6* – датчик скорости движения пресс-штемпеля; *7* – закалочное устройство на столе пресса; *8* – датчик температуры на входе в закалочное устройство; *9* – подогревающее устройство на столе пресса; *10* – машина для обрезки концов; *11* – датчик качества прессуемых изделий; *12* – стеллаж; *13* – правильно-растяжная машина; *14* – датчик перемещения захватов машины; *15* – датчик для определения деформаций; *16* – горизонтальные агрегаты для закалки крупногабаритных изделий; *17* – ролико-правильная машина; *18* – печи для отжига и старения крупногабаритных изделий; *19* – установки ультразвукового контроля; *20* – центральный пульт автоматизированной системы управления линией прессования

Технические возможности пресса позволяют прессовать изделия с законцовками. Контейнер выполнен удлиненным с повышенным отношением длины контейнера к диаметру рабочей

втулки. Пресс оборудован устройствами для зачистки слитков перед прессованием, стоящими в линии подачи слитков от печи к прессу. Привод пресса, помимо насосно-аккумуляторной станции, оснащен также и индивидуальной насосной установкой с насосами переменной производительности. Схемой предусмотрено подключение любой группы рабочих цилиндров как к насосам, так и к насосно-аккумуляторной станции. На входе и выходе пресса установлены пирометрические бесконтактные датчики температуры для регистрации температуры слитков и прессуемого изделия на выходе из очка матрицы. Скорость движения и положение пресс-штемпеля замеряются с помощью дифференциально-индуктивных датчиков. По своим эксплуатационным характеристикам эти датчики превосходят известные фотоэлектрические датчики, применяемые в локальных регуляторах скорости движения пресс-штемпеля.

Предусмотрена возможность регулировки скорости рабочего хода пресс-штемпеля управляемыми дросселями или насосами переменной производительности. В выходной части пресса имеются приемный стол специальной конструкции, холодильник и пилы для обрезки концов отпрессованных изделий. Все операции от выдачи слитка из печи до получения изделия механизированы.

Правильно-растяжная машина (ПРМ) для правки и упрочнения длинномерных изделий из алюминиевых сплавов состоит из двух тянущих выкрутных головок одинакового исполнения, каждая из которых снабжена индивидуальным масляным приводом. Основанием машины служат станина и опорные балки, установленные и закрепленные на фундаменте. Боковые балки служат опорой и направляющими для проставок. Машина снабжена датчиками скорости и положения тянущих головок, а также сканирующим датчиком деформации отдельных частей пресс-изделия.

Далее в линии установлены горизонтальные агрегаты для закалки крупногабаритных изделий, печи для отжига и старения крупногабаритных изделий, участок ультразвукового контроля и роликоправильная машина.

Технологический процесс производства длинномерных изделий выглядит следующим образом. Слиток, нагретый в печи *2* до температуры, превышающей на 10…15 °С температуру прессования, после зачистки поверхности на устройстве *3* поступает на пресс *4*. На прессе обеспечиваются изотермические условия прессования, после чего часть изделий закаляется непосредственно на столе пресса в закалочном устройстве *7*. После закалки эта часть изделий, после обрези концов на машине *10*, поступает на ПРМ *13*. Контроль данной части изделий производится в потоке. Основная же часть изделий после прессования и обрези концов поступает на термообработку в агрегатах *16* и *18*, а затем на правку на роликовой *17* и протяжной *13* машинах. После этого изделия проходят ультразвуковой контроль на установках *19*.

Работа линии координируется автоматизированной системой управления, охватывающей основные технологические операции, такие как нагрев слитков перед прессованием, процесс прессования на гидравлическом прессе, термообработку и правку изделий на растяжной правильной машине. Для части изделий предусмотрен контроль их качества (точность размеров, сплошность, механические свойства) после каждой технологической операции.

Температурный режим нагрева слитков перед прессованием назначается в зависимости от размеров слитков, их химического состава и фактических механических свойств, определяемых в процессе прессования первого слитка. Система управления осуществляет контроль над режимом нагрева.

Известно, что однородность механических свойств по всей длине длинномерных прессуемых изделий имеет место в условиях изотермического прессования, когда обеспечивается постоянство температуры металла на выходе из очка матрицы по всей длине прессуемого изделия. Одновременно достигается и максимальная производительность процесса, что весьма важно при производстве длинномерных изделий.

Система управления процессом прессования призвана обеспечить изотермические условия прессования за счет регулирования скорости движения пресс-штемпеля в процессе прессования.

2.3. Гибкие производственные системы механообрабатывающего производства

Анализ производства большинства промышленно развитых стран показал, что 80…90 % всех деталей, изготавливаемых в настоящее время на станках, целесообразнее получать используя гибкие производственные системы (ГПС или входящие в состав ГПС гибкие производственные модули). Следует иметь в виду, что стоимость программного и аппаратного обеспечения производственного оборудования всей ГПС составляет около 75 % ее стоимости, остальные 25 % стоимости ГПС приходятся на транспортное и другое вспомогательное оборудование. В качестве примера рассмотрим ГПС фирмы Vought (США), предназначенную для механической обработки деталей фюзеляжа американского бомбардировщика B1B. ГПС, поставленная фирмой Cincinnati Milacron (США), включает в себя восемь идентичных горизонтальных обрабатывающих центров с ЧПУ, связанных при помощи транспортной сети из четырех автоматических транспортных тележек с двумя управляемыми от ЭВМ координатно-измерительными машинами; автоматическую станцию мойки и сушки; два карусельных накопителя плит-спутников и автоматическую систему сбора стружки (рис. 2.6).

Станочное оборудование ГПС состоит из восьми горизонтальных обрабатывающих центров HC-20 фирмы Cincinnati Milacron (США), предназначенных для контурного фрезерования, сверления, растачивания, развертывания и нарезания резьбы. Они имеют магазин емкостью 30 инструментов, в котором хранится набор инструментов для обработки на любом из восьми станков. Каждый станок имеет устройство автоматической смены плит-спутников челночного типа с позицией промежуточного хранения. На плитах-спутниках имеются многоместные приспособления для установки различных деталей на одну плиту.

Четырехкоординатные станки могут обрабатывать заготовки размерами 800 × 800 × 900 мм и массой до 2270 кг из черных и цветных металлов. Имеется автоматический конвейер для

отвода стружки, измерительное устройство для установки нулей отсчета, устройство обнаружения поломки инструмента и система адаптивного управления крутящим моментом на шпинделе. Обрабатывающие центры оснащены системами ЧПУ типа CNC Acramatic 900, каждая из которых связана с центральной ЭВМ (DNC).

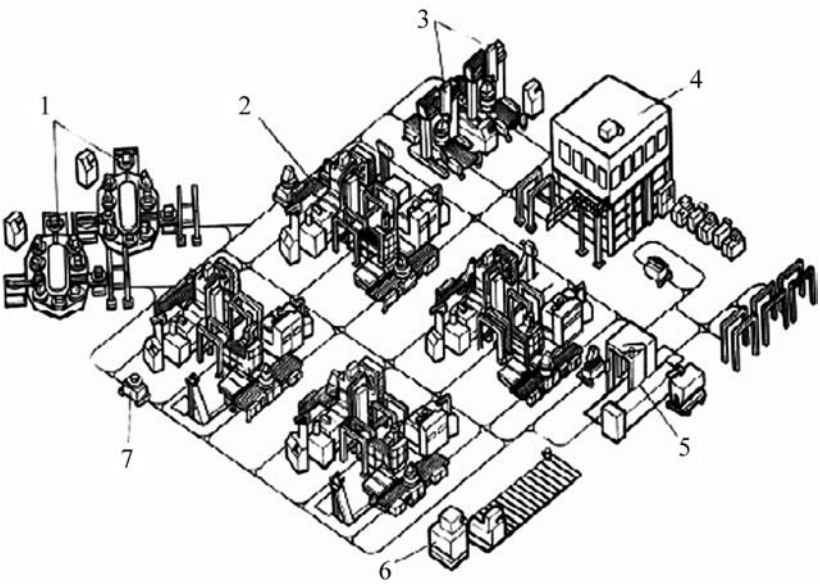


Рис. 2.6. Планировка гибкой производственной системы фирмы Vought: *1* – позиция загрузки-выгрузки; *2* – обрабатывающие центры; *3* – координационно-измерительные машины; *4* – комната с управляющей ЭВМ; *5* – автоматическая моечная станция; *6* – автоматическая система сбора стружки; *7* – направляемые по проводам тележки

Две координатно-измерительные машины производят автоматический контроль обработанных деталей. Данные цикла измерений детали передаются по системе обратной связи на соответствующий станок для автоматической регулировки смещения инструментов. Измерительные машины связаны с системой DNC, циклом измерения управляет центральная ЭВМ. Работу ГПС и других безлюдных систем затрудняет удаление стружки.

Фирма Vought (США) пытается решить эту проблему с помощью автоматической системы сбора стружки и СОЖ, расположенной под полом. Двухпоточная система связана со всеми станками, разделяет стружку черных и цветных металлов, удаляет сгустки масла из СОЖ. Система имеет автоматический самоочищающийся всасывающий фильтр (т. е. в нем не используется сменная фильтровальная бумага), оборудована воздушной системой сушки с электрическим подогревом и конвейером для доставки стружки черных и цветных металлов в различные контейнеры, которые затем транспортируются на автоматических транспортных тележках. Химический состав СОЖ контролируется. Детали и заготовки загружаются и снимаются вручную с двух десятиместных карусельных накопителей, которые в пределах ГПС обслуживаются четырьмя направляемыми по проводам транспортными тележками.

Всей ГПС управляет система DNC с помощью ЭВМ. Последовательность обработки деталей в ГПС задается оператором в соответствии с ежедневным производственным заданием. Его решения учитываются в производственном плане предприятия с помощью системы обратной связи.

Фирма Grumman (США) использует интегрированную ячейку для фрезерования и сверления отверстий в деталях сложного профиля и листовом алюминии, которые применяются в конструкции обшивок, панелей, обтекателей и дверей. До внедрения ячейки эти детали обрабатывались вручную с использованием зажимных приспособлений. Центральный элемент ячейки – робот IRE-60 фирмы ASEA. Ячейка включает в себя также пять основных элементов с программным управлением: контейнер, рабочий стапель для установки и закрепления детали, систему автоматической смены инструмента и контроля (рис. 2.7).

В заключение отметим, что в механообработке металлов достигнуты значительные успехи в разработке новых режущих материалов и приводов для металлорежущих станков, в результате чего значительно сократилось основное машинное время на обработку каждой заготовки.

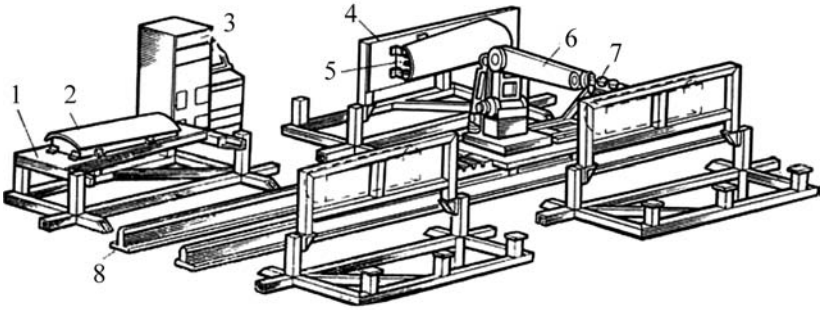


Рис. 2.7. Схема интегральной роботизированной ячейки:
1 – позиция загрузки; *2* – обрабатываемая деталь; *3* – блок управления; *4* – позиция обработки; *5* – оснастка; *6* – робот; *7* – робот для смены инструмента; 8 – рельсы для перемещения робота

Много нерешенных проблем существует в области разработки систем крепления, включая системы переналадки приспособлений для крепления инструментов и др. Ведутся дальнейшие работы в области сенсорной техники, систем автоматической регулировки и управления процессами производства. Особое внимание уделяется созданию универсальных и надежных систем распознавания дефектов износа и поломки инструментов. Для большинства металлообрабатывающих предприятий основой развития гибкого производства и снижения затрат на обработку является модульная технология.

Контрольные вопросы

1. Укажите основные виды промышленного производства.
2. Дайте определение и описание ГПС.
3. Дайте определение и описание ГАП.
4. Дайте определение АЛ.
5. Проведите сравнительный анализ ГПС, ГАП и АЛ для различных видов производств.
6. Опишите назначение и структуру автоматизированной линии горячей штамповки.

7. Опишите назначение и структуру автоматизированной линии изотермического прессования.

8. Сформулируйте назначение пресса изотермической штамповки в составе автоматизированной линии горячей штамповки.

9. Сформулируйте принципы изотермического прессования.

10. Сформулируйте принципы системы управления изотермическим прессованием.

11. Опишите функциональное назначение устройств управления линии изотермического прессования.

12. Опишите работу линии изотермического прессования.

13. Укажите технико-экономические характеристики изотермического прессования.

14. Опишите работу линии по производству длинномерных крупногабаритных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов.

15. Опишите планировку гибкой производственной системы Vought.

16. Дайте технико-экономическую характеристику гибкой производственной системы Vought.

Лекция 3
ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Проектирование технического объекта – создание, преобразование и представление в принятой форме образца этого, еще не существующего, объекта. Образ объекта может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться с помощью некоторых алгоритмов в процессе взаимодействия с ЭВМ.

Инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности в некоторых технических объектах. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий сведения, достаточные для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть проект – окончательное описание объекта.

Проектирование предполагает выполнение комплекса работ исследовательского, расчетного и конструктивного характера.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека с ЭВМ, называется *автоматизированным*. Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой *систему автоматизированного проектирования* – CAD (Computer Aided Design в англоязычной терминологии).

Имеется несколько типов проектов: технические, организационные, экономические, социальные и смешанные. Однако процесс проектирования имеет две особенности: во-первых, состав и последовательность его этапов не зависит от целевого назначения проекта, во-вторых, логика процесса проектирования инвариантна к способу проектирования – традиционному или автоматизированному.

Кроме того, для подходов к проектированию сложных мехатронных систем характерны:

– структуризация процесса проектирования (декомпозиция проектных задач и документации);

– итерационный характер проектирования;

– типизация и унификация проектных решений и средств проектирования;

– информационная поддержка (в том или ином виде) на всех этапах процесса проектирования;

– соблюдение основных принципов проектирования.

3.1. Основные принципы проектирования

При решении задач проектирования руководствуются рядом основных принципов.

Последовательность и итерационность. Последовательность заключается в строгой очередности выполнения этапов проектирования механизма или машины, а итерационность – в корректировках проектных решений, полученных на предыдущих этапах проектирования.

Модульный принцип проектирования состоит в максимально возможном использовании однотипных узлов (или элементов узлов) при проектировании семейства машин различного целевого назначения. Сложные системы необходимо проектировать так, чтобы поведение одной части системы оказывало минимальное воздействие на остальную систему. Этот принцип базируется на активном использовании компьютерной техники и применяется тогда, когда уже имеется достаточно четкое представление о семействе проектируемых машин.

Применение модульного принципа при проектировании одного механизма или одной машины бессмысленно и невозможно. Только в случае разработки семейства машин и использовании при этом ограниченного числа готовых узлов последние становятся модулями. Модули являются следствием принятого технического решения, ибо в принципе проектировать можно так, что

узлы одного назначения не будут даже отдаленно похожи друг на друга.

Различают модули *производственные* (применяемые без каких-либо изменений в машинах различного целевого назначения), *технологические* (отличающиеся в основном технологией изготовления и незначительными конструкторскими изменениями, относящимися, как правило, к местам крепления узлов, например: правый-левый, верхний-нижний, передний-задний и т. п.) и *конструкционные* (имеющие конструкционное подобие, но различные размеры).

Современное техническое обеспечение САПР позволяет легко получать зеркальные изображения узлов (технологические модули) с минимальными затратами труда и времени. Несколько сложнее получить конструкционные модули, так как при их проектировании необходимо одновременно выполнять требования соблюдения размерных рядов и максимально возможной унификации.

При использовании модульного принципа проектирования на уровне принятия концепции должен быть решен вопрос о критерии целесообразности его применения для проектируемого семейства машин. Модули, используемые в последующих разработках, переходят в категорию унифицированных узлов.

Принцип унификации связан с применением в семействе проектируемых механизмов или машин унифицированных сборочных единиц (узлов, подузлов, агрегатов), деталей (оригинальных и стандартных), комплектующих. Как показывает опыт автоматизированного проектирования, применение типовых унифицированных деталей нецелесообразно. Значительно выгоднее иметь большое количество макрусов и существенные заделы в банках данных по модификациям и унифицированным узлам, что позволяет избегать излишней детализации конструкторских разработок. Информацию об унифицированных деталях, узлах и системах целесообразно хранить на микрофишах систематизированно по группам.

Принцип соответствия выбора номенклатуры и значений выходных характеристик целевому назначению проектируемой

машины или механизма. Чем ответственнее проектируемый объект, тем большее число выходных характеристик и параметров объекта регламентируется и тем более жесткие требования к ним предъявляются. Например, вероятность безотказной работы станков принимается в пределах 0,95–0,99, а самолетов – 0,999 99.

Другой пример. Число установленных и проверяемых выходных параметров точности станка при высоких требованиях к точности обрабатываемых деталей может достигать 20–30, в то время как для станков нормальной точности достаточно регламентировать 8–10 показателей. Основная цель регламентации выходных параметров станка – обеспечить погрешность обработки, которая находилась бы в установленных пределах в течение всего периода его эксплуатации.

Во всех случаях проектировщику необходимо помнить, что соответствие выходных характеристик механизма или машины их целевому назначению в первую очередь определяет общая компоновка, принимаемая на концептуальном уровне.

Принцип компромиссов. Проектирование – это непрерывная цепь компромиссов, которые приходится принимать на всех стадиях создания механизма или машины. Например, стремление к увеличению частоты вращения шпиндельных узлов всегда приводит к увеличению тепловыделения в опорах, которое не может превышать определенного уровня, и принятие окончательного решения всегда требует компромисса.

Улучшение любой технической характеристики машины (скорости, грузоподъемности, точности, надежности, производительности и др.) неизбежно вызывает увеличение ее стоимости, трудоемкости изготовления, часто требует другого уровня обслуживания и повышения культуры эксплуатации, что всегда приводит к компромиссным решениям.

Тенденция современных машиностроительных производств к концентрации операций постоянно требует от проектировщика решения задачи рационального сочетания технологических возможностей и усложнения конструкций оборудования. Избыточность технологических возможностей может быть не оправдана экономически.

Увеличение надежности машины почти всегда сопровождается ее усложнением и удорожанием. Выбор опор и направляющих, обеспечивающих незначительный износ, применение новых материалов, специальных покрытий, смазок, термообработки повышают трудоемкость изготовления и стоимость машины. Далеко не всегда ясно, *что* экономически целесообразнее – удорожать механизм или машину изначально либо совершенствовать систему обслуживания и ремонта в период эксплуатации. Компромисс заключается в обеспечении в первую очередь надежности наиболее ответственных деталей и узлов машины.

Принцип преемственности. Практически любые механизмы и машины являются продуктом эволюции, и в них всегда имеются элементы, детали и узлы, разработанные ранее. Соблюдение преемственности является одним из эффективных путей снижения затрат и сокращения сроков создания машины.

Хорошо отработанные элементы и узлы нет нужды заменять, и в одной машине прекрасно могут сосуществовать «новое» и «старое». Изыскание новых принципов построения механизмов и машин не является, как правило, задачей конструирования. *Суть проектирования – обеспечение требуемых характеристик машины, а не погоня за оригинальностью*. Преемственность определяется самой логикой последовательного развития машин. Модернизация, систематическое совершенствование позволяют поддерживать показатели выпускаемых машин на уровне постоянно возрастающих требований в течение определенного времени без коренной переработки конструкции. Например, ведущие автомобильные фирмы выпускают принципиально новую модель только раз в 8–10 лет.

Вопрос заключается в том, как *наиболее рационально сочетать новое со старым*. Это зависит как от качества отработки отдельных проектных решений (стоит ли заменить), так и от уровня технологической подготовки производства (можем ли заменить). На этом пути существуют две основные опасности: консерватизм, влекущий за собой добровольный отказ от творческого поиска и приводящий к необъективной критике новых решений и отказу от них, и психологическая инерция, ослабляющая

самоконтроль, в результате чего конструктору очень трудно отрешиться от своего решения, так как он находится в плену идеи.

Преемственность при проектировании имеет несколько аспектов:

– приверженность фирм к определенным, отработанным годами решениям (в области компоновки, конструкции узлов, дизайна и т. п.). Это то, что определяет «почерк» фирм, и они весьма неохотно расстаются со своими традиционными решениями, часто связанными с «ноу-хау» и даже иногда носящими названия фирм;

– индивидуализация конструкций механизмов и машин не должна распространяться на все элементы и узлы. Модули могут и должны использоваться для различных моделей;

– конструктивная преемственность дает возможность увеличить эффективность разработки за счет использования модулей и унифицированных элементов и узлов;

– степень заимствования определяется на концептуальном уровне и зависит от возможности принятия своих и чужих технических решений в неизменном или модифицированном виде, реальных возможностей проектировщика, определяемых квалификацией, сроками и другими обстоятельствами.

Работающая сложная система неизбежно оказывается результатом работающей простой системы. Сложная система, разработанная на бумаге от начала и до конца, как правило, никогда не работает, и ее невозможно заставить работать. Всегда надо начинать с работающей простой системы.

3.2. Схема процесса проектирования

Стадии проектирования – наиболее крупные части проектирования процесса, развивающегося во времени. В общем случае выделяются стадии научно-исследовательских работ (НИР), эскизного проекта или опытно-конструкторских работ, технического, рабочего проектов, испытаний опытных образцов или опытных партий. Стадию НИР иногда называют предпроектными

исследованиями, или стадией технического предложения. Очевидно, что по мере перехода от стадии к стадии степень подробности и тщательность проработки проекта возрастают. Рабочий проект должен быть вполне достаточным для изготовления опытных или серийных образцов. Близким к определению стадии, но менее четко оговоренным понятием является понятие этапа проектирования.

Стадии (этапы) проектирования подразделяют на составные части, называемые ***проектными процедурами***. Примерами проектных процедур могут служить подготовка деталировочных чертежей, анализ кинематики, моделирование переходного процесса, оптимизация параметров и другие проектные задачи.

В свою очередь, проектные процедуры можно расчленить на более мелкие компоненты, называемые ***проектными операциями***. Например, при анализе прочности детали сеточными методами могут быть построены сетки, произведены выбор или расчет внешних воздействий, собственно моделирование полей напряжений и деформаций, представление результатов моделирования в графической и текстовой формах. Проектирование сводится к выполнению некоторых последовательностей проектных процедур – ***маршрутов проектирования***.

На рис. 3.1 показана укрупненная схема процесса проектирования.

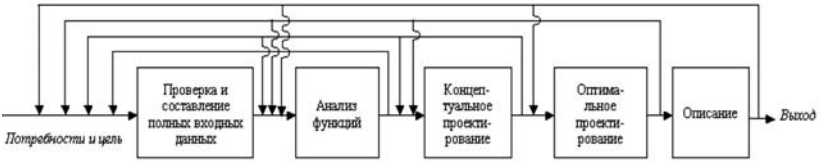


Рис. 3.1. Укрупненная схема процесса проектирования

Техническая разработка системы начинается с определения нужд потенциального пользователя разрабатываемой системы. Часто оказывается, что пользователь желает иметь систему, выполняющую данную работу, однако испытывает трудности при количественной формулировке своих потребностей и целей.

Поэтому у инженера и пользователя возникает дополнительная задача количественного воплощения целей системы так, чтобы была определена содержательная совокупность целевых функционалов для последующей разработки (проверка и составление полных входных данных).

Коль скоро потребности и цели системы определены, необходимо дать количественное описание функций, которые должны выполнять система и любая требуемая подсистема. Эта процедура называется анализом функций. Его цель состоит в выборе функций, или операций, которые должны быть проведены для выполнения задачи, требуемой от разрабатываемой системы. Эти функции становятся затем целями низшего уровня для разработки подсистем. Определение функций по своей природе носит качественный характер. Однако коль скоро функция или операция определена, она должна быть описана в количественных терминах. Например, если операцию нужно провести быстро, необходимо оговорить допустимое время.

Следующий шаг, показанный на рис. 3.1, является одним из наиболее трудных этапов в технической разработке системы и, конечно, самым трудным шагом для аналитического описания. Концептуальное проектирование, как видно из названия, состоит в определении концепций, или основных конфигураций системы, которые могут удовлетворить целям системы. На этом шаге желательно оставить концепции по возможности в общем виде, с тем чтобы не исключить кандидатуры систем, которые могут оказаться эффективными. Например, если операция, подлежащая выполнению, есть продвижение летательного аппарата над поверхностью Земли, то концептуальные проекты могут включать в себя проектирование колес, направляющих, стоек и воздушной подушки. На этом этапе процесса проектирования важно определить границы приемлемых значений параметров, описывающих систему. Для параметров проектирования в пределах этих значений система должна уметь выполнять функции, определенные на предыдущем шаге.

Пусть мы имеем дело с оптимальным проектом, для которого целью является выбор неопределенных параметров, введенных

на предыдущем шаге (оптимальное проектирование). Эти параметры должны быть в пределах, определяемых технологическими ограничениями и назначением системы. Критерием выбора параметров системы является максимизация стоимости системы или минимизация меры затрат. Следует особо отметить, что математически точный оптимум может оказаться недостижимым и, следовательно, служить лишь ориентиром. Однако методы выбора параметров системы должны обладать таким свойством, что если оптимум существует, то при достаточном терпении и заданном машинном времени он должен быть в пределе достижим.

То что является последним шагом в модели технической разработки системы на рис. 3.1 (описание оптимальной системы), в действительности оказывается промежуточным шагом. До тех пор пока процедура проектирования системы не станет исключительно эффективной, система, предложенная группой разработчиков, не будет удовлетворять заказчика. Получив результаты одного прохождения через процедуру проектирования системы, заказчик, вероятно, вспомнит некоторые ограничения, которые он забыл описать и которые оптимальная система нарушает. Проектировщик также может найти привлекательные решения, которых он ранее не видел. Он опять-таки в большей мере, чем заказчик, вспомнит технологические ограничения, которые он забыл описать и которые оптимальная система нарушает. Наконец, заказчик, несомненно, решит, что неплохо бы уменьшить на малую величину уровни качества системы, если это приведет к экономии денег.

На следующем шаге процедуры каждый участник группы должен сделать глубокий вдох и вернуться к работе, вооруженный добытыми с трудом новыми знаниями. Именно с этой целью указаны все каналы обратной связи в модели на рис. 3.1. Эта итеративная процедура продолжается до тех пор, пока заказчик не решит, что предлагаемая система является той, в которой он действительно нуждается. Это будет еще одно решение, принимаемое человеком, но математически не запрограммированное.

Основные стадии и процедуры процесса проектирования показаны на рис. 3.2. Разделение процесса проектирования на последовательные стадии (этапы) является в известной степени

условным, поскольку в процессе проектирования пересматриваются и уточняются ранее принятые решения.

Прокомментируем основные стадии проектирования. ***Техническое задание*** (ТЗ) обосновывает те новые качества, которыми должен обладать проектируемый объект, и является наряду с техническим предложением итогом предпроектной подготовки. ТЗ устанавливает основное назначение объекта, обосновывает целесообразность его создания и регламентирует все основные технические характеристики (требования).

В процессе подготовки ТЗ разрабатывается основная концепция проектирования. Разработкой концепции занимается небольшая по численности группа проектантов высшей квалификации.

Техническое предложение формулирует принятую концепцию, уточняя и развивая техническое задание. Оно состоит из совокупности конструкторских документов, необходимых для дальнейшего проектирования. Техническое предложение обеспечивает и уточняет технические характеристики проектируемой машины и диапазоны эксплуатационных нагрузок и скоростей. На этом этапе выбирают окончательный вариант компоновки машины, ее узлов и агрегатов, пользуясь результатами анализа, синтеза и оптимизации вариантов компоновок, и разрабатывают принципиальные схемы машины: кинематическую, гидравлическую, пневматическую, электрическую и др., а также принимают тип и характеристики системы управления, определяют общие габаритные размеры.

Техническое предложение дает полное представление о компоновке и возможностях проектируемых механизмов или машин.

Эскизный проект содержит предварительную конструкторскую проработку всех основных узлов и является развитием технического предложения. Он базируется на анализе различных конструкторских решений, результатах расчетов, оптимизации важнейших параметров и характеристик машины.

При конструировании машины, ее узлов и систем следует максимально использовать стандартные и унифицированные детали, механизмы и элементы, что удешевляет проектируемую машину.

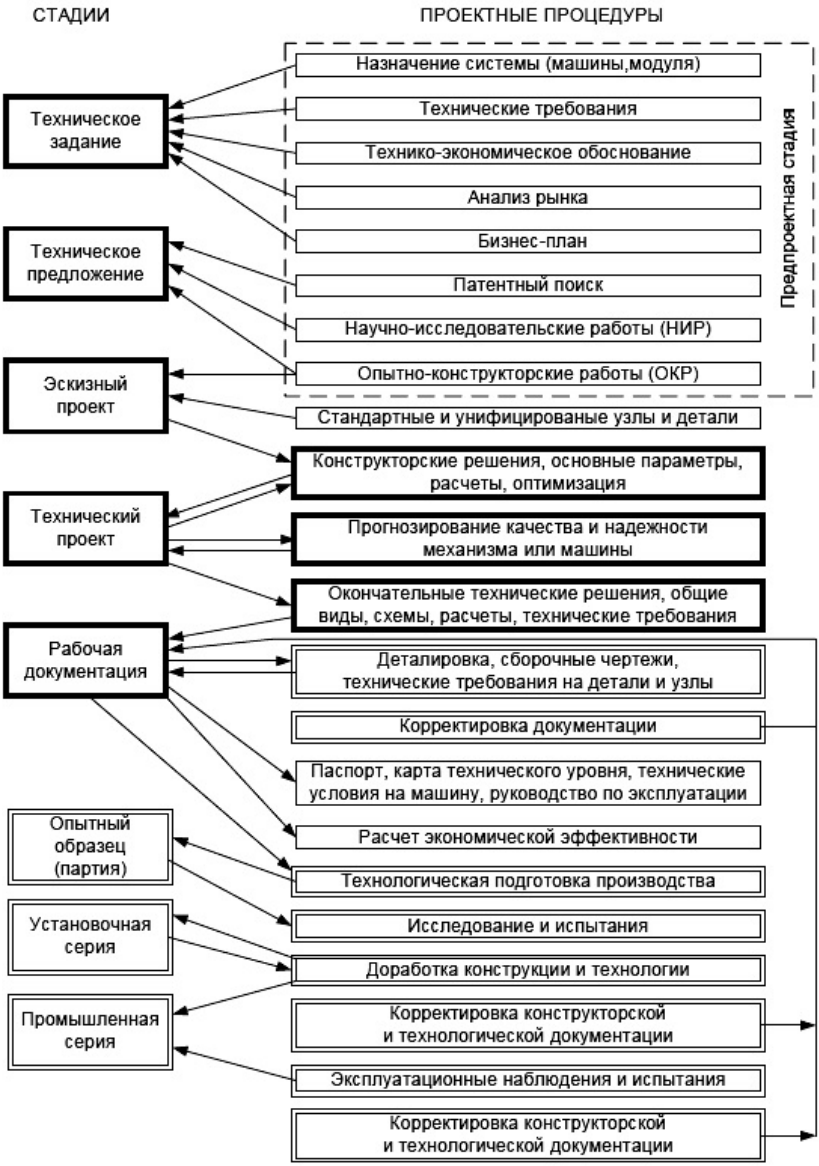


Рис. 3.2. Стадии и процедуры процесса проектирования

Каждое конструкторское решение должно быть обосновано результатами расчетов, рассмотрено с точки зрения обеспечения качества и надежности функционирования проектируемой машины, технологичности изготовления и сборки, удобства эксплуатации, ремонтопригодности и т. д.

Технический проект включает в себя окончательную конструкторскую проработку всех узлов, чертежей, схем машины и ее общих видов. На этом этапе производят все виды уточненных и поверочных расчетов, оптимизируют необходимые параметры узлов и систем машины, окончательно определяют ее эффективность; прогнозируют выходные характеристики и оценивают надежность машины с учетом вероятностной природы режимов ее эксплуатации. Проект должен содержать все исходные данные, необходимые для разработки комплекта технической документации на проектируемый механизм или машину, его согласовывают и утверждают в установленном порядке.

Рабочая документация – завершающий этап проектирования. Он включает в себя разработку рабочих чертежей всех оригинальных деталей и простановку технических требований на их изготовление, составление технологической документации, корректировки (в случае необходимости) технического проекта, составление спецификаций оригинальных и покупных комплектующих деталей, формирование паспорта машины, карты технического уровня, инструкции по эксплуатации и ряда других документов. Рабочая документация должна содержать все данные, необходимые для изготовления проектируемого механизма или машины. Выпуск рабочей документации существенно упрощается при применении САПР.

После завершения разработки комплекта рабочей документации осуществляются ***технологическая подготовка производства*** и последующие этапы изготовления и отладки спроектированной машины. В ряде случаев для сокращения сроков выпуска новой техники технологическую подготовку производства начинают заранее до завершения выпуска комплекта рабочей документации. Применение техники CAD/CAM значительно сокращает сроки подготовки производства.

3.3. Системный подход к проектированию

В лекции 1 было отмечено, что наиболее общим подходом к проектированию мехатронных систем является системный подход. В системотехнике можно выделить три подхода к процессу проектирования: структурный, блочно-иерархический и объектно-ориентированный.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции описания сложных систем на иерархические уровни, вводит понятие стиля проектирования, устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

В лекции 1 отмечено, что для большинства приложений характерны три иерархических уровня: *системный*, *макроуровень* и *микроуровень*. В каждом – приложение наименований уровней и их число может быть различным (в радиотехнике, вычислительной технике, машиностроении и т. д.). Например, в машиностроении имеются уровни: деталей, узлов, машин и комплексов машин.

В зависимости от последовательности решения задач иерархических уровней различают ***нисходящее***, ***восходящее*** и ***смешанное*** проектирование (стили проектирования).

Восходящее проектирование предполагает решение задач от нижних уровней к верхним. ***Нисходящее*** проектирование – от верхних к нижним. ***Смешанный стиль*** имеет элементы как восходящего, так и нисходящего проектирования. В большинстве случаев для сложных систем предпочтение отдают нисходящему проектированию, но часто используют и смешанное.

Неопределенность и нечеткость исходных данных при нисходящем проектировании (так как еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при восходящем проектировании (поскольку техническое задание имеется на всю систему, а не на ее части) обусловливают необходимость прогнозирования недостающих данных с последующим их уточнением, т. е. последовательного приближения к окончательному решению (итерационность проектирования).

Наряду с декомпозицией описаний на иерархические уровни применяют разделение представлений о проектируемых объектах на аспекты.

Аспект описания (страта) – описание системы или ее части с некоторой оговоренной точки зрения, определяемой функциональными, физическими или иного типа отношениями между свойствами и элементами.

Различают ***функциональный***, ***информационный***, ***структурный*** и ***поведенческий*** (процессный) ***аспекты***.

Функциональное описание относят к функциям системы и чаще всего представляют его функциональными схемами.

Информационное описание включает в себя основные понятия предметной области (сущности), словесное пояснение или числовые значения характеристик (атрибутов) используемых объектов, а также описание связей между этими понятиями и характеристиками. Информационные модели можно представлять графически (графы, диаграммы *сущность – отношение*), в виде таблиц или списков.

Структурное описание относится к морфологии системы, характеризует составные части системы и их межсоединения и может быть представлено структурными схемами, а также различного рода конструкторской документацией.

Поведенческое описание характеризует процессы функционирования (алгоритмы) системы и (или) технологические процессы создания системы.

Иногда аспекты описаний связывают с подсистемами, функционирование которых основано на различных физических процессах.

Отметим, что в общем случае выделение страт может быть неоднозначным. Так, помимо указанного подхода очевидна целесообразность выделения таких аспектов проектирования, как *функциональное* (разработка принципов действия, структурных, функциональных, принципиальных схем), *конструкторское* (определение форм и пространственного расположения компонентов изделий), *алгоритмическое* (разработка алгоритмов и программного обеспечения) и *технологическое* (разработка технологических процессов) проектирование систем. Примерами страт в случае САПР могут служить также рассматриваемые далее виды обеспечения автоматизированного проектирования.

Структурный подход к проектированию требует синтезацию вариантов системы из компонентов (блоков, модулей) и оценку этих вариантов (предварительно спрогнозировав характеристики компонентов). Он основан на идее алгоритмической декомпозиции (по методу «сверху-вниз»), где каждый блок (модуль) системы выполняет один из этапов общего процесса проектирования. Таким образом, представление о проектируемой системе расчленяется на отдельные блоки (модули), являющиеся частями алгоритма функционирования системы.

Структурный подход включает в себя создание структуры проектируемой системы и расчет ее параметров. Эти две части подхода называют *структурным и параметрическим синтезом* системы (как это было сказано в лекции 1). Задачи структурного синтеза относятся к задачам проектирования, наиболее сложным с точки зрения возможности их формализации.

Результатом структурного синтеза должны быть или перечень типов элементов вместе с таблицей соединений, или схема расположения элементов с указанием их типа, или эскизный чертеж, или схема алгоритма и т. п. Структурный синтез обычно осуществляется по блочно-иерархическому принципу. Это означает, что синтезируется не вся сложная система целиком, а на каждом уровне проектирования синтезируется определенный уровень системы – структурная схема (элементы изображения устройств), далее функциональная схема и конструкции устройств (элементы, блоки), затем более мелкие функциональные и конструктивные единицы. Такой подход существенно упрощает решение задачи синтеза.

Параметрический синтез систем обычно реализуют с помощью методов и алгоритмов оптимизации. Однако для непрерывных систем (когда управляемые параметры непрерывны и могут принимать любые значения в пределах непрерывной допускаемой области) и для дискретных систем (с дискретными внутренними параметрами) методы оптимизации имеют существенное отличие. Задачи дискретной оптимизации относятся к задачам дискретного математического программирования.

Задачи дискретного программирования считаются более трудными для решения, чем задачи математического программирования с непрерывными параметрами.

Сложность решения задач синтеза систем естественно отождествлять со сложностью производственных систем. Для поддержки концептуального проектирования сложных плохо структурированных систем наиболее перспективными являются генетические методы оптимизации, экспертные системы и CASE-системы, которые будут рассмотрены в последующих лекциях.

Объектно-ориентированный подход рассматривает сложную систему как совокупность взаимодействующих друг с другом объектов, каждый из которых является экземпляром отдельного класса. Такой подход наиболее перспективен при проектировании и моделировании сложных систем.

При структурном подходе жизненный цикл разработки сложной системы складывается из этапов анализа, проектирования, программирования, тестирования и сопровождения, которые выполняются последовательно. Главным недостатком такого подхода является последовательность выполнения этапов. Например, программирование можно начать только по завершении анализа и проектирования. Это приводит к большим потерям времени, не позволяет быстро разрабатывать прототипы программной системы. Этот подход не согласуется с интерактивным характером разработки программной системы, поскольку на последних этапах может выясниться необходимость внесения изменений в решения, принятые на предыдущих этапах (см. лекцию 1).

В целом структурному подходу присущи следующие недостатки [6]:

– трудоемкость внесения изменений;

– большой объем документации по проекту;

– серьезные ограничения возможностей сборки системы из готовых компонентов;

– сложность переноса на другие платформы.

Стремление избавиться от недостатков структурного подхода, базирующегося на системном анализе, привело к возникновению объектно-ориентированного анализа (ООА). В ООА такие понятия, как система, структура, состояние, иерархия, событие,

сущность, пришедшие из системотехники, были дополнены новыми понятиями, такими как *домен, класс, объект, атрибут, наследственность, инкапсуляция, полиморфизм* и др.

Долгое время объектно-ориентированный подход (ООП) (на базе ООА) развивался почти исключительно программистами, хотя в начале он предназначался для моделирования (проектирования) сложных систем и использовался в языке моделирования Simula-67. Своеобразным итогом многолетнего развития объектно-ориентированного программирования можно считать появление «унифицированного языка моделирования» UML (Unified Modeling Language).

Только в последние годы ООП стал востребованным в своей первоначальной области – моделировании. Для его реализации наиболее известны пакеты Simulink и Stateflow, работающие вместе с Matlab.

Рассмотрим несколько основополагающих понятий объектно-ориентированного анализа (ООА): ***сущность, связь, атрибут***.

Под *сущностью* (entity) понимается произвольное множество реальных или абстрактных объектов, каждый из которых обладает одинаковыми свойствами и характеристиками. В этом случае каждый рассматриваемый объект может являться экземпляром одной и только одной сущности, должен иметь уникальное имя или идентификатор, а также отличаться от других экземпляров данной сущности. Примерами сущностей могут быть: предприятие, фирма, цех, банк, клиент банка, технология, компьютер, рейс. Каждая из сущностей может рассматриваться с различной степенью детализации, что определяется конкретной постановкой задачи.

Связь (relationship) определяется как отношение или некоторая ассоциация между отдельными сущностями. Примером связей могут быть родственные отношения типа «отец – сын» или производственные отношения «начальник – подчиненный». Другой тип связей задается отношениями «иметь в собственности», «обладать свойством» или «быть частью».

Атрибут – это каждая отдельная характеристика, которая является общей для всех возможных экземпляров объекта.

Атрибутами являются такие характеристики, как высота, температура, регистрационный номер или положение предметов в реальном мире.

Чтобы обратиться к атрибуту, пишут <имя объекта>, <имя атрибута>, как например:

– самолет, размах крыла;

– листопрокатный стан, 1500;

– аудитория, лекционная.

Фундаментальными понятиями объектно-ориентированного подхода являются понятия *объекта*, *класса*, *домена*. *Объекты* – конкретные предметы, а также абстрактные и реальные сущности в реальном мире, а точнее, в интересующей разработчика предметной области. Например, объектами могут быть: студент, кафедра, университет. Объект обладает индивидуальностью и поведением, имеет атрибуты, значение которых определяют его состояние. Так, конкретный студент, сдавая экзамен, может оказаться в состоянии, когда его ответы не удовлетворяют экзаменатора, а его «поведение» в этом случае заключается в «дополнительной подготовке к экзамену».

Класс – это абстрактная совокупность объектов, которые имеют общий набор свойств и обладают одинаковым поведением. Понятие класса впервые было введено в язык UML. Объекты и классы обладают характерными свойствами, которые активно используются при объектно-ориентированном подходе и во многом определяют его преимущество. К важной особенности классов относится возможность их организации в виде некоторой иерархической структуры.

Домен – отдельная предметная область, «населенная» набором объектов, которые ведут себя в соответствии с правилами домена. Большие домены разбивают на подсистемы.

Основными принципами объектно-ориентированного подхода являются: *наследование*, *инкапсуляция* и *полиморфизм*.

Наследование – первый принцип, в соответствии с которым знание о более общей категории разрешается применять для более частной категории. Наследование тесно связано с иерархией классов, которая определяет, какие классы следует считать

наиболее абстрактными и общими по отношению к другим классам. При этом если родительский класс (предок) обладает фиксированным набором свойств и поведением, то производный от него класс (потомок) должен содержать этот же набор свойств и поведение, а также дополнительные свойства, которые будут характеризовать уникальность полученного таким образом класса. В качестве примера можно привести общий класс «Автомобиль», а в качестве производных классов рассмотреть «Легковой автомобиль», «Легковой автомобиль производства BMW», «Конкретную модель BMW». Наследование, позволяющее создавать иерархию классов, является эффективным средством внесения изменений и дополнений в программы проектируемых систем.

Инкапсуляция – это сокрытие отдельных деталей внутреннего устройства классов от внешних по отношению к нему объектов или пользователей. Объекты можно считать самостоятельными сущностями, отделенными от внешнего мира. Для того чтобы объект произвел некоторое действие, ему извне необходимо послать сообщение, которое инициирует выполнение нужного действия. Инкапсуляция позволяет изменять реализацию любого класса объектов без опасения, что это вызовет нежелательные побочные эффекты в программной системе. Тем самым упрощается процесс исправления ошибок и модификацию программ.

Полиморфизм – это свойство некоторых объектов принимать различные внешние формы в зависимости от обстоятельств. Применительно к объектно-ориентированному программированию (ООП) полиморфизм означает, что действия, выполняемые одноименными методами, могут отличаться в зависимости от того, к какому из классов относится тот или иной метод [7]. Рассмотрим, например, три объекта соответствующих классов: «Студент», «Водитель», «Фигурист». Для каждого из них можно определить операцию учиться. Однако результат выполнения этой операции будет отличаться для каждого из рассмотренных объектов.

Методология ООП оказала влияние на процесс разработки программ. *Процедурно-ориентированная декомпозиция* программ уступила место *объектно-ориентированной декомпозиции*, при которой отдельными структурными единицами программы стали

являться не процедуры и функции, а классы и объекты с соответствующими свойствами и методами (действиями). Программа стала *событийно-управляемой* и перестала быть последовательностью предопределенных на этапе кодирования действий. При разработке современных приложений каждая программа представляет собой бесконечный цикл ожидания некоторых заранее определенных событий. При этом инициаторами событий могут быть другие программы или пользователи.

При использовании методологии ООП написание программного кода может быть отделено от процесса проектирования структуры программы. До начала программирования классов, их свойств и методов необходимо определить, чем же являются сами эти классы. Более того, нужно дать ответы на такие вопросы, как: сколько и каких классов необходимо определить для решения поставленной задачи, какие свойства и методы необходимы для придания классам необходимого поведения, а также установить взаимодействие между классами. Таким образом, анализ предметной области решаемой задачи необходимо проводить до начала написания программы.

Жизненный цикл объектно-ориентированной разработки программных систем содержит несколько этапов, но в отличие от структурного подхода в нем нет строгой последовательности их выполнения. Процесс носит принципиально итерационный характер, что значительно упрощает написание программ [6].

Разработка начинается с этапа исследования (объектно-ориентированного анализа). Здесь предъявляются требования к системе. Затем осуществляется анализ предметной области, в ходе которого определяются классы и объекты, которые составляют словарь предметной области.

После исследования начинается объектно-ориентированное проектирование, в ходе которого детализируются классы и объекты, полученные на этапе анализа. При этом могут вводиться новые классы и объекты, если это потребуется. В результате проектирования должна быть создана детальная модель системы, составлены спецификации объектов, классов и отношений, достаточных для программирования.

Для разработки программных систем используются инструментальные средства CASE-систем, такие как SADT – Structured Analysis and Design Technique, IDEF – Integrated DEFinition и UML. Эти средства будут рассмотрены в последующих лекциях.

В отличие от процедурно-ориентированного подхода к программированию, в объектно-ориентированном подходе к моделированию и проектированию реальных физических систем различного назначения полиморфизмом называется возможность использования вместо объектов одного декларированного класса объектов другого класса, называемого замещающим, совместного с первым. Совместимость классов означает, что либо замещающий класс является потомком декларированного класса, либо декларирован интерфейс, а замещающий класс реализует этот интерфейс. Таким образом, можно выделить «совместимость по наследованию» и «совместимость по интерфейсу». Под интерфейсом в объектно-ориентированном моделировании (ООМ) следует понимать некоторую совокупность видимых компонентов объекта, т. е. для блока (на структурной схеме объекта) – это внешние переменные и видимые извне процедуры и функции. Таким образом, если блок (замещающего класса) содержит совокупность видимых компонентов с теми же именами, что в декларации интерфейса, и с совместимыми типами, то блок реализует этот интерфейс. Каждый блок неявно задает определенный интерфейс – совокупность всех своих внешних компонентов [8].

Особенность процесса разработки современных сложных систем состоит в том, что центр тяжести работ смещается от программирования к более ранним этапам – анализу и проектированию.

Рассмотрим основные преимущества объектно-ориентированного подхода [6]:

– *распараллеливание работ* (программирование и тестирование отдельных компонентов системы возможно до завершения проектирования, возможность внесения изменений и дополнений без переработки проекта);

– *гибкость архитектуры и переносимость* (в клиент-серверной системе объекты могут размещаться как на местах клиента,

так и на сервере. Возможность реализации классов на компьютерах различного типа, а фиксированный интерфейс каждого класса обеспечивает правильность функционирования системы);

– *возможность повторного использования программных компонентов* (библиотеки классов позволяют значительно снизить объем программирования новых приложений);

– *естественность описания* (использования естественного языка описания предметной области, легко выделяются объекты и связи между ними) [6].

Основные недостатки объектно-ориентированного подхода [6]:

– объектно-ориентированная декомпозиция заметно отличается от алгоритмической, что влечет за собой необходимость преодоления психологических трудностей и дополнительные расходы на обучение новой методике и языку программирования;

– основные недостатки объектно-ориентированного подхода лежат в области программирования: активное динамическое создание и удаление новых объектов (что широко используется в объектно-ориентированных языках);

– многочисленность методов и их излишние вызовы (для доступа к многим атрибутам объектов используются специальные методы).

Однако надо иметь в виду, что при использовании традиционных технологий некоторые результаты можно получить и при сравнительно небольших затратах, но на определенной стадии наступает насыщение, когда даже значительные дополнительные затраты не приводят к существенному повышению эффективности.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «проектирование».

2. Дайте развернутую характеристику подходов к проектированию сложных технических систем.

3. Сформулируйте основные принципы проектирования.

4. Опишите укрупненную схему процесса проектирования сложных систем.

5. Назовите основные стадии и процедуры процесса проектирования.

6. Прокомментируйте содержание основных стадий процесса проектирования.

7. Прокомментируйте содержание основных процедур процесса проектирования.

8. Опишите назначение и порядок проведения предпроектной стадии проектирования.

9. Опишите блочно-иерархический подход к проектированию сложных систем (стили проектирования, аспекты описания).

10. Дайте характеристику структурному подходу к проектированию сложных систем (две части структурного подхода).

11. Укажите основные недостатки структурного подхода к проектированию.

12. Сформулируйте основные принципы необходимости объектно-ориентированного подхода к проектированию сложных систем.

13. Рассмотрите основные понятия объектно-ориентированного анализа (ООА).

14. Опишите фундаментальные понятия объектно-ориентированного подхода.

15. Сформулируйте основные принципы объектно-ориентированного подхода.

16. Укажите основные преимущества и недостатки объектно-ориентированного подхода.

Лекция 4
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В лекции 1 (п. 1.1) было сказано, что в состав развитых машиностроительных систем автоматизированного проектирования (САПР) на этапах проектирования и подготовки производства входят в качестве составляющих системы CAD, CAE и CAM.

4.1. Общая характеристика систем автоматизированного проектирования

Рассмотрим основные функции автоматизированных систем CAD, CAE и CAM на этапах проектирования и подготовки производства.

CAD – автоматизированное проектирование – представляет собой компьютерную технологию для облегчения создания, изменения, анализа и оптимизации проектов. Наиболее важным компонентом CAD являются системы автоматизированной разработки рабочих чертежей и системы геометрического моделирования. Кроме того, CAD используется для оптимизации и анализа, имеет программы для анализа допусков, расчета массинерциальных свойств, моделирования методом конечных элементов и визуализации результатов анализа.

CAM – автоматизированное производство – это компьютерная технология для планирования, управления и контроля операций производства через прямой и косвенный интерфейс с производственными ресурсами предприятия. CAM используется для числового программирования управления станками с ЧПУ

и роботами, работающими на гибких автоматизированных участках. В задачах планирования производства CAM стыкуется с автоматизированной системой *MRP* и *ERP* через систему *PDM* (*MRP – material requirement planning* – планирование технических требований к материалам).

CAE – автоматизированное конструирование – это компьютерная технология для анализа геометрии деталей, моделирования и изучения поведения изделий для усовершенствования и оптимизации их конструкций. Средства CAE могут осуществлять множество различных вариантов анализа (кинематические расчеты, динамический анализ, расчет напряжений методом конечных элементов – *FEM – finite-element method*). Метод FEM рассчитывает теплообмен, распределение магнитных полей, потоков жидкости и другие задачи с непрерывными средами. Для применения метода FEM необходима аналитическая модель объекта подходящего уровня.

CAE наиболее эффективно используется на стадии анализа и оптимизации конструкции.

Функции CAD-систем

Функции CAD-систем в машиностроении подразделяют на функции двумерного и трехмерного проектирования. К функциям *2D* относят черчение, оформление конструкторской документации; к функциям *3D* – получение трехмерных геометрических моделей, метрические расчеты, реалистичную визуализацию, взаимное преобразование *2D*- и *3D*-моделей. В ряде систем предусмотрено также выполнение процедур, называемых процедурами позиционирования. К ним относят компоновку и размещение оборудования, проведение соединительных трасс.

Среди CAD-систем различают системы нижнего, среднего и верхнего уровней. Первые из них иногда называют «легкими» системами, они ориентированы преимущественно на *2D*-графику, сравнительно дешевы, основной аппаратной платформой для их использования являются персональные ЭВМ. Системы верхнего уровня, называемые также «тяжелыми», дороги,

более универсальны, ориентированы на геометрическое твердотельное и поверхностное *3D*-моделирование, оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей. Системы среднего уровня по своим возможностям занимают промежуточное положение между «легкими» и «тяжелыми».

К важным характеристикам CAD-систем относятся параметризация и ассоциативность. Параметризация подразумевает использование геометрических моделей в параметрической форме, т. е. при представлении части или всех параметров объекта не константами, а переменными. Параметрическая модель, находящаяся в базе данных, легко адаптируется к разным конкретным реализациям и поэтому может использоваться во многих конкретных проектах. При этом появляется возможность включения параметрической модели детали в модель сборочного узла с автоматическим определением размеров детали, диктуемых пространственными ограничениями. Эти ограничения в виде математических зависимостей между частью параметров сборки отражают ассоциативность моделей.

Параметризация и ассоциативность играют важную роль при проектировании конструкций узлов и блоков, состоящих из большого числа деталей. Действительно, изменение размеров одних деталей оказывает влияние на размеры и расположение других. Благодаря параметризации и ассоциативности изменения, сделанные конструктором в одной части сборки, автоматически переносятся в другие части, вызывая изменения соответствующих геометрических параметров в этих частях.

CAD-системы геометрического моделирования делятся на *каркасные*, *поверхностные*, *твердотельные* и *немногообразные* [9].

Каркасное моделирование (wireframe modeling systems) представляют форму тела в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек. Визуальная модель представляет собой каркасный чертеж формы, а соответствующее математическое описание представляет набор уравнений кривых, координат точек и сведений о связности кривых и точек (принадлежность точек

к конкретным кривым, а также пересечение кривых друг другом). Однако эта модель не содержит сведений о внутренних и внешних поверхностях объекта, что не позволяет рассчитать массу объекта.

В *системах поверхностного моделирования* (surface modeling systems) математическое описание визуальной модели включает в себя не только сведения о характеристических линиях и их конечных точек, как в каркасном моделировании, но и данные о поверхностях. При работе с отображаемой на экране моделью изменяются уравнения поверхностей, кривых и координат конечных точек. Существует три стандартных метода создания поверхностей в системах поверхностного моделирования:

– интерполяция входных точек;
– интерполяция криволинейных сеток;
– трансляция и вращение заданной кривой.

Системы твердотельного моделирования (solid modeling systems) предназначены для работы с объектами, состоящими из замкнутого объема или монолита (solid). Системы линий и поверхностей должны образовывать замкнутый объем, т. е. объем тела полностью заполнен материалом. Математическое описание объекта, созданного в системе твердотельного моделирования, содержит сведения, по которым система может определить, где находится какая-либо точка: внутри объекта, снаружи него или на его границе.

Немногообразные системы моделирования (nonmanifold modeling systems) позволяют использовать каркасные, поверхностные, твердотельные и сотовые (а также другие немногообразные) модели одновременно в одной и той же системе моделирования, расширяя диапазон доступных моделей сверх возможностей любой из упомянутых систем. К сожалению, обычные системы геометрического моделирования (каркасные, поверхностные, твердотельные) не поддерживают моделирование немногообразных моделей.

Более подробно системы геометрического моделирования описаны в [9].

Функции CAM-систем

Основные функции CAM-систем: разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки, генерация постпроцессоров для конкретных типов оборудования с ЧПУ, расчет норм времени обработки.

Другая важная функция CAM – программирование роботов, которые могут работать в гибких производственных системах и на автоматизированных участках. Еще одна важная функция CAM состоит в автоматизации *технологической подготовки производства* (Computer Aided Process Planning – CAPP). Автоматизация технологической подготовки производства связывает проектирование и производство и позволяет достигнуть полную интеграцию CAD и CAM.

CAPP составляет основу CAM и выполняет синтез технологических процессов и программ для оборудования с ЧПУ, а также выбор оборудования, оснастки, инструмента, расчет норм времени и т. п.

Технология подготовки производства (CAPP) заключается в выборе технологических процессов и их параметров, а также оборудования для реализации этих процессов. Технологическую подготовку можно определить также, как составление подробных технологических инструкций для станка или сборщика агрегата, изделий.

Автоматизированный подход к подготовке производства реализуется в виде *модифицированного подхода* (variant approach) или *генеративного подхода* (generative approach).

Модифицированный подход называется так потому, что он является модификацией неавтоматизированного (традиционного) планирования производства, выполняемого вручную: технолог пользуется не только своей памятью, но и памятью компьютера. Другими словами, рабочий журнал технолога хранится в компьютерном файле.

Типичный технологический план производства подобной детали может автоматически извлекаться из такого файла после описания анализируемой детали в соответствии с определенной системой кодирования. Выбранный план производства может редактироваться в интерактивном режиме; в него вносятся поправки, соответствующие специфике конкретной детали. Таким образом, модифицированный подход требует наличия базы данных со стандартными планами производства для каждого семейства деталей. Такой план должен содержать все инструкции, которые будут входить в план производства любой детали из данного семейства. Детали классифицируются по семействам на основании концепции групповой технологии. Согласно этой концепции каждой детали присваивается код, зависящий от ее элементов, после чего детали группируются в семейства в соответствии с присвоенными кодами. О групповой технологии будет рассказано в другом разделе.

Итак, модифицированный подход к разработке плана производства выражается в следующем. Технологическая подготовка производства новой детали начинается с кодирования ее особенностей, что эквивалентно описанию детали на языке группой технологии. Затем деталь может быть отнесена к какому-либо семейству на основании ее кода, после чего из базы данных извлекается стандартный план производства для деталей этого семейства. В плане содержатся общие инструкции по производству любых деталей семейства, поэтому может потребоваться его редактирование для получения плана нужной детали.

Редактирование осуществляется средствами компьютерной системы. Часто изменения оказываются незначительными, потому что новый план представляет собой лишь небольшую модификацию стандартного. Благодаря этому на этапе подготовки плана экономится время, а готовые планы оказываются гораздо более последовательными, чем разрабатываемые вручную.

Если деталь нельзя отнести к одному из существующих семейств, технолог может разработать новый стандартный план производства в интерактивном режиме.

Генеративный подход (generative approach) состоит в том, что технологический план вырабатывается автоматически на основании технических требований к детали. В технические требования должны включаться подробные сведения о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках проверки, а также графическое изображение формы детали.

На первом этапе разработки плана производства новой детали при генеративном подходе технические требования вводятся в компьютерную систему. В идеале они должны считываться непосредственно из базы данных САПР. Для этого необходимо, чтобы автоматизированная система технологической подготовки могла распознавать элементы детали, требующие машинной обработки, такие как отверстия, пазы и выемки.

Реализация первого этапа значительно упрощается, если при моделировании детали используется объектно-ориентированный подход. Однако даже конструктивные элементы, используемые в системе объектно-ориентированного моделирования, могут потребовать преобразования к элементам, которые могут быть изготовлены машинной обработкой.

Некоторые конструктивные элементы однозначно сопоставляются с технологическими, тогда как преобразования других представляют собой не совсем обычную процедуру. Кроме того, информации об элементах, вообще говоря, недостаточно для технологической подготовки производства. Например, большинство моделей CAD не содержат сведений о допусках и материалах, и их приходится вводить вручную. При этом схема кодирования должна определять все геометрические элементы и их параметры, в частности положение, размеры и допуски. Закодированные данные сопровождаются информацией в текстовом формате. Наконец, система должна иметь сведения о форме заготовки.

На втором этапе закодированные данные и текстовая информация преобразуются в подробный технологический план производства детали. На этом этапе определяется оптимальная последовательность операций и условия их выполнения. К условиям относятся используемые инструменты, крепления, измерительные приборы, зажимы, схемы подачи и скорости обработки. Для

построения столь подробного плана производства детали произвольной сложности требуется большая база данных и сложная логическая система.

Этап технологической подготовки производства в основном сводится к решению следующих задач [1]:

– разработка технологий изготовления изделий, инструментов, приспособлений и т. д. на основе их геометрических моделей, полученных на этапе проектирования (CAD);

– подготовка программ для технологического оборудования (станков, прессов, прокатных станов и др.) с ЧПУ по спроектированным технологиям.

Программные среды, с помощью которых решаются задачи этого этапа, можно объединить в две группы. К первой из них следует отнести программные комплексы, специально разработанные для выполнения всего цикла или определенных процедур технологической подготовки производства. Среди данной группы программного обеспечения можно выделить ADEM, ArtCAM, EdgeCAM и некоторые разработки российских фирм: КОМПАС, АВТОПРОЕКТ (Аскон) – проектирование технологических процессов механообработки, штамповки, сборки, термообработки; FLEX ТехноПро (Топ Системы) – проектирование технологии механообработки, сборки, сварки, пайки, нанесения покрытий, штамповки, ковки, термообработки; СИТЕП ЛШ – листовая штамповка; TECHCARD (Интермех) – комплексная система автоматизации технологической подготовки производства; ТехноПро (Вектор) – универсальная система автоматизации технологического проектирования; SprutCAM, СПРУТ-ТП (СПРУТ-Технологии) – система автоматизированного проектирования технологических процессов и др.

Другую группу программного обеспечения составляют программные системы сквозного проектирования и технологической подготовки производства: CATIA, EUCLID3, Unigraphics, Pro/Engineer, CADDS и др.

Контроль качества управляющих программ выполняют специальные программы, например такие, как NC Simul, NC Formater и др.

В производстве машиностроительных и части приборостроительных изделий используют технологии, в основе которых лежат различные физические процессы: механообработка, электроэрозионная обработка, литье металлов и пластмасс и др.

В автоматизированных системах сквозного проектирования и подготовки производства наиболее часто реализованы следующие виды механообработки: 2,5-, 3- и 5-координатное фрезерование, токарная обработка, сверление, нарезание резьбы и др.; имеется возможность моделировать движение инструмента и снятие материала во время черновой и чистовой обработки поверхности изделия. Например, в простейшем варианте 2- и 2,5-координатной обработки поверхностей: контурная обработка, фрезерование призм и тел вращения, выборка карманов с возможностью движения «в одну сторону», зигзаг, спираль, а также нарезание резьбы и снятие фасок. В модулях 3- и 5-координатного фрезерования программных систем сквозного проектирования и технологической подготовки производства реализованы практически все возможные способы обработки поверхностей изделий, например такие, как фрезерование поверхности с управлением угла наклона инструмента, шлифующее резание с возможностью обдувки и др.

При выполнении различных видов механообработки используется общая база данных для поддержки связи между геометрической моделью обрабатываемой детали и управляющей программой для станка с ЧПУ, где проходы инструмента создают по геометрии модели. Изменение геометрии отражается в управляющей программе. Траектория движения инструмента создается интерактивно по поверхности модели изделия, благодаря чему технологи получают возможность визуально наблюдать на экране монитора имитацию процесса удаления стружки, контролировать зарезы и быстро вносить изменения в циклы обработки.

С помощью специальных функций автоматически вычисляется объем, который необходимо удалить из заготовки при обработке изделия.

В системах сквозного проектирования и технологической подготовки производства различных фирм-разработчиков реализо-

ваны свои подходы к организации программ, свои алгоритмы и методы. Более подробно эти подходы реализованы в системах верхнего уровня САПР, например в системе EUCLID3 фирмы EADS MATRA DATA VISION (Франция), которая воплотила многолетний опыт специалистов различных отраслей и считается одной из лучших в мире. В [1] описаны основные положения проектирования технологий фрезерной и токарной обработки.

Практика показывает, что предприятия по-разному подходят к созданию своих интегрированных информационных систем, предназначенных для комплексного решения задач автоматизации конструирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства. Во многих случаях на рабочих местах конструкторов и технологов устанавливаются программные среды различных фирм-разработчиков. В этих условиях вопросы организации обмена информацией становятся актуальными. Известно, что обмен без потерь информации достигается при наличии единой базы данных для различных подсистем. Этим выгодно отличаются комплексные системы сквозного проектирования и подготовки производства верхнего уровня. В тех случаях, когда на рабочих местах устанавливаются программные среды различных фирм, организация обмена информацией ложится на самих пользователей. Поэтому важно, чтобы для таких программ были разработаны соответствующие интерфейсы с необходимой полнотой реализации форматов (CALS-технологии).

При подготовке производства также широко используется *групповая технология проектирования и подготовки производства*.

Групповая технология – это группировка задач, в основном подобных друг другу, позволяющая найти общее их решение, сэкономив тем самым время и усилия.

Это всеобъемлющее определение можно конкретизировать, определив область его применения. Суть групповой технологии состоит в создании базы данных подобных деталей, проектов и технологий и использовании этой базы для внедрения общей процедуры проектирования и производства таких деталей. Детали объединяются в семейства по конструктивному подобию

(например, по схожести форм) и по технологическому подобию (например, по необходимым операциям, таким как фрезерование или сверление).

Групповая технология широко используется для упрощения продвижения продуктов на производстве. Выделение деталей с общими технологическими параметрами позволяет разработать эффективные планы производства, выделяя для каждого семейства одну ячейку плана. Таким образом, упрощаются технологические маршруты, сокращаются временные затраты на передачу материалов между станками и длительность производственных циклов.

Более того, поскольку подобные детали производятся на одних и тех же станках, часто сокращаются и временные затраты на настройку станков. Может использоваться специальное технологическое оснащение. В предыдущем разделе отмечалось, что коды групповой технологии используются для выбора существующих планов в автоматизированной технологической подготовке производства.

Инженерам-технологам не приходится разрабатывать планы с нуля для каждой новой детали – вместо этого они могут обращаться к планам производства аналогичных деталей и изменять их в соответствии с техническими требованиями к новым деталям.

Концепция групповой технологии дает преимущества и на этапе проектирования. С ее помощью часто удается устранить избыточное разнообразие деталей, предоставив конструкторам возможность осуществлять поиск по семействам деталей. Часто конструкторы просто не знают о наличии аналогичных проектов среди текущих разработок. Обычно это бывает связано с тем, что система нумерации деталей не дает им достаточной информации. В таких случаях возникает тенденция к дублированию деталей с незначительными изменениями, не имеющими отношения к назначению деталей. Избыток деталей приводит к быстрому увеличению количества бумаг, а также к расходам заготовок.

В процессе разработки технических изделий широкое применение находят их физические прототипы [9].

Быстрое прототипирование и изготовление (БПИ) – это способ физического моделирования для получения физического прототипа конструкции, например детали (физический объект), – широко используется на стадии анализа проекта (детали) по окончании концептуального проектирования.

В своей основе процессы быстрого прототипирования и изготовления (БПИ) (*rapid prototyping and manufacturing*) состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготовляемого объекта из полимерных материалов (или за счет спекания твердых частиц и порошка лучом лазера); послойное наложение этих сечений и комбинация слоев. Поэтому для создания физического объекта требуются только данные о его поперечных сечениях. Процессы БПИ являются безынструментальными – позволяют создавать физический объект без использования инструментов (по сравнению, например, со станками с ЧПУ).

Данные о поперечных сечениях изделия можно получить, используя объемные 3*D*-чертежи деталей, полученных методами геометрического (например, твердотельного) моделирования.

Методы БПИ [9, с. 379–412]

1. Стереолитография.
2. Отверждение на твердом основании.
3. Избирательное лазерное спекание.
4. Трехмерная печать.
5. Ламинирование.
6. Моделирование методом наплавления.

Кратко рассмотрим все перечисленные методы.

Стереолитография. Метод основан на избирательном отверждении поверхностного слоя фотополимера и построении трехмерных объектов из последовательно наложенных слоев.

Процесс изготовления детали протекает и следующим образом (рис. 4.1):

1. Фоточувствительный полимер, затвердевающий на свету, поддерживается в жидком состоянии.

2. На толщину одного слоя ниже поверхности жидкого полимера помещается платформа, способная двигаться в вертикальном направлении.

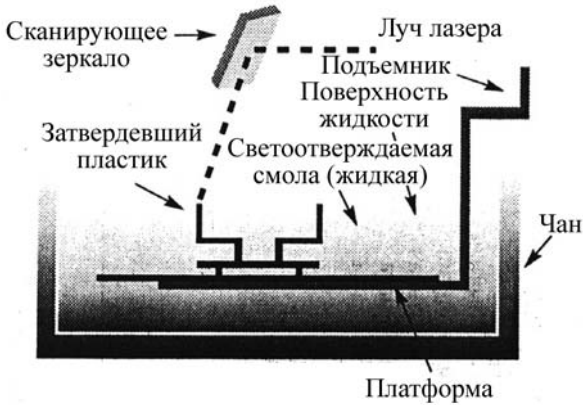


Рис. 4.1. Процесс стереолитографии

3. Ультрафиолетовый лазер сканирует слой полимера над платформой, отверждая полимер по форме соответствующего поперечного сечения. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.

4. Платформа опускается в ванну с полимером на толщину одного слоя, давая полимеру растечься по поверхности детали для начала нового слоя.

5. Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет наращен верхний слой детали.

6. Для полного затвердевания детали выполняется окончательное отверждение. Этот шаг необходим, поскольку в каждом слое могут еще оставаться жидкие участки. Так как лазерный луч имеет конечные размеры, сканирование каждого слоя аналогично закрашиванию некоторой фигуры тонкой цветной ручкой.

Габаритные размеры ванн 500×500×500 мм. Толщина слоев составляет 50…150 мкм. Точность моделей 0,1 мм.

Отверждение на твердом основании (*solid ground curing* – SGC). В этом случае каждый слой отверждается путем экспонирования ультрафиолетовой лампой, а не сканирования лазерным лучом. Таким образом, все точки слоя затвердевают одновременно и окончательного отверждения не требуется. Типичный

процесс отверждения на твердом основании имеет место в системе *Solider* от *Cubatal Israel*, работа которой происходит следующим образом:

1. По данным геометрической модели детали и желаемой толщине слоя рассчитывается поперечное сечение каждого слоя.

2. Для каждого слоя изготавливается оптическая маска по форме соответствующего поперечного сечения.

3. После выравнивания (рис. 4.2, *а*) платформа покрывается тонким слоем жидкого фотополимера (рис. 4.2, *б*).

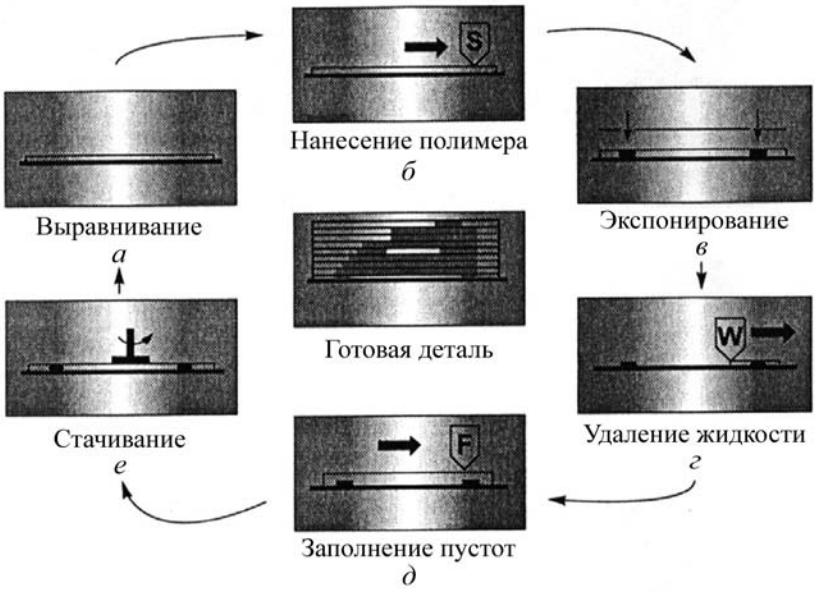


Рис. 4.2. Система Solider

4. Над поверхностью жидкой пластмассы помещается маска, соответствующая текущему слою, и пластмасса экспонируется светом мощной ультрафиолетовой лампы (рис. 4.2, *в*). Обратите внимание, что процесс начинается с маски, соответствующей нижнему слою.

5. Оставшаяся жидкость удаляется с изделия аэродинамическим *wiper* [ˈwaipə] – очистителем (рис. 4.2, *г*).

6. Изделие покрывается слоем жидкого воска, который заполняет пустоты (рис. 4.2, *д*). Затем к воску прикладывается холодная пластина, и он затвердевает.

7. Слой стачивается до желаемой толщины с помощью шлифовального диска (рис. 4.2, *е*).

8. Готовая часть изделия покрывается тонким слоем жидкого полимера, и шаги 4–7 повторяются для каждого последующего слоя, пока не будет обработан самый верхний слой.

9. Воск расплавляется и удаляется из готовой детали.

Главным преимуществом метода отверждения на твердом основании по сравнению с методом стереолитографии является отсутствие необходимости в поддерживающих структурах. Это обусловлено тем, что пустоты заполняются воском. Кроме того, благодаря использованию света лампы вместо лазерного луча, исключается операция окончательного отверждения. Хотя отверждение на твердом основании позволяет изготавливать детали с большей точностью, чем стереолитография, процесс этот весьма сложен.

Избирательное лазерное спекание. Процесс изготовления детали путем избирательного лазерного спекания, разработанный фирмой DTM (США), протекает следующим образом (рис. 4.3):

1. Цилиндрическая заготовка помещается на высоте, необходимой для того, чтобы на нее можно было осадить слой порошкового материала желаемой толщины. Порошковый материал, используемый для изготовления прототипа, поступает из подающего цилиндра и наносится выравнивающим валиком.

2. Слой порошка избирательно сканируется и нагревается лучом лазера, вследствие чего частицы слипаются между собой. Просканированные частицы порошка образуют требуемое поперечное сечение. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.

3. Цилиндрическая заготовка опускается на толщину одного слоя для нанесения нового слоя порошка.

4. Луч лазера сканирует новый слой порошка, склеивая его с предыдущим и формируя следующее поперечное сечение.

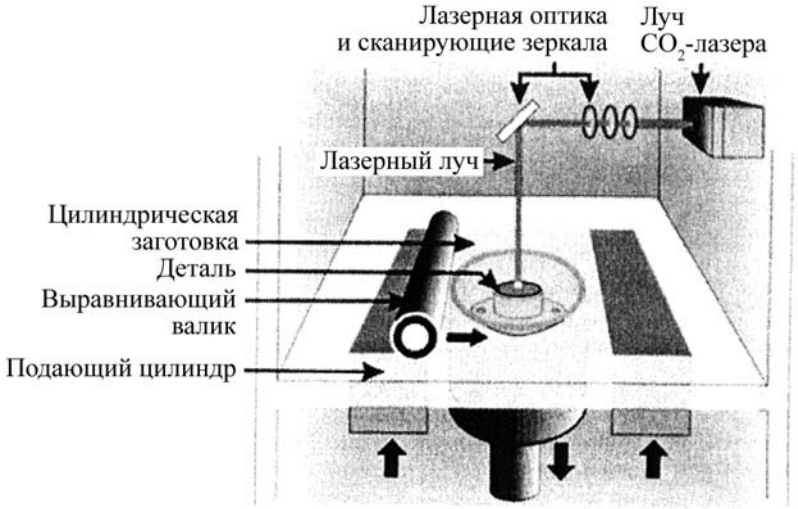


Рис. 4.3. Избирательное лазерное спекание

5. Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет создан самый верхний слой детали.

6. Для некоторых материалов может понадобиться окончательное отверждение.

Поддерживающая структура не требуется, потому что пустоты каждого слоя заполняются необработанным порошком. Более того, в качестве материала для процесса избирательного спекания потенциально может использоваться любой плавкий порошок, даже металлический, если лазер обладает достаточной мощностью.

На практике для металлических порошков, частицы которых покрыты термопластическим связующим материалом, используется косвенное спекание. Под лучом лазера связующий материал расправляется и свободно связывает частицы металлического порошка, образуя желаемую форму, которая называется *зеленой деталью* (*green part*). В этом случае достаточно, чтобы мощности лазера хватало для расплавления связующего материала.

Затем зеленая часть подвергается обработке в печи, в ходе которой связующий материал выжигается, а частицы металлического

порошка связываются за счет обычных механизмов спекания. Получившаяся деталь носит название *коричневой детали* (*brown part*). Без дальнейшей обработки деталь будет довольно пористой из-за наличия пустот, которые ранее занимали частицы связующего материала. Чтобы снизить пористость, в печь помещается еще один материал – инфильтрант. Этот металл расплавляется при рабочей температуре печи и проникает в поры детали за счет капиллярного эффекта. Данный метод используется для изготовления форм для литья непосредственно по их геометрическим моделям. Ресурса таких форм достаточно для изготовления от 2 500 до 10 000 деталей-прототипов.

Трехмерная печать. Разработанный в Массачусетском технологическом институте процесс трехмерной печати был назван так из-за своей схожести с печатью на струйном принтере. В трехмерной печати вместо чернил используется жидкое связующее вещество. Процесс трехмерной печати происходит следующим образом (рис. 4.4):

1. Платформа располагается на высоте, необходимой для того, чтобы можно было нанести на нее слой керамического порошка надлежащей толщины.

2. Нанесенный слой керамического порошка избирательно сканируется печатающей головкой, из которой поступает жидкое связующее вещество, вызывающее прилипание частиц друг к другу. Отсканированные печатающей головкой частицы образуют требуемую форму поперечного сечения. Обратите внимание, что этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения.

3. Платформа опускается на одну толщину слоя, позволяя нанести следующий слой порошка.

4. Новый слой сканируется, образуя следующее поперечное сечение и склеиваясь с предыдущим слоем.

5. Шаги 3 и 4 повторяются, пока не будет создан верхний слой детали.

6. Для отверждения детали проводится последующая тепловая обработка.

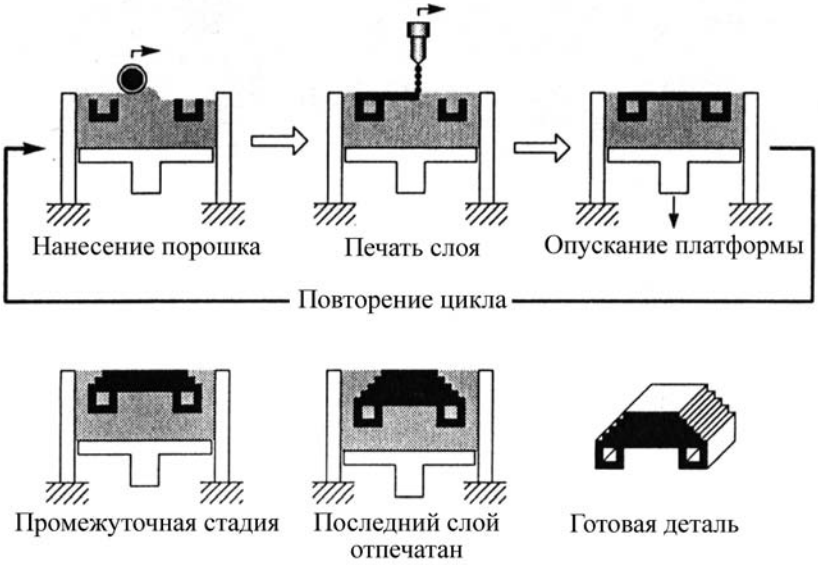


Рис. 4.4. Трехмерная печать

С помощью трехмерной печати было бы удобно изготавливать формы для литья, поскольку форма изготавливается как цельная деталь, состоящая из оболочки и полостей, и положение полостей относительно оболочки можно было бы задавать точно. Однако формы для литья, изготовленные путем современной трехмерной печати, имеют невысокое качество поверхности.

Ламинирование (*laminated object manufacturing* – LOM). Коммерциализированной фирмой *Helisys* деталь изготавливается путем ламинирования и лазерной резки материалов, поступающих в листовом виде. Слипание листов происходит за счет наличия термоадгезивного покрытия. Процесс протекает следующим образом (рис. 4.5):

1. Каждый лист приклеивается к заготовке с помощью нагрева и давления, образуя очередной слой. Листовой материал подается в виде непрерывного рулона с одной стороны машины и принимается с противоположной стороны. Температуру и давление,

необходимые для ламинирования, обеспечивает нагретый валик. Обратите внимание на то, что, когда к стопке приклеивается следующий лист, платформа опускается на толщину одного листа.

2. После того как слой (лист) приклеен, он сканируется лазером вдоль контура текущего поперечного сечения. Обычно для этой цели используется лазер на углекислом газе мощностью 25 или 50 Вт. Как и в других процессах, этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения. Обратите внимание, что здесь сканирование производится только по контурам. Это делает данный процесс более эффективным, чем процессы, требующие растрового сканирования.

3. Области слоя, выходящие за пределы контуров, штрихуются лазером, т. е. рассекаются на маленькие кусочки, называемые *черепичками* (*tiles*), для последующего удаления, когда деталь будет закончена.

4. Шаги 1–3 повторяются до тех пор, пока не будет наклеен и вырезан верхний слой детали.

5. После того как все слои будут готовы, внутри блока поддерживающего материала окажется готовая деталь. Этот материал затем разматывается на кусочки вдоль линий лазерной штриховки.

6. Готовую деталь можно покрыть герметиком, чтобы предохранить ее от влажности.

Наличие поддерживающего материала вокруг детали имеет свои преимущества и недостатки. Прежде всего, оно исключает необходимость во внешних поддерживающих структурах. При изготовлении детали внутри блока поддерживающего материала, имеющего определенную форму, геометрия всей структуры стабилизирована и соответственно ей не грозит перекос под собственным весом. Более того, нам не приходится беспокоиться об изолированных «островках», которые часто образуются, когда твердое тело, спроектированное в CAD-системе, рассекается на слои.

Иными словами, ламинирование позволяет избежать создания специальных подпорок, которые точно фиксировали бы эти «островки» в пространстве, пока в процессе изготовления не будут созданы «мосты» к оставшимся частям детали. Однако удаление лишнего материала по окончании изготовления детали является непростой задачей.

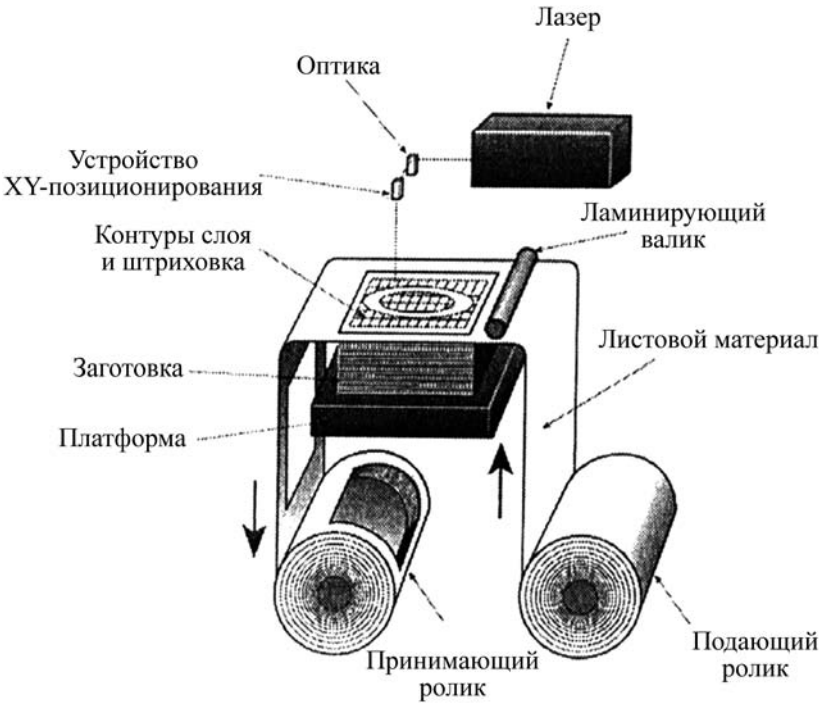


Рис. 4.5. Процесс ламинирования

Чтобы удалить только излишки, а хрупкие части детали при этом не сломать, необходимо бережно очистить ее вручную. Кроме того, полую структуру с замкнутыми поверхностями невозможно изготовить в виде единой части, поскольку в этом случае излишки материала невозможно будет извлечь изнутри. Сложность удаления ненужного материала характерна для любой части с узкими перемычками, внутренними полостями с ограниченным доступом, слепыми отверстиями и т. п. Далее большая часть материала, расходуемая при ламинировании, идет не на саму деталь, а остается неиспользованной в рулоне или образует поддерживающие структуры, которые будут удалены после изготовления. Это может быть весьма расточительно, если применяются более дорогостоящие материалы, чем бумага.

Помимо преимуществ и недостатков процесс ламинирования имеет следующие характеристики:

Это субтрактивный, а не аддитивный процесс, т. е. для создания слоя с требуемым поперечным сечением материал удаляется, а не добавляется. Во всех прочих процессах БПИ слои образуются путем добавления материала. Таким образом, потенциально ламинирование является самой быстрой технологией изготовления деталей с большим отношением объема к площади поверхности.

Детали образуются перемежающимися слоями материала и клейкого вещества. Соответственно, многие из их физических свойств являются неоднородными и анизотропным.

Потенциальная точность процесса изготовления ламинированных объектов высока. В нем может использоваться сколь угодно тонкий листовой материал, что позволяет достичь хорошей разрешающей способности в направлении наращивания деталей. В действительности изготовить тонкий однородный листовой материал несложно, и усадка при ламинировании не представляет проблемы, поскольку контуры вырезаются после того, как происходит усадка.

Хотя процесс потенциально применим ко многим материалам, включая пластики, композиты и металлы, наиболее популярным на сегодняшний день является бумажное ламинирование.

Габариты изделия достигают размера 800 × 560 × 500 мм. Масса до 20 кг. Температура горячего валика – 70…400 °С. Сила прижатия валика до 180 кН. Толщина материала 0,076…0,2 мм.

Моделирование методом наплавления (*fused-deposition modeling* – FDM). В процессе наплавления коммерциализированной фирмой *Stratasys* каждый слой формируется путем выдавливания термопластичного материала, находящегося в жидком состоянии (рис. 4.6). Температура выдавливаемого материала незначительно превышает его температуру затвердевания (аналогичная ситуация при создании надписей на торте шоколадным кремом). Деталь изготавливается путем последовательного наплавления слоев. Этот процесс относительно прост, но его применение ограничено термопластичными материалами.

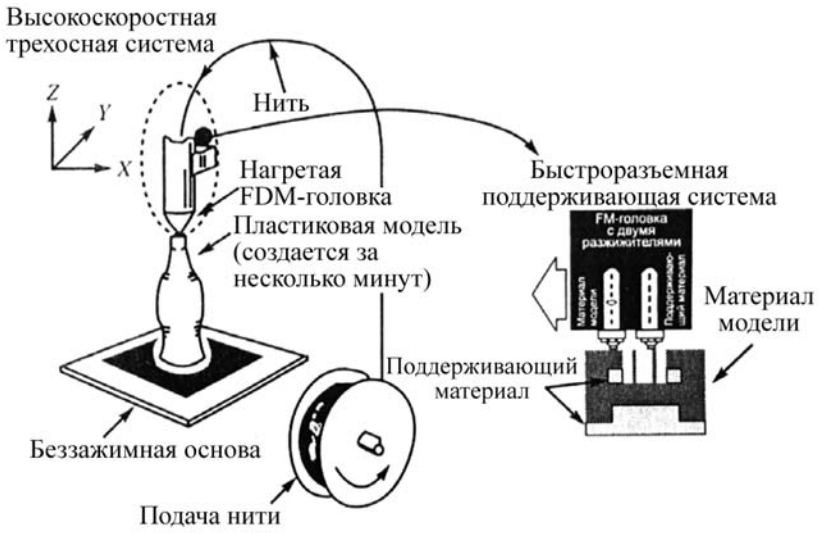


Рис. 4.6. Моделирование методом наплавления
(с разрешения Stratasys, Inc.)

Функции CAE-систем

CAE-системы наиболее эффективно используются на стадии анализа и оптимизации конструкций и технологических процессов.

Функции CAE-систем довольно разнообразны, так как связаны с проектными процедурами анализа, моделирования, оптимизации проектных решений. В состав машиностроительных CAE-систем прежде всего включают программы для выполнения следующих процедур:

– моделирование полей физических величин, в том числе анализ прочности, который чаще всего выполняется в соответствии с МКЭ;

– расчет состояний моделируемых объектов и переходных процессов в них средствами макроуровня;

– имитационное моделирование сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Основными частями программ анализа с помощью МКЭ являются библиотеки конечных элементов, препроцессор, решатель и постпроцессор.

Библиотеки конечных элементов содержат их модели – матрицы жесткости. Очевидно, что модели конечных элементов будут различными для разных задач (анализ упругих или пластических деформаций, моделирование полей температур, электрических потенциалов и т. п.), разных форм конечных элементов (например, в двумерном случае – треугольные или четырехугольные элементы), разных наборов координатных функций.

Исходные данные для препроцессора – геометрическая модель объекта, чаще всего получаемая из подсистемы конструирования. Основная функция препроцессора – представление исследуемой среды (детали) в сеточном виде, т. е. в виде множества конечных элементов.

Решатель – программа, которая ассемблирует (собирает) модели отдельных конечных элементов в общую систему алгебраических уравнений и решает эту систему одним из методов разреженных матриц.

Постпроцессор служит для визуализации результатов решений в удобной для пользователя форме. В машиностроительных САПР это графическая форма. Пользователь может видеть исходную (до нагружения) и деформированную формы детали, в которых палитра цветов или интенсивность свечения характеризуют значения фазовой переменной.

CAE-системы позволили создать новые методы визуализации результатов компьютерного моделирования отдельных прототипов и целых производств [9].

Дело в том, что прогресс автоматизированной разработки привнес новую парадигму в проектирование и анализ. Прежде всего, системы геометрического моделирования настолько продвинулись вперед за последнее десятилетие, что современные CAD-системы способны обрабатывать модели деталей и агрегатов самой сложной геометрии и конструкции. Агрегат можно отображать, оценивать и модифицировать как единое целое, а его движение имитировать так же, как это делается с физическим прототипом.

Еще одно достижение – это анализ по методу конечных элементов. Он мог бы стать средством виртуальной оценки надежности и технических характеристик продукта, если бы его вычислительную эффективность можно было улучшить до такой степени, чтобы выводить результаты в реальном времени. С его помощью можно было бы предсказывать механические свойства и характеристики (напряжения, прогиб, вибрация, температура, давление в сложных деталях) так, как если бы они измерялись посредством различных экспериментов.

Более того, производители CAD-систем в настоящий момент пытаются объединить геометрическое моделирование с методом конечных элементов. Такая интеграция обеспечила бы непрерывное течение цикла проектирования и анализа. Метод конечных элементов использовался бы изначально в процессе проектирования для принятия конструкторских решений, что позволило бы сэкономить время и затраты, связанные с перепроектированием.

Все эти тенденции привели к возникновению новой инженерной дисциплины – *виртуальная инженерия* (*virtual engineering*).

Виртуальная инженерия – это имитационный метод, помогающий инженерам в принятии решений и управлении. Виртуальная среда представляет собой вычислительную структуру, позволяющую точно имитировать геометрические и физические свойства реальных систем. Виртуальная инженерия включает в себя имитацию различных видов инженерной деятельности, таких, как машинная обработка, сборка, управление производственными линиями, осмотр и оценка, а также процесс проектирования.

Таким образом, виртуальная инженерия может охватывать весь цикл разработки и производства продукта. После того как смоделирована деталь, имитируется ее машинная обработка и сборка. Затем, также с помощью имитации, собранный прототип тестируется, и в его конструкцию вносятся необходимые изменения. Когда прототип одобрен, имитируется производственная система и ее функционирование. Прогнозируется также себестоимость и график поставок. В результате этих имитаций

получается оптимизированный конечный прототип и производственные процедуры, на основе которых затем реализуется физическая система.

Виртуальная инженерия дает совершенно новый подход к инженерным задачам. Использование имитации устранит необходимость в дорогостоящих физических прототипах и физических экспериментах. Время разработки коренным образом сократится, появится возможность проверить большее количество альтернативных вариантов конструкции, повысится качество конечного продукта. Виртуальная инженерия обеспечит также превосходный интерфейс для клиента, позволяя ему заранее увидеть трехмерную модель продукта и запросить конструктивные изменения. Можно будет построить прототип продукта, который недоступен, слишком опасен или слишком дорог для того, чтобы создавать его в реальности. Такая возможность будет неоценима в автомобильной и авиационной промышленности, где физические макеты стоят дорого, время разработки велико, продукты крайне сложны и требуется глубокая обратная связь от клиентов.

Основными компонентами виртуальной инженерии являются: *виртуальное проектирование, цифровая имитация, виртуальное прототипирование* и *виртуальный завод*. Виртуальное проектирование выполняется с помощью устройств виртуальной реальности. Цифровая имитация позволяет проверять и оценивать работу продукта без использования физических прототипов. В процессе виртуального прототипирования строится компьютерный прототип, имеющий ту же геометрию и физическое поведение, что и реальный продукт. Виртуальный завод – это имитация заводской производственной линии. Ниже следует описание каждой из этих составляющих.

Виртуальное проектирование выполняется в виртуальной среде с использованием технологий виртуальной реальности. Виртуальное проектирование сосредоточивается на альтернативном пользовательском интерфейсе для процесса проектирования. Используя технологии виртуальной реальности, конструкторы могут погрузиться в виртуальную среду, создавать компоненты, модифицировать их, управлять различными

устройствами и взаимодействовать с виртуальными объектами в процессе конструкторской деятельности. Конструкторы могут видеть стереоскопическое изображение виртуальных объектов и слышать пространственный реалистичный звук. Эти изображения и звук возникают, когда рука конструктора движет виртуальной рукой и пальцем. Прикосновение к виртуальному объекту ощущается конструктором в виде обратной связи. Тем самым замысел конструктора эффективно воплощается в проекте и проверяется функциональное поведение конструкции.

Основная цель виртуального проектирования – позволить конструктору действовать интуитивным и естественным образом. В системах геометрического моделирования, даже при том что современные CAD-системы предоставляют изощренные средства моделирования, взаимодействие конструктора с моделью небезгранично. Возможности обзора ограничиваются изображением, спроектированным на монитор, а возможности ввода информации от конструктора – точечными манипуляциями с мышью.

Таким образом, в рамках CAD-технологии сегодняшнего дня конструктор является «одноглазым и однопалым». Более естественное взаимодействие, обеспечиваемое технологиями виртуальной реальности, дало бы конструктору большую свободу и позволило бы ему повысить креативность при создании модели. Вторая цель виртуального проектирования – на ранних стадиях проектирования учесть точку зрения потенциального пользователя продукции.

В процессе проектирования могут быть в полной мере оценены такие качества, как доступность и управляемость. Третья цель – учесть при проектировании опыт экспертов в сборке или манипулировании деталями. Этот опыт сложен и трудно формализуем, но система виртуального проектирования может пролить свет на положение пользователя, его взаимодействие с объектами и последовательность операций сборки.

Виртуальное проектирование потребует совершенно иного подхода к моделированию трехмерной геометрии. Например, меню и кнопки можно заменить технологией распознавания речи

или жестов. Если конструктор захочет изменить размеры модели, то, вместо того чтобы указать на нее, конструктор сможет взять ее в руки и растянуть. В связи с процессом виртуального проектирования непременно возникнут новые методы проектирования и схемы моделирования.

Цифровая имитация используется для проверки процессов, так как машинные операции необходимо тщательно проверить, прежде чем начинать реальную работу. Если в управляющем коде имеется ошибка, это может привести к серьезной поломке станка. Используя цифровую имитацию, пользователь перед началом работы имеет возможность проверить траекторию перемещения инструмента станка с ЧПУ, щупа координатно-измерительной машины или руки робота. Например, процессом машинной обработки можно управлять графически, как если бы это делалось на реальном станке: виртуальный станок с ЧПУ, читая стандартные инструкции, будет выполнять всю обработку в реальном времени, включая перемещение инструментов, принадлежностей, укладчиков и деталей. Непрерывный контроль за снятием материала позволяет пользователю выявлять ситуации, приводящие к вибрации и поломке инструмента, появлению выбоин и зарубок. С помощью имитации пользователь может также спрогнозировать столкновения между инструментом и приспособлением или деталью.

Визуализация также помогает инженерам лучше понять систему. Она позволяет легко уяснить идею конструкции и заранее проверить ее эксплуатационные качества. В настоящее время для этой цели используется главным образом кинематическая имитация твердых тел. Имитация моделей более высокого уровня – жидкостей, человеческих существ и сложных сред – требует моделирования физических эффектов, включая эффекты динамики, вибрации, акустики и деформации. Однако сложные имитации с использованием виртуальных прототипов могут осуществить проверку рабочих характеристик системы быстрее и с меньшими затратами.

Виртуальным прототипированием (*virtual prototyping*) называют построение прототипа агрегата из геометрических моделей его отдельных частей. Виртуальный прототип называют

иногда *цифровым макетом* (*digital mockup*) или *предварительной цифровой сборкой* (*digital preassembly*). Системы цифрового прототипирования позволяют визуализировать процесс сборки и проверять осуществимость предлагаемых агрегатов в рамках имеющихся производственных ограничений. Путем сборки виртуального прототипа можно выявить конструктивные просчеты и внести изменения в проект, чтобы реальную сборку можно было выполнить с первой попытки.

Основная функция виртуального прототипирования заключается в том, чтобы установить, осуществима ли операция сборки. Система проверяет сопряжение деталей в контексте сборочных ограничений и требований к допускам. Функции обнаружения столкновений указывают на мешающие друг другу детали. Проверяется также последовательность сборки и траектории движения деталей. Кроме того, можно определить оптимальные траектории сборки. Передовые системы позволяют также проводить структурный и функциональный анализ виртуального прототипа, используя встроенное аналитическое программное обеспечение. Часто выполняется кинематическая и динамическая имитация прототипа.

Инженеры смогут основывать конструкторские решения на виртуальных прототипах. Оптимизация конструкции будет достигаться путем последовательного уточнения виртуального прототипа. С увеличением степени детальности виртуального прототипирования станет возможной более точная структурная и функциональная имитация. Идеальной ситуация станет тогда, когда виртуальный прототип будет иметь всю совокупность характеристик физического прототипа. Таким образом, со временем виртуальное прототипирование устранит необходимость в дорогих и трудоемких физических прототипах.

Виртуальный завод (*virtual factory*) – это смоделированная на компьютере полная производственная система. Виртуальный завод имитирует конструкции производственных участков, производственные процессы и складские системы. Кроме того, для него можно программировать автоматизированное заводское оборудование – роботы, конвейеры и станки.

Система моделирует и имитирует такие компоненты, как конвейеры, накопители, доки, производственные участки и процессы. Кроме того, система моделирует процедуры – маршруты, последовательности и слияния. После этого модель производства анализируется в терминах затрат на рабочую силу, инвентаризации, эксплуатационных расходов, затрат на обработку и длительностей цикла.

Такие возможности позволяют использовать виртуальный завод для планирования производства, включая оценку проектов производственных систем и сравнение альтернативных способов производства. Когда эта технология достигнет зрелости, с помощью виртуального завода можно будет сымитировать всю цепочку поставок, что позволит оценивать и оптимизировать весь процесс управления ресурсами и производством.

Итак, методы виртуальной инженерии предлагают совершенно новый подход к процессу проектирования, который позволяет оценить возможность производства различных вариантов конструкции (включая оценку качества сборки или эксплуатационную характеристику продукта) и оптимизировать производственный процесс (методом цифровой имитации), легко настроить продукт под требования заказчика, эффективно накопить обширную базу знаний, обеспечить основу для коллективной разработки проектов.

Рассмотрим аппаратуру, которая используется виртуальной инженерией. Виртуальная инженерия – чисто программная технология, и поэтому сама по себе не требует какого-либо специального оборудования. Однако для взаимодействия с пользователем необходимо оборудование виртуальной реальности. Это оборудование включает в себя устройства как ввода, так и вывода. Устройства вывода дают пользователю ощущения от виртуальной среды. Поскольку самый эффективный способ сенсорного восприятия – это зрение, главными компонентами систем виртуальной реальности являются устройства отображения. Эти устройства должны обеспечивать пользователю стереоскопический обзор.

Доступное в настоящий момент оборудование включает в себя головные дисплеи, бинокулярные всенаправленные мониторы,

дисплеи пространственного погружения и специальные очки. Звук и осязание обогащают ощущения от виртуальной реальности, когда они используются в совокупности со зрительной системой. Типичным примером звуковой аппаратуры могут служить наушники с пространственно расширенной звуковой системой. Аппаратура осязания – это приборы с силовой обратной связью. Популярными устройствами ввода являются системы распознавания речи, следящие системы и информационные перчатки.

Головные дисплеи. Головной дисплей – это устройство отображения с полным погружением. Шлем полностью закрывает глаза и позволяет смотреть только прямо перед собой. Небольшой экран, смонтированный перед глазом пользователя, дает стереоскопическое изображение. Прибор имеет встроенную следящую систему, благодаря которой изображение на дисплее меняется при изменении положения и ориентации головы пользователя. В настоящее время доступно более 40 моделей головных дисплеев. Среди них можно упомянуть FOHMD от CAE-Electronics и Looking Glass от Polhemus Lab.

Бинокулярные всенаправленные мониторы. Бинокулярный всенаправленный монитор – это механическая версия головного дисплея. Он состоит из дисплейной коробки, которая сбалансирована по весу на многозвенной стреле. Пользователь смотрит на дисплей, а движение его головы отслеживается через систему механических звеньев. Основным преимуществом бинокулярных всенаправленных мониторов перед головными дисплеями является быстрое и точное слежение. В продаже имеются бинокулярные всенаправленные мониторы *BOOM-2C* от *Fake Space Labs* (http://www.fakespace.com) и *Cyberface3* от LEEP.

Дисплеи пространственного погружения. В дисплеях пространственного погружения используется панорамный видеоэкран, окружающий пользователя, так что пользователь чувствует себя погруженным в виртуальную среду. Дисплеи пространственного погружения обеспечивают большое поле зрения и свободу передвижения в виртуальной среде. В университете штата Иллинойс (Чикаго) разработана четырехстенная система пространственного погружения *CAVE*. Приобрести систему

CAVE можно через фирму *Pyramid System*. Существуют большие куполообразные дисплеи пространственного погружения, такие как *Visionarium Graphics*, имеющий 8 м в диаметре. Фирма *Spitz Electrihorizen* построила дисплей пространственного погружения диаметром 8,5 м.

Шторные очки. Шторные очки – это недорогое устройство отображения. Пользователь надевает устройство, напоминающее очки, которое попеременно закрывает обзор то одному, то другому глазу. Монитор или другое устройство отображения, синхронизированное с очками, имеет в два раза большую частоту обновления и попеременно показывает картинку для левого и для правого глаза. В результате на экране монитора пользователь видит стереоскопическое изображение. Данное устройство может использоваться вместе с выпускаемыми в настоящий момент дисплеями, поэтому оно экономически выгодно. Однако оно не обеспечивает достаточного погружения для того, чтобы пользователь увидел реальную среду, так как поле зрения ограничено размерами монитора. В продаже имеются шторные очки *Crystal Eyes* от *Stereographics* и *SGS* от *Tektronicx*.

Устройства осязания. Устройство осязания дает ощущение физического прикосновения. Такое устройство позволяет пользователям почувствовать реальный объект через систему силовой обратной связи, создающую иллюзию работы с реальным материалом. Примером устройства осязания является джойстик с силовой обратной связью, через который пользователь ощущает силу реакции на рабочей руке. В продаже имеются джойстики *Haptic Mater* от *Nissho Electronics* и *BSP Joystick* от *AEA Technologies*.

Прибор *Phantom* фирмы *SensAble Technology* – это устройство осязания на базе карандаша, имеющее шесть степеней свободы. Более передовым типом устройства осязания является экзоскелет – сложная система механических звеньев, окружающая всю руку так, что каждый палец и сустав независимо получают силовую обратную связь. Он объединяет в себе информационную перчатку и устройство осязания. Примерами экзескелетов являются *The Exoskeletal Hand Master* от *Sarcos* и *Force ArmMaster* от *Exos*.

Следящие системы. Следящие устройства используют электромагнитную, ультразвуковую, оптическую или механическую систему для определения положения и ориентации отслеживаемого объекта. Следящее устройство может быть встроено в головной дисплей для отслеживания направления взгляда и положения головы или в информационную перчатку – для отслеживания положения руки. Следящее устройство можно также прикрепить на любую часть тела. В продаже имеются такие следящие системы, как *Flock of Birds* от *Ascension* и *ISOTRAK II* от *Polhemus* (http://www/polhemus.com).

Типичным примером следящих устройств с использованием ультразвуковой технологии могут служить *Head-tracker* от *Logitech* (http://www.logitech.com) и *GAMS* от *Transition State Corporation*. Механичекая система используется в устройствах *GyroEngine* от *Gyration*, *ADL-1* от *Shooting Star Technology* и *Wrightrack* от *Vidtronics*. Наконец, к устройствам с использованием оптической технологии относятся *GRD-1010* от *GEC Ferranti*, *DynaSight* от *Origin Instruments* и *RtPM* от *Spatial Positioning Systems*.

Информационные перчатки. Информационная перчатка имеет на каждом суставе пальцев руки датчики, измеряющие изгиб пальца. Положение руки в целом определяется следящей системой, прикрепленной к перчатке. Обычно информация, получаемая с перчатки, преобразуется в виртуальной среде снова в изображение, форма и положение которого динамически изменяются, следуя за движениями руки пользователя. В продаже имеются информационные перчатки *Dexterous Hand master* от *Exos*, *CyberGlove GG1801* от *Virex* и *DataGlove* от *Greenleaf Medical Systems*.

Примеры промышленного применения виртуальной инженерии

Самолет Boeing 777. Boeing 777 – это первый коммерческий самолет, успешно спроектированный безбумажным методом. Для разработки модели 777 корпорация *Boeing* организовала 238 межфункциональных групп проектирования и изготовления,

ответственных за конкретные продукты. Компания *Boeing* использовала CAD-систему *CATIA* от *Dassault/IBM* и разработала собственную систему предварительной компьютерной сборки *EPIC* (*Electronic Preassembly in Computer*). Перед сборкой первого самолета не было изготовлено ни одного физического прототипа, кроме макета носовой части (для проверки критической проводки). Виртуальное прототипирование позволило компании *Boeing* вовлечь в процесс проектирования самолета заказчиков и операторов (до линейных механиков). Виртуальное прототипирование было настолько успешным, что несоосность при монтаже левого крыла составила всего 0,03 мм.

Виртуальный прототип локомотивного двигателя фирмы GM. Подразделение *Electro-Motive* фирмы *General Motors* разработало локомотивный двигатель *GM16V265H* мощностью 6300 л.с. путем так называемой «виртуальной разработки продукта» в сотрудничестве с *Unigraphics Solutions*. Все детали были представлены в виде трехмерных моделей, и последующий анализ, оптимизация конструкции и программирование станков с ЧПУ и приспособлений проводились для этих моделей. Моделирование позволило обеспечить поставку продукта в сжатые сроки: первый двигатель был построен через 18 месяцев после начала программы, в то время как обычно подобный процесс занимает более 36 месяцев. Это позволило также гораздо быстрее провести тесты надежности, что дало GM возможность удовлетворить более жесткие требования к надежности.

Дизайн интерьера салона автомобиля фирмы Chrysler. Дизайн интерьера салона автомобиля *Dodge Durango* 1998 г. был разработан методом виртуального проектирования. Член дизайнерской группы сидит в упрощенном макете салона автомобиля, состоящем только из сиденья, руля и педалей. Дизайнер, на котором надеты головной дисплей системы виртуальной реальности, информационные перчатки и датчики движений, рассматривает виртуальный прототип интерьера автомобиля (приборная доска, органы управления радиоприемника, бардачок и окна) и взаимодействует с ним. Виртуальный прототип позволяет легко вносить изменения в дизайн и оценивать обзор, доступность и эстетику.

Этот метод дает возможность быстро проверять различные варианты дизайна.

Поезд Metrocar 2000 в Стокгольме. *Metrocar* 2000 – это новая система общественного транспорта в Стокгольме, разработанная компанией *Adtranz Sweden*. Используя программу *dVISE* от *Division*, *Adtranz* сконструировала виртуальные прототипы поездов, включая полностью оснащенные интерьеры с текстурными сидениями, полами, рекламными плакатами и индикаторной панелью машиниста. Глядя на виртуальный прототип, зрители могут получить представление о масштабе, пространственных отношениях и эстетике дизайна. Это позволяет заказчику и инженеру на ранних стадиях проектирования знакомиться с дизайном продукта и вносить в него изменения.

Проектирование кораблей для Королевского военно-морского флота Великобритании. Морской директорат перспективных проектов Великобритании внедрил виртуальное проектирование в рамках своей новой программы разработки кораблей. С помощью программы *ENVISION* от *Deneb Robotics* методом имитации в интерактивном режиме был разработан квартердек для нового корабля. Имитация включала движение корабля (с шестью степенями свободы) и его влияние на работающее оборудование, людей на борту и условия освещения в каютах. Это моделирование позволило инженерам оценить проект и внести в него необходимые изменения.

В заключение отметим, что виртуальная инженерия – зарождающаяся технология. Она обладает достаточным потенциалом для того, чтобы стать значительной составляющей деятельности инженера, однако на сегодняшний день функциональность и возможности применения систем виртуальной инженерии ограничены. Чтобы виртуальная инженерия превратилась в развитую технологию, необходимо получить возможность полностью отразить функциональное поведение физических систем посредством компьютерной имитации. Обсудим некоторые связанные с этим проблемы.

Новые средства проектирования. Виртуальное проектирование представляет принципиальное иную среду для разработки.

В ней зрение является стереоскопическим, а взаимодействие с моделью конструкции осуществляется с помощью нескольких органов чувств. Эта новая среда открывает возможности для появления новых методов проектирования и подходов к моделированию. В ближайшем будущем конструктор будет иметь возможность взять объект в руки и растянуть его или создать и изменить модель с помощью одного только голоса. Новый подход к моделированию обеспечит более естественные и интуитивные способы создания моделей.

Моделирование процессов и физических объектов. В настоящее время возможности имитации сводятся главным образом к кинематике. Моделирование динамических, деформируемых и жидких систем обычно требует анализа методом конечных элементов, отнимающего большое количество вычислительных ресурсов. Чтобы это имело какую-то ценность в качестве средства виртуального проектирования, данный анализ необходимо производить в реальном времени, а чтобы стала возможной имитация в реальном времени, необходимо компактное и точное моделирование. Более того, модели должны содержать в себе информацию о своих физических свойствах и экспериментальные данные, демонстрирующие их физическое поведение.

Мера возможности производства. Производственные процессы различны, каждый имеет свои собственные уникальные характеристики. Таким образом, найти какую-то общую методику, определяющую возможности производства различных продуктов, представляется трудной задачей. Необходимы исследования определений возможности производства и методологии ее оценки. Помимо простого решения типа «да/нет» необходимо определить количественную меру возможности производства. Кроме того, оценку возможности производства необходимо трансформировать в оценку продолжительности производственных процессов и затрат.

Быстродействие системы. В настоящий момент качество визуализации и имитации сильно ограничивается недостаточным быстродействием системы. Благодаря экспоненциальному росту скорости обработки и прогрессу технологии распределенных

вычислений качество имитации улучшается. Однако быстродействие системы остается все еще слишком низким для полноценного виртуального проектирования. Для визуализации требуется детализированное трехмерное отображение и анимация с высокой частотой кадров. Оценка проекта включает в себя анализ динамических систем и оптимизации, требующих больших вычислительных ресурсов. Кроме того, для обеспечения коллективной разработки необходимо повысить скорость работы сетей, расширить полосу пропускания и увеличить число каналов.

Стандарт интерфейса данных. Виртуальное проектирование включает в себя взаимодействие различных пакетов прикладных программ. Моделирование детали обычно производится в CAD-системе, анализ – в программе анализа по методу конечных элементов, а компьютерная имитация – в интерактивной системе имитации производства. Для коллективной разработки необходимо, чтобы эти различные системы работали вместе. Стандартные интерфейсы баз данных и программного обеспечения являются ключом к виртуальному проектированию.

Открытая архитектура. Открытая архитектура придает системе масштабируемость. Системы виртуального проектирования необходимо объединять с имеющимися в настоящий момент инженерными системами для получения дополнительной функциональности или решения разнотипных задач. Открытая архитектура позволяет системе задействовать большой резерв инженерных ресурсов и находить разнообразные формы применения.

4.2. Структура и разновидности систем автоматизированного проектирования

Как и любая сложная система, САПР состоит из подсистем. Различают подсистемы проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры. Примерами проектирующих подсистем могут служить подсистемы геометрического трехмерного

моделирования механических объектов, изготовления конструкторской документации, схемотехнического анализа, трассировки соединений в печатных платах.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПР. Типичными обслуживающими подсистемами являются подсистемы управления проектными данными, подсистемы разработки и сопровождения программного обеспечения *CASE (Computer Aided Software Engineering),* обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

Структурирование САПР по различным аспектам обусловливает появление *видов обеспечения* САПР. Принято выделять семь видов обеспечения САПР:

– *техническое (ТО),* включающее различные аппаратные средства (ЭВМ, периферийные устройства, сетевое коммутационное оборудование, линии связи, измерительные средства);

– *математическое (МО),* объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования;

– *программное*, представляемое компьютерными программами САПР;

– *информационное*, состоящее из базы данных, СУБД, а также включающее другие данные, используемые при проектировании (отметим, что вся совокупность используемых при проектировании данных называется информационным фондом САПР, а база данных вместе с СУБД носит название банка данных);

– *лингвистическое*, выражаемое языками общения между проектировщиками и ЭВМ, языками программирования и языками обмена данными между техническими средствами САПР;

– *методическое*, включающее различные методики проектирования; иногда к нему относят также математическое обеспечение;

– *организационное*, представляемое штатными расписаниями, должностными инструкциями и другими документами, регламентирующими работу проектного предприятия.

Классификацию САПР осуществляют по ряду признаков, например по приложению, целевому назначению, масштабам

(комплексности решаемых задач), характеру базовой подсистемы – ядра САПР.

По приложениям наиболее представительными и широко используемыми являются следующие группы САПР:

1. САПР для применения в отраслях общего машиностроения. Их часто называют машиностроительными САПР или системами *MCAD (Mechanical CAD).*

2. САПР для радиоэлектроники: системы *ECAD (Electronic CAD)* или *EDA (Electronic Design Automation).*

3. САПР в области архитектуры и строительства.

Кроме того, известно большое число специализированных САПР или выделяемых в указанных группах, или представляющих самостоятельную ветвь в классификации. Примерами таких систем являются САПР больших интегральных схем (БИС), САПР летательных аппаратов, САПР электрических машин и т. п.

По целевому назначению различают САПР, обеспечивающие разные аспекты (страты) проектирования. Так, в составе MCAD появляются рассмотренные выше CAE/CAD/CAM-системы.

По масштабам различают отдельные программно-методические комплексы (ПМК) САПР, например: комплекс анализа прочности механических изделий в соответствии с методом конечных элементов (МКЭ) или комплекс анализа электронных схем; системы ПМК; системы с уникальными архитектурами не только программного (*software*), но и технического (*hardware*) обеспечения.

По характеру базовой подсистемы различают следующие разновидности САПР:

1. САПР на базе подсистемы машинной графики и геометрического моделирования. Эти САПР ориентированы на приложения, где основной процедурой проектирования является конструирование, т. е. определение пространственных форм и взаимного расположения объектов. К этой группе систем относится большинство САПР в области машиностроения, построенных на базе графических ядер.

В настоящее время широко используются унифицированные графические ядра, применяемые более чем в одной САПР (ядра *Parasolid* фирмы *EDS Unigrafics* и *ACIS* фирмы *Integraph*).

2. САПР на базе СУБД. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах прорабатывается большой объем данных. Такие САПР преимущественно встречаются в технико-экономических приложениях, например при проектировании бизнес-планов, но они имеются также при проектировании объектов, подобных щитам управления в системах автоматики.

3. САПР на базе конкретного прикладного пакета. Фактически это автономно используемые ПМК, например имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по МКЭ, синтеза и анализа систем автоматического управления и т. п. Часто такие САПР относятся к системам CAE. Примерами могут служить программы логического проектирования на базе языка VHDL, математические пакеты типа MathCAD.

4. Комплексные (интегрированные) САПР, состоящие из совокупности подсистем предыдущих видов. Характерными примерами комплексных САПР являются CAE/CAD/CAM-системы в машиностроении или САПР БИС. Так, САПР БИС включает в себя СУБД и подсистемы проектирования компонентов, принципиальных, логических и функциональных схем, топологии кристаллов, тестов для проверки годности изделий. Для управления столь сложными системами применяются специализированные *системные среды*.

4.3. Программные системы проектирования (примеры программ) [3]

К числу мировых лидеров в области CAD/CAM/CAE-систем верхнего уровня относятся системы *Unigrafics* (компания *EDS*), *CATIA* (*Dessault Systems*), *Pro/Engineer* (*PTC*). Продолжают использоваться также системы *I-DEAS* (*EDS*), *CADDS5* (*PTC*) и *EUCLID3* (*Matra Datavision*).

Вначале рассмотрим структуру ПО САПР и его функциональные возможности на примере комплекса программ *Pro/Engineer*.

Комплекс насчитывает несколько десятков программ (модулей), которые подразделены на группы программ конструкторского проектирования механических объектов, промышленного дизайна, функционального моделирования, технологического проектирования, обмена данными.

Базовые модули конструкторского проектирования (подсистема CAD) предназначены для твердотельного и поверхностного моделирования, синтеза конструкций из базовых элементов формы (БЭФ), поддержки параметризации и ассоциативности, проекционного черчения и разработки чертежей с простановкой размеров и допусков. Пользователь может пополнять библиотеку БЭФ оригинальными моделями. Синтез трехмерных модулей сложной формы возможен вытягиванием плоского контура по нормали к его плоскости, его протягиванием вдоль произвольной пространственной кривой, вращением контура вокруг заданной оси, натягиванием между несколькими заданными сечениями. Синтез сборок выполняется вызовом или ссылкой на библиотечные элементы, их модификацией, разработкой новых деталей. Детали сборки можно нужным образом ориентировать в пространстве. Далее следует ввести ассоциативные (сопрягающие) связи. Дополнительные модели конструкторского проектирования имеют более конкретную, но узкую специализацию. Примерами таких модулей могут служить модули конструирования панелей из композиционных материалов, разработки штампов и литейных пресс-форм, трубопроводных систем, сварных конструкций, разводки электрических кабелей и жгутов.

Модули функционального моделирования (подсистема CAE) используются как препроцессоры и постпроцессоры в программах конечно-элементного анализа (нанесение сетки конечных элементов, визуализация результатов анализа), для анализа теплового состояния конструкций, оценки виброустойчивости и др.

Основные модули технологического проектирования (подсистема CAM) служат для моделирования технологических процессов фрезерной, токарной, электроэрозионной обработки и для разработки постпроцессоров для систем управления оборудованием с ЧПУ.

Модули обмена данными (конверторы форматов данных) должны обеспечивать возможности импорта и экспорта данных в другие CAE/CAD/CAM-системы.

Система Unigraphics – универсальная система геометрического моделирования и конструкторско-технологического проектирования, в том числе разработки больших сборок, прочностных расчетов и подготовки конструкторской документации. Система многомодульная.

В конструкторской части (подсистема CAD) имеются средства для твердотельного конструирования, геометрического моделирования на основе сплайновых моделей поверхностей, создания чертежей по 3*D*-модели, проектирования сборок (в том числе с сотнями и тысячами компонентов) с учетом ассоциативности, анализа допусков и др.

В технологической части (подсистема CAM) предусмотрены разработка управляющих программ для токарной и электроэрозионной обработки, синтез и анализ траекторий инструмента при фрезерной трех- и пятикоординатной обработке, при проектировании пресс-форм, штампов и др. Для инженерного анализа (подсистема CAE) в систему включены модели прочностного анализа с использованием МКЭ с соответствующими пре- и постпроцессорами, кинематического и динамического анализа механизмов с определением сил, скоростей и ускорений, анализа процессов литья пластических масс.

Другая система верхнего уровня CATIA позволяет заказчику генерировать собственный вариант САПР сквозного проектирования – от создания концепции изделия до технологической поддержки производства и планирования производственных ресурсов. В системе реализовано поверхностное и твердотельное 3*D*-моделирование и оптимизация характеристик изделий. Возможны фотореалистичная визуализация, восстановление математической модели из материального макета. Система масштабируема. Предлагаются типовые конфигурации, в том числе варианты для полнофункционального сквозного проектирования сложных изделий и проектирования комплектующих на небольших и средних предприятиях. Аналогичные возможности реализованы и в других тяжелых САПР.

Значительно дешевле обходится приобретение САПР среднего уровня. В России получили распространение системы компаний *Autodesk, Solid Works Corporation, Топ Системы, Аскон, Интермех, Bee-Pitron* и некоторых других. Все эти системы ориентированы в первую очередь на платформу *Wintel*, как правило, имеют подсистемы: конструкторско-чертежную 2*D*, твердотельного 3*D*-моделирования, технологического проектирования, управления проектными данными, ряд подсистем инженерного анализа и расчета отдельных видов машиностроительных изделий, а также библиотеки типовых конструктивных решений. Широкое распространение в России и за рубежом получило ПО машиностроительных САПР компании *Autodesk*.

Линия современных программных систем конструкторского проектирования фирмы *Autodesk* включает ряд систем, среди которых наиболее развитыми следует считать системы *AutoCAD, Mechanical Desktop* и *Inventor*.

Система *Mechanical Desktop (MDT)* предназначена для параметрического 3*D*-моделирования, ассоциативного конструирования, распределенного проектирования в сети Интернет, оформления 2*D*-документации. Построена на графическом ядре *ACIS*. *Имеется управляющая программа CAD-менеджер со средствами настройки, конфигурирования и управления рабочими группами.*

Система *Inventor* предназначена для твердотельного параметрического проектирования, ориентирована на разработку больших сборок с сотнями и тысячами деталей, имеет развитую библиотеку стандартных элементов. В основе системы также лежит графическое ядро *ACIS*. Построение 3*D*-моделей возможно выдавливанием, вращением, по сечениям, по траекториям. Из 3*D*-модели можно получить 2*D*-чертежи и спецификации материалов. Поддерживается коллективная работа над проектом, в том числе в пределах одной и той же сборки. Предусмотрена автоматическая проверка кинематики, размеров детали с учетом положения соседних деталей в сборке. *Значительные удобства работы конструкторов обусловлены тем, что ассоциативные связи задаются не путем описания операций с параметрами и уравнений, а непосредственно определением формы и положения компонентов*.

В число продуктов *Autodesk* входит ряд других программ автоматизированного проектирования, в том числе *Autodesk Data Exchange* – набор конверторов для взаимного преобразования данных из форматов *DXF* и *SAT* (формат ядра *ACIS*) в такие форматы, как *STEP, IGES, VDA-FS*.

Ряд продуктов, интегрированных с программами проектирования компании *Autodesk*, создан компаниями, входящими в ассоциацию *Mechanical Applications Initiative* производителей прикладного ПО. Среди них следует отметить программу *Dynamic Designer Motion* (компания *Mechanical Dynamic*), предназначенную для расчетов динамики и кинематики механизмов (в том числе трехмерных). Элементами являются модели шарниров, пружин, сухого трения, ударных нагрузок.

Программа *Dynamic Designer Motion* имеет связи с группой программ конечно-элементного анализа *Cosmos*. Например, можно использовать программу *Cosmos/DesignSTAR* как автономно, так и в связке с программами *Inventor Solid Edge*, а программу *Cosmos/Works* – с программой *Solid Works*. С помощью этих программ проводят анализ деформированного состояния деталей, стационарных и нестационарных тепловых процессов, динамики жидкостей и газов, низкочастотных электромагнитных полей, определяют собственные частоты колебания конструкций.

Система твердотельного параметрического моделирования механических конструкций *Solid Works* (компания *Solid Works Corporation*) построена на графическом ядре *Parasolid*, разработанном в *Unigfaphics Solution*. Синтез конструкции начинается с построения опорного тела с помощью операций типа выдавливания, протягивания или вращения контура с последующим добавлением и (или) вычитанием тех или иных тел. Используется технология граничного моделирования (*B-representation*) с аналитическим или сплайновым описанием поверхностей. При проектировании сборок на основе БЭФ можно задавать различные условия взаимного расположения деталей, автоматически контролировать зазоры и отсутствие взаимопересечения деталей. Предусмотрены *IGES, DXF, DWG*-интерфейсы с другими системами.

Среди САПР среднего уровня наряду с продуктами зарубежных фирм неплохо зарекомендовали себя системы отечественных разработчиков – это, прежде всего, системы *Компас* (компания *Аскон*) и *T-Flex CAD* (*Топ Системы*).

В системе *Компас* для трехмерного твердотельного моделирования используется оригинальное графическое ядро. Синтез конструкций выполняется с помощью булевых операций над объемными примитивами, модели деталей формируются путем выдавливания или вращения контуров, построением по заданным сечениям. Возможно задание зависимостей между параметрами конструкции, расчет масс-инерционных характеристик. Разработка проектно-конструкторской документации, в том числе различных спецификаций, выполняется подсистемой *Компас-График*.

Имеются библиотеки с данными о типовых деталях и с графическими изображениями, а также программы специального назначения (проектирование тел вращения, пружин, металлоконструкций, трубопроводной арматуры, штамповой оснастки, выбора подшипников качения, раскроя листового материала и др.). Проектирование технологических процессов выполняется с помощью подсистемы *Компас-Автопроект*, программирование объемной обработки на станках с ЧПУ – с помощью подсистемы *ГЕММА-3D*. Ряд необходимых функций управления проектными данными возложено на подсистему *Компас-Менеджер*.

Подсистема трехмерного твердотельного моделирования *T-Flex CAD* 3*D* в САПР *T-Flex CAD* построена на базе ядра *Parasolid*. Реализована двунаправленная ассоциативность, т. е. изменение параметров чертежа автоматически вызывает изменение параметров модели, и наоборот. При проектировании сборок изменение размеров или положения одной детали ведет к корректировке положения других. Модель 3*D* может быть получена непосредственно по имеющемуся чертежу, или с помощью булевых операций, или путем выталкивания, протягивания, вращения профиля, лофтинга и т. п. Предусмотрен расчет масс-инерционных параметров.

В то же время можно по видам и разрезам трехмерной модели получить чертеж, для чего используется подсистема *T-Flex CAD*

3D SE. Для параметрического проектирования и оформления конструкторско-технологической документации служит подсистема *T-Flex CAD 2D*, для управления проектами и документооборотом – подсистема *T-Flex DOCs*. В подсистеме технологического проектирования *T-Flex/ТехноПро* выполняются синтез технологических процессов, расчет технологических размеров, выбор режущего и вспомогательного инструмента, формирование технологической документации, в том числе операционных и маршрутных технологических карт, ведомостей оснастки и материалов, карт контроля. Подготовка программ для станков с ЧПУ осуществляется в подсистеме *T-FlexЧПУ*. Кроме названных основных подсистем в состав *T-Flex CAD* включен ряд программ для инженерных расчетов деталей, проектирования штампов и пресс-форм.

В САПР *Cadmech 2000* белорусской компании *Интермех* входят программы *AVS* для выпуска конструкторской документации, *Techcard* для технологической подготовки производства, *LCAD* для планирования производственных цехов и участков и др. Для собственно конструкторского 3*D*-проектирования *Интермех* использует программы компании *Autodesk*.

Разработкой продуктов для САПР литейного производства занимается компания *Moldflow*, ее программы *Part Adviser* и *Mold Advisor* предназначены для моделирования процессов литья пластмасс.

Важное место в конструкторско-технологических САПР занимают программы технологической подготовки производства. Компания *Consistent Software* предлагает систему *TechnologiCS* для технологической подготовки дискретного производства. Эта система выполняет функции составления спецификаций, ведения дерева проекта и библиотеки чертежей, синтеза технологических процессов, выбора инструмента, расчета режимов резания, нормирования расхода материалов, ведения технологической документации. Система *SolidCAM* (*CADTech*), построенная, как и *Mechanical Desktop*, на ядре *ACIS*, служит для получения управляющих программ для токарной, 2,5- и 3-осевой фрезерной обработки на станках с ЧПУ. Система *ТЕХТРАН*

(*НИП «Информатика»*) включает модули токарной, фрезерной, электроэрозионной обработки.

Мировыми лидерами среди программ конечно-элементного анализа являются программно-методические комплексы *Nastran* и *Patran* (компания *MSC Software Corporation*) и *Ansys* (компания *Ansys Inc.*). Как правило, эти комплексы включают в себя ряд программ, родственных по математическому обеспечению, интерфейсам, общности некоторых используемых модулей. Эти программы различаются ориентацией на разные приложения, степенью специализации, ценой или выполняемой обслуживающей функцией. Например, в комплексе *Ansys* основные решающие модули позволяют выполнять анализ механической прочности, теплопроводности, динамики жидкостей и газов, акустических и электромагнитных полей. Во все варианты программ входят пре- и постпроцессоры, а также интерфейс с базой данных. Предусмотрен экспорт (импорт) данных между *Ansys* и ведущими комплексами геометрического моделирования и машинной графики.

Мировой лидер среди средств моделирования механических процессов на макроуровне путем решения СОДУ – программа *Adams*, а примером отечественных систем подобного назначения следует назвать программы *ПА*7 и *ПА*9. В САПР крупных предприятий обычно используют программы разных уровней. Связано это с тем, что более 80 % всех процедур конструирования можно выполнить на CAD-системах нижнего и среднего уровней, кроме того, «тяжелые» системы дороги. Поэтому предприятие приобретает лишь ограниченное число экземпляров (лицензий) программы верхнего уровня, а большинство клиентских рабочих мест обеспечивается экземплярами программ нижнего или среднего уровней. При этом возникает проблема обмена информацией между разнотипными CAD-системами. Она решается путем использования языков и форматов, принятых в *CALS*-технологиях, хотя для неискаженной передачи геометрических данных с помощью промежуточных унифицированных языков приходится преодолевать определенные трудности.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику автоматизированным системам CAD/CAM/CAE.

2. Опишите функции CAD-систем (характеристики параметризации и ассоциативности, геометрическое моделирование).

3. Дайте характеристику основным функциям CAM-систем, включая автоматизацию технологической подготовки производства (CAPP).

4. Опишите модифицированный и генеративный подходы к CAPP.

5. Опишите групповую технологию проектирования и подготовки производства.

6. Обоснуйте необходимость физического моделирования в процессах проектирования (включая технологию быстрого прототипирования).

7. Дайте общую характеристику методам быстрого прототипирования и изготовления (БПИ).

8. Опишите методы стереолитографии, отверждения на твердом основании, избирательного лазерного спекания.

9. Опишите методы трехмерной печати, ламинирования, моделирования методом наплавки.

10. Дайте характеристику основным функциям CAE-систем и перспектив их развития применительно к разработке методов виртуальной инженерии.

11. Опишите структуру и функции виртуальной инженерии.

12. Укажите и опишите основные компоненты виртуальной инженерии.

13. Опишите основное оборудование виртуальной реальности (устройства ввода и вывода информации).

14. Опишите структуру и классификацию существующих САПР.

15. Дайте характеристику системам САПР верхнего уровня Unigrafics, CATIA, Pro/Engineer.

16. Дайте сравнительный анализ системам САПР среднего уровня.

Лекция 5
ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Наибольший успех при разработке сложных (мехатронных) систем может быть достигнут только в случае полной интеграции отдельных подсистем САПР. Поэтому в последние годы получили широкое распространение универсальные интегрированные CAD/CAM/CAE-системы, которые предназначены для комплексной автоматизации процессов проектирования, конструирования и производства различной продукции. Они входят в состав современных САПР. На практике применяется большое число интегрированных систем различных версий и конфигураций для решения конкретных задач проектирования. Такая ситуация порождает большие издержки проектирования, особенно если речь идет об участии большого количества исполнителей при проектировании сложных производственных систем.

Кроме того, в связи с большим объемом технических данных по мере разработки проекта возникает проблема переноса данных из одной системы в другую. Поэтому современные системы должны включать в свой состав программные пакеты, называемые системами управления данных в продуктах – PDM (product data management). Использование такой системы улучшает взаимодействие и повышает эффективность управления проектами. Универсальные CAD/CAM/CAE/PDM-системы обеспечивают следующие функции проектирования:

– трехмерное графическое моделирование;

– различные виды анализа и инженерных расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ), моделирование кинематики и динамики механизмов и процессов;

– автоматизацию технологической подготовки производства;

– собственные или коммерческие СУБД;

– создание прикладных приложений концептуального проектирования и программного обеспечения сложных систем;

– управление данными проекта;

– обмен данными в различных графических форматах.

В качестве примера интегрированных САПР можно указать системы верхнего уровня: Catia, Unifraphics, Pro/Engineer, SolidWorks.

Далее рассмотрим программное обеспечение, позволяющее создавать и поддерживать интегрированные информационные среды для промышленных автоматизированных систем.

5.1. Системы PDM

Системы PDM предназначены преимущественно для информационного обеспечения проектирования – упорядочения информации о проекте, управление документами и документооборотом (включая спецификации и другие виды представления данных), обеспечения доступа к данным по различным атрибутам, навигации по иерархической структуре проекта. В ряде систем PDM поддерживают информационные связи не только внутри САПР, но и с производственной и маркетинговой документацией [1].

Если рассматривать ситуацию в динамике, то маркетинговые концепции должны передаваться в отдел планирования продуктов и в группу проектирования, которая взаимодействует с производственным отделом и группой поддержки. Сведения об обнаруженных проблемах возвращаются в отделы проектирования и производства. Сведения о продажах и проектах передаются поставщикам и партнерам. Данные о расходах обрабатывает бухгалтерия. Все эти виды деятельности тесно связаны друг с другом, поэтому изменения в содержании или состоянии проекта должны быть доступны всем участникам во избежание дорогостоящих ошибок.

Рассмотрим типичные для систем PDM основные функции [1, 3]:

1) поддержка интерактивной работы пользователя при создании моделей изделий (процессов), структурирование описаний

проектируемых объектов, предъявление пользователю этой иерархической структуры вместе с возможностями навигации по структуре (дереву изделия, проекта) и получение нужной информации по каждой указанной пользователем структурной компоненте;

2) управление конфигурацией изделия (процесса), ведение состава и контроль изменения изделия, сохранение истории проекта, классификация и кодификация изделий;

3) обеспечение целостности проектных данных при управлении версиями проекта и внесение изменений в проект (при изменении версии проекта сначала создается новая версия проекта, а изменения вносятся уже в эту новую версию; одна версия каждого объекта является текущей или активной версией; нельзя одновременно вносить изменения в один и тот же проект разным разработчикам);

4) управление документами и документооборотом, электронным архивом, поддержка классификаторов и справочников, автоматизированное составление спецификаций (в интегрированных САПР в документооборот входит большое число документов, связанных с процедурами маркетинга, планирования, администрирования и т. п.);

5) Использование полнофункциональных систем делопроизводства, разработанных независимо от конкретных PDM (ввод в оборот документов с помощью средств их автоматического распознавания и атрибутирования, поиск нужных данных, поддержка групповой работы над документами, разграничение прав доступа к документам, подготовка отчетов, маршрутизация документов, учет их движения, контроль исполнения предписанных документами действий, автоматическое уведомление соответствующих лиц, планирование работ, связанных с прохождением документов);

6) управление проектами (процессом проектирования) включает распределение основных и вспомогательных заданий и контроль их выполнения, выполнение проектных операций и процедур, пересылку документов и файлов конкретным пользователям, изменение статуса объекта, просмотр и утверждение инженерных проектов, внесение в них изменений и т. п.;

7) визуализация структуры изделия (проекта) в виде дерева, многооконное представление трехмерных изображений;

8) возможность подключения внешних систем;

9) использование криптографических средств и средств электронной подписи.

Интеграция данных на ранних этапах развития PDM связывалась только с организацией сквозного (параллельного) проектирования изделий и систем в рамках конкретной САПР. В настоящее время (как отмечалось выше) основным содержанием проблемы интеграции стало обеспечение интерфейса САПР с другими автоматизированными системами. Проблема решается с помощью поддержки типовых форматов, например путем конвертации данных из общепринятых форматов во внутренние представления конкретных САПР.

Примеры PDM

Первые известные PDM, созданные фирмами, разрабатывающими САПР или АСУП:

– iMAN (Unigrphics Solutions);
– Euclib Design Manager (Matra DataVision);
– Smar Team (Smart Solutions, Dessault Sysytems);
– Baan PDM (BAAN);
– Optegra и ProPDM (PTC);
– ENOVIA (IBM, Dessault Sysytems).

Дополнительные преимущества получены за счет совместного использования CATIA (Dessault Sysytems) и ENOVIA.

На роль PDM претендует система ведения архива технической документации и управления проектными данными Search (Интермех).

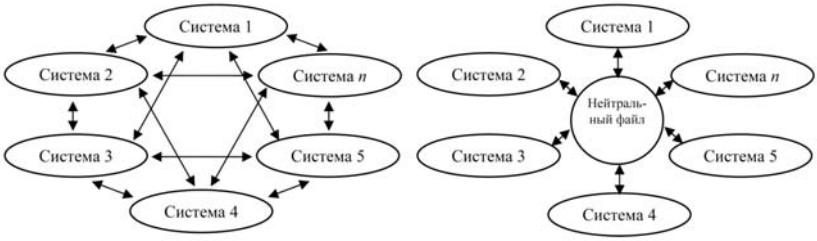
Другие примеры PDM:

– STEP Suite;
– Outdo CS PDM (Consistent Software);
– PartY Plus (Лоция Софт);
– Omega Production (СИКОР) может служить основой для интеграции САПР и АСУП.

5.2. Метод обмена данными

Когда две или более CAD/CAM/CAE-системы объединяются и связываются в единое приложение для совместного использования данных, часто возникает проблема обмена данными. Фактически всегда существует проблема (потребность) связать воедино несколько систем либо внутри одной организации, либо внешне, как в случае со смежниками (по проекту) или поставщиками компонентов. Для решения этой коммуникационной проблемы необходима возможность преобразовать данные технических требований одной системы в форму, понятную для других систем, и наоборот. Чтобы облегчить преобразование и не разрабатывать программы-конверторы для всех возможных пар САПР, было предложено несколько стандартных форматов для хранения данных технических требований. Вкратце рассмотрим типичные стандартные форматы.

Различные CAD/CAM/CAE-системы хранят данные технических требований в структурах разного вида, поэтому для переноса данных необходимо преобразовать данные технических требований одной системы в формат другой. Еще один конвертор (преобразователь) необходим для переноса данных между двумя системами в противоположном направлении. Следовательно, для каждой пары систем необходимо иметь два конвертора. Двунаправленные стрелки для каждой пары систем (рис. 5.1, *а*) предполагают наличие двух конверторов. Эти конверторы для каждой конкретной пары систем называются *прямыми конверторами* (*direct translators*). Если у нас есть n различных систем, нам необходимо разработать $n(n - 1)$ конверторов, поскольку количество пар систем равно $n(n - 1)/2$. Например, для обмена данными между 10 системами придется разработать 90 конверторов. Таким образом, метод прямого конвертирования непрактичен, так как требует разработки слишком большого количества конверторов при необходимости работать с множеством систем. Более того, добавление одной системы к n уже имеющимся потребует написания $2n$ дополнительных конверторов.



а) *б*)

Рис. 5.1. Два метода обмена данными между двумя различными системами

Однако обмен данными можно обеспечить, введя нейтральную структуру базы данных, называемую *нейтральным файлом* (*neutral file*), которая была бы независима от существующих САПР. Эта структура будет действовать как промежуточная точка коммуникации между различными структурами баз данных САПР (рис. 5.1, *б*).

Таким образом, в каждой системе будет своя пара конверторов для экспорта и импорта данных в этот нейтральный формат. Конвертор, преобразующий данные из собственного формата данной системы в нейтральный формат, называется *препроцессором* (*pre-processor*), а конвертор, выполняющий обратное преобразование, – *постпроцессором* (*post-processor*) (рис. 5.2). Соответственно в этом случае для обмена данными между *n* системами потребуется 2*n* конверторов и лишь два дополнительных конвертора необходимо будет добавить при введении новой системы.

Иными словами, этот косвенный метод свободен от присущего прямому методу недостатка, когда требовалось писать всевозрастающее количество программ. Это основная причина, по которой косвенный метод принят в качестве главного метода обмена данными между различными системами, несмотря на то что в сравнении с прямым методом у него имеются некоторые недостатки. В частности, прямые конверторы работают быстрее косвенных, и создаваемые ими файлы данных обычно имеют

меньший размер, чем нейтральные файлы, генерируемые косвенными конверторами. Файл данных в собственном формате конкретной системы обычно также оказывается меньше нейтрального файла из-за обобщенной природы последнего. Когда мы переносим данные технических требований через нейтральный файл, некоторая информация, как правило, теряется, особенно информация о топологическом дереве и ограничениях в системах параметрического моделирования.

Рис. 5.2. Обмен данными с использованием нейтрального файла

Известны три типичных формата нейтрального файла: IGES (*Initial Graphics Exchange Specification* – первоначальная спецификация обмена графическими данными), DXF (*Drawing Interchange Format* – формат обмена чертежами) и STEP (*Standard for Exchange of Product model data* – стандарт обмена данными о модели продукта). В настоящее время IGES является самым популярным форматом нейтрального файла, а формат DXF используется главным образом для обмена данными чертежей. STEP – это стандартный формат данных, используемый для хранения полной информации обо всем жизненном цикле продукта, включая проектирование, анализ, производство, контроль качества, испытания и обслуживание помимо обычных данных технических требований. В настоящее время CAD-системы, поддерживавшие формат IGES, ориентированы на переход к формату STEP.

В лекции 7 будут рассмотрены и другие способы организации информационных обменов.

5.3. Тенденции в развитии интегрированных систем [10, 11]

Сегодня информационная поддержка проектирования, конструирования и технологической подготовки сложных (мехатронных) производств, как правило, осуществляется с использованием преимущественно САПР верхнего уровня. Их выбор определяется способностью конкретных САПР решать поставленные перед производителем задачи.

Интегрированная CAD/CAM/CAE-система, дополненная средствами трехмерного проектирования и анализа, способными работать в распределенной компьютерной сети и удовлетворяющими принципам параллельного проектирования, определяет основную тенденцию ее развития.

Для дальнейшего развития интегрированных систем необходимо не только расширение функциональных возможностей системы проектирования, но и кардинального повышения производительности труда разработчиков, которая снижается в связи с возрастающим объемом обмена информацией между группами проектировщиков. Кроме того, требует решения еще одна проблема, связанная со сложностью переноса систем на другие платформы (например, с UNIX-платформы на платформу Wintel). Еще одна трудность возникает при необходимости ввести новый элемент в группу деталей, сохраненных в базе данных системы. Для этого соответствующая программная библиотека должна быть расширена, а затем перекомпилирована. Когда изменяются задачи проектирования, то проектировщики должны создавать новые прикладные подсистемы, не имея возможности применить разработанный ранее аппарат, аккумулирующий их «ноу-хау».

Поэтому предложенные в новых поколениях интегрированных систем их открытость и использование объектно-ориентированного проектирования (см. п. 3.3) направлены на преодоление некоторых указанных выше недостатков и ограничений.

Объектно-ориентированная модель определяется как электронная модель реального физического объекта, а не только как

представление его геометрии, и содержит не только геометрию объекта, но и все негеометрические его параметры, атрибуты и связи. Например, описание гидравлического пресса в виде «объекта» проектирования кроме размеров его конструктивных элементов будет содержать еще такие атрибуты, как «максимальное усилие», «величина давления в гидросистеме», «производительность» и «дата установки». В описание «объекта» также будут входить возможности его модификации, а также его отдельные компоненты, которые можно исследовать на прочность и надежность функционирования при различных эксплуатационных условиях.

Построенная на основе объектно-ориентированных моделей система CAD/CAM позволяет вводить описание объектов нового вида как подкласс более общего класса. Новый объект сможет наследовать не только атрибуты, но и методы преобразования уже известных объектов, что заодно существенно упрощает расширение базы данных конкретной системы и сокращает время проектирования объекта. В системы CAD/CAM/CAE закладываются возможности многократного повторного применения в разных проектах одних и тех же элементов конструкций и процессов.

Новая объектно-ориентированная архитектура открыта и обеспечивает широкое участие в совместном проектировании специалистов различных групп от заказчиков поставщиков комплектующих, до аналитиков и технологов.

Учитывая, что данные проекта – это самая ценная часть системы, то особенно тщательно должны быть разработаны все средства доступа к проектным данным и их обработки, обеспечивающие максимально высокую степень их непротиворечивости, защищенности и сохранности.

Возможность и направленность дальнейшего развития CAD/CAM/CAE-систем будут рассмотрены в лекции 7 «Информационная поддержка жизненного цикла мехатронных систем».

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику интегрированного подхода к разработке мехатронных систем.

2. Определите основное назначение систем PDM.

3. Опишите три первые (1–3) типичные функции PDM.

4. Опишите три следующие (4–6) типичные функции PDM.

5. Опишите три последние (7–9) типичные функции PDM.

6. Приведите примеры PDM.

7. Обоснуйте необходимость обмена данными между разными САПР.

8. Опишите метод прямого конвертирования обмена данными.

9. Опишите метод с использованием нейтрального файла обмена данными (косвенный метод).

10. Проведите сравнительный анализ двух методов обмена данными.

11. Опишите три типичных формата нейтрального файла.

12. Проведите сравнительный анализ трех типичных форматов нейтрального файла.

13. Опишите схему обмена данными с использованием нейтрального файла.

14. Перечислите дополнительные средства, необходимые для расширения функциональных возможностей CAD/CAM/CAE-систем.

15. Перечислите проблемы, которые необходимо решить для дальнейшего развития интегрированных CAD/CAM/CAE-систем.

16. Объяснить, почему открытость интегрированных систем и использование объектно-ориентированного проектирования направлены на дальнейшее развитие интегрированных систем.

Лекция 6
КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

6.1. Основные положения

Следуя [12], отметим, что проектирование – сложная итерационная процедура, содержащая множество неформальных решений. И тем не менее существует определенная последовательность проектных действий.

Первым этапом (часто говорят верхним уровнем) проектирования является разработка концепции изделия (концептуальное проектирование). Концепция изделия (процесса) – это система взглядов на будущее изделие (производственного процесса).

Концептуальное проектирование выполняют в процессе предпроектных исследований (см. рис. 3.2), когда формируется техническое задание (ТЗ), технические предложения и эскизный проект будущего изделия (производственного процесса).

Все выше сказанное относится и к процедуре модернизации (реинжинирингу) деятельности предприятия, на котором реализуется производственный процесс.

Предпроектные исследования предприятий, на которых создаются или модернизируются производственные процессы, проходят путем обследования этих предприятий. На основе результатов обследования строят модель, отражающую деятельность предприятия на данный момент (до модернизации). Такую модель называют «AsIs' (как есть). В процессе проектирования нового производственного процесса в качестве модели «AsIs' принимается ее ближайший прототип.

Далее путем изменения модели «AsIs' разрабатывают новую модель производственного процесса, которую называют моделью «ToBe» (как должно быть). Модель «ToBe» – это сложная модель, которая имеет несколько аспектов описания. В ее состав входят *функциональные*, *информационные*, *поведенческие* и *структурные* модели.

Функциональная модель системы описывает совокупность выполняемых системой функций. Она должна отвечать на следующие вопросы [12]: «Какие функции выполняет система?», «Какова структура функций?», «Что есть вход и выход функций?», «Что обеспечивает управление функцией?», «Как связаны функции и компоненты системы?», «Как избежать дублирования функций?». В функциональную структуру должны войти, как минимум, все функции, приведенные в ТЗ на систему.

Информационная модель отражает структуры данных – их состав и взаимосвязи.

Поведенческая модель описывает функционирование системы (процессов) как упорядоченную последовательность событий с одновременным описанием объектов, имеющих непосредственное отношение к процессу. В ней фигурируют такие категории, как состояние системы, событие, переход из одного состояния в другое, условия перехода, последовательность событий. Если функциональная модель позволяет ответить на вопрос: «Что делает система?», то поведенческая модель объясняет «Как система это делает». В основе поведенческого моделирования лежат модели имитационного моделирования систем массового обслуживания, сети Петри, методы конечного автомата.

Структурная модель характеризует совокупность элементов системы и их взаимосвязь, описывает морфологию (построение) системы.

Концептуально современный подход к созданию и информационному обеспечению сложных (мехатронных) производственных процессов и систем базируется на следующих общих положениях:

1. Основой разработки мехатронных систем служат методы *совмещенного* (*параллельного*) проектирования, предполагающие

совмещение во времени некоторых этапов проектирования, выполняемых последовательно при традиционном проектировании (например, последовательно выполняется разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы с последующей разработкой интерфейсных блоков).

2. Синергетический характер мехатронных систем проявляется в том, что составные части системы не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что образованная ими система начинает обладать новыми свойствами. При этом мехатронные системы, в отличие от традиционных, обладают меньшей структурной избыточностью и большей степенью интеграции. В результате повышается конструктивная компактность системы (вплоть до миниатюризации в микромашинах), улучшаются массогабаритные и динамические характеристики машин, упрощаются кинематические цепи. Возникают дополнительные возможности при проектировании мехатронных систем, наилучшим образом отвечающие требованиям заказчика. Функциональное, структурное и конструктивное объединение разных по физической природе элементов, связанных между собой аппаратными и программными интерфейсами – основа мехатронного подхода к процессу проектирования производственных процессов и систем.

3. Интегрированные мехатронные элементы выбираются разработчиком уже на стадии проектирования машины, а затем обеспечивается необходимая инженерная и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации машины. В этом радикальное отличие мехатронных машин от традиционных, когда зачастую пользователь был вынужден самостоятельно объединять в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие устройства различных изготовителей. Именно поэтому многие сложные комплексы (например, некоторые гибкие производственные системы в отечественном машиностроении) показали на практике низкую надежность и невысокую технико-экономическую эффективность.

4. Проектирование мехатронных систем базируется на идеях модульного конструирования, при котором из отдельных

многофункциональных модулей (механической, электронной, компьютерной частей системы) компонуются гибкие сложные системы модульной архитектуры.

5. В мехатронных системах наблюдается перераспределение функциональной нагрузки от аппаратных (например, электромеханических) модулей к информационным (компьютерным) модулям. При этом исключается многоступенчатое преобразование энергии и информации.

6. При проектировании мехатронных систем широко применяются методы *визуализации динамических процессов*, протекающих в системах, вплоть до использования систем *виртуальной реальности* при проектировании сложных технических систем.

7. Высокий уровень интеллектуализации мехатронных систем диктует необходимость проектирования интеллектуальных систем управления (для борьбы с неопределенностями, сопутствующими функционированию сложных динамических систем). При этом необходим обоснованный выбор интеллектуальных технологий при проектировании многоуровневых иерархических систем управления.

8. Использование концепции АКУ (аппарат конфигурируемого управления), у которой маневренность является приоритетной функцией. Ранее при создании машины сначала выполняли базовое проектирование (с точки зрения физики и механики), а затем в качестве подсистемы разрабатывали систему управления. Но оказалось, что можно спроектировать более эффективную машину, если еще на этапе базового проектирования заложить основы системы управления, используя принципы АКУ. При этом машина может реализовать свои функции только благодаря существованию системы управления. Таким способом можно добиться максимальной динамичности системы (машины). Устойчивость достигается благодаря наличию контуров управления. Концепция АКУ широко используется в самолетостроении.

9. Широкое использование «встроенных» систем (внедрение цифровых электронных блоков и микропроцессоров в мехатронные узлы машин и систем).

10. Бессенсорное управление – перенос функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства мехатронных систем.

Практическое воплощение данных принципов требует привлечения всех современных методов проектирования и поддержки функционирования сложных (мехатронных) систем.

6.2. Инструментальные средства концептуального проектирования и модернизации систем

В современных информационных технологиях важное место отводится инструментальным средствам и средам разработки и модернизации мехатронных систем (производственных процессов и систем). Эти технологии и среды образуют системы, называемые CASE-технологиями (или CASE-системами).

CASE-технологии [3, 11]

Аббревиатура CASE имеет двойное толкование, соответствующее двум направлениям использования CASE-технологий. Первое из них Computer Aided Software Engineering, что переводится как «автоматизированное проектирование программного обеспечения». Соответствующие CASE-технологии называют инструментальными средами разработки программного обеспечения (ПО). В этом случае CASE-технологии часто отождествляют с инструментальными средами разработки ПО, называемыми средами быстрой разработки приложений (RAD – Rapid Application Development). Примерами широко известных инструментальных сред RAD являются Delphi, Borland, C++, PowerSoft, СУБД (Oracle). Кроме того, используются специализированные средства (Tools). Эти текстовые и графические редакторы, электронные таблицы, User-пакеты и языки для создания приложений в составе CAD/CAM-систем и т. п. Наряду с самостоятельными

RAD-системами имеются и RAD-системы в составе САПР. Это прежде всего системы CAS.CADE фирмы Matra Datavision.

Второе направление, в котором используются CASE-технологии, – это поддержка концептуального проектирования сложных, слабоструктурированных систем – Computer Aided System Engineering. Далее CASE-технологии этого направления будем называть *системами CASE для концептуального проектирования*.

Среди систем CASE для концептуального проектирования различаются, описанные выше системы *функционального*, *информационного* и *поведенческого* проектирования. Наиболее известной методикой функционального проектирования сложных систем является методика SADT (Structured Analysis and Design Technique), предложенная в 1973 г. Р. Россом и впоследствии ставшая основой стандарта IDEF0 (Integrated DEFinition 0) – язык функционального проектирования. Для информационного моделирования использована методика инфологического (информационного) проектирования баз данных IDEF1X. Для поведенческого (динамического) моделирования используется методика IDEF3.

Процесс построения функциональных, информационных и поведенческих моделей автоматизируется за счет применения поддерживающих методологию IDEFсистем – BPWin, ERWin, OOWin, Design/IDEF и др. При этом в начале методом CASE-технологий строится модель процесса (As Is) – «как есть», а затем, после ее анализа и оптимизации с учетом использования современных интегрированных CAD/CAM/CAE/PDM-систем и вновь предложенных компонентов, – модель (To Be) – «как нужно».

Подсистему CASE в составе системной среды САПР можно рассматривать как специализированную САПР, в которой объектом проектирования являются новые версии подсистем САПР, в частности версии, адаптированные к требованиям конкретного заказчика.

Методика IDEF0, IDEF1X, IDEF3 [1, 3]

Рассмотрим кратко методологию SADT. Подход SADT относится к классу формальных методов, используемых при анализе

и разработке модели системы. SADT-модель предназначена для полного, точного и адекватного описания системы, имеющей конкретное назначение. Это назначение, называемое целью модели, вытекает из формального определения модели в SADT: «*М моделирует А, если М отвечает на вопросы относительно А*». Разработку SADT-модели начинают с формулировки вопросов, на которые модель должна дать ответы, т. е. формулируется цель моделирования. Далее дается точное определение границ моделируемой системы (модель точно устанавливает, что является и что не является субъектом моделирования). Ограничивая субъект, SADT-модель помогает сконцентрировать внимание на описываемой системе и позволяет избежать включение посторонних субъектов. Таким образом, SADT-модель должна иметь единственный субъект. Кроме того, SADT требует, чтобы модель рассматривалась все время с одной той же позиции. Эта позиция называется «точкой зрения» данной модели и однозначно определяет цель и субъект, например, конкретного технологического (производственного) процесса. Иногда только одна из множества возможных точек зрения может дать описание, удовлетворяющее цели модели. Например, для создания согласованной модели производственного процесса нужно встать на точку зрения главного инженера предприятия.

После того как определены субъект, цель и точка зрения модели, начинается первая интеграция процесса моделирования по методике SADT. Субъект определяет, что включить в модель, а что исключить из нее. Точка зрения диктует автору модели выбор нужной информации о субъекте и форму ее подачи. Цель становится критерием окончания моделирования. Конечным результатом этого процесса является набор тщательно взаимосвязанных описаний, начиная с описания самого верхнего уровня всей системы и заканчивая подробным описанием технологических операций производственного процесса.

Каждое из таких взаимосвязанных описаний называется диаграммой. Модель SADT можно представить в виде древовидной структуры диаграмм, где верхняя диаграмма является наиболее общей, а самые нижние наиболее детализированы. Ниже будут приведены примеры таких диаграмм.

Министерство обороны США (DoD) использовало методику SADT в качестве части своей программы ICAM–$5ntegrated Computer Aided Manufacturing (интеграция компьютерных и промышленных технологий) и назвала ее IDEF0 (Integrated DEFinition 0) – язык функционального моделирования.

IDEF0 – это более строгая реализация ранее предложенной методики SADT (*Structured Analysis and Design Technique*). Начиная с момента создания первой версии, методика успешно применялась для проектирования телефонных сетей, систем управления воздушными перевозками, производственных предприятий и др.

Описание объектов и процессов в IDEF0 выполняется в виде совокупности взаимосвязанных блоков (рис. 6.1), называемых блоками ICOM (*Input – Control – Output – Mechanism*), где *I* –вход, *C* – управление, *O* – выход, *M* –механизм.

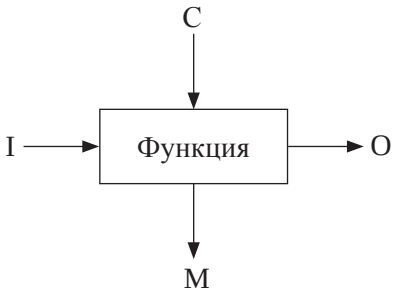


Рис. 6.1. Блок ICOM

Блоки представляют функции (работы), их названия выражаются глаголами или отглагольными существительными. Типичные примеры функций: планировать, разработать, классифицировать, измерить, изготовить, отредактировать, рассчитать, продать (или планирование, разработка, классификация, измерение, изготовление, редактирование, расчет, продажа). Число блоков на одном уровне иерархии – не более 6, иначе восприятие диаграмм будет затруднено. Число уровней иерархии не ограничено, но обычно – не более 5. Блоки в диаграммах IDEF0 связаны

дугами (стрелками), которые отображают множества объектов (данных). Управление (*control*) определяет условия выполнения. Примеры управления: требования, чертеж, стандарт, указания, план. Механизм (*mechanism*) выражает используемые средства, например: компьютер, САПР, оснастка, заказчик, фирма. Входы и выходы могут быть любыми объектами.

Пример диаграммы IDEF0 показан на рис. 6.2, где представлены функции, выполняемые на начальных этапах процесса реинжиниринга предприятия. На диаграмме показаны четыре этапа подготовки к реинжинирингу.

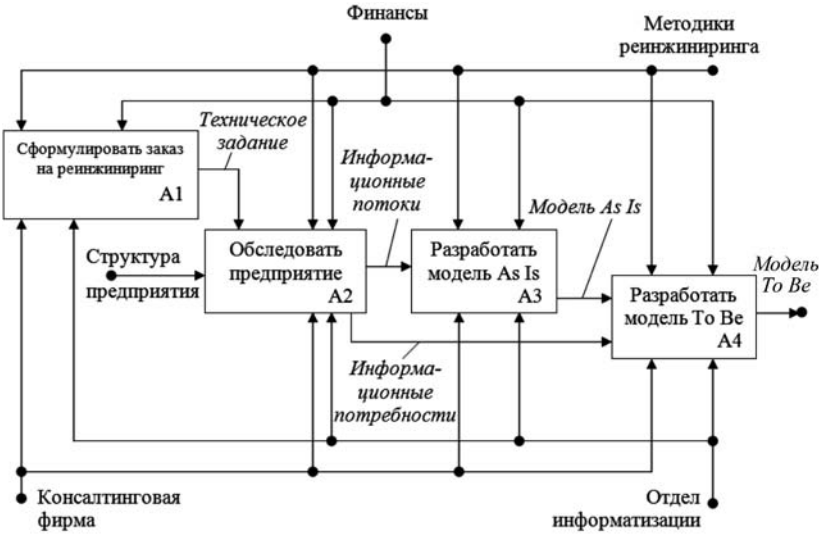


Рис. 6.2. Пример IDEF0-диаграммы

После формулировки заказа на перестройку процессов функционирования на базе информатизации управления производится обследование предприятия, выявляются его структура, информационные потоки между подразделениями, внешние информационные связи, степень компьютеризации, наличие вычислительной сети и т. п. На основании полученных данных составляется функциональная модель As Is и разрабатывается

модель To Be. Эта модель верхнего уровня далее конкретизируется, каждая из функций раскрывается более подробно на диаграммах следующих уровней.

Методика информационного проектирования приложений IDEF1X основана на построении информационных моделей приложений в виде диаграмм «сущность – связь». Для описания сущностей и отношений используется язык диаграмм.

Сущности в IDEF1X-диаграммах изображаются в виде прямоугольников, отношения – в виде стрелок. Отношения между сущностями в IDEF1X являются бинарными. Выделяют *идентифицирующие отношения* – связи типа «родитель – потомок», в которых потомок (зависимая сущность) однозначно определяется своей связью с родителем, и *неидентифицирующие отношения*, означающие, что у связанного этим отношением экземпляра одной сущности может быть (а может и не быть) соответствующий экземпляр второй сущности. Идентифицирующее отношение изображают на диаграмме сплошной линией между прямоугольниками связанных сущностей, неидентифицирующее – пунктирной линией. На дочернем конце линии должно быть утолщение (жирная точка). Мощность k связи – число экземпляров зависимой сущности, соответствующее одному экземпляру родительской сущности. Известное значение мощности может быть указано около утолщенного конца линии связи. При этом символ p означает $k \geq 1$, а символу z соответствует $k = 0$ или 1. Отсутствие символа интерпретируется как $k \geq 0$.

Различают также специфические и неспецифические отношения. *Неспецифические отношения* – это связи типа «многие ко многим», они обозначаются сплошной линией с утолщениями на обоих концах.

В отношениях «родитель – потомок» возможно наличие у потомка единственного родителя или нескольких родителей (ассоциативная связь). Выделяют также отношения категоризации (наследования), отражающие связи между некоторой общей сущностью и вариантами ее реализации (категориями). Примером категориальной связи является отношение «тип прибора – альтернативные варианты этого прибора».

Среди атрибутов различают ключевые и неключевые. Значение *ключевого атрибута* (*ключа*) однозначно идентифицирует экземпляр сущности. *Внешний ключ* – это атрибут (или атрибуты), входящий в ключ родителя и наследуемый потомком. На IDEF1X-диаграммах ключи записываются в верхней части прямоугольника сущности, причем внешние ключи помечают меткой FK (*Foreign Key*), неключевые атрибуты помещают в нижнюю часть прямоугольников. В идентифицирующих отношениях все ключи родителя входят и в ключи потомка, в неидентифицирующих – ключи родителя относятся к неключевым атрибутам потомка.

Между IDEF0 и IDEF1X-моделями одного и того же приложения существуют определенные связи. Так, стрелкам на IDEF0-диаграммах соответствуют атрибуты некоторых сущностей в IDEF1X-моделях, что нужно учитывать при построении информационных моделей.

Поведенческие аспекты приложений отражает методика IDEF3. Если методика IDEF0 связана с функциональными аспектами и позволяет отвечать на вопросы «Что делает система?», то в IDEF3 детализируются и конкретизируются IDEF0-функции и IDEF3-модель отвечает на вопросы «Как система это делает?». Язык IDEF3 – язык диаграмм, помогающий разработчику моделей наглядно представить моделируемые процессы. В IDEF3 входят два типа описаний: 1) процессно-ориентированные в виде последовательности операций; 2) объектно-ориентированные, выражаемые диаграммами перехода, характерными для конечно-автоматных моделей [3]. Программный продукт ProSim реализует методику IDEF3.

В заключение этого раздела рассмотрим все семейство стандартов IDEF. Применяемые в CASE-средствах разные методики и модели описывают различные свойства систем, важные, например, с точки зрения их автоматизации, а также позволяющие количественно оценить параметры проектов. Следует отметить, что спектр свойств систем различного назначения очень широк, и не все они к настоящему времени отражены в адекватных моделях. В то же время для класса информационных систем

организационного типа (*Management Information Systems* – MIS) адекватные модели разработаны и поддерживаются соответствующими средствами автоматизации.

Взаимная совокупность методик и моделей концептуального проектирования IDEF (*Integrated DEFinition*) разработана в США по программе *Integrated Computer Aided Manufacturing*. В настоящее время имеются методики функционального, информационного и поведенческого моделирования и проектирования, в которые входят IDEF-модели, приведенные ниже.

Название	**Назначение**
IDEF0	Функциональное моделирование *Function Modeling Method*
IDEF1 и **IDEF1X**	Информационное моделирование *Information and Data Modeling Method*
IDEF2	Поведенческое моделирование *Simulation Modeling Method*
IDEF3	Моделирование деятельности *Process Flow and Object Stale Description Capture Method*
IDEF4	Объектно-ориентированное проектирование *Object-oriented Design Method*
IDEF5	Систематизация объектов приложения *Ontology Description Capture Method*
IDEF6	Использование рационального опыта проектирования *Design Rational Capture Method*
IDEF8	Взаимодействие человека и системы *Human-System Interaction Design*
IDEF9	Учет условий и ограничений *Business Constraint Discovery*
IDEF14	Моделирование вычислительных сетей *Network Design*

IDEF0 реализует методику функционального моделирования сложных систем. Наиболее известной реализацией IDEF0 является методология SADT (*Structured Analysis and Design Technique*), предложенная в 1973 г. Д. Россом и впоследствии ставшая осно-

вой стандарта IDEF0. Эта методика рекомендуется для начальных стадий проектирования.

IDEF1X и **IDEF1** реализуют методики инфологического проектирования баз данных. В IDEF1X имеется ясный графический язык для описания объектов и отношений в приложениях, так называемый язык диаграмм «сущность – связь» (ERD – *Entry-Relations Diagrams*). Разработка информационной модели по IDEF1X выполняется в несколько этапов:

– выясняются цели проекта, составляется план сбора информации, при этом обычно исходные положения для информационной модели следуют из IDEF0-модели;

– выявляются и определяются основные сущности – элементы базы данных, в которых будут храниться эти системы;

– выявляются и определяются основные отношения, результаты представляются графически в виде так называемых ER-диаграмм;

– детализируются нестандартные отношения, определяются ключевые атрибуты сущностей; детализация отношений заключается в замене связей «многие ко многим» на связи «многие к одному» и «один ко многим»;

– определяются атрибуты сущностей.

IDEF2 и **IDEF3** реализуют поведенческое моделирование. Если методика IDEF0 связана с функциональными аспектами и позволяет отвечать на вопрос «Что делает система?», то в этих методиках детализируется ответ «Как система это делает». В основе поведенческого моделирования лежат модели и методы имитационного моделирования систем массового обслуживания, сети Петри, возможно применение модели конечного автомата, описывающей поведение системы как последовательности смен состояний.

Перечисленные методики относятся к так называемым структурным методам.

IDEF4 реализует объектно-ориентированный анализ больших систем. Он предоставляет пользователю графический язык для изображения классов, диаграмм наследования, таксономии методов.

IDEF5 направлен на представление онтологической информации приложения в удобном для пользователя виде. Для этого используются символические обозначения (дескрипторы) объектов, их ассоциаций, ситуаций и схемный язык описания отношений классификации, «часть-целое», перехода и т. п. В методике имеются правила связывания объектов (термов) в предложения и аксиомы интерпретации термов.

IDEF6 направлен на сохранение рационального опыта проектирования информационных систем, что способствует предотвращению структурных ошибок.

IDEF8 предназначен для проектирования диалогов человека и технической системы.

IDEF9 используется для анализа имеющихся условий и ограничений (в том числе физических, юридических, политических) и их влияния на принимаемые решения в процессе реинжиниринга.

IDEF14 предназначен для представления и анализа данных при проектировании вычислительных сетей на графическом языке с описанием конфигураций, очередей, сетевых компонентов, требований к надежности и т. п.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «концептуальное проектирование» (модели «As Is» и «To Be»).

2. Опишите функциональную и информационную модели производственного процесса (модели «To Be»).

3. Опишите поведенческую и структурную модели производственной системы.

4. Перечислите общие положения, на которых концептуально базируется современный подход к созданию и информационному обеспечению сложных процессов и систем.

5. Раскройте понятие «совмещенное (параллельное)» проектирование. Приведите пример.

6. В чем проявляется синергетический характер мехатронных систем?

7. Объясните причины широкого применения методов визуализации и использования «встроенных» систем при проектировании сложных систем.

8. Чем объясняется необходимость проектирования интеллектуальных систем управления сложными системами?

9. Раскройте двойное толкование аббревиатуры CASE.

10. Рассмотрите кратко методологию SADT.

11. Укажите основное назначение методик IDEF0, IDEF1X, IDEF3.

12. Опишите процесс построения функциональных моделей в процессе проектирования сложных систем (с использованием IDEF0-методики).

13. В чем состоит суть методики информационного проектирования сложных систем (приложений) IDEF1X?

14. Какие аспекты проектирования отражает методика IDEF3?

15. Охарактеризуйте все семейство стандартов IDEF.

16. Перечислите методики IDEF, относящиеся к структурным методам проектирования.

Лекция 7
ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Описанные выше методы IDEF задают единообразный подход к моделированию приложений, но не затрагивают проблем единообразного представления данных в процессах информационного обмена между разными компьютерными системами и приложениями. Необходимость решения этих проблем в интегрированных CAD/CAM/CAE-системах привела к появлению ряда унифицированных форматов представления данных в межкомпьютерных обменах, среди которых наиболее известными в машиностроении являются форматы IGES, DXF (см. раздел 5.2), EDIF в электронике и другие. Ограниченные возможности этих стандартов обусловили развитие работ в направлении полной информации обо всем жизненном цикле продукта, включая проектирование, анализ производства, контроль качества, испытание и обслуживание, помимо обычных данных технических требований, и привели к появлению формата STEP (Standard for Exchange jf Product data – стандарт обмена данными о модели продукта) в составе CALS-технологий.

7.1. CALS-технологии (основные понятия) [1, 3]

В настоящее время термин CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) как «Непрерывное сопровождение и информационная поддержка всех этапов жизненного цикла изделий (ЖЦ)». На русском языке понятию CALS соответствует ИПИ (информационная поддержка изделий) или КСПИ (компьютерное сопровождение и поддержка изделий).

Из этих определений следует, что CALS-технологиями называются технологии комплексной компьютеризации всех сфер промышленного производства, цель которых – унификация и стандартизация спецификаций промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла (см. рис. 1.1). Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой и эксплуатационной документацией. В CALS-системах предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте.

Стратегия CALS предполагает создание единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников ЖЦ изделия. ЕИП предполагает представление всей информации об изделии в электронном виде и организацию совместного использования информации для всех участников ЖЦ изделия (в соответствии с правилами доступа).

Основные свойства ЕИП:

– информация предоставляется в электронном виде;

– охватывается вся информация об изделии, созданная всеми исполнителями на любом этапе ЖЦ;

– ЕИП выступает основным источником данных для исполнителей, предоставляя (в соответствии с правами доступа) нужную информацию в нужное время и в нужном виде;

– для интеграции информации в ЕИП используются только международные и отраслевые стандарты, поддерживаемые подавляющим большинством производителей прикладных систем;

– для создания ЕИП используются существующие на предприятиях программно-аппаратные средства; необходима адаптация этих систем к работе в рамках ЕИП.

Стратегия CALS предусматривает два этапа при переходе к ЕИП:

– автоматизация отдельных процессов (или этапов) ЖЦ изделия и представление данных на них в электронном виде;

– интеграция автоматизированных процессов и относящихся к ним данных, уже представленных в электронном виде, в рамках ЕИП.

CALS-технологии – это набор методов реализации стратегии CALS:

– технологии реинжиниринга бизнес-процессов – набор методов реструктуризации бизнес-процессов в целях повышения их эффективности;

– технологии представления данных об изделии в электронном виде – набор методов для представления в электронном виде данных об изделии, относящихся к отдельным процессам ЖЦ изделия. Эти данные являются информационными моделями, обеспечивающими автоматизацию отдельных процессов ЖЦ изделия. Технологии представления данных включают в себя также технологии перевода данных из бумажного в электронный вид (*E-commerce* – *E*-бизнес). Рассматриваемая группа CALS-технологий состоит из известных методов, реализованных в соответствующих автоматизированных системах;

– технологии интеграции данных об изделии в рамках ЕИП – набор методов для интеграции автоматизированных процессов ЖЦ и относящихся к ним данных, представленных в электронном виде, в рамках ЕИП; эти технологии реализуются с помощью класса автоматизированных систем, называемых системами управления данными об изделии (проектными данными) – PDM (*Product data Management*). Для реализации технологии PDM существуют специализированные программные средства, называемые PDM-системами. Пользователями PDM-систем являются конструкторы, технологи, а также сотрудники, работающие в других сферах производства и обслуживания – продажи, маркетинга, снабжения, финансов, сервиса, эксплуатации и т. п.

Главная задача создания и внедрения CALS-технологий – обеспечение единообразных описаний и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и применяющих разные системы CAE/CAD/CAM. Одна и та же

конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства. Кроме того, упрощается эксплуатация систем.

CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия. Поэтому интеграция автоматизированных систем на современных предприятиях должна быть основана на CALS-технологиях. Внедрение их требует освоения имеющихся технологий и CALS-стандартов, развития моделей, методов и программ автоматизированного проектирования и управления. Важные проблемы, требующие решения при создании CALS-систем, – управление сложностью проектов и интеграция программного обеспечения, включая вопросы декомпозиции проектов, распараллеливания проектных работ, целостности данных, межпрограммных интерфейсов и др.

CALS-технологии зародились в 1980-е гг. в недрах военно-промышленного комплекса США в связи с их планами в области стратегической оборонной инициативы (СОИ). Поэтому не удивительно, что среди имеющихся CALS-стандартов фигурирует большое число стандартов и рекомендаций DoD (Министерства обороны США). Для реализации планов СОИ требовались совместные усилия многих промышленных компаний и предприятий в проектировании, производстве и логистической поддержке сложных изделий, а это означало необходимость унификации представления данных об изделиях. Было осознано, что для взаимодействия автоматизированных систем разных предприятий нужна унификация не только формы, но и содержания (семантики) проектной, технологической, эксплуатационной и другой информации о совместно производимой продукции. Другими словами, требовалось создание единой информационной среды взаимодействия всех крупнейших фирм американского военно-промышленного комплекса.

Оказалось, что это чрезвычайно сложная проблема, решение которой требует длительной и многосторонней проработки в масштабах, выходящих за пределы одной страны. Выяснилось также, что создание единой информационной среды требуется не только для уникальных программ типа СОИ, но и для производства любых сложных систем, в первую очередь военной техники, если ее производство основано на взаимодействии многих предприятий.

В связи с возникшими практическими потребностями рядом комиссий и комитетов в рамках международных организаций были начаты работы по созданию информационных технологий и взаимодействию предприятий и выражающих их международных стандартов. Например, в Международной организации стандартизации (*International Standard Organization* – ISO) этими вопросами ведает подкомитет SC4 комитета TC184. В SC4 имеется несколько рабочих групп, занимающихся конкретными сериями стандартов. В настоящее время в ведущих индустриальных странах мира созданы национальные органы, координирующие работу в области CALS-технологий. В международном масштабе развитием CALS помимо ISO занимаются и такие организации, как ICC (*International CALS-Congress*), EIA (*Electronics Industry Association*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) и др. В России в рамках Госстандарта создан технический комитет № 431 «CALS-технологии».

В 1990-х гг. разработан и к настоящему времени принят ряд серий международных стандартов, представляющих CALS-технологии, среди которых наиболее значимы стандарты ISO 10303 STEP (*Standard for Exchange of Product Data*). В контрактах, заключаемых на поставку зарубежным заказчикам военной техники, требования к изделиям и документации на них, как правило, формулируются с позиций международных CALS-стандартов и стандартов DoD (последние имеют префикс MIL).

Развитие CALS-технологий стимулирует образование виртуальных производств, при которых процесс создания спецификаций с информацией для программного управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия,

может быть распределен во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными организациями.

Ожидается, что успех на рынках сложной технической продукции будет немыслим вне CALS-технологий. Так, уже сегодня фирмы, предлагающие военную технику без электронной документации, выполненной в соответствии с CALS-стандартами, не имеют никаких шансов на успех в конкурентной борьбе.

Итак, CALS-технологии призваны, в конечном счете, повысить эффективность создания и использования сложной техники (в том числе мехатронных систем). В чем выражается повышение эффективности?

Во-первых, улучшается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений. Так, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем – системам автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУТП), и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п. При этом под оперативным доступом необходимо понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной интерпретации, т. е. согласованность по синтаксису и семантике с протоколами, принятыми в АСУП. То же относится и к другим системам, например, технологические подсистемы должны с необходимостью воспринимать и правильно интерпретировать данные, поступающие от подсистем автоматизированного конструирования. Последнего не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными автоматизированными системами.

Во-вторых, сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий. Применение

CALS-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания ранее выполненных удачных разработок компонентов и устройств, многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю CALS-технологий. Доступность опять же обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы. Кроме того, появляются более широкие возможности для специализации предприятий, вплоть до создания виртуальных предприятий, что также способствует снижению затрат.

В-третьих, значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки. Существенно облегчается решение проблем ремонтопригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т. п.

По аналогии с САПР для CALS-технологий разработаны различные виды обеспечения их применения: *лингвистическое*, *информационное*, *программное*, *математическое*, *методическое*, *техническое* и *организационное*.

К ***лингвистическому обеспечению*** относятся языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий.

Информационное обеспечение составляют базы данных, в которых имеются сведения о промышленных изделиях, используемые разными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции. В состав информационного обеспечения входят также серии международных и национальных CALS-стандартов и спецификаций.

Программное обеспечение CALS представлено программными комплексами, предназначенными для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий. Это, прежде всего, системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными (PDM), взаимодействия предприятий в совместном электронном бизнесе

(CPC), подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

Математическое обеспечение CALS включает методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия различных систем в CALS-технологиях. Среди этих методов в первую очередь следует назвать методы имитационного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов.

Методическое обеспечение CALS представлено методиками выполнения таких процессов, как параллельное (совмещенное) проектирование и производство, структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, объектно-ориентированное проектирование, создание антологий приложений.

К ***техническому обеспечению*** CALS относят аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении изделий. Взаимодействие частей виртуальных предприятий, систем, поддерживающих разные этапы жизненного цикла изделий, происходит через линии передачи данных и сетевое коммутирующее оборудование. Однако используемые технические средства не являются специфическими для CALS, и поэтому вопросы технического обеспечения не рассматриваются.

Наконец, организационное обеспечение ***организационное обеспечение*** CALS представлено различного рода документами, совокупностью соглашений и инструкций, регламентирующих роли и обязанности участников жизненного цикла промышленных изделий.

За последний год появился целый ряд предприятий, которые активно занимаются изучением и применением CALS-технологий для решения конкретных производственных задач повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. К таким организациям относятся АВПК «Сухой», АНТК им. Туполева, ОАО «Туламашзавод», Конструкторское бюро приборостроения (г. Тула), корпорация «Компомаш», корпорация «Метран» и др. Разработкой конкретных применений CALS-технологий для

ряда областей промышленности занимается МГТУ «Станкин». Решением координационного совета РАН по техническим наукам от 12 февраля 2002 г. Институту конструкторско-технологической информатики РАН поручена координация работ по CALS (ИПИ)-технологиям.

7.2. STEP-стандарты [5]

Выше было отмечено, что для реализации CALS-технологий необходимо обеспечить единообразное описание и интерпретацию данных, независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Это единообразие достигается за счет разработки системы CALS-стандартов, созданных под эгидой ISO (*International Standard Organization*) – международной организации стандартизации.

Центральное место в системе CALS-стандартов занимает ISO 10303 под названием STEP (*Standard for Exchange of Product Data* – стандарт для обмена данными о промышленных изделиях), определяющий средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех стадиях их ЖЦ. Для этого был разработан инвариантный к приложениям язык Express, введенный в STEP. Совокупность стандартов STEP составляет основу CALS-технологий.

В STEP используются следующие важные понятия:

AAM – *Application Activity Model* – функциональная модель IDEFO для определенного приложения;

ARM – *Application Requirements Model* – модель, представляющая данные с точки зрения пользователя. В частности, в этой модели данные могут быть выражены как средствами, типичными для приложения, так и с использованием синтаксиса языка Express;

AIM – *Application Interpreted Model* – ARM-модель, переведенная в STEP-представление с использованием ряда унифицированных в STEP-понятий, закрепленных в интегрированных ресурсах;

AP – *Application Protocol* – STEP-стандарт, отражающий специфику конкретного приложения;

SDAI – *Standard Data Access Interface* – программный интерфейс к источникам данных (репозиториям) прикладных систем (в том числе к библиотекам моделей систем CAD/CAM) с переводом моделей в STEP- файлы; используется в STEP-средах для организации обменов между приложениями через общую базу данных STEP.

STEP – это совокупность стандартов, состоящих из нескольких томов. Тома имеют свои номера и обозначаются как «часть №» или ISO 10303-№. К настоящему времени разработано более сотни томов. Стандарты ISO 10303 определяют средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех этапах их ЖЦ.

Том 1 (ISO 10303-1) – вводный стандарт, выполняющий роль аннотаций всей совокупности томов. В этом стандарте вводится ряд терминов, используемых в других стандартах, например таких, как продукт (*product*), приложение (*application*), проектные данные (*product data*), модель (*model*), модели AAM, AIM, ARM, прикладной протокол (AP), интегрированный ресурс (*integrated resource*), элемент функциональности (*unit of functionality* – UoF).

Тома 11–14 – методы описания (*description methods*).

Тома 21–29 – методы реализации (*implementation methods*).

Тома 31–35 – основы тестирования моделей (*conformance testing methodology and framework*).

Тома 41–50 – интегрированные основные ресурсы (*integrated generic resources*).

Тома 101–108 – интегрированные прикладные ресурсы (*integrated application resources*).

Тома 201–236 – прикладные протоколы (*application protocols*).

Тома 301–332 – абстрактные тестовые наборы (*abstract test suites*).

Тома 501–520 – прикладные компоненты (*application interpreted constructs*).

Ряд томов переведен на русский язык и представлен в виде национальных стандартов России. Это, например, ГОСТ Р ИСО 10303-1–99, посвященный обзору и основополагающим принципам STEP, ГОСТ Р ИСО 10303-11–99 – справочное руководство по языку Express, ГОСТ Р ИСО 10303-21–99 – то же по обменному файлу, ГОСТ Р ИСО 10303-41–99 – описание интегрированных

родовых ресурсов. Перечисленные документы соответствуют стандартам ISO 10303-1, ISO 10303-11, ISO 10303-21, ISO 10303-41. Подготовлены к утверждению ГОСТы, соответствующие томам 43, 44, 203 стандарта ISO 10303.

Таким образом, в томах STEP описаны основные принципы обмена данными, изложены правила языка Express, даны методы его реализации. Модели, методы тестирования моделей, ресурсы как общие для приложений, так и некоторые специальные (например, геометрические и топологические модели, описание материалов, процедуры черчения, конечно-элементного анализа и т. п.), введены прикладные протоколы, отражающие специфику моделей в конкретных предметных областях. Вопросам взаимодействия АС в STEP уделяется основное внимание – выделена подгруппа томов, посвященных способам обмена данными между разными системами, созданными в рамках STEP-технологий.

Развитие CALS-технологий находит выражение также в разработке серий стандартов ISO13584 *Parts Library* (сокращенно *P_Lib*), ISO 14959 *Parametrics*, ISO15531 *Manufacturing Management Data* (*Mandate*), ISO 18876 *Integration of Industrial Data for Exchange, Access, and Sharing* (*IIDEAS*), ISO 8879 *Standard Generalized Markup Language* (*SGML*) (см. т. 107, 108).

Более подробно со структурой STEP-стандартов (методами описания диалектов языка Express № 11–19, методами реализации межпрограммного информационного обмена между прикладными системами в STEP-среде № 21–29, прикладными протоколами № 201–236, интегрированными ресурсами и прикладными компонентами № 41–50 и № 101–108, № 501–520) можно познакомиться в работе [5, с. 166–180].

7.3. Организация в STEP информационных обменов [1]

Возможны обмены через обменный файл, описанный выше (см. п. 5.2), и через базу данных SDAI (Standard Data Access Interface) – интерфейс к данным, представленным в соответствии с CALS-стандартами.

Обменный файл используется при связи моделей *A* и *B*, имеющих общие данные с различными обозначениями. Пользователь должен написать перекодировщик (например, на языке Express-X), с помощью которого отождествляются идентификаторы одних и тех же сущностей, имевших разные обозначения в моделях *A* и *B* (рис. 7.1).

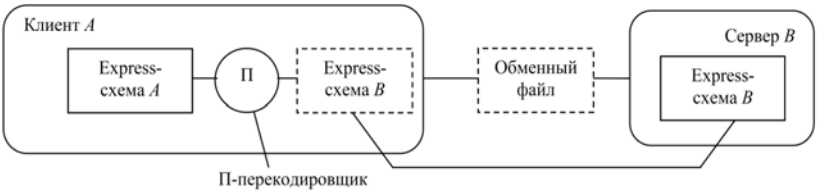


Рис. 7.1. Взаимодействие Express-приложений через обменный файл

Связь через интерфейс SDAI отличается от предыдущего способа обмена тем, что в SDAI имеет место не просто обмен, а разделение данных многими пользователями, и SDAI фактически выступает в роли метамодели для разных САПР. Другими словами, SDAI представляет собой интерфейс, содержащий набор функций на языках C++ и C, для доступа к разделяемым моделям, которые могут быть представлены в виде обменного файла (рис. 7.2).

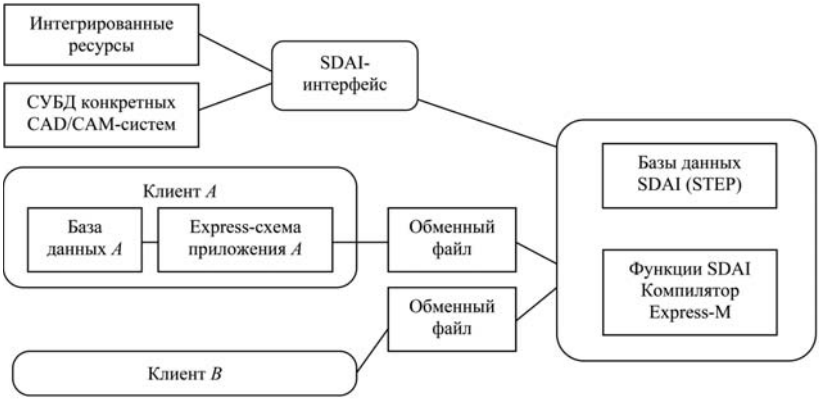


Рис. 7.2. Взаимодействие Express-приложений через базу данных SDAI

В CALS-технологиях рассматриваются не только вопросы представления данных и организации информационных обменов, но и вопросы моделирования приложений и проектирования сложных систем на базе концептуального проектирования.

В заключение данной лекции рассмотрим проблемы практического использования CALS-технологий.

7.4. Проблемы практического использования CALS-технологий

Проблема внедрения CALS-технологий в практику работы промышленных предприятий имеет организационный, технологический, кадровый аспекты.

В организационном плане прежде всего необходима убежденность руководителей предприятий в целесообразности (а в ряде случаев и в неизбежности) перехода к CALS-технологиям, что позволит сконцентрировать усилия на разработке и реализации планов реинжиниринга предприятий с постепенным внедрением элементов CALS-технологий. Эти планы направлены на создание корпоративной автоматизированной системы (КАС), интегрирующей системы автоматизации проектирования, управления и технологической подготовки производства. Особую важность вопросы создания КАС на базе CALS-технологий имеют для производственных объединений, включающих несколько предприятий.

Автономно функционирующие системы САПР, АСУП, АСУТП уже имеются на многих предприятиях. Очевидно, что при их интеграции на основе CALS-технологий собственно задача замены уже используемых систем какими-либо другими не ставится, поскольку замена – процедура дорогостоящая, длительная и болезненная, требующая переучивания специалистов. Замена может быть вызвана не особенностями CALS, а лишь выявленной недостаточной функциональностью используемых систем (например, невозможностью проектирования сборок с тысячами компонентов).

Что в этом случае подразумевается под «единой электронной моделью изделия»? Ответ заключается в следующем: единая электронная модель изделия имеет место, если любая подсистема или пользователь КАС (с соответствующими полномочиями) может, обратившись к базе данных системы, получить нужное подмножество данных об изделии, причем это подмножество будет согласовано с подмножествами, запрашиваемыми другими подсистемами или пользователями. Очевидно, что подмножества данных (профили), запрашиваемые конструкторскими, технологическими, управленческими и другими подсистемами и службами, включают как специфические, так и общие атрибуты, причем общие атрибуты будут иметь одинаковые значения в каждом подмножестве.

Если на предприятии автоматизация была развита слабо, то создание на нем КАС нужно начинать с обследования деятельности предприятия. Перед обследованием формируются и в процессе его проведения уточняются цели обследования – определение возможностей и ресурсов для повышения эффективности функционирования предприятия на основе автоматизации процессов управления, проектирования, документооборота и т. п. Содержание обследования – выявление структуры предприятия, выполняемых функций, информационных потоков, имеющихся опыта и средств автоматизации. Обследование проводят системные аналитики (системные интеграторы) совместно с представителями организации-заказчика.

На основе анализа результатов обследования строят модель, отражающую деятельность предприятия на данный момент. Такую модель называют As Is – «как есть». Далее разрабатывают исходную концепцию КАС. Эта концепция включает в себя предложения по изменению структуры предприятия, взаимодействию подразделений, информационным потокам, что выражается в модели To Be – «как должно быть».

Результаты анализа конкретизируются в техническом задании на создание КАС. В нем указывают потоки входной информации, типы выходных документов и предоставляемых услуг, уровень защиты информации, требования к производительности

(пропускной способности) и т. п. Техническое задание направляют заказчику для обсуждения и окончательного согласования.

Перевод документов в электронную форму – одна из первых задач внедрения CALS-технологий. Для создаваемого электронного архива документов нужно в соответствии со спецификациями MIL-PRF-2800x выбрать единые форматы представления чертежной и текстовой информации. Далее необходимы разработка проекта корпоративной вычислительной сети и его реализация, выбор, приобретение и установка системы PDM, обучение сотрудников предприятия работе в КАС.

Для успешного внедрения и использования CALS-технологий предприятие должно располагать инженерными кадрами, знающими методы и умеющими использовать средства автоматизированного проектирования, поскольку CALS-технологии развиваются прежде всего на базе САПР. В настоящее время в технических вузах страны студенты изучают такие разделы САПР, как геометрическое моделирование и машинная графика, математическое моделирование, оптимизация проектных решений. Целесообразно дополнить учебные программы соответствующих курсов, включив в них изучение вопросов CALS-технологий.

Так, вопросы геометрического моделирования, изучаемые в курсах инженерной графики, основ САПР или в специальном курсе «Вычислительная геометрия», полезно дополнить фрагментами соответствующих прикладных протоколов STEP. В разделах, посвященных математическому моделированию, нужно знакомить студентов с возможностями многоаспектного моделирования, в том числе на базе языка VHDL-AMS. Студенты должны быть знакомы с методиками концептуального проектирования IDEF0, IDEF1X и объектно-ориентированного проектирования на базе языка UML. Эти вопросы, так же как структура стандартов STEP и основы языка Express, могут быть предметом изучения в отдельном курсе «CALS-технологии» или в курсе «Основы автоматизированного проектирования». В раздел оптимизации проектных решений нужно включить методы оптимального планирования и распределения ресурсов. Наконец, следует предусмотреть знакомство студентов с основами Internet-технологий,

в том числе с представлением документов с помощью языков разметки.

Естественно, что преподавание вопросов CALS-технологий требует развития лабораторной базы. В составе программного обеспечения, поддерживающего лабораторные циклы по САПР и CALS, необходимо иметь по крайней мере один из пакетов MCAD (с модулями CAD и CAM), программы моделирования (например, типа ПА9), пакеты поддержки методик функционального и информационного моделирования (например, BPWin и ERWin), XML-редактор, желательно приобретение PDM. Циклы дисциплин радиоэлектронного профиля должны поддерживаться программным обеспечением сквозного проектирования радиоэлектронной аппаратуры и в первую очередь программами разработки схем на базе ПЛИС и проектирования печатных плат.

Более глубоко с отдельными разделами CALS-технологий: обзор CALS-стандартов, математическое, лингвистическое и программное обеспечение – можно ознакомиться в [1, 3, 7, 12].

Контрольные вопросы

1. Дайте обоснование необходимости появления формата STEP обмена данными.
2. Дайте общее определение термина CALS-технологии.
3. Сформулируйте суть стратегии CALS.
4. Перечислите основные свойства единого информационного пространства (ЕИП).
5. Опишите два этапа перехода к ЕИП.
6. Перечислите методы реализации стратегии CALS.
7. Сформулируйте главную задачу создания и внедрения CALS-технологий.
8. Опишите историю зарождения CALS-технологий.
9. Укажите причины повышения эффективности создания и применения сложной техники при использовании CALS-технологий.
10. Опишите различные виды обеспечения CALS-технологий.

11. Укажите условия, необходимые для реализации CALS-технологий.

12. Сформулируйте основное назначение стандарта ISO 10303 (STEP-стандарт).

13. Дайте общую характеристику совокупности стандартов ISO 10303 (содержание томов, входящих в стандарты).

14. Опишите два способа организации в STEP информационных обменов.

15. Опишите порядок внедрения CALS-технологий в практику работы промышленных предприятий.

16. Опишите методику преподавания CALS-технологий для обучения инженерных кадров.

Лекция 8
ОСНОВНЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

8.1. Формирование общих проектных решений [3, 12, 13]

Исторически сложилось, что при традиционном проектировании управляемых машин и процессов разработка механической, электронной, информационной и компьютерной частей ведется последовательно и независимо друг от друга (рис. 8.1).

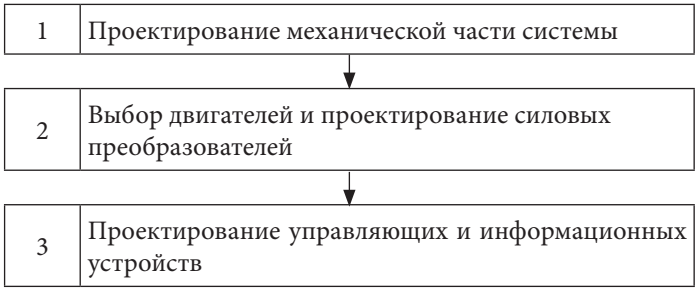


Рис. 8.1. Традиционный алгоритм проектирования

При этом возможности разработчика системы управления крайне ограничены, так как основные конструкторские решения уже приняты на предыдущих этапах, выбор двигателей и силовых преобразователей завершен и не подлежит корректировке при разработке электронной и управляющей частей системы. Кроме

того, при традиционном проектировании многочисленные интерфейсы, связывающие в мехатронной машине (производственном процессе) устройства различной физической природы (механические, электронные, информационные), предопределяют их конструктивную и аппаратно-программную сложность. Опыт эксплуатации сложных систем показывает, что до 70 % проблем их функционирования связаны с надежностью связей и соединений. Поэтому была предложена новая методологическая основа проектирования мехатронных систем – методы параллельного проектирования. Суть методологии параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех устройств мехатронной системы уже на этапах проектирования и изготовления интегрированных модулей системы.

Следуя [13], можно выделить следующие уровни интеграции в мехатронных системах: первый уровень образуют мехатронные (технологические) устройства и составляющие их элементы, второй – включает интегрированные мехатронные модули, третий – предполагает компоновку из мехатронных модулей, четвертый – предполагает построение на единой интеграционной платформе производственных систем (реконфигурируемых производств).

Описанные выше методы параллельного проектирования и выделения уровней интеграции в мехатронных системах позволяют определить направление и глубину интеграционных процессов при проектировании сложных систем.

Использование гибких технологий при проектировании и изготовлении мехатронных систем определяет два направления проектных и конструкторских работ:

1) собственно проектирование производственных процессов на предприятиях на базе готовых программных и аппаратных (технологических) компонентов с помощью специальных инструментальных средств разработки приложений (например, CASE-средств);

2) проектирование упомянутых компонентов и инструментальных средств, ориентированных на многократное применение при разработке многих производственных процессов (систем).

Первое направление базируется на системотехнике, информационных технологиях и программных продуктах, инструментальных средствах разработки приложений (см. лекции 6, 7).

Второе направление в большей мере относится к области разработки математического и программного обеспечения (МО, ПО), методов анализа и синтеза проектных решений, технологий программирования на базе знаний и т. п.

В дальнейшем в лекции основное внимание будет уделено первому направлению работ – собственно проектированию машинных комплексов и производственных процессов на предприятиях.

Проектирование любой сложной системы начинается с формулирования целей, видения будущей системы и исходных технических требований. Затем согласно теории системного проектирования сложных систем выполняются:

– функционально-структурный анализ системы;

– синтез структуры системы;

– структурный анализ и оптимизация (по критерию сложности) отдельных технических подсистем;

– разработка проектно-конструкторской документации в целом на систему.

Функция системы имеет приоритетное значение по отношению к ее структуре, так как различные структуры могут с разной степенью эффективности реализовать одну и ту же функцию.

Заметим, что сложные технические системы различного назначения (интегрированные мехатронные модули и машины, производственные процессы, интегрированные автоматизированные системы и др.) имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при их проектировании, производстве, реализации (технологической реализации производства) и эксплуатации.

На всех этапах жизненного цикла технологических изделий и производственных процессов (см. рис. 1.1) используются технологии реинжиниринга и параллельного проектирования, методика SADT и стандарты IDEF-технологий (IDEF0, IDEF3, DFD) для проектирования функциональных моделей системы через их поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде.

Для структурного описания систем и связей между их структурными элементами используется методология IDEF1X (задающая структуру баз данных для обеспечения процессов), имитационное моделирование, виртуальная инженерия, системы принятия проектных решений, интегрированные системы CAD/CAM/CAE/PDM.

Из поддерживающих методологию IDEF-систем можно отметить BPWin, ERWin, OOWin, Design IDEF др., а также ряд систем автоматизированного проектирования и управления техническими системами и международных стандартов ISO (STEP-стандарты) (см. лекцию 1).

8.2. Построение модели процесса разработки мехатронных систем

Для описания процесса разработки мехатронных систем (МС) далее будем использовать принятую в САПР терминологию этапов разработки:

1) функциональное проектирование (определение функций МС на основе анализа исходных требований);

2) функционально-структурный анализ (выбор вариантов структурных решений системы по ее заданной функции);

3) конструкторское проектирование элементов и модулей МС по результатам структурно-конструктивного анализа;

4) разработка проектной и конструкторской документации на систему;

5) разработка производства МС (включая технологическую подготовку производства);

6) испытание МС;

7) доводка МС;

8) эксплуатация МС.

Основные этапы проектирования мехатронных систем

Первые три (из перечисленных выше) этапа разработки определяют цикл проектирования (см. рис. 1.1) мехатронных систем. На

этом цикле используются инструментальные средства и методы информационных технологий, которые определяют возможность и уровень разрабатываемых систем. Среди этих методов и средств CALS-технологии, CASE-средства и поддерживающие их инструментальные системы (BPWin, ERWin, Design IDEF и др.), технологии реинжиниринга и параллельного проектирования (методики SADT, IDEF), системные среды Meta САПР (Framework), универсальные CAD/CAM/CAE, PDM, SCADA и другие системы.

В настоящее время актуальной становится задача автоматизации проектирования не отдельных элементов и подсистем, а всего процесса проектирования, конструирования и производства мехатронных систем.

Основными чертами современной технологии создания САПР являются [17]:

– переход к автоматизации всего процесса проектирования в целом;

– обеспечение взаимодействия между автоматизированными системами, ведущими расчеты, разработку, изготовление и т. д.;

– обеспечение возможности адаптации системы к объекту проектирования и развития ее в процессе эксплуатации;

– широкое использование диалоговых режимов работы, процедур коллективного проектирования;

– развитие новой методологии проектирования, ориентированной на сквозное применение средств автоматизации в рамках интегрированных CAD/CAM/CAE-систем, на основе которых создаются «приложения» – специализированные САПР.

Структурная модель МС строится на базе функциональной модели МС, полученной с помощью IDEF-технологий (IDEF0, IDEF1X, DFD) и поддерживающих их систем (BPWin, ERWin, Design IDEF), а также САПР Спрут, имитационного моделирования, систем принятия проектных решений, CALS-технологий. С этой целью функциональную модель МС подвергают декомпозиции на отдельные узлы и детали для технических (конструкционных) мехатронных систем или на отдельные технологические операции для производственных процессов. Далее с помощью интерактивных процедур (например, использования диалоговых

средств), осуществляется оптимизация структурной модели и ее компонентов (см. лекцию 1). Возможность осуществления интерактивного метода конструирования является одним из самых важных требований этапа конструирования. Для автоматизации процесса конструирования должен быть (как минимум) разработан пакет конструирования, состоящий из CAD-систем, обеспечивающих выполнение всего объема конструкторских работ и приложений, интегрированных с выбранными CAD-системами.

Инструментальные средства проектирования мехатронных систем

Далее рассмотрим комплекс инструментальных средств, охватывающих процесс концептуального проектирования (первые три этапа разработки системы) мехатронных систем [16]. На рынке IDEF-систем фирмой Computer Associations предложены CASE-средства BPWin и ERWin. CASE-средство верхнего уровня BPWin поддерживает методологию IDEF0 (функциональная модель), IDEF3 (Workflow Diagram – сценарий бизнес-процесса, поведенческое моделирование) и DFD (Dataflow Diagrams – диаграммы потока данных, набор связанных друг с другом действий).

Функциональная модель предназначена для описания существующих процессов на предприятии (As Is-модели) и того, к чему надо стремиться (модель To Be). Методология IDEF0 предписывает построение иерархической системы диаграмм – единичных описаний фрагментов системы. Сначала проводится описание системы в целом и ее взаимодействие с окружающим миром (контекстная диаграмма), после чего проводится функциональная декомпозиция – система разбивается на подсистемы и каждая подсистема описывается отдельно (диаграмма декомпозиций). Затем каждая подсистема разбивается на более мелкие и так далее до достижения нужной степени подробности. Каждая диаграмма проверяется экспертами предметной области, заказчиками и пользователями процесса. В случае необходимости (чтобы осветить специфические стороны технологии предприятия) BPWin позволяет переключиться на нотацию IDEF3 или DFD и создать

смешанную модель. Нотация DFD включает такие понятия, как внешняя ссылка и хранилище данных, что делает ее более удобной (по сравнению с IDEF0) для моделирования документооборота. Методология IDEF3 включает элемент «перекресток», что позволяет описать логику взаимодействия компонентов системы.

После построения функциональной модели можно построить модель данных, используя модель ERWin. Хотя процесс преобразования модели BPWin в модель данных плохо формализуется и поэтому полностью не автоматизируется, Computer Associations предлагает удобный инструмент для обеспечения построения модели данных на основе функциональной модели (механизм связи BPWin–ERWin). ERWin имеет два уровня представления модели – логический и физический. На логическом уровне данные не связаны с конкретной СУБД, поэтому могут быть наглядно представлены даже не для специалистов. Физический уровень данных – это, по существу, отображение системного каталога, который зависит от конкретной реализации СУБД. ERWin позволяет проводить процессы прямого и обратного проектирования БД. Это означает, что по модели данных можно сгенерировать схему БД или автоматически создать модель данных на основе информации системного каталога. Кроме того, ERWin интегрируется с популярными средствами разработки клиентской части – Power Builder, Visual Basic, Delphi, что позволяет автоматически генерировать код приложения, который полностью готовы к компиляции и выполнению.

В заключение цикла проектирования МС рассмотрим еще одну возможность минимизации сложности МС и мехатронных модулей (ММ).

Синергетическая интеграция в мехатронных системах

В общем случае функциональная и структурная сложность технических систем (подсистем) в значительной степени определяется количеством соединяемых элементов, числом и интенсивностью их взаимодействия. Поэтому оснащение технических систем многофункциональными элементами, повышение уровня

интеграции ММ (подсистем) и снижение числа интерфейсов направлено на минимизацию сложности систем.

Функциональное представление МС и ММ с определенными входными и выходными переменными (модель типа «черный ящик») показано на рис. 8.2.

Рис. 8.2. Мехатронный модуль в виде «черного ящика»

Таким образом, основная функциональная задача мехатронной системы или мехатронного модуля заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение выходного звена.

Программа движения может быть задана управляющим компьютером как набор команд высокого уровня или, в случае дистанционного управления, человеком-оператором с помощью человеко-машинного интерфейса. Управляемое движение осуществляется механической подсистемой ММ, и его конечное звено взаимодействует с объектами внешней среды. Внешние воздействия, например силы резания при шлифовальных и фрезерных операциях, контактные силы и моменты при роботизированной сборке, должны эффективно отражаться мехатронным модулем в процессе движения. Информационная обратная связь необходима для оценки текущего состояния ММ как объекта управления и внешней среды в режиме реального времени.

Обозначенная основная функция не является единственной для мехатронных систем. Некоторые дополнительные функции, такие как реконфигурация системы, обмен сигналами и инфор-

мацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для эффективной и надежной работы МС. Но именно выполнение функционального движения является основной мехатронной функцией, так как механическая подсистема взаимодействует с объектами работ и, таким образом, определяет поведение МС во внешней среде.

Рассмотренное представление мехатронного модуля в форме «черного ящика» (см. рис. 8.2) имеет два информационных входа (программа движения и информационная обратная связь), энергетический вход (реакция внешней среды) и механический выход (целенаправленное управляемое движение). Следовательно, в общем случае функциональная модель мехатронного модуля может быть определена как *информационно-механический преобразователь*.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. На современной стадии развития мехатроники для этой цели в основном используют электрические источники энергии. Введя соответствующие электроэнергетические преобразования, получаем следующую функциональную модель (*F*-модель) мехатронного модуля (рис. 8.3):

Рис. 8.3. Функциональная модель мехатронного модуля

Полученная *F*-модель ММ в общем случае содержит семь базовых функциональных преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками.

Отметим, что электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема отнюдь не является единственно возможной для выполнения мехатронной функции, как это постулировано в приведенном определении мехатроники. Безусловно, и другие виды энергетических процессов могут быть использованы в мехатронных системах для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как альтернативные варианты на этапе концептуального проектирования. Выбор разработчиком ММ физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями его применения. В современной инженерной практике широко применяются гидравлические, пневматические, химические и другие виды энергетических преобразователей.

Итак, в любом мехатронном модуле необходимо реализовать семь функциональных преобразований (см. рис. 8.3). Три из них назовем *моноэнергетическими* (информационный, электрический и механический преобразователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются *дуальными* (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, и параллельные электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурная модель мехатронного модуля должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления и электромеханике принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольника с указанием входной и выходной переменных, а уравнения или характеристики записывают внутри него.

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (*S*-модель –

рис. 8.4). Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электромеханическую подсистемы. При конструировании мехатронных модулей особый интерес представляет исполнительная часть, входящая в состав электромеханической подсистемы.

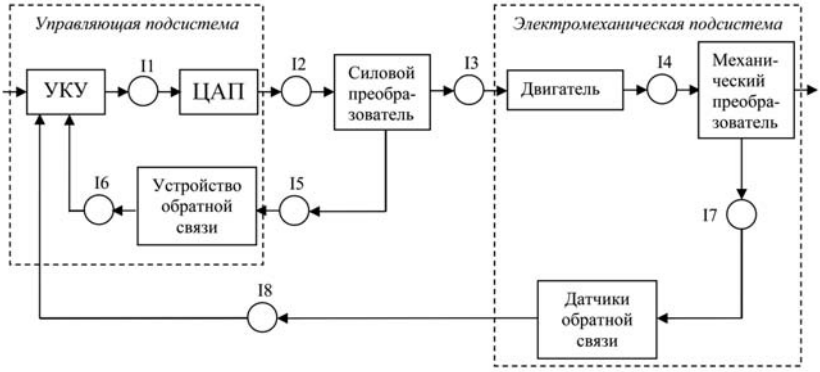


Рис. 8.4. Структурная модель электропривода с компьютерным управлением

Структурная модель электропривода (см. рис. 8.4) включает в себя следующие основные элементы:

– устройство компьютерного управления движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);

– цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;

– силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);

– управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который является электротехническим элементом привода;

– механический преобразователь, который реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними

объектами; в приводных модулях в качестве таких устройств применяют редукторы, вариаторы, либо непосредственно используют рабочий орган (например, в мехатронных модулях типа «мотор-шпиндель»);

– устройство обратной связи, которое используют для контроля текущих напряжений и токов в силовом преобразователе, а также управляющих функций (например, для организации контура регулирования момента, развиваемого приводом);

– датчики обратной связи по положению и скорости движения выходного звена механического устройства, выполняющие функции механико-информационного преобразования;

– интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как 11–18.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими преобразователями движения, так и содержать электронные аппаратно-программные компоненты. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие выходное механическое устройство с двигателем (интерфейс 14) и датчиками обратной связи (интерфейсы 17, 18).

Интерфейсные электронные устройства расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления (УКУ) и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

– с цифро-аналоговым преобразователем (встроенный интерфейс 11) и далее с силовым преобразователем модуля (интерфейс 12);

– с датчиками обратной связи (интерфейс 17), который в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);

– с устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (для традиционного привода интерфейс 16 также использует стандартный АЦП).

В традиционной приводной технике интерфейсы являются сепаратными устройствами. Поэтому их проектирование, изго-

товление и наладка становятся серьезной проблемой для разработчика привода, особенно когда требуется надежно соединять нестандартные и специализированные элементы различных производителей. Мехатронные структуры отличаются высокой степенью интегрированности элементов, причем эти решения закладываются уже на стадии проектирования модулей и машин.

Сравнивая функциональную модель мехатронного модуля (см. рис. 8.3) и структурную модель традиционного электропривода (см. рис. 8.4), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число необходимых функциональных преобразователей. Другими словами, можно говорить о структурной избыточности традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей. Поэтому целесообразно стремиться к сокращению количества сепаратных структурных элементов (как основных, так и интерфейсных блоков) в системе. В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль (см. рис. 8.2), приняв на информационный вход программу движения, должен выполнить целенаправленное управляемое движение с заданными показателями качества. При этом все проблемы интеграции в модуле механических, электронных и управляющих устройств должны быть решены разработчиком для каждой стадии жизненного цикла – от проектирования системы до ее эксплуатации у конечного потребителя.

Суть синергетической интеграции состоит в объединении в единый модуль элементов различной физической природы при сохранении функционального преобразования, выполняемого данным модулем.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании мехатронных модулей основана на трех базовых принципах:

– реализация заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков путем объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули;

– выбор интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаратных элементов;

– перераспределение функциональной нагрузки в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Практическая реализация принципов синергетической интеграции при проектировании позволяет обеспечить основные преимущества мехатронных систем по сравнению с традиционными машинами и добиться качественно новых показателей, в первую очередь по компактности конструкции, скорости и точности движений. Снятие с аппаратной («железной») части системы функциональной нагрузки (прежде всего через упрощение механического узла) и ее перенос на управляющую и электронную подсистемы придает системе гибкость, делает ее способной к легкой реконфигурации под новые технологические задачи. Следует заметить, что интеграция предполагает не только аппаратное объединение элементов, но и организацию интегрированных информационных процессов в интеллектуальных модулях.

Синергетическую интеграцию в мехатронике осуществляют при проектировании двумя основными способами – функционально-структурной интеграцией (ФС-интеграция) и структурно-конструктивной интеграцией (СК-интеграция), которые объединяют в общий алгоритм проектирования мехатронных систем (см. рис. 8.2).

Функционально-структурная интеграция. Задачей этапа функционально-структурной интеграции является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. ФС-интеграция направлена на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение некоторых основных блоков, а значит, и смежных с ними интерфейсов из структуры системы.

Примеры мехатронных проектных решений, основанные на способе ФС-интеграции элементов, приведены в табл. 8.1. Пред-

ставленные решения основаны на совместном анализе функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 8.3) и структуры традиционного электропривода (см. рис. 8.4).

Первые два мехатронных решения относятся к электромеханической подсистеме модуля, следующие варианты интеграции можно реализовать в его управляющей подсистеме (см. рис. 8.4). При конструировании мехатронных модулей наибольшее внимание уделяют решениям, направленным на упрощение механической части модулей и связанных с ней блоков и интерфейсов, которые реализуют электромеханическое и механико-информационное функциональные преобразования.

Рассмотрим подробнее мехатронные решения по ФС-интеграции элементов из табл. 8.1.

Первый вариант предусматривает использование в обратной связи вместо двух отдельных датчиков положения и скорости только одного элемента – фотоимпульсного датчика (ФИД), который позволяет получать информацию и о угле поворота вала, и о скорости его вращения. При этом также важно, что ФИД выдает выходной сигнал в кодовой форме, что дает возможность вводить информацию в УКУ без дополнительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что было необходимо для традиционных датчиков с аналоговым выходным сигналом (тахогенераторов, потенциометров и т. п.).

Различают два основных вида фотоимпульсных датчиков – *абсолютные* и *инкрементальные*. Абсолютные ФИД (*encoder*) дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) подвижного элемента относительно фиксированного нулевого положения. Преимуществами абсолютного ФИД являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (это важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, которое он занимал до начала движения.

Таблица 8.1

ФС-интеграция элементов в мехатронном модуле

№ п/п	Мехатронное решение	Функциональное преобразование	Исключаемые сепаратные элементы	
			Основные блоки	Интерфейсы
1	Фотоимпульсный датчик обратной связи	Механико-информационное	Один датчик обратной связи	17, 18
2	Вентильный высокомоментный двигатель	Электромеханическое и механико-информационное	Механическое устройство, сепаратные датчики обратной связи	14, 17, 18
3	Интеллектуальный силовой преобразователь	Информационно-электрическое	Избыточное устройство обратной связи	15, 16
4	Управляющие контроллеры на базе блоков FPGA	Электроинформационное	Цифро-аналоговый преобразователь	11, 12

Интеллектуализацию ФИД обеспечивают встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передачи текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании ФИД заключается в объединении в одном сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Таким образом, использование ФИД позволяет исключить из структуры традиционного привода один датчик обратной связи с его интерфейсом (17), а также АЦП на входе УКУ (интерфейс 18).

Применение высокомоментного двигателя (ВМД) позволяет (второе решение в табл. 8.1) заменить исполнительную пару

«двигатель + преобразователь движения» на один приводной элемент «двигатель». Этот способ ФС-интеграции означает исключение механического устройства и избыточного интерфейса 14 из структуры привода.

Ниже перечислены основные преимущества мехатронных модулей с ВМД:

– снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;

– повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформаций звеньев и т. д.;

– исключение трения в механической трансмиссии, что позволяет избежать нелинейных динамических эффектов, особенно на ползучих скоростях.

Для определения положения полюсов на роторе двигателя в конструкцию вентильного ВМД встраивают датчик положения. В исполнительных приводах информацию с этого датчика могут использовать и как сигнал обратной связи. Следовательно, применение вентильных ВМД со встроенными ФИД позволяет упростить не только механическую часть модуля, но и цепь обратной связи, так как разработчику не требуется вводить в конструкцию модуля сепаратные датчики положения и скорости.

ВМД могут быть как углового, так и линейного типа. До появления линейных двигателей традиционные электроприводы линейных перемещений включали в себя двигатель углового движения и механическую передачу для преобразования вращательного движения в поступательное (шарико-винтовую передачу, зубчатую рейку, ленточную передачу и т. п.). Основные преимущества мехатронных модулей на базе линейных двигателей по сравнению с традиционными приводами обусловлены исключением многоступенчатого преобразования движения, отсутствием характерных недостатков механических преобразователей (люфт, упругость, силы трения, высокая инерция). Это позволяет добиться повышения в несколько раз линейной скорости и ускорения, высокой точности реализации движения, повышенной статической и динамической жесткости привода.

В табл. 8.1 приведены также два примера применения способа ФС-интеграции к элементам управляющей подсистемы модуля.

В состав мехатронных модулей могут входить интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП). Их строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (*MOSFET*), биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*), запираемые тиристоры с полевым управлением (*MCT*). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (например, для транзисторов *MOSFET* – 100 000 Гц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для *IGBT* предельная сила коммутируемого тока – до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение – до 3 500 В). Особенность ИСП состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСП в составе мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Использование контроллеров движения с блоками FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) позволяет исключить цифро-аналоговое преобразование сигналов при компьютерном управлении двигателем. На выходе блоков FPGA сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление. При этом они обладают уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений соизмерима с аппаратными компонентами) с возможностью программирования как обычные микропроцессорные устройства.

Обобщая рассмотренные примеры, интересно обратить внимание на то, что точками для ФС-инитеграции являются структурные блоки, реализующие функциональные преобразования только дуального типа (см. третий столбец табл. 8.1). К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи

функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 8.3) и электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурно-конструктивная интеграция (СК-интеграция) основана на анализе структурной модели мехатронного модуля, которая сформирована на этапе ФС-интеграции. Заданная структура модуля может быть реализована различными конструктивными решениями. СК-интеграция нацеливает разработчика мехатронных модулей на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение интерфейсов как сепаратных блоков путем встраивания их в отдельный корпус. При автоматизированном проектировании принятые решения представляют в виде конструктивной модели.

Методическим ключом при поиске вариантов СК-интеграции является рассмотрение интерфейсных блоков 11–18 в качестве локальных точек, где потенциально возможна СК-интеграция. Можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько точек интеграции.

Таблица 8.2

СК-интеграция элементов в мехатронном модуле

№ п/п	Мехатронные модули	Функциональное преобразование	Встраиваемые элементы	
			Основные блоки	Интерфейсы
1	Модуль движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	14
2	Мехатронный модуль движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатели, механическое устройство, датчик обратной связи	14, 17, 18
3	Интеллектуальный мехатронный модуль	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электромеханическое	Управляющий контроллер, силовой преобразователь, двигатель	11, 12, 13, 15, 16

Примеры мехатронных модулей, основанных на способе СК-интеграции элементов, приведены в табл. 8.2. Представленные решения базируются на анализе структурных моделей мехатронных модулей, разработанных на этапе функционально-структурной интеграции (см. рис. 8.4).

Интеграция элементов в мехатронных модулях является ведущей тенденцией при создании современных машин и систем, так как позволяет добиться качественно нового уровня по основным техническим показателям – скорости и точности движения, компактности конструкции и способности машины к быстрой реконфигурации. Практическое воплощение этой тенденции в машинах сегодняшнего дня зависит от эффективности взаимодействия конструктора, который выдвигает новые интеграционные идеи, и технолога, реализующего предложенные проектные решения в автоматизированных технологических процессах.

Специфика и сложность мехатронных модулей и систем заключается еще и в том, что их составляющие части (механическая, электронная и компьютерная) имеют различную физическую природу, а основные структурные элементы выпускаются зачастую предприятиями различных отраслей промышленности.

Разработка проектной и конструкторской документации

Процесс проектирования и конструирования мехатронной системы завершается разработкой проектной и конструкторской документации на систему, относится к *четвертому* этапу разработки системы.

Конструкторская документация (КД) подразделяется на проектную и рабочую.

Проектная конструкторская документация (ПКД) выполняется на различных стадиях реализации проекта в соответствии с техническим заданием (ТЗ), разработанным на предпроектной стадии (см. рис. 3.2), до разработки рабочей документации. В состав проектной документации входят: техническое предложение, эскизный и технический проекты. Состав и номенклатура документов,

входящих в техническое предложение, эскизный и технический проекты подробно изложены в лекции 3 (раздел 3.2).

Рабочая конструкторская документация (РКД) разрабатывается на основе технического задания или проектной конструкторской документации и предназначается для обеспечения монтажа, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта технических изделий (производственных процессов). Следует отметь, что выпуск и корректировка РКД обычно продолжается и на всех последующих этапах разработки и эксплуатации технической системы.

Четыре последние этапа (5, 6, 7, 8) (см. раздел 8.2) разработки мехатронных систем относятся к процессам подготовки, реализации и эксплуатации мехатронных систем (см. раздел 1.1, лекция 1). Сюда же можно отнести и процессы управления промышленными предприятиями на различных иерархических уровнях.

Основные положения этапа 5 «Разработка производства мехатронных систем (включая технологическую подготовку производства)» были рассмотрены в лекции 4 (раздел 4.1). Разработка больших производственных систем включает следующие виды работ:

– разработка производственных процессов, объединенных в производственную систему;

– разработка технологических процессов, входящих в состав производственных процессов;

– разработка технологических операций, на которые делится технологический процесс;

– разработка локальных систем управления отдельными процессами;

– разработка интегрированной информационной системы для автоматизации технологической подготовки и управления производственными системами и процессами;

– оптимизация технологических и производственных процессов;

– решение ряда инженерных задач.

Работы, связанные с выполнением 6 и 7 этапов, соответственно «Испытание» и «Доводка» мехатронных систем, в данном курсе лекций не рассматриваются.

Последний 8-й этап разработки мехатронных систем «Эксплуатация мехатронных систем» будет рассмотрен в лекции 9 в тесной увязке с этапом «Производство и реализация» жизненного цикла мехатронной системы (см. лекция 1, рис. 1.1). Основное внимание будет уделено автоматизированным системам управления промышленных предприятий, на которых реализуются производственные процессы.

Контрольные вопросы

1. Опишите традиционный алгоритм проектирования.
2. Сформируйте четыре уровня интеграции в мехатронных системах.
3. Разберите два направления проектных и конструкторских работ при проектировании и изготовлении мехатронных систем.
4. Опишите общую схему проектирования любой сложной системы.
5. Перечислите восемь этапов процесса разработки мехатронных систем (с выделением этапов, определяющих цикл проектирования).
6. Опишите инструментальные средства и методы информационных технологий, используемые при выполнении цикла проектирования.
7. Рассмотрите представление мехатронного модуля в форме «черного ящика».
8. Сформулируйте основную функциональную задачу мехатронной системы (или мехатронного модуля). Другие дополнительные функции мехатронных систем.
9. Опишите функциональную модель мехатронного модуля (F-модель).
10. Опишите структурную модель электропривода с компьютерным управлением (S-модель мехатронного модуля).
11. Сформулируйте суть синергетической интеграции элементов при проектировании мехатронных модулей. Рассмотрите три базовых принципа синергетической интеграции.

12. Сформулируйте суть функционально-структурной (ФС) и структурно-конструктивной (СК) синергетической интеграции.

13. Сформулируйте основную задачу этапа функционально-структурной интеграции (ФС-интеграция).

14. Рассмотрите мехатронные решения по функционально-структурной интеграции элементов из табл. 8.1.

15. Сформулируйте основную задачу этапа структурно-конструкторской интеграции (СК-интеграция).

16. Рассмотрите примеры мехатронных модулей, основанных на способе СК-интеграции (табл. 8.2).

Лекция 9
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ [1, 3, 18]

Мехатронные производства имеют иерархическую многомодульную структуру и соответствующие этой структуре автоматизированные системы управления (АСУ). Среди АСУ различают автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП).

9.1. Автоматизация управления предприятиями (АСУП)

В большинстве случаев АСУП охватывают уровни от предприятия до цеха.

Функции АСУП на промышленных предприятиях выполняют следующие автоматизированные системы (на различных иерархических уровнях) (см. лекцию 1, раздел 1.1):

ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);

MRP (MRP-II) – Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производственных (материальных) ресурсов);

MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);

DRP – Distribution Resource Planning (управление маркетинговыми мероприятиями и обработкой заказов);

FRP – Finance Requirements Planning (финансовый учет и планирование);

PM – Project Management (управление проектами).

Имеется ряд автоматизированных систем (АС):

CRM–$5ustomer Relationship Management (управление продажами), SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок), S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием). Эти АС могут быть отнесены как к АСУП, так и к логистическим системам, которые будут рассмотрены ниже.

Исторически первоначально был разработан стандарт MRP. Он появился в конце 60-х гг. Стандарт MRP включал в себя только планирование потребностей в материалах по замкнутому циклу. Затем стандарт MRP был расширен до MRP-II. Это позволило планировать все производственные ресурсы предприятия на основе данных, полученных от поставщиков и потребителей. Но этого оказалось недостаточно, и появился стандарт ERP, объединяющий возможности MRP и MRP-II, а также возможности стандартов DRP и FRP. Однако ERP-системы имеют явный крен в сторону автоматизации и стандартизации финансовых и учетно-хозяйственных функций производственных процессов и не обеспечивают интегрированного решения задач технологической подготовки производствами с его оперативным управлением, ограничиваясь только стратегическим планированием, а также между уровнем ERP и уровнем технологической подготовки и оперативного управления производством. В результате оказывается не охваченным информационными технологиями целый класс жизненно важных для предприятия производственных процессов.

Опыт внедрения ERP показал, что при создании действительно интегрированной системы управления предприятием в первую очередь необходимо решить в едином информационном пространстве (ЕИП) взаимоувязанные задачи автоматизации технологической подготовки и оперативного управления производством.

В настоящее время создание интегрированных информационных систем управления промышленными предприятиями реализуется на базе CALS-технологий, которые в гражданской

промышленности называются PLM-системами (PLM – Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом изделий).

Автоматизированные информационные системы (АИС) класса PLM включают в свой состав PDM-системы в качестве электронного архива и технологического документооборота (workflow).

В [18] приведены зарубежные и российские компании-разработчики АИС-систем класса PLM. Среди российских компаний-разработчиков следует выделить: «Аскон», «Топ Системы», НПП «Интермех» (г. Минск), «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ). Все эти компании разрабатывают АИС-системы класса PLM с программным обеспечением (ПО), позволяющим интегрировать в состав АИС-систем автоматизированные системы (АС), САПР: CAD, CAM, CAE.

На повестку дня поставлена задача определения базовых информационных технологий ИАИС (интегрированная автоматизированная информационная система) для алгоритмического и программного обеспечения функций CAD/CAM/CAE/PDM/FRP/MRP/MES-систем в ЕИП предприятия.

В настоящее время системами корпоративного управления и учета для планирования материальных ресурсов (MRP и MRP-II), управления технической информацией (TIM), электронной почтой, маршрутизацией документов при коллективной работе и т. д. являются: R|3, BAAN, AVALON9 (CIM) MANMAN/X, MMI, SOCAP, TRITON, а также STAFFWARE, SCALA и Lotus Notes. Самой крупной интегрированной системой этого класса является R|3.

9.2. Автоматизация управления технологическими процессами (АСУТП)

Системы АСУТП охватывают уровень от цеха и ниже. Однако в АСУТП могут быть включены и межцеховые связи, если управление единым производственным процессом выполняется в нескольких цехах. Эти системы часто называют системами промышленной автоматики, или встроенными системами (Embedded Systems).

В состав АСУТП входят автоматизированные системы:

– SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);

– CNC – Computer Numerical Control (компьютерное численное управление).

Система SCADA на верхнем иерархическом уровне АСУТП выполняет диспетчерские функции:

– сбор и обработка данных о состоянии оборудования;

– контроль протекания технологических процессов;

– выполняет роль инструментальной системы разработки ПО для встроенного в состав АСУТП оборудования компьютерной автоматизации;

– управление и регистрация аварийных сигналов (алармов);

– связь с корпоративной информационной сетью.

SCADA-системы состоят из терминальных компонентов, диспетчерских пунктов и каналов связи. Связь с контроллерами и приложениями в SCADA-системах обычно осуществляется посредством технологий: DDE – Dynamic Data Exchange (обмен данными), OLE – Object Linking and Embedding Technology (связывание и внедрение объектов), ODBC – Open Database Connectivity (открытый доступ к базам данных). В качестве каналов связи используют последовательные промышленные шины Profibus, CANbus, Foundation Fieldbus и др.

Разработка программ для программируемых контроллеров выполняется на языках C/C++, VBA – Visual basic для приложений или оригинальных языках, разработанных для конкретных систем. Ряд языков стандартизован и представлен в международном стандарте IEC 1131–3.

Известные SCADA-системы:

– Citect (компания Ci Technology), работающая в среде Windows;

– Trace Mode (компания AdAstra), операционные системы QNX, OS9, Windows;

– LabView SCADA (компания National Instruments).

Функциями систем MES являются анализ производственных процессов, их оптимизация, управление ресурсами и расходом

материалов, анализ простоя оборудования, диагностика и предупреждение поломок оборудования, контроль и управление качеством продукции, формирование отчетов о производстве для передачи на уровень ERP.

Функции MES близки по некоторым выполняемым функциям к системам ERP, PDM, SCM, S&SM и отличаются от них именно оперативностью, принятием решений в реальном времени, причем большое значение придается оптимизации этих решений с учетом текущей информации о состоянии оборудования и процессов.

В настоящее время наблюдается интеграция АСУП и АСУТП, ранее развивающихся автономно. Использование информации непосредственно от технологических процессов позволяет более рационально планировать производство и управлять предприятием за счет использования на этих уровнях общих программных средств, баз данных, сетей Industrial Ethernet и др.

На уровне управления технологическим оборудованием (запуск, тестирование, выключение оборудования, сигнализация о неисправностях, выработка управляющих воздействий для программно управляемого оборудования) используются программируемые контроллеры с системой CNC. Эти контроллеры обычно встраиваются в технологическое оборудование.

Техническое обеспечение АСУТП представлено персональными ЭВМ (в промышленном исполнении), контроллерами CNC, микрокомпьютерами PLC, распределенными по контролируемым участкам производства, связанными друг с другом с помощью промышленных шин.

9.3. Информационные логистические системы

Логистические задачи занимают значительное место среди задач, решаемых при организации управления сложными производственными системами.

Исторически в начале логистику связывали с управлением процедурами движения сырья и готовой продукции, их склади-

рованием и движением к месту потребления. Логистика формировалась как «наука об организации совместной деятельности менеджеров различных подразделений предприятия, а также группы предприятий по эффективному продвижению продукции по цепи «закупка сырья – производство продукции – сбыт – распределение» на основе интеграции и координации операций, процедур и функций, выполняемых в рамках данного процесса с целью минимизации общих затрат ресурсов». По существу, логистика выполняла функции подсистемы АСУП.

В 1974 г. международный конгресс по логистике предложил более широкое определение логистики «как науки о планировании, управлении и контроле за движением материальных, информационных и финансовых ресурсов в различных системах».

Затем появился термин «информационная логистика», под которым понимают организацию и использование систем информационного обеспечения производственно-хозяйственных процессов на предприятии. Объект информационной логистики – информационные потоки, сопровождающие материальные потоки.

Информационная логистика наиболее актуальна для автоматизированных систем проектирования (САПР) и управления, оперирующих информационными ресурсами, например в виде потоков документов (в различных формах), порождаемых материальными потоками и сопровождающих материальные потоки. Информационная логистика охватывает все виды деятельности, связанные с планированием и управлением процессами, нацеленными на обеспечение предприятия релевантной информацией.

В процессе проектирования мехатронных изделий или систем вся информация по проекту хранится в банке изделия, но возникает проблема с ее доставкой на рабочее место исполнителя. Возможностей СУБД для этого уже недостаточно. Более эффективные методы управления информацией оформлены в виде международных стандартов группы STEP (ISO 10303) CALS-системы. Такие методы составляют суть современной информационной логистики. Вместо логистической системы нередко

используются родственные ей системы управления разработками (проектами), например PDM-система управления проектными данными [10].

Создание логистической системы для САПР, обеспечивающей разработку или модернизацию сложных технических систем, начинается с описания предполагаемого изделия (входящих в его состав узлов (подсистем) и связей между ними) на специальном алгоритмическом языке EXPRESS, имеющимся в ISO 10303 (см. лекцию 7). При этом производится декомпозиция изделия – детальная функциональная и формируется структура информации, передаваемой по всем предусмотренным типам связи.

Полученная выше система пока обеспечивает только управление потоками информации. В ней не содержится никаких расчетов. Все расчеты, конструирование, анализ полученной информации, ее визуализация и прочая работа, необходимая для создания изделия, выполняется в отдельных модулях. Модули создаются на базе существующих САПР. Модули должны быть оформлены в виде самостоятельных программ со стандартными интерфейсами, предусмотренными в логистической системе. К числу таких модулей относятся системы ERP, SCM, CRM, PDM и др.

Вся созданная система размещается в локальной сети, например типа клиент-сервер. В этом случае все версии банка изделия и банка знаний размещаются на достаточно мощном сервере (типа Cray-3). В этом случае число клиентов в сети может измеряться сотнями.

Затем разрабатывается схема процесса проектирования изделия и начинается проектирование изделия.

В [10] более подробно описывается технология проектирования и последующая работа над изделием.

Логическим решением разработки информационных логистических систем является создание интегрированной автоматизированной системы управления (ИАИСУ), обеспечивающей информационное взаимодействие всех участников проекта.

9.4. Автоматизированные системы делопроизводства

В связи с переходом машиностроительной промышленности от серийного к мелкосерийному производству значительно возросла номенклатура выпускаемых предприятиями наукоемких изделий, что привело к многократному росту объема технической информации и документооборота.

На этапах конструкторской и технологической подготовки производства ведется коллективная работа с большим объемом документации, которая представлена в разных форматах (текстовые документы, чертежи, спецификации, отчеты, таблицы и т. д.) и разрабатываются в разных автоматизированных информационных системах (АИС) с использованием различных методов проектирования и типов сопровождающих их данных (твердотельные 3D модели, схемы печатных плат, программы для ЧПУ и т. д.).

Существует достаточно большое количество критериев классификации автоматизированных систем делопроизводства (АСД) по целевому назначению, приложению, масштабам:

- системы управления документами (СУД);
- системы управления документооборотом (СДО);
- инструментальные среды делопроизводства;
- специализированные и комплексные системы;
- локальные и распределенные системы;
- заказные и тиражируемые системы;
- фактографические и полнотекстовые системы;
- системы управления техническими данными (TDM);
- офисные системы делопроизводства;
- системы управления знаниями.

Отличия TDM от офисных АСД заключается в большом количестве чертежной документации и в тесной взаимосвязи с САПР.

Системы управления документами (СУД) предназначены для обеспечения санкционированного доступа к документам.

Систему управления документооборотом служат для управления деловыми процессами прохождения и обработки документов в соответствующих подразделениях и службах предприятия.

К системам управления знаниями в области делопроизводства относятся системы, выполняющие функции, характерные для интеллектуальных систем (классификация документов, телематический отбор документов, аналитическая обработка данных, моделирование деловых процессов).

Инструментальные среды в системах делопроизводства служат для формирования АСД, адаптированных к условиям конкретных предприятий и фирм. Ряд других задач, решаемых АСД, описан в [3, 18].

Основными компонентами СУД и СДО являются:

- электронный архив;
- система маршрутизации документов;
- контроль исполнения;
- модули сопровождения с прикладными программами;
- средства ввода информации.

В крупных АСД предусматривается распределенное хранение с доступом к документам в режимах off-line и on-line.

Современные системы делопроизводства являются распределенными, имеющими архитектуру клиент-сервер. На серверной стороне применяются серверы баз данных полнотекстовых документов, электронной почты, приложений SQL- и Web-серверы. На клиентской стороне – рабочие места пользователей.

К широкоизвестным СДО и АСД относятся Lotus Notes, Docs Open и др. примерами TDM служат Search или T-Flex Docs (на небольшое число пользователей) и системы документооборота, используемые в PDM Optegra или iMAN (для большого числа пользователей).

Контрольные вопросы

1. Перечислите автоматизированные системы, выполняющие функции АСУП на промышленных предприятиях.
2. Опишите стандарт MRP, входящий в АСУП.
3. Опишите стандарт MRP-II, входящий в АСУП.
4. Перечислите самые крупные интегрированные автоматизированные информационные системы (ИАИС).

5. Перечислите автоматизированные системы, выполняющие функции АСУП.

6. Укажите автоматизированные системы, выполняющие функции АСУТП.

7. Перечислите функции системы SCADA.

8. Перечислите известные SCADA-системы.

9. Опишите функции MES-систем.

10. В чем выражается интеграция АСУП и АСУТП?

11. Опишите историю развития логистических систем.

12. Дайте определение понятию «информационная логистика».

13. Укажите область применения информационной логистики.

14. Опишите порядок создания логистической системы для САПР.

15. Перечислите критерии классификации автоматизированных систем делопроизводства (АСД).

Опишите основные компоненты систем управления документами (СУД) и систем управления документооборотом (СДО).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели курс лекций, посвященных изучению основ дисциплины «Информационная поддержка мехатронных комплексов и производств», являющейся базовой составляющей более общей дисциплины «Проектирование мехатронных систем».

Данный курс лекций составляет в совокупности основу знаний в области информационного обеспечения разработки сложных (мехатронных) систем различного назначения и позволяет оценить роль информационного обеспечения при современном подходе к проектированию любых сложных технических систем.

Авторы не обещают, что прочитав эту книгу, студент сможет непосредственно притупить к разработке мехатронных систем (в лекциях основное внимание уделено только общим подходам к решению этой проблемы). Но авторы уверены, что студент будет подготовлен к дальнейшему самостоятельному углубленному изучению специальной технической литературы по всем аспектам, связанным с разработкой сложных технических и организационных систем.

Желаем вам больших успехов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Норенков И. П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И. П. Норенков, П. К. Кузьмик. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 320 с.
2. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
3. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов / И. П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2002. – 336 с.
4. Готлиб Б. М. Технология автоматизированного машиностроения : учеб. пособие : в 2 т. / Б. М. Готлиб, А. А. Вакалюк, М. Б. Готлиб. – Т. 2. Автоматизированные высокоэнергетические технологические процессы точного машиностроения. – Екатеринбург : УрГУПС. – 2012. – 230 с.
5. Юревич Е. И. Основы робототехники : учеб. пособие / Е. И. Юревич. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 308 с.
6. Черемных С. В. структурный анализ систем: IDEF-технологии / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С. Ручкин. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 208 с.
7. Леопенков А. В. Самоучитель UML / А. В. Леопенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 432 с.
8. Бенькович Е. С. Практическое моделирование динамических систем / Е. С. Бенькович, Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
9. Ли Кунву. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Ли Кунву. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
10. Тунаков А. П. САПР газотурбинных двигателей : учеб. пособие / А. П. Тунаков, И. А. Кривошеев, Д. А. Ахмедзянов. – Уфа : УГАТУ, 2005. – 272 с.
11. Кривошеев И. А. Формализация процесса проектирования и доводки двигателей с использованием CASE-технологии / И. А. Кривошеев. – М. : Изд-во «МАИ», 2008. – 128 с.

12. Лукинов А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств : учеб. пособие / А. П. Лукинов. – СПб. : Изд-во «Лань», 2012. – 608 с.
13. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение : учеб. пособие для студентов вузов / Ю. В. Подураев. – М. : Машиностроение, 2006. – 256 с.
14. Егоров О. Д. Мехатронные модули. Расчет и конструирование : учеб. пособие / О. Д. Егоров, Ю. В. Подураев. – М. : МГТУ «Станкин», 2004. – 360 с.
15. Марка Д. Методология структурного анализа и проектирования / Д. Марка, К. МакГоуэн. – М. : Метатехнология, 1992. – 239 с.
16. Файзрахманов Р. А. Структурно-функциональный подход к проектированию информационных технологий и автоматизированных систем с использованием CASE-средств / Р. А. Файзрахманов, К. А. Селезнев. – Пермь : ПГТУ, 2005. – 245 с.
17. Кривошеев И. А. Компьютерное моделирование в инновационном проектировании авиационных двигателей / И. А. Кривошеев, С. Г. Селиванов. – М. : Машиностроение, 2010. – 330 с.
18. Кульга К. С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технологической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством : монография / К. С. Кульга, И. А. Кривошеев. – М. : Машиностроение, 2011. – 377 с.
19. Кривошеев И. А. Общая структура автоматизированной разработки авиационных двигателей и энергоустановок / И. А. Кривошеев. – М. : Машиностроение, 2009. – 265 с.

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

С. Г. Паняк, Т. С. Бобина

УЧЕБНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА

Учебное пособие
для студентов специальности
21.05.04 – «Горное дело»

Екатеринбург
2020

УДК
ББК
Б

Р е ц е н з е н т : А. Б. Макаров, доцент кафедры геологии, поисков и разведки полезных ископаемых УГГУ

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Паняк С. Г., Бобина Т.С.

Учебная геологическая практика: Учебное пособие к первой учебной геологической практике по курсу «Геология» в окрестностях г. Екатеринбурга. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. 95 с.

Настоящее пособие состоит из трех частей. Первая часть содержит методику проведения учебной практики и правила техники безопасности. Во второй – описываются геологические процессы, формирующие основные структуры земной коры и различные формы рельефа поверхности. В третьей части приводится описание опорных геологических маршрутов – основных объектов полевых исследований.

Данное пособие предназначено для студентов специальности 21.05.04 – «Горное дело». Однако может быть использовано студентами других специальностей, походящих учебную геологическую практику в окрестностях г. Екатеринбурга. Пособие может быть полезным также для любителей камня, интересующихся природой и красотой родного края.

УДК
ББК

© Паняк С. Г., Бобина Т.С., 2020
© Уральский государственный горный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УЧЕБНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ .. 6
1.1. Организация практики, цели и задачи 6
1.2. Содержание практики 7
1.3. Правила техники безопасности 13
2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ФОРМИРОВАНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И РЕЛЬЕФА ЗЕМЛИ 19
2.1. Эндогенные процессы и их продукты 19
2.1.1. Магматизм и его продукты 19
2.1.2. Метаморфизм и его продукты 25
2.1.3. Тектоника 38
2.2. Экзогенные процессы 47
2.2.1. Литогенез 47
3. ОПИСАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ 60
3.1. По Уктусскому массиву 60
3.2. Елизаветинское месторождение 65
3.3. Шабровское рудное поле 69
3.4. Шиловское месторождение 76
3.5. Березовское рудное поле 80
3.6. Гора Хрустальная 83
3.7. Билимбаевское месторождение 88
3.8. Суффозионные процессы вдоль линий метро 92
ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА 94
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА 94

ВВЕДЕНИЕ

Учебная геологическая практика после первого курса является неотъемлемой и важнейшей частью высшего образования, способствует формированию у студентов практических профессиональных навыков. На практике студенты учатся наблюдать, документировать и обобщать геологические факты, что способствует закреплению пройденного материала по теоретическому курсу «Геология», «Динамическая геология». Кроме того, учебная практика играет важную роль в подготовке студентов к последующему изучению других специальных дисциплин, а также в трудовом воспитании, развитии чувства коллективизма, организаторских способностей.

При выборе места проведения практики и основных маршрутов выпускающая кафедра исходила из того, что наиболее удачным районом практики по динамической геологии является такой, где на относительно небольшой территории располагаются разнообразные геологические объекты. Их специфика определяется: 1 – сложным геологическим строением; 2 – продуктами различных процессов – магматизма, метаморфизма, тектоники; 3 – большим количеством разнообразных месторождений полезных ископаемых; 4 – выходами подземных вод; 5 – проявлениями опасных геологических и антропогенных процессов, включая жизнедеятельность человека. Таким районом с большим разнообразием процессов и их продуктов являются, прежде всего, окрестности г. Екатеринбурга.

Сам город Екатеринбург строился как город-крепость, для которого была необходима разведка новых полезных ископаемых. Многие из них эксплуатируются до сих пор. Район Екатеринбургского геологического полигона географически размещается в пределах лесной зоны, а в орографическом отношении охватывает зону главного водораздела и пологого восточного эродированного восточного склона Среднего Урала, и, частично, краевую зону Зауралья. Рельеф этого района грядовый, неравномерно всхолмленный, с общим понижением на восток, максимальная абсолютная отметка 545 м, относительные превышения 70-250 м.

Гидрографическая сеть представлена системой рр. Исети, Пышмы, Чусовой и их притоков, принадлежащих бассейнам рек Тобола и Камы. На реках Исети и Чусовой искусственно созданы крупные водоемы – оз. Исетское, Нижне-Исетский и Верх-Исетский пруды, Верхне-Макаровское и Волчихинское водохранилища. На площади имеются крупные естественные водоемы – озера Аятское, Таватуй, Щитовское, Балтым, Шарташ. Значительные площади, особенно в западной части района, заняты болотами. Территория Екатеринбургского геологического полигона являются частью одного из старейших горнорудных районов Урала, где и в настоящее время эксплуатируются месторождения коренного золота (Березовское, Крылатовское), россыпного золота (Чусовская группа), титаномагнетита (Первоуральск), благородного змеевика (Шабровская группа), мрамора (Мраморское, Шабровское), кирпичных глин и строительного камня. Район

густо населен и экономически развит, хорошо развиты пути сообщения: железные, шоссейные и улучшенные грунтовые дороги, благодаря чему большая часть района доступна для проведения геологических исследований. Многочисленные грунтовые дороги пригодны для проезда в сухое время года. Обнаженность района неравномерная и в целом удовлетворительная.

В настоящем пособии описаны геологические маршруты в окрестностях города Екатеринбурга, где можно увидеть результаты процессов, происходивших в далеком прошлом и зафиксированных в каменной книге. Маршруты открывают многообразие геологических процессов и их продуктов: хрупкие и пластические деформации, различные формы рельефа, магматические, метаморфические и осадочные породы, минералогические редкости, а также проявления оползней, карста, подтоплений и других опасных явлений.

Особый интерес для представителей студентов специальности «Прогнозирование и предупреждение опасных природных явлений» представляют отдельные формы эрозионного рельефа (речные террасы, долины, овраги), проявления тектоники (складки, разрывные нарушения), причудливые скальные городища, возникшие в результате выветривания и геологической деятельности ветра. Многие из этих геологических образований являются памятниками природы. К сожалению, человек нередко вносит изменения в природу, которые часто приводят к необратимым последствиям. Это необходимо иметь в виду при проведении маршрутов, чтобы не изуродовать скальные выходы при взятии образцов, иногда лучше зафиксировать объект на фотопленку, чем выколачивать его из скалы. Интересные объекты можно также зарисовать в пикетажную книжку, сохраняя их для будущих поколений.

Климат района континентальный. Среднегодовое количество осадков 450-550 мм, высота снежного покрова 0,4-0,6 м, глубина промерзания грунтов 0,5-2,0 м. Большая часть района покрыта хвойными, смешанными и лиственными лесами (сосна, лиственница, кедр, береза, осина).

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УЧЕБНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ

1.1. Организация практики, цели и задачи

Учебная геологическая практика после первого курса проводится в течение двух недель, состоит из нескольких этапов и заканчивается написанием отчета, который составляется составом бригады.

***Цель практики*:** Знакомство с результатами естественных геологических процессов в окрестностях г. Екатеринбурга путем их полевого наблюдения и документации. Овладение профессиональными навыками описания естественных и искусственных обнажений закрепляет теоретические знания, полученные в процессе изучения курсов «Геология» и «Динамическая геология».

***Задачи практики**:*

— знакомство с методиками полевых геологических, геоморфологических, и гидрогеологических наблюдений;

— обучение студентов методики работы с горным компасом;

— знакомство с методикой документации полевых объектов: естественных обнажений, опорных разрезов, горных выработок, особенностей рельефа местности и т. д.;

— обучение приемам камеральной обработки полевых материалов, оформлению геологического отчета с необходимыми графическими приложениями;

— знакомство с некоторыми промышленными предприятиями и их влиянием на среду обитания.

Студенты, прошедшие геологическую практику, должны:

— иметь представление об эндогенных и экзогенных геологических процессах, потенциально несущих угрозу катастроф;

— различать экзогенные процессы, которые в последнее время все больше стимулируются антропогенными факторами, связанными с деятельностью человека;

— уметь делать предварительную оценку возможных потенциальных катастроф, связанных с теми или иными экзогенными, эндогенными и антропогенными процессами в районе практики.

После завершения практики студенты должны уметь:

— различать между собой магматические, метаморфические и осадочные породы;

— наблюдать и документировать обнажения горных пород;

— уметь вести абрис маршрута;

— вести дневник наблюдений (пикетажную книжку);

— отбирать образцы пород и вести их каталог;

— замерять элементы залегания слоистости, трещиноватости, сланцеватости;

— работать с горным компасом, составлять с его помощью фрагментарные схемы и планы, разрезы;

— анализировать геологические структуры, возрастные взаимоотношения различных геологических образований, как в обнажениях, так и на картах.

Таким образом, в результате освоения задач практики студенты должны получить:

— общекультурные компетенции ОК-6,7,8,10,11;

— профессиональные компетенции ПК-1,2,3,4,8,17,18.

1.2. Содержание практики

Геологическая практика проводится сотрудниками кафедры Геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях. Как и любые другие полевые геологические исследования, она состоит из трех основных этапов – подготовительного, полевого и камерального.

Подготовительный этап

П о д г о т о в и т е л ь н ы й э т а п продолжается один день, в течении которого со студентами проводятся лекции о целях и задачах практики, формируются учебные бригады из 4-5 человек, выбирается бригадир, готовится и выдается полевое снаряжение (рюкзак, полевая сумка, мешочки под образцы, компас, фотоаппарат, рулетка, геологический молоток, лупа, складной нож, ручка, карандаш, линейка, медицинская аптечка), а также документы (карты, полевой дневник, журнал образцов, этикетки). Перечисленным снаряжением и документами должна располагать каждая учебная бригада, полевой дневник должен иметь каждый студент для самостоятельного ведения записей и зарисовок обнажений.

Для успешного проведения учебной геологической практики необходимо осуществить ряд мероприятий, направленных на строгое выполнение правил техники безопасности в полевых условиях. Прежде всего, нужно организовать медицинский осмотр студентов, которые будут проходить практику, сделать предохранительные прививки. Эти мероприятия осуществляются до экзаменационной сессии в течение учебного семестра. Вторым обязательным мероприятием является ознакомление студентов с правилами безопасности и трудовой дисциплины. Студенты, сдавшие зачет по технике безопасности, расписываются в соответствующей ведомости, удостоверяя, тем самым, что они знакомы с правилами безопасности и дисциплины на учебной практике. Особое внимание в правилах техники безопасности уделяется следующим разделам:

- организация полевого лагеря;
- ведение маршрута;
- работа в горной местности;
- работа в карстовых областях;
- переправа через водные преграды;
- использование автотранспорта;
- пртивоэнцефалитная подготовка;
- обеспечение питьевой водой;
- оказание до врачебной помощи;
- правила передвижения группами по городским улицам и автомобильным дорогам;
- правила поведения в общественном транспорте.

В подготовительный период студентам читаются лекции о геологическом строении окрестностей г. Екатеринбурга, истории его геологического развития, а также знакомят с коллекцией образцов данного района.

Полевой период

В полевой период проводятся полевые маршруты на хорошо вскрыытых природных обнажениях, а также на участках с проявлениями антропогенного влияния на устойчивость промышленных и хозяйственных объектов.

Первые маршруты предусматривают усвоение студентами общих навыков работы в полевых условиях. С этой целью преподаватели рассказывают о методике полевых геологических наблюдений, показывают следствия их проявлений на рельефе местности.

Выполнение маршрутного задания зависит, прежде всего, от четкой организации работы студенческих бригад в полевых условиях. Этому способствует предварительное распределение обязанностей между членами бригады перед очередным маршрутом. В каждом маршруте посменно одни студенты отвечают за один из участков работы, на следующий день они отвечают за другой и т. д.

Объем геологической информации возрастает от маршрута к маршруту. Своевременная обработка этого материала определяет качество итоговых геологических документов, в связи, с чем эту работу следует проводить до периода составления отчета.

Основная форма проведения полевых геологических наблюдений – маршруты, которые являются составной частью учебного процесса практики. Количество их и содержание определяются целями и задачами, планом обучения и программой геологической практики с учетом специфики специальности.

Практически во всех случаях маршруты являются комплексными, когда одновременно ведутся наблюдения над несколькими процессами и объектами. Целесообразность таких маршрутов обусловлена выявлением взаимосвязи

отдельных геологических процессов и явлений. Например, в одном маршруте полезно проследить связи между формами рельефа, литологией пород и тектоникой района, выходами подземных вод на поверхность и определенным стратиграфическим горизонтом, выветриванием и составом горных пород.

Необходимо особо подчеркнуть, что геологические наблюдения в маршруте должны вестись непрерывно.

Основная работа в маршрутах – изучение горных пород, описание результатов тектонических, геоморфологических и других процессов, включая опасные. Записи проводятся на специальных остановках – точках наблюдения (Т.Н.). По характеру изучаемых явлений «Т.Н.» можно условно разделить на три вида. На одних проводится изучение и описание геолого-географических особенностей (тектоники, рельефа, деятельности подземных и поверхностных вод, выветривания и т. д.); на других - изучение и описание горных пород и условий их залегания в обнажениях; и, наконец, на третьих – (наиболее частый случай) исследуются и те и другие вопросы одновременно. Остановка на «Т.Н.» даже на небольшом объекте отнимает много времени, поэтому нужно выбирать каждую точку так, чтобы была возможность изучать наибольшее число объектов и явлений.

При остановке на «Т.Н.» прежде всего, следует сориентироваться по сторонам света (с использованием компаса, по солнцу, или другому способу) и определить нахождение точки на карте и местности, т. е. дать ее адрес. Определение местонахождения производится методом засечек по азимутам на хорошо заметные элементы рельефа, гидрографии и т. д. или методом глазомерной привязки точки по азимуту и расстоянию, определяемому, например, шагами. После привязки наносят местонахождение данной точки на карту под соответствующим номером (нумерация точек наблюдения должна быть сквозной). Сегодня следует осваивать переходить на новейшие методики ориентации на местности – ГЛОНАС и GPS.

Изучая на точке наблюдения геологическое строение отдельного участка, целесообразно, прежде всего, описать общегеологические явления – геоморфологию, гидрографию, тектонику и т. д. Переходя к конкретному описанию пород обнажения, прежде всего, отмечают его размер по высоте и ширине, а также тип (обрывистый склон, скальный выход на склоне, обнажение в русле рек, стенка карьера, элювиальный развал и т. д.). После этого приступают к описанию пород. В зависимости от целей и задач такое описание дается либо в общем виде, либо более подробно и послойно, либо по отдельным пачкам. В последнем случае лучше описывать слои и пачки снизу вверх.

В описании пород должна быть приведена сжатая характеристика их отличительных генетических свойств: текстура, структура, минеральный состав, тектонические дислокации и т. д. В описании указываются элементы залегания пород, их слоистости, сланцеватости, крыльев складок, плоскостей сместителей и т. д. Отмечаются места отбора образцов и их нумерация. На

левой стороне пикетажной книжки приводятся зарисовки и указываются места фотоиллюстраций.

При описании породы рекомендуется следующий порядок работы на обнажении. Прежде всего, следует внимательно осмотреть обнажение, отобрать серию образцов, определить все имеющиеся здесь породы, выделить отдельные пласты, магматические тела, метасоматические зоны, контакты. Определить элементы залегания. При этом руководитель контролирует и направляет работу отдельных студентов и всей группы для того, чтобы прояснилась общая картина обнажения. После этого делают полное описание, а затем схематическую зарисовку обнажения, которая дублируется фотографированием. При необходимости делают зарисовки и фотографии деталей обнажения.

В первых маршрутах и при изучении принципиально новых объектов преподаватель должен сам давать соответствующие описания. Позднее, когда студенты овладеют соответствующими навыками и усвоят общую схему описания, можно поручить одному из них рассказать о том, что он мог бы написать в своем полевом дневнике на данной «Т.Н.». Остальные студенты делают свои замечания и дополнения и, наконец, преподаватель обобщает все сказанное и формулирует итоги для общей записи.

Ниже приведены лишь наиболее важные методические положения из этой области.

Основные правила ведения первичной документации

Формы первичной документации включают:

1 – дневники, полевые книжки;

2 – журналы документации горных выработок;

3 – журналы образцов, проб и т. д.;

4 – этикетки;

5 – зарисовки обнажений, горных выработок;

6 – фотографии естественных и искусственных обнажений.

В процессе документации исполнитель обязан придерживаться следующих правил:

1 – все записи ведутся максимально разборчиво;

2 – записи должны выполняться по одинаковой схеме;

3 – записи должны вестись карандашом или чернилами, которые не расплываются во влажных условиях;

4 – записные книжки или дневники должны иметь сквозную нумерацию листов.

Ниже приведены основные правила ведения дневников (полевых книжек).

Дневник (полевая книжка) – основной первичный документ регистрации геологических наблюдений всех видов (собственно геологических, поисковых,

геоморфологических и т. п.). Он изготовляется в виде книжки в твёрдом переплёте, покрытом дерматином или другим материалом, предохраняющим его от сырости, механических и иных повреждений. На случай потери рекомендуется использование материалов яркого цвета, хорошо заметных на фоне растительного и почвенного покрова.

На третьей странице обложки помещается карман. С внутренней стороны клапана располагается держатель для карандаша (ручки).

Формат книжки допускается в пределах от 10-12 х 15-18 см (для кармана одежды) до 13-15 х 20-22 см (для полевой сумки). Большие форматы не рекомендуются вследствие неудобства для использования в маршруте, меньшие – как неоправданно дробящие запись на чрезмерно короткие строки и затрудняющие её чтение.

Рекомендуемый объём дневника – 100–130 листов. Дневник должен изготовляться из писчей бумаги, 6-10 листов миллиметровки и нескольких листов кальки.

Титульный лист дневника должен содержать название организаций, экспедиций (партий, отрядов), фамилию, имя, отчество исследователя, даты начала и окончания дневника, номера точек наблюдения и адрес, по которому следует вернуть утерянный дневник.

На обороте титульного листа помещается оглавление дневника.

На первой странице дневнике помещаются условные обозначения к зарисовкам, список сокращений, принятых в тексте, и необходимые замечания. Далее при необходимости могут быть помещены вспомогательные таблицы (определение истиной мощности и глубины залегания наклонных пластов, поправки к углам падения при пересечениях, не перпендикулярных к простиранию пластов и др.) и необходимые пояснения к ним.

На правой стороне дневника ведётся запись наблюдений. Здесь же отмечаются взятые пробы, образцы и другие виды каменного материала.

Перед описанием маршрута, разреза и т. п. указываются день, месяц, год и цель работы. Описание каждой точки наблюдения начинается с красной строки. Привязка точки к местности или предыдущей точке помещается рядом с её номером и образует вместе с ним отдельную точку или абзац. Номера точек наблюдения рекомендуется выделить прямоугольными рамками (в примерах выделены полужирным шрифтом), номера образцов и проб и т. п. подчёркиваются или заключаются в овальную рамку. Измерения элементов залегания, радиоактивности, содержания химических элементов и т. п. выделяются отдельной строкой.

На левой стороне дневника помещаются вспомогательные записи, облегчающие пользование документацией. На неё выносятся все номера образцов, проб и других видов каменного материала, номера фотографий (с указанием их содержания), могут выноситься также элементы залегания. На этой же стороне помещаются зарисовки геологических объектов и их деталей, а также различные схемы для обнажений (отбора образцов и проб, расположение рисунков и фотографий и т. п.) или участков (расположении е геологических

тел на местности, кроки местности с расположением обнажений, горных выработок и т. п.). Здесь же излагаются предположения и соображения исследования, возникающие в процессе наблюдения, но требующие подтверждения или детализации.

В конце описания каждого маршрута должны быть приведены основные выводы исследователя и протяжённость маршрута в километрах.

Законченный дневник подписывается исполнителем, проверяется и подписывается начальником партии (отряда, участка).

Камеральный этап

К а м е р а л ь н ы й э т а п проводится последовательно после завершения одного или двух маршрутов и включает в себя время на обработку полевых материалов, составление отчета и его защиту.

В камеральный этап выполняются следующие виды работ:

- обработка полевых книжек;
- занесение в каталог образцов отобранных проб;
- оформление рисунков к отчету;
- изготовление и описание разрезов, схем и карт;
- изготовление фотографий и вынесение на них геологической информации;
- окончательное уточнение полевых определений горных пород, составление рабочей коллекции каменного материала;
- написание и оформление отчета;
- защита отчета.

Главная цель написания отчета – овладение анализом и обобщением геологических наблюдений и умение грамотно изложить результаты такого обобщения. При этом вырабатываются навыки правильного оформления отчетов, подбора и изготовления графических приложений, составление списка литературы и т. д. Поскольку цель настоящей практики состоит в закреплении теоретических знаний по курсу «Динамическая геология», то вопросам динамики эндогенных и экзогенных процессов, деформаций пород, формам рельефа, гидрогеологическим особенностям района работ необходимо уделить максимальное внимание.

Повышенные требования к методике наблюдения природных объектов и их документации особенно важны для будущих специалистов в области защиты в чрезвычайных ситуациях, поскольку они обязаны не только фиксировать природные и техногенные процессы, но научиться их прогнозировать.

1.3. Правила техники безопасности

Введение

Настоящая инструкция по технике безопасности предназначена для студентов, проходящих учебную геологическую практику в окрестностях г. Екатеринбурга. Опыт показывает, что незнание правил техники безопасности, пренебрежение элементарными правилами влекут за собой несчастные случаи.

Молодые люди, юноши и девушки, решив посвятить свою жизнь трудной профессии должны отчетливо представлять свою будущую специальность. Полевые исследования выполняются в различных природных и климатических условиях. Они требуют от человека физической выносливости, самообладания, умения в сложных условиях, в любой обстановке не теряться. Поэтому подготавливать свой организм, воспитывать в себе необходимые качества и навыки студент должен с первого курса. Участие в экскурсиях, геологических и туристических походах помогает закрепить и приобретать навыки полевой жизни. В этом случае студент на самостоятельной работе будет физически вынослив и морально подготовлен. Очень важным является то, что для успешного выполнения программы геологической практики необходимо знание и умение соблюдать на практике правила личной гигиены и правила безопасности ведения работ.

В данной инструкции приводятся основные положения Правил безопасности при полевых работах.

1. Общие правила безопасности

Геологическая практика должна проводиться по утвержденным в установленном порядке программам, в которых предусматриваются мероприятия по технике безопасности с учетом местных условий в соответствии с настоящей Инструкцией.

Перед геологической практикой все студенты должны пройти медицинское освидетельствование и сделать предохранительные прививки против энцефалита.

Руководители практики перед ее началом обязаны провести специальный инструктаж всех студентов об условиях практики, правилам безопасности и дисциплине. Врач проводит инструктаж об оказании необходимой медицинской помощи на маршруте. О прохождении инструктажа каждый студент расписывается в «Книге регистрации обучения и инструктирования студентов по технике безопасности». В процессе проведения полевых работ руководители групп должны также систематически проводить дополнительный инструктаж о мерах предотвращения наиболее вероятных для данного района работ опасностей и несчастных случаев.

Каждый работающий, заметивший опасность, угрожающую людям, обязан принять зависящие от него меры для ее устранения и немедленно сообщить об этом своему непосредственному руководителю. Руководитель обязан принять меры к устранению опасности; при невозможности устранения опасности – прекратить работы, вывести работающих в безопасное место.

Запрещается во время работы и во время перерывов располагаться в траве, кустарнике и других, не просматриваемых местах, если на участке работ используются транспортные средства.

Запрещается допускать к работе лиц в состоянии алкогольного, наркотического или токсического опьянения, а также в болезненном состоянии.

2. Требования безопасности работы в маршрутах

Перед выходом группы в маршрут руководитель группы обязан:

а) проверить готовность группы к маршруту (обеспеченность ее топоосновой, снаряжением, продовольствием, инструментом, защитными и спасательными средствами);

б) дать указание старосте о порядке проведения маршрута, о правилах передвижения применительно к местным условиям;

в) нанести на свою карту линию намеченного маршрута группы.

В дни, когда по прогнозу погоды затяжной дождь, сильный ветер, то выходить в маршруты запрещается. Если затяжной дождь, густой туман застают группу в пути, необходимо прервать маршрут, укрыться в безопасном месте и переждать непогоду.

2.1. Порядок передвижения в маршрутах

Движение группы должно быть компактным, обеспечивающим постоянную зрительную или голосовую связь между людьми и возможность взаимной помощи. При отставании кого-либо из участников маршрута с потерей видимости или голосовой связи, старший группы обязан остановить движение и подождать отставшего.

При ухудшении метеорологической обстановки (снегопад, гроза, густой туман и т.п.), появлении признаков пожара, при агрессивном поведении хищных зверей следует прекратить маршрут и принять меры, обеспечивающие безопасность работающих.

В маршрутах каждому студенту рекомендуется надевать яркий шарф, косынку или рубашку для обеспечения лучшей взаимной видимости.

Запрещается употреблять в пищу неизвестные грибы, ягоды и рыбу во избежание возможного отравления.

Использование для питьевой воды минеральных источников, бальнеологические свойства которых неизвестны, запрещается, не рекомендуется также купаться в них.

При передвижении и на привалах необходимо соблюдать питьевой режим в соответствии с разделом 4 «Инструкции по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве». Пить сырую воду из луж, ям и других поверхностных водоемов запрещается. Употребление сырой воды для питья допускается только с разрешения санитарно-противоэпидемической службы.

Особое внимание в маршрутах необходимо уделять мерам предупреждения тепловых и солнечных ударов. В жаркие безветренные дни работать с непокрытой головой не разрешается.

Одежда не должна стеснять движений при работе, обувь обязательно подбираться по ноге.

Для защиты от кровососущих насекомых рекомендуется надевать накомарники или периодически смазывать лицо, шею, руки репеллентами.

В маршруте каждый студент должен иметь нож, индивидуальный перевязочный пакет и запасную коробку спичек в непромокаемом чехле.

Перевозить и переносить острые колющие инструменты (топоры, пилы, ножи и пр.) следует в предохранительных чехлах или в обертке.

2.2. Маршруты в сложных условиях, в горных местностях

При движении и работе на скалах сбрасывать камни и отваливать неустойчивые глыбы без надобности запрещается.

При передвижении по узким тропам и карнизам выступы камней, корни деревьев и т. п. следует обходить очень осторожно, т. к. при резких поворотах можно зацепиться рюкзаком, потерять равновесие и сорваться с обрыва. В таких условиях ремни рюкзаков должны быть ослаблены, связывать их на груди запрещается.

При работе на обрывистых и крутых (более 30^{o}) склонах при отсутствии необходимой опоры следует организовать взаимную страховку работающих.

При движении по осыпям и скалам всегда следует иметь в виду возможность срыва сверху камней и каменных лавин. В таких местах, особенно с карнизными скальными развалами, в узких ущельях со слабоустойчивыми стенками и нависшими каменными глыбами, срыв камней может быть вызван звуком. Поэтому крики без надобности в подобных условиях запрещаются.

Выходить на скальные карнизы, на края обрывов и крутых склонов без соответствующей страховки запрещается.

Подниматься и спускаться по крутым склонам и осыпям следует длинными зигзагами («серпантином»). Подъем вверх «в лоб» и спуск прямо во избежание травмирования камнями идущих ниже не рекомендуется. В случае вынужденного движения таким способом необходимо держаться на максимально близком расстоянии друг от друга.

Подъем и спуск по крутым склонам должны производиться с обязательной взаимопомощью.

При подъеме на гору в залесенной местности, а также при передвижении в густых кустарниках расстояние между людьми должно быть не менее 3 м во избежание травмирования ветками идущего следом.

Подъем и спуск по крутым склонам в местах, где водятся ядовитые паукообразные и змеи, должны проводиться особенно осторожно во избежание внезапного укуса.

2.3. Маршруты в сложных условиях: в речных долинах и оврагах

При работе в речных долинах и оврагах с крутыми обрывистыми склонами передвижение и осмотр обнажений (во избежание опасности обвала, оплыва, падения камней и деревьев) должны производиться очень осторожно.

В случае внезапных грозовых ливней работа в овраге должна быть немедленно прекращена.

Запрещается движение вблизи кромки берегового обрыва.

При передвижении по долинам рек, особенно в местах впадения притоков со спокойным течением, илистые и заболоченные участки следует по возможности обходить или преодолевать их с помощью охранных средств (веревки, шесты, настилы).

2.4. Маршруты в сложных условиях; в лесных районах

При проведении маршрутов в лесу особенно строго должны соблюдаться правила зрительной и голосовой связи.

Передвижение через лесные завалы разрешается только с соблюдением соответствующих мер предосторожности

На участках, заросшей высокой и густой травой, рекомендуется начинать работу после высыхания росы.

При работе в лесу следует строго соблюдать меры пожарной безопасности.

Бросать в лесу непотушенные спички и окурки запрещается. Костры разрешается разводить лишь в местах, где исключена возможность возникновения пожара.

При малейшем признаке лесного пожара (запах дыма, гари, бег зверей и полет птиц в одном направлении) группа должна выйти к ближайшей речной долине или поляне.

При возникновении пожара необходимо приступить к его тушению с помощью всех имеющихся средств и одновременно сообщить об этом местным органам власти.

При передвижении по горелым лесам и торфяникам следует соблюдать особую осторожность.

При проведении маршрутов в местах распространения энцефалитных клещей рекомендуется плотно застегивать одежду и 3-4 раза в день осматривать тело и одежду.

Запрещается:

а) работать в зоне возможного падения сухостойных деревьев;

б) передвигаться по участкам леса с сухостойными деревьями во время сильного ветра;

в) ударять по сухостойным деревьям инструментом, рукой и т. п.;

г) укрываться во время грозы под высокими и отдельно стоящими деревьями.

2.5. Маршруты в сложных условиях: карст

При движении по закарстованным площадям следует обходить блюдцеобразные и воронкообразные впадины.

Запрещается:

а) производить обследование вновь обнаруженных карстовых пустот;

б) разводить костры перед входом в пещеру.

2.6. Опробование

При отборе образцов в выработках должны применяться меры по защите от падения кусков породы со склона и бортов выработки.

При одновременной работе двух или более пробоотборщиков на одном уступе расстояние между участками их работ должно быть не менее 1,5м.

3. Требования безопасности в аварийных ситуациях

3.1. Если произошел несчастный случай или студент почувствовал недомогание, то следует:

— прекратить работу, сохранить обстановку места происшествия, если это не представляет опасности для окружающих;

— сообщить руководителю, вызвать скорую помощь.

3.2. При получении травмы оказать первую помощь пострадавшему, сообщить руководителю, при необходимости вызвать скорую помощь или отправить пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение. Для оказания первой помощи при ранениях и кровотечениях необходимо на рану наложить стерильный бинт, предварительно смазать настойкой йода очищенный от грязи участок вокруг раны. При сильном кровотечении необходимо наложить выше раны жгут не более, чем на 1.0 - 1.5 часа.

3.3. При возникновении пожара немедленно сообщить о нем преподавателю и в пожарную часть, известить руководителя практики, обезопасить людей и приступить к тушению очага возгорания с помощью первичных средств пожаротушения.

3.4. При обнаружении опасных ситуаций (оголенный электрический провод), оградить опасную зону и сообщить руководителю.

4. Требования безопасности по окончании практической работы

4.1. Привести в порядок снаряжение и другие принадлежности.

4.2. Провести мероприятия личной гигиены. Провести осмотр всех участников экскурсии на предмет обнаружения клещей.

4.3. Организованно пройти на автобусную остановку для возврата в город.

4.4. Ожидать транспорт разрешается только на посадочных площадках, а при их отсутствии – на тротуаре или обочине.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ФОРМИРОВАНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И РЕЛЬЕФА ЗЕМЛИ

Облик Земли в ходе ее развития непрерывно изменяется в результате разнообразных геологических процессов. Многие из них протекают настолько медленно, что человек за всю свою жизнь не может обнаружить каких-либо существенных изменений. Но когда процессы действуют в течение длительных отрезков геологического времени, исчисляемых миллионами лет, они приводят к крупным преобразованиям лика Земли. Другие процессы, например извержения вулканов, землетрясения, протекают быстро, и их проявления можно наблюдать непосредственно. Созидающие и разрушающие геологические процессы вызываются различными источниками энергии.

Одни из них связаны с силами, действующими внутри Земли, и называются процессами внутренней динамики или ***э н д о г е н н ы м и*** (от греческого «эндо» – внутри). Другие проявляются на поверхности Земли и в верхних частях земной коры и связаны с воздействием внешних по отношению к земной коре факторов. Эти процессы называются ***э к з о г е н н ы м и*** (от греческого «экзо» – внешний). В результате взаимодействия внешних и внутренних процессов формируется рельеф Земли (горы, равнины, ущелья, речные террасы).

2.1. Эндогенные процессы и их продукты

К эндогенным относят процессы, протекающие преимущественно внутри Земли, однако главным их признаком являются источники энергии, за счет которых они развиваются. Главным источником внутренней энергии считают гравитационный, второстепенными – радиоактивный и ротационный. К эндогенным процессам, например, относят формирование эффузивных пород, хотя застывание лавовых потоков происходит на дневной поверхности. К эндогенным относят магматические процессы, метаморфические преобразования пород, а также процессы движения литосферных плит (тектонику).

2.1.1. Магматизм и его продукты

Под магматизмом понимают совокупность геологических процессов, связанных с деятельностью магмы и ее производными. Магма представляет собой высокотемпературный расплав (800-1500 градусов Цельсия), возникающий в астеносфере. В силу определенных физико-химических процессов расплав может оставаться на месте его рождения или подниматься по подводящим каналам на дневную поверхность.

В случае если магматический расплав достигает поверхности, после его остывания образуются так называемые *эффузивные породы* (от «эффузио» –

излияние). Сама магма при достижении поверхности называется лавой. Всю совокупность процессов, связанных с магматической деятельностью и протекающих на дневной поверхности, называют вулканизмом или эффузивным магматизмом.

Различия в химическом составе эффузивных и интрузивных пород незначительны. Значимые различия ощущаются лишь в содержании газов, которые при снижении давления в приповерхностных условиях из лавовых потоков быстро удаляются. В верхних частях таких потоков их остатки иногда сохраняются в виде газовых пузырьков.

Химический состав магматических пород определяют около 10-ти основных (породообразующих) компонентов. Однако ведущую роль в составе магмы играет компонент кремнезем – SiO_2, его количество, определяет минеральный состав пород, а также их классификацию. В магматических породах содержание кремнезема колеблется в пределах 35-75 %. Все породообразующие минералы магматических пород являются силикатами, т. е. соединениями разных химических элементов с кремнеземом. Такие соединения с кремнеземом образуют: Al_2O_3, Fe_2O_3, FeO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, TiO_2, MnO, H_2O.

Кроме главных (породообразующих) компонентов магматические породы могут содержать другие химические элементы, называемые редкими, их содержание обычно не превышает 1 %.

Все многообразие магматических горных пород представляет собой комбинацию одного или нескольких упомянутых выше химических компонентов, образующих один из семи породообразующих минералов (силикатов): оливин, пироксен, роговая обманка, слюда (темноцветные минералы), а также плагиоклаз, калиевый полевой шпат, кварц (светлоокрашенные минералы). Если горная порода состоит из одного минерала, то она называется ***мономинеральной***, если из нескольких – ***полиминеральной***.

Классификация магматических пород основана на их химическом, а значит минеральном составе. Все магматические породы разделяются по содержанию кремнезема (SiO_2) на 4 класса:

- кислые – более 63 %,
- средние – 52-63 %,
- основные – 45-52 %,
- ультраосновные – менее 45 %.

Максимальное количество кремнезема содержится, естественно, в кварце (100 %), минимальное – в оливине (40 %).

Минеральный состав магматических пород является отражением их химического состава. Например, кислые породы состоят из минералов с наибольшим содержанием SiO_2, а ультраосновные – с наименьшим. Исходя из этих соображений, минеральный состав различных классов магматических пород будет следующим:

К и с л ы е – кварц, полевые шпаты (кислые плагиоклазы, калиевые полевые шпаты), биотит.

С р е д н и е – полевые шпаты (средние плагиоклазы), роговая обманка.

О с н о в н ы е – полевые шпаты (основные плагиоклазы), пироксен.

У л ь т р а о с н о в н ы е – оливин, пироксен, редко роговая обманка.

Так как в природе не бывает дискретных (четко ограниченных) составов по химизму и минеральному составу, то выделяют промежуточные породы:

- гранодиорит (между гранитом и диоритом),
- граносиенит (между гранитом и сиенитом),
- габбро-диорит (между габбро и диоритом).

Выделение их визуально основано на совместном присутствии в породе двух темноцветных минералов. Например, у гранодиорита и граносиенита одновременно присутствуют роговая обманка и биотит, а у габбро-диорита – пироксен и роговая обманка.

Необходимо также знать еще некоторые правила:

1. В кислых породах в обязательном порядке присутствует кварц, с переходом к породам среднего состава его содержание постепенно приближается к нулю, а темноцветный минерал слюда сменяется роговой обманкой.

2. В средних породах темноцветом выступает роговая обманка, которая доминирует и в диоритах и в сиенитах. Различие между диоритом и сиенитом в соотношении полевых шпатов: в диоритах доминирует плагиоклаз, а в сиенитах – два полевых шпата (плагиоклаз и калишпат).

3. В основных породах темноцветом является пироксен, который при приближении состава породы к среднему может частично замещаться роговой обманкой. При смещении состава в сторону ультраосновных пород темноцветы могут быть представлены, кроме пироксена, оливином.

4. В состав ультраосновных пород не входят светлые минералы. В них доминирует, как правило, оливин и пироксен.

Если минеральный состав определить сложно вследствие очень мелкого размера зерен, класс породы определяется по ее цвету: кислые породы обладают светлой окраской, средние – серой, основные – темной (черной), иногда со светлыми пятнами, ультраосновные – только черной.

Таким образом, магматическая порода определяется в следующей последовательности: сначала по структурно-текстурным особенностям определяется генезис (условия образования), т. е. принадлежность к глубинным, плутоническим (интрузивным) или поверхностным, вулканическим (эффузивным) образованиям. Затем по минеральному составу устанавливается ее наименование (см. табл.1).

Трудности возникают с диагностикой магматических пород при изучении вулканических пород, когда в них выкристаллизованными могут быть: один, два или три минерала. Иногда таких минералов нет вообще, например, в обсидиане (вулканическом стекле). В некоторых случаях окончательная

диагностика возможна только с использованием микроскопических или химических исследований, что не входит в круг наших задач.

Среди плутонических пород следует выделять разновидность жильных или гипабиссальных образований, которые формируются в полуглубинных или малоглубинных условиях и выполняют трещины в земной коре. По условиям формирования (температура, давление, скорость остывания) они занимают промежуточное положение между глубинными интрузиями (плутонами), и поверхностными покровами (эффузивами). Для них наиболее часто употребляются комбинированные названия: гранит-порфир, сиенит-порфир.

Таблица 1

Классификация магматических горных пород

Тип породы по содержанию SiO_2		**Интрузивные породы**	**Эффузивные породы**	**Породообразующие минералы**
Кислые (более 65 %)		Гранит	Риолит, липарит	Кварц, калишпат, кислый плагиоклаз, биотит
Средние (65-53%)	Щелочной ряд	Сиенит	Трахит	Калишпат, средние плагиоклазы, роговая обманка
	Нормальный ряд	Диорит	Андезит	Средние плагиоклазы, роговая обманка
Основные (53-44 %)		Габбро	Базальт	Основные плагиоклазы, пироксен
Ультраосновные (менее 44 %)		Пироксенит	Редко пикриты, коматииты	Пироксен
		Перидотит		Пироксен, оливин
		Дунит, оливинит		Оливин

Текстуры и структуры пород

Текстуры магматических пород разделяются по степени и характеру заполнения пространства минеральным веществом. Различают следующие текстуры:

м а с с и в н а я – обусловлена компактным, плотным и однородным сложением составляющих породу минералов;

п о р и с т а я – определяется наличием округлых или неправильной формы пустот размером 1-10 мм;

н о з д р е в а т а я – определяется наличием округлых или неправильной формы пустот размером более 10 мм;

м и к р о п о р и с т а я – определяется наличием округлых или неправильной формы, невидимых для невооруженного глаза, пустот размером менее 0,1 мм;

м и н д а л е к а м е н н а я – образуется при заполнении пустот вторичными минералами (кальцитом, опалом, халцедоном, хлоритом). От пористой текстуры миндалекаменная отличается лишь тем, что мы имеем дело с заполненными пустотами.

Структуры магматических пород обусловлены степенью кристалличности, а также наличием или отсутствием вулканического стекла. Выделяют следующие структуры:

п о л н о к р и с т а л л и ч е с к а я - порода полностью сложена кристаллическими зернами;

п о р ф и р о в а я – порода сложена крупными и мелкими зернами и вулканическим стеклом (крупные кристаллы называют *п о р ф и р о в ы м и в к р а п л е н н и к а м и* , а мелкие в совокупности с нераскристаллизованным стеклом – *о с н о в н о й м а с с о й*);

с к р ы т о к р и с т а л л и ч е с к а я (афировая)– обусловлена наличием в породе очень мелких, различимых только под микроскопом, кристаллов и вулканического стекла;

с т е к л о в а т а я – возникает, когда вулканическая лава застывает в водной среде, не успевая раскристаллизоваться.

Основные разновидности магматических пород

Кислые породы

Г р а н и т – плутоническая или интрузивная порода с массивной текстурой и полнокристаллической, от мелко- до крупнокристаллической, структурой. Минеральный состав: кварц, калиевый полевой шпат, кислые плагиоклазы, биотит. Наличие кварца в породе является главным признаком кислых пород. Зерна кварца характеризуются жирным стеклянным блеском, дымчато-серым цветом, отсутствием спайности.

Р и о л и т (липарит) – эффузивный аналог гранита. Имеет мелкопористую текстуру и порфировую структуру: на фоне светлой скрытокристаллической основной массы выделяются мелкие вкрапленники кварца, калиевого полевого шпата, плагиоклаза. Темноцветные минералы встречаются редко, представлены биотитом, реже игольчатыми кристаллами роговой обманки.

О б с и д и а н – застывшее вулканическое стекло. Текстура массивная, иногда флюидальная (со следами течения), структура стекловатая. Чаще всего встречаются обсидианы кислого состава, но имеются также стекла основного и среднего состава. Цвет у них различный: серый, бурый, черный. Образуются при быстром застывании излившейся на поверхность магмы.

П е м з а – «вспененное» стекло; текстура пористая, структура стекловатая. Образуется при быстром затвердевании бурно вскипающей богатой газами и парами лавы. По химическому составу пемзы обычно кислого состава, редко отмечаются разновидности среднего и основного состава.

Средние породы

В этом классе выделяются два ряда – щелочной и нормальный. Породы щелочного ряда характеризуются наличием большого количества калиевого полевого шпата, который доминирует над плагиоклазом. В породах нормального ряда резко доминирует плагиоклаз.

Щелочной ряд

С и е н и т – плутоническая или интрузивная порода; текстура массивная, структура полнокристаллическая. Состоит из калиевого полевого шпата, плагиоклазов (кислых и средних) и роговой обманки, количество которой колеблется от 10 до 20 %.

Т р а х и т – эффузивный аналог сиенита. Текстура тонкопористая, обуславливающая шероховатость породы на ощупь; структура мелкопорфировая, во вкрапленниках желто-розовые калиевые полевые шпаты и один или несколько темноцветных минералов (чешуйчатый биотит и игольчатая роговая обманка). В трахитах часто наблюдаются текстуры течения, т. е. взаимопараллельное расположение игольчатых минералов.

Нормальный ряд

Д и о р и т – плутоническая (интрузивная) порода. Текстура массивная, структура полнокристаллическая. Минеральный состав: средний плагиоклаз, (60-65 %) и роговая обманка (30-35 %). Плагиоклаз образует белые или зеленовато-серые зерна неправильной формы; роговая обманка – в виде черных, удлиненной формы кристаллов.

А н д е з и т – эффузивный аналог диорита. Текстура пористая, структура скрытокристаллическая, поэтому минеральный состав не определяется визуально. Класс породы устанавливается по ее цвету – андезит имеет цвет от светло-серого до серого. Иногда структура породы мелкопорфировая, тогда во вкрапленниках содержатся мелкие прямоугольные кристаллы среднего плагиоклаза серого цвета.

Основные породы

Г а б б р о – плутоническая (интрузивная порода). Текстура массивная, структура полнокристаллическая, часто крупно- или гигантозернистая. Состоит из белых или зеленовато-серых основных плагиоклазов и черного пироксена. На Урале пироксен часто замещается роговой обманкой, такое габбро называют уралитизированным.

Б а з а л ь т – эффузивный аналог габбро. Текстура крупнопористая, структура скрытокристаллическая, поэтому минеральный состав не определяется. Класс породы устанавливается по черному цвету. Иногда в

базальте наблюдаются мелкие порфировые вкрапленники основного плагиоклаза, пироксена, иногда оливина. При сравнении андезита и базальта, у последнего поры обычно более крупные и более темная черная окраска.

Ультраосновные породы

П и р о к с е н и т – плутоническая (интрузивная) порода. Текстура массивная, структура полнокристаллическая, крупнозернистая. Состоит из изометрических кристаллов пироксена черного цвета, часто с зеленым или бурым оттенком.

П е р и д о т и т – плутоническая (интрузивная) порода. Текстура массивная, структура полнокристаллическая, неравномерно-зернистая. Состоит из крупных изометричных кристаллов пироксена и мелких зерен оливина, распределенных между зерен пироксена.

Д у н и т (оливинит) – плутоническая (интрузивная) порода. Текстура массивная, структура полнокристаллическая, мелкозернистая. Состоит из мелких зерен темно-зеленого оливина. При выветривании оливин становится бурым, поэтому дуниты с поверхности имеют бурую корочку.

Вулканических (эффузивных) аналогов ультраосновных пород обычно нет.

2.1.2. Метаморфизм и его продукты

М е т а м о р ф и з м - процесс преобразования любых исходных пород под воздействием изменившихся физико-химических условий среды. Он реализуется преимущественно путем перекристаллизации пород без существенного плавления под воздействием меняющихся температур, давлений, газовой (флюидной) среды. Преобразуя свой минеральный состав, порода, таким образом, приспосабливается к изменившимся термодинамическим (Т-Р) условиям.

Название термина происходит от греческого слова метаморфосис – преобразование. Метаморфическим преобразованием могут подвергаться изначально осадочные, магматические и (повторно) метаморфические породы. При этом исходные породы, как правило, после таких преобразований полностью теряют свой первоначальный облик.

Факторами метаморфизма, т. е. непосредственными причинами преобразования пород, являются: давление (Р), температура (Т), а также растворы и газы (флюиды), пронизывающие толщи горных пород.

Д а в л е н и е при метаморфических преобразованиях может быть обусловлено рядом причин: давлением нагрузки вышележащих толщ (литостатическим - Рл), динамическим давлением тектонического движения (стрессовым - Рс), давлением движущейся магмы (Рм), а также давлением поровых (гидротермальных и флюидных) растворов (Рф). Главным среди

отмеченных причин следует считать тектоническое или стрессовое давление, способное достигать десятков тысяч атмосфер и распространяться на огромные пространства. При проявлении тектонического или стрессового давления роль нагрузки вышележащих пород может оказаться незаметной, а проявление магматического и порового давления флюидов на таком фоне может повлиять на характер минеральных преобразований лишь локально, в местах их проявления.

Температуры метаморфических преобразований могут быть обусловлены несколькими причинами и достигать уровней, когда порода начинает плавиться, т. е. 800-1200 °С. Всегда существует температурный фон, обусловленный глубиной погружения пород, т. е. геотермическим градиентом (Тг), составляющим обычно около 30°/1 км. Однако основные тепловые превращения в породе осуществляются за счет тектонических подвижек (Тс), и сопровождающих такие движения аномальных глубинных тепловых потоков (Тф). На контакте с магматическими породами преобразование осуществляется за счет прогрева пород очагом остывающей магмы (Тм).

Гидротермальные растворы и флюиды, которые способны привносить или выносить различные химические компоненты, влиять на характер минералообразования, создавать специфическую окислительную или восстановительную (Eh), а также кислую либо щелочную (pH) среды. Глубинные флюиды насыщены, прежде всего, парами воды и углекислоты, а также более редкими соединениями водорода, хлора, фтора и др.

Типы метаморфизма

В зависимости от сочетания упомянутых выше факторов выделяются те или иные типы метаморфизма. Наиболее простая схема типов метаморфизма, выделяющихся в зависимости от термодинамических (P, T) параметров, показана на рис. 2, а геологические условия их проявления – на рис.1.

Можно говорить о термальном типе метаморфизма, когда порода преобразуется под преимущественным воздействием температуры, а также динамическом, когда основным фактором выступает давление, и динамо-термальном, когда проявляются оба фактора одновременно. Каждый из этих типов обладает своими специфическими геологическими условиями проявления (рис. 3).

Термальный тип проявляется обычно в обрамлении магматических тел, на контакте с ними, поэтому он обычно называется контактовым. Температура магматических тел может колебаться в интервале 800-1200 °С, а вмещающие породы, разогретые первоначально за счет геотермического градиента, могут быть относительно «холодным». Ширина зоны (ореол) контактового метаморфизма зависит, главным образом,

от объема магматического очага и может достигать нескольких километров. Если вмещающая порода разогрета жильным магматическим телом, то прогретой может быть лишь узкая полоса в несколько метров.

Весьма существенную роль при контактовом метаморфизме играет химический состав магмы и вмещающих пород, а точнее, контрастность состава между ними. В случае резкого контраста между многокомпонентной магмой и вмещающими породами на их контакте, в соответствии с законами Фика, протекают диффузионные процессы взаимного проникновения, меняющие как состав внешней оболочки магматического тела, так и состав вмещающих пород. Такой процесс перекристаллизации пород, протекающий с существенным изменением их химического состава, называется м е т а с о м а т о з о м .

Обычно метасоматоз сопровождается интенсивной гидротермальной и флюидной проработкой, способствующей привносу и выносу химических компонентов. Типичными представителями таких контактово-метасоматических процессов (на границе между силикатными магмами и известняками) являются с к а р н ы (см. описание ниже). С другой стороны, в случае, если силикатная магма находится в контакте с близкими ей по химическому составу вмещающими породами, то формируются р о г о в и к и – прогретые и перекристаллизованные продукты метаморфизма без проявления метасоматоза (см. описание ниже).

Д и н а м и ч е с к и й м е т а м о р ф и з м , который чаще называют д и с л о к а ц и о н н ы м , протекает в относительно «холодных» условиях под воздействием тектонических движений по разрывным нарушениям (разломам). При этом происходит дробление пород, их истирание. Обломки различной величины при последующих процессах, сопровождающихся проникновением в ослабленные зоны флюидов и гидротермальных растворов, могут подвергаться частичной или полной перекристаллизации и цементации с образованием структур катаклаза.

Среди новообразованных минералов – индикаторов высоких давлений – выделяют: кианит, глаукофан, пироп, омфацит (пироксен), алмаз и другие. Эти минералы фиксируют давления больших глубин, где всегда имеется и некоторый температурный фон, создаваемый геотермальным градиентом. В приповерхностных условиях можно наблюдать неперекристаллизованные брекчии, милониты, филлониты.

Контактовый и дислокационный типы метаморфизма развиваются в ограниченных пространствах, локально. Первый тип проявляется в виде полосы вокруг магматических тел, а второй такой же полосой сопровождает тектонические трещины. Поэтому тот и другой типы объединяются названием л о к а л ь н ы й (рис. 3).

В противоположность локальному выделяют р е г и о н а л ь н ы й м е т а м о р ф и з м , проявление которого охватывает большие пространства (регионы). Он протекает в широком интервале температур и давлений, поэтому его можно называть д и н а м о т е р м а л ь н ы м . Породы

регионального метаморфизма, естественно, имеют наиболее широкое распространение. Одновременное проявление температур и давлений создает условия для новообразования широкого диапазона пород, которые можно разделить на фации – совокупности (семейства) пород, формирование которых протекало в близких термодинамических (Р-Т) условиях. Эта близость устанавливается по т. н. индекс-минералам с известными параметрами устойчивости в тех или иных Р-Т условиях. Известен, например, ряд слюд, устойчивость которых возрастает от 200-300 ^{o}С для серицита, до 300-400 ^{o}С для мусковита и 500 ^{o}С и более для биотита. Известны температуры устойчивости и для других минералов.

Название фации определяется по типичной породе. По мере возрастания Р-Т условий регионального метаморфизма выделяют: 1 – *зеленосланцевую* фацию; 2 – *эпидот-амфиболитовую* фацию; 3 – *амфиболитовую* фацию и 4 – *гранулитовую* фацию. В области термодинамических условий гранулитовой (иногда амфиболитовой) фации в породе может отмечаться частичное плавление, такое преобразование называют **ультраметаморфизмом**. Это переходная зона от метаморфизма к магматизму.

Особенности минерального состава

Широкий диапазон термодинамических условий проявления метаморфизма обусловил большое разнообразие минерального состава пород. Кроме того, этот набор минералов зависит от состава исходных пород. Сам механизм перекристаллизации пород, протекающий в твердом виде, представляет собой сложный процесс замещения одних минералов (неустойчивых при новых Р-Т условиях) другими, более устойчивыми. При этом важную роль играют поровые флюиды как катализаторы реакций замещения.

Кроме упоминавшихся минералов, входящих в состав магматических пород, выделяется группа минералов, характерных преимущественно для метаморфических пород.

Тальк – низкотемпературный чешуйчатый минерал, возникающий при гидротермальной проработке магнезиальных пород. Мягкий, с жирным блеском.

Хлорит – низкотемпературный чешуйчатый минерал часто с зеленоватым оттенком. Образуется при гидротермальной проработке основных пород.

Серпентин – возникает как продукт гидротермальной проработки ультраосновных пород. Не обладает четко выраженной формой (иногда образует волокнистые агрегаты у хризотил-асбеста), серого с зеленоватыми оттенками цвета.

Серицит – низкотемпературная, мелкочешуйчатая, наиболее гидроксилнасыщенная разновидность слюды – мусковита. Присутствие в породе серицита обусловливает ее шелковистый блеск.

А к т и н о л и т – низкотемпературная разновидность роговой обманки. Образует волосовидные, тонколучистые неориентированные агрегаты. Цвет светло-зеленый.

Г л а у к о ф а н – разновидность роговой обманки, образующаяся при высоких давлениях. Образует тонколучистые агрегаты. Цвет густо фиолетовый до черного.

С т а в р о л и т – кристаллы в виде коротких ромбического сечения призм; характерные двойники, напоминающие прямой или косой (угол 60 °) крест. Цвет коричневый, красно-бурый до черного. Легко узнается по цвету и двойниковым формам.

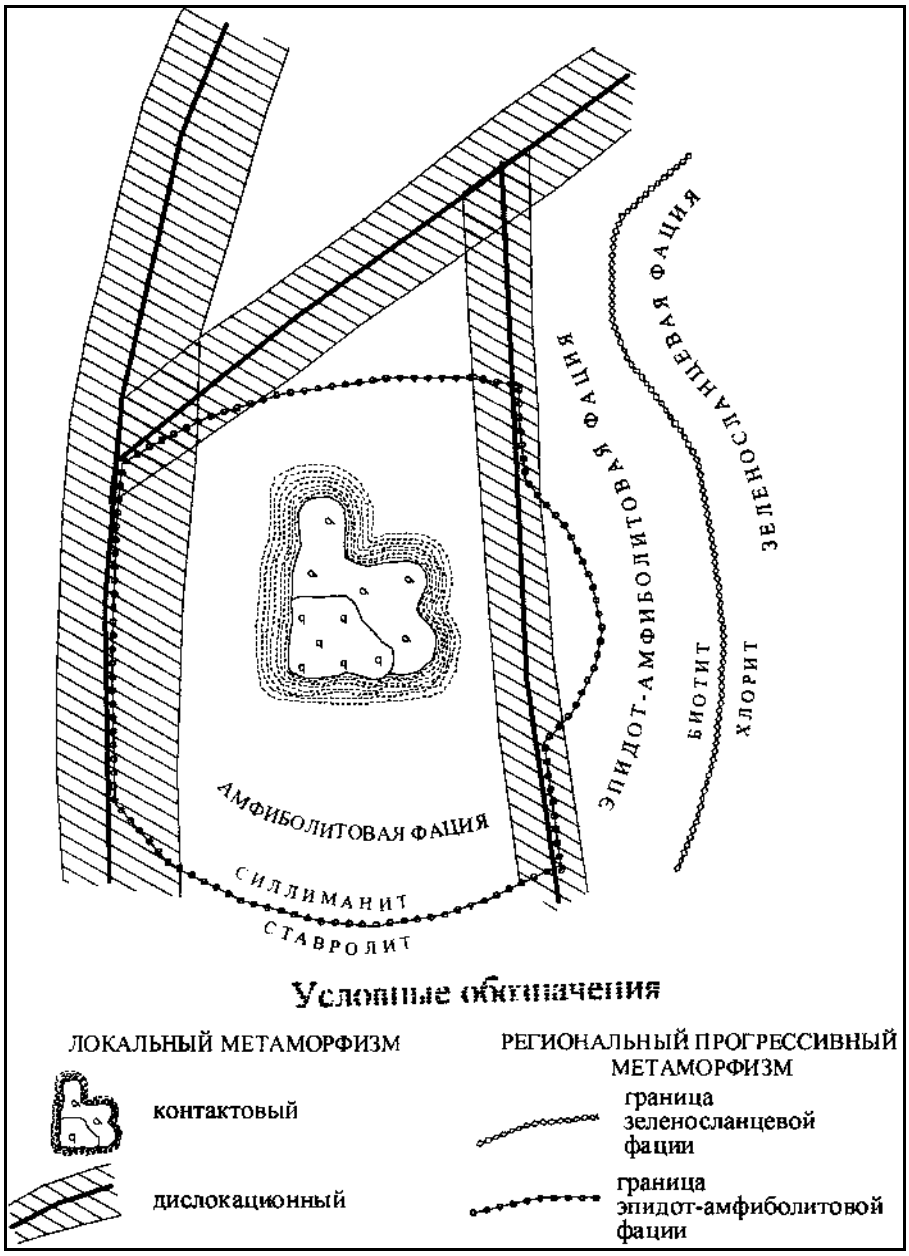


Рис. 1. Схематическая карта метаморфизма

К и а н и т – кристаллы длинные, уплощенные. Имеет анизотропию твердости. Цвет голубой или синий.

Э п и д о т – образует призматические кристаллы; лучистые или зернистые агрегаты. Цвет светло-зеленый. Блеск сильный стеклянный.

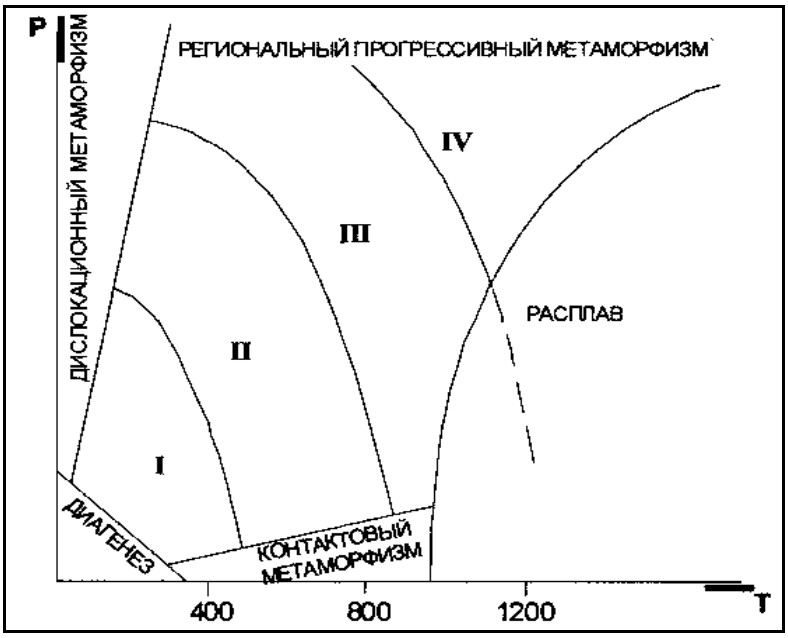


Рис. 2. Типы и фации метаморфизма
1 – зеленосланцевая; 2 – эпидот-амфиболитовая; 3 – амфиболитовая; 4 – гранулитовая

Г р а н а т – кристаллы изометричные в виде ромбододекаэдров, реже зернистые агрегаты. Цвет – от коричневого до красного. Макроскопически легко узнается по характерному облику кристаллов и цвету.

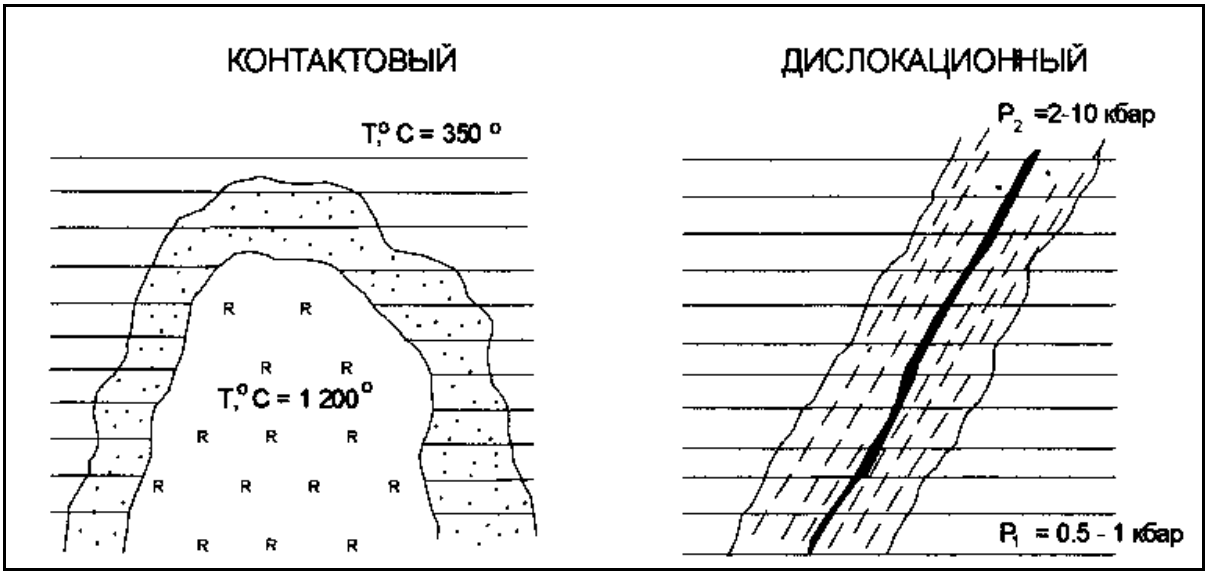


Рис. 3. Локальный метаморфизм

Текстуры и структуры

Текстуры и структуры метаморфических пород зависят от специфических физических условий их образования. Эти условия отличаются от термодинамических параметров кристаллизации магматических пород, для которых действует в полной мере известный закон Паскаля, обеспечивающий при любом направленном тектонических движений одинаковое давление во все стороны. Этим условием обеспечивается повсеместная массивная текстура глубинных магматических пород. Слюды в гранитах, например, благодаря действию закона Паскаля, не ориентированы в одном направлении.

Метаморфические процессы не достигают условий плавления, поэтому они изменяются в твердом или пластичном состоянии, когда закон Паскаля работает лишь частично или не проявляется вовсе. Для регионального метаморфизма, например, ориентированное давление влияет на форму возникающих минералов, а также на их параллельную или субпараллельную ориентировку. Поэтому у низкотемпературных продуктов регионального метаморфизма отмечаются, как правило, сланцеватые текстуры с параллельным и субпараллельным расположением вытянутых, уплощенных или чешуйчатых минералов.

С повышением температуры, в условиях амфиболитовой фации, когда вещество начинает проявлять пластические свойства, а значит частично проявляется закон Паскаля, четкая ориентировка удлиненных, уплощенных минералов постепенно исчезает, т. к. давление становится, до определенной степени, всесторонним. Такая текстура со слабо выраженной ориентировкой минералов называется гнейсовой, по названию главного и типичного представителя пород амфиболитовой фации – гнейса.

Максимальное проявление закона Паскаля достигается в условиях гранулитовой фации, поэтому ее продукты не несут следов ориентировки минералов, а текстура называется массивной как у глубинных магматических пород.

Так как региональный метаморфизм протекает в условиях тектонического давления, то сланцеватые текстуры могут усложняться мелкой складчатостью. Тогда текстура называется плойчатой. Нередко метаморфические процессы высокотемпературных фаций сопровождаются расслоением первично однородной массы на слои контрастного минерального состава. Образуются темно-окрашенные (с амфиболом, слюдами) и светлоокрашенные (с кварцем, полевым шпатами) слои. В этом случае говорят о полосчатой текстуре пород.

Более широкий диапазон текстур характерен для продуктов локального (контактового и дислокационного) метаморфизма. Для скарнов, роговиков, березитов, лиственитов, мраморов, образующихся при контактовом метаморфизме без проявления тектонического (стрессового) давления, наиболее часто отмечается массивная текстура.

Структурные особенности метаморфических пород также в существенной степени определяются Р-Т условиями среды минералообразования. Очевидно

ведь, что в условиях полной анизотропии среды, когда относительно «холодная» твердая порода подвергается тектоническому направленному сжатию, легче кристаллизоваться и расти чешуйчатым минералам, которые относительно легко могут наращивать свой размер вкрест, перпендикулярно вектору давления.

В то же время в условиях изотропной среды гранулитовой фации, когда давление становится всесторонним, возникают благоприятные условия для кристаллизации изометричных, объемных минералов.

Так как для метаморфических процессов отмечается тесная обусловленность внешними факторами формы минералов, эта особенность заложена в понятие с т р у к т у р ы (в противоположность магматическим и осадочным породам, где в понятие структуры вкладывается не форма, а размер минералов, зерен и т. д.). Форма минералов, а значит и структура породы, совместно с ее текстурными особенностями позволяют восстанавливать Р-Т условия образования продуктов метаморфизма.

Конкретные названия структур определяются несколькими латинскими названиями упомянутых форм минералов: *л е п и д о с* – ч е ш у й к а; *н е м а т о с* – н и т ь, и г о л к а; *г р а н о с* – з е р н о. Кроме того, следует помнить, что метаморфизм – процесс постоянного обновления минерального состава породы, все минералы вновь выросшие, возникшие. Этот процесс называется ***б л а с т е з о м*** (от греческого б л а с т о с – р о с т о к).

В итоге структуры продуктов регионального метаморфизма, в зависимости от формы слагающих ее минералов, могут называться: лепидобластовая, гранобластовая, нематобластовая, либо более сложными комбинированными названиями: лепидогранобластовая, нематогранобластовая и т. д.

Г р а н о б л а с т о в а я структура чаще отмечается для пород амфиболовой и гранулитовой фаций метаморфизма при наличии зерен изометричной формы – кварца, полевых шпатов, гранатов, карбонатов и др.

Л е п и д о б л а с т о в а я характерна обычно для зеленосланцевой фации при обилии чешуйчатых, листоватых минералов – серицита, мусковита, биотита, хлорита, талька, серпентина.

Н е м а т о б л а с т о в а я в чистом виде встречается редко (амфиболы, актинолитовые сланцы) и отличаются наличием минералов игольчатой, длиннопризматической формы (эпидот, роговая обманка, актинолит, кианит, рутил).

Однако, как уже отмечалось, в природе чаще встречаются комбинированные структуры, когда в наличии имеется несколько минералов разной формы, например, лепидонематогранобластовая структура. В этом случае название структуры формируется по определенному правилу. В начале такого наименования ставится структура, определяющая форму наименее распространенного минерала, а в конце – наиболее распространенного.

Иногда в породе отмечаются разнозернистые агрегаты, когда один из новообразованных минералов резко выделяется по размеру среди остальных. В этом случае можно говорить о **п о р ф и р о б л а с т о в о й** структуре.

Значительно меньшую информацию об условиях образования несут структуры контактового метаморфизма, продукты которого чаще всего обладают **к р и с т а л л о б л а с т о в ы м и** структурами.

Среди пород регионального метаморфизма имеется два характерных исключения. В зависимости от Р-Т условий различные формы минералов возникают лишь в том случае, если в исходном химическом составе имелись в наличии необходимые породообразующие компоненты, позволяющие строить все многообразие решеток минералов (чешуйчатых, игольчатых, зернистых). Среди осадочных пород известны два мономинеральные, а значит простые по составу, образования – известняки ($CaCO_3$, $MgCO_3$) и кварцевые пески (SiO_2). При метаморфизме эти простые по составу породы не способны формировать игольчатые, чешуйчатые и другие, кроме зернистых, формы. Поэтому известняки при метаморфизме переходят в мономинеральную (с одним кальцитом) породу – мрамор с возможным укрупнением зерна по мере роста температуры. Аналогично ведут себя кварцевые пески, которые способны образовать только зернистый агрегат кварцита. Так как отмеченные породы не способны реагировать на давление изменением формы зерен, то для них, обычно, трудно восстановить тип метаморфизма – региональный или контактовый.

Основные разновидности метаморфических пород

Продукты регионального метаморфизма

Продукты регионального метаморфизма отличаются большим разнообразием. Это обусловлено, во-первых, разнообразием исходного состава горных пород (*эдукта*), во-вторых, зависимостью минерального состава пород от термодинамических условий (породы одного химического состава в условиях разных фаций имеют различный минеральный состав). Некоторым исключением выглядят две упомянутые выше породы: мрамор и кварцит, краткое описание которых приведено ниже.

М р а м о р – карбонатная порода, образующаяся при метаморфизме известняков и доломитов и сложенная преимущественно кальцитом. Мраморы высокой степени метаморфизма лишь немногим отличаются от мраморов низкой степени. При увеличении температуры может возрастать крупность минеральных зерен. В остальном породы идентичны, хотя их генезис может быть весьма разнообразным.

Чистые разности мраморов имеют белый цвет, различные минеральные примеси окрашивают их в розовые (гематит), желтые (лимонит), серые (органическое вещество), зеленые (хлорит, эпидот) оттенки. Текстура массивная, реже полосчатая; структура гранобластовая.

Кварцит – горная порода, состоящая существенно из кварца. Образуется при метаморфизме кварцевых песчаников и некоторых кислых магматических пород (кварцевых порфиров). Так как кварц слабо реагирует на изменение термодинамических условий, фациальный уровень того или иного кварцита (если нет других минеральных примесей) определить очень трудно.

Кварциты низких и высоких степеней метаморфизма, в силу упомянутых причин, очень похожи. Цвет чистых кварцитов белый, в зависимости от примесей может обладать розовым, черным, желтым, зеленым оттенками. Текстура массивная; структура гранобластовая.

Внешне кварцит очень похож на мрамор, но отличается от него следующими свойствами: твердостью (кварцит царапает стекло, мрамор - нет), спайностью зерен (у кальцита совершенная спайность в трех направлениях, у кварца отсутствует), реакцией с соляной кислотой (мрамор «вскипает» в кислоте, кварцит не реагирует).

Полиминеральные породы изменяют свой минеральный состав в зависимости от фациальных условий, поэтому эти породы будут рассмотрены в рамках минеральных фаций.

Фация зеленых сланцев

Филлит образуется в самой низкотемпературной области фации зеленых сланцев. Исходной породой филлитов обычно являются аргиллиты (глинистые сланцы). Глинистые минералы в результате метаморфизма преобразуются в кварц, серицит, иногда хлорит, альбит (полевой шпат), часто с примесью графита. Так как зерна очень мелкие визуально минеральный состав не устанавливается, а внешне это темная, почти черная (за счет примеси графита) сланцеватая порода с шелковистым блеском на плоскостях сланцеватости, обусловленным присутствием серицита.

Часть исходного минерального состава может оставаться не перекристаллизованной. Текстура сланцеватая, структура чаще всего гранолепидобластовая. Гранулярность породы нередко обусловлена сохранившимся зернистым кварцем.

Кварц – серицитовый сланец является продуктом зеленосланцевой фации прогрессивного регионального метаморфизма и образуется либо по аргиллитам (глинистым сланцам), либо по аркозовым песчаникам, или кислым магматическим породам. Основными минералами являются кварц, серицит, альбит (полевой шпат). В зависимости от исходного состава пород могут присутствовать хлорит, эпидот или карбонаты. Размер зерен еще очень невелик (до 0,5 мм), поэтому отдельные минералы определяются с трудом. Цвет породы светло-серый, иногда с зеленоватым оттенком (за счет хлорита и эпидота); на плоскостях спайности – шелковистый блеск, обусловленный присутствием серицита. Текстура сланцевая, иногда плойчатая; структура гранолепидобластовая.

Хлоритовый (зеленый) сланец – продукт зеленосланцевой фации прогрессивного регионального метаморфизма основных магматических

пород. Это сланцеватые зеленые породы, цветом своим обязаны обилию одного или более зеленых минералов (хлорита, эпидота и актинолита), из других минералов практически всегда отмечается альбит (полевой шпат) и кварц. Структура породы гранолепидобластовая.

Тальковый сланец образуется за счет низкотемпературного гидротермального метаморфизма ультраосновных магматических пород (перидотитов и серпентинитов). Основным минералом породы является тальк (не менее 75 %, обычно 90 %), может присутствовать хлорит, актинолит, серпентин, карбонаты. Текстура сланцеватая, структура лепидобластовая.

Эпидот-амфиболитовая фация

Слюдяной (кристаллический) сланец – продукт регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации. Исходными породами кристаллических сланцев могут быть осадочные (аргиллиты и песчаники) и кислые магматические породы. Основными минералами этих сланцев являются биотит, мусковит, кварц, полевые шпаты. При этом в сланцах преобладают слюды (биотит и мусковит), поэтому для них характерна грубая рассланцованность. Помимо этих минералов в кристаллических сланцах, как правило, присутствуют порфиробласты граната, кианита, ставролита и других минералов. Текстура сланцеватая; структура порфиробластовая, лепидогранобластовая, гранолепидобластовая.

Амфиболитовая фация

Гнейс – продукт дальнейшего метаморфизма слюдяных кристаллических сланцев, т. е. исходными породами гнейсов являются осадочные и кислые породы. Главные минералы гнейсов – кварц, полевые шпаты, слюды (биотит, мусковит) и роговая обманка; может присутствовать гранат, кианит и др. Наиболее характерным отличием гнейсов от кристаллических сланцев является гнейсовая (полосчатая) текстура – чередование светлых кварц-полевошпатовых и темных биотит-роговообманковых прослоев – без отчетливой ориентировки удлиненных и чешуйчатых зерен. Такая расслоенность является результатом «метаморфической дифференциации» прогретых до высокой пластичности пород, при которой обычно не образуется сланцеватых структур. Структура лепидогранобластовая.

Амфиболит – типичная порода амфиболитовой фации регионального метаморфизма, производная от основных магматических пород. Сложена преимущественно роговой обманкой и плагиоклазом. В ней могут присутствовать в небольших количествах гранат, биотит и кварц. Текстура визуально массивная, но под микроскопом часто заметна ориентировка призм роговой обманки. Нередко наблюдается полосчатая «гнейсовая» текстура. Структура нематогранобластовая или гранонематобластовая.

Гранулитовая фация

Гранулиты представляют собой среднезернистую до крупнозернистой породу по облику, состоящую в основном из калиевого полевого шпата, натриевого плагиоклаза и пироксена, а также кварца, граната и других минералов. Гранулиты похожи на гнейсы, но поскольку у них обычно нет слюды, эти породы имеют массивную текстуру. Структура породы преимущественно гранобластовая.

Продукты дислокационного метаморфизма

При дислокационном метаморфизме основным фактором является одностороннее (стрессовое) давление, которое возникает при тектонических подвижках (взбросах, сдвигах, надвигах и т. д.).

Тектонические брекчии – сильно раздробленные породы, состоящие из угловатых обломков различных размеров, сцементированных тем же, но мелко раздробленным, материалом. Разновидностью тектонической брекчии может считаться яшма – кремнистая пестро окрашенная порода, продукт тектонического дробления осадочных, вулканогенно-осадочных кремнеземсодержащих образований.

Катаклазит – сильно раздробленная, перетертая горная порода, состоящая из деформированных, изогнутых, раздробленных зерен минералов.

Милонит – еще более тонкоперетертая горная порода. От катаклазита отличается большей степенью раздробленности минеральных зерен и наличием линзовидно-полосчатой, сланцеватой текстуры, которая возникает вследствие неоднократных разнонаправленных перемещений блоков породы. В результате образуются линзы грубо раздробленного материала, сцементированные тонко раздробленной полосчатой, частично перекристаллизованной массой.

При более высоких температурах в зонах дислокационного метаморфизма происходит перекристаллизация и новообразование минералов, устойчивых при высоких давлениях – кианита, пиропа, омфацита (пироксена). Примером таких пород может служить эклогит.

Эклогит – продукт метаморфизма высоких температур и очень высоких давлений. Исходными породами эклогитов являются основные магматические породы. Состоят преимущественно из пироксена (омфацита) и граната (пиропа). Иногда отмечается кианит и полевые шпаты. Омфацит темно-зеленого цвета, призматической формы. Гранат в эклогите представлен пиропом, который образует крупные порфиробласты красно-коричневого цвета. Текстура массивная, иногда слабо сланцеватая, структура гранонематобластовая.

Кроме того, хорошо известно, что алмазы образуются в «трубках взрыва», в кимберлитах при высоких давлениях. Минералами-спутниками алмазов служат те же омфацит и красный пироп.

Продукты контактового метаморфизма и метасоматизма

В случае если контактовый метаморфизм протекает в зоне сочленения разогретой силикатной магмы с близкими ей по химическому составу вмещающими породами, здесь происходит лишь прогрев пород без существенного перемещения химических компонентов. В таких условиях, при отсутствии контраста химических составов обеих пород, образуется, например, роговик.

Р о г о в и к – плотная порода, обычно с высоким содержанием кремнезема, Следствием такого состава является присутствие у неё раковистого излома. Текстура массивная, структура гранобластовая (роговиковая). В состав роговика могут входить различные минералы: кварц, слюды, полевые шпаты, гранат и др. Но вследствие тонкозернистой (роговиковой) структуры эти минералы обычно не определяются.

При наличии градиента концентрации (контраста) химического состава на границе магма – вмещающие породы, такой контактовый метаморфизма обычно сопровождается *метасоматизмом* – существенной миграцией химических компонентов, что, в конечном счете, приводит к значительному изменению состава как магмы (в эндоконтакте), так и во вмещающих породах (в экзоконтакте). Так образуются скарны.

С к а р н – контактово-метасоматическая порода, образующаяся на контакте мраморов или известняков и кислых (до средних) магматических пород. В зоне контакта под действием высоких температур магматического очага на начальной стадии образуются роговики, которые при дальнейшей их проработке высокотемпературными растворами преобразуются в метасоматическую породу – скарн.

Растворы имеют высокую минерализацию и пропитывают эндо- и экзоконтакты интрузии. В мраморы и известняки из интрузии обычно мигрируют элементы Fe, Mg, Si, Al и др., а в известняках растворы обогащаются Ca и CO_2. В результате взаимодействия этих растворов происходит образование новых минералов – граната (андрадита), кальцита, реже везувиана, эпидота, роговой обманки и актинолита. Очень часто скарны бывают рудными, т. е. содержат большое количество магнетита, сульфидов, иногда золота. Все крупнейшие на Урале месторождения железа, разрабатываемые еще Демидовым, на базе которых выросли такие города, как Н.Тагил, Екатеринбург, Магнитогорск, являются скарново-магнетитовыми.

В целом для скарнов характерны следующие признаки: разнообразие и непостоянство минерального состава; резкое изменение размеров зерен даже в пределах одного штуфа; обязательное присутствие граната и кальцита; частое наличие рудных минералов (магнетита и др.). Текстура у них массивная, структура гранобластовая.

Метасоматизм, или метасоматоз, протекает без проявления ощутимого стрессового, тектонического давления. Поэтому объем исходных и конечных продуктов всегда сохраняется неизмененным. В некоторых случаях метасоматические породы образуются благодаря «пропариванию» пород

проникающими с глубин горячими растворами (серпентиниты, лиственити, березиты).

Серпентиниты – гидротермально изменённые ультраосновные породы (дуниты, перидотиты). Серпентинизация может быть как автометаморфической, т. е. вызванной гидротермами самой интрузии, так и аллометаморфической, связанной с воздействием на ультраосновные породы гидротерм других, более молодых интрузий. Сущность процесса серпентинизации заключается в замещении первично безводных Fe-Mg-силикатов (оливина и пироксена) водным силикатом Mg (серпентином) и вторичным окислом железа (магнетитом). Цвет породы тёмно-зелёный, пятнистый, текстура массивная, структура лепидогранобластовая.

Лиственит – конечный продукт единого процесса гидротермального преобразования ультраосновных пород, состоящего из 3-х стадий – серпентинизации, карбонатизации и лиственитизации. Гидротермы, вызвавшие серпентинизацию ультраосновных пород, с понижением температуры обогащаются углекислотой (CO_2), что вызывает интенсивную карбонатизацию серпентинитов с образованием талька и карбоната Mg. На следующем этапе, когда весь серпентин заместился тальком и карбонатом, начинается карбонатизация талька. Освобождающаяся при этом кремнекислота (SiO_2) образует кварц. В результате появляется кварц-карбонатная порода – лиственит. Обычно она имеет зелёный цвет за счёт примеси фуксита – зелёной хромовой слюды. Характерны также примесь золотоносного пирита, поэтому лиственит используются как поисковый признак на золото. Текстура массивная, структура гранолепидобластовая.

Березиты – гидротермально изменённые кислые магматические породы, в которых полевые шпаты под воздействием гидротерм были замещены серицитом. Состоят из кварца и серицита часто с примесью золотоносного пирита. Цвет серый, текстура массивная, структура гранолепидобластовая.

2.1.3. Тектоника

Конвективные движения в пластичной астеносферной оболочке приводят в постоянное движение внешнюю хрупкую оболочку земли – литосферу. Ее движения осуществляются, главным образом, по двум направлениям: вертикальному и горизонтальному. И те, и другие приводят к нарушению первоначального залегания пластов литосферы, формируют ее внутреннюю структуру. Всесторонним изучением таких движений литосферы занимается наука геотектоника. В сфере ее изучения как сами процессы движения, их характер, причины, так и последствия – деформации литосферы. Как правило, именно после изучения и анализа деформаций восстанавливают характер процесса движения.

Классификация тектонических явлений

Согласно современной классификации профессора МГУ В. Е. Хаина, тектонические движения делятся на два типа: вертикальные и горизонтальные. Давно и хорошо изучены вертикальные движения литосферы, которые имеют множество аргументированных доказательств. Здесь выделяют колебательные (эпейрогенические) и горообразующие (или орогенические) движения.

Колебательными, или эпейрогеническими, называют медленные радиальные движения литосферы вверх-вниз, которые обычно не приводят к существенным деформациям ее пластов. При орогенических (горообразовательных) движениях напряжения передаются тангенциально, по касательной к поверхности Земли, и в результате такого горизонтального сталкивания литосферных плит (коллизии) формируются складчатые пояса - геосинклиналии. Некоторые исследователи увязывают отмеченные два типа движений генетически, как имеющие единую, общую природу.

В середине XX века в геологии доминировали представления об исключительно вертикальных движениях литосферы. С ними связывались также складчатые и разрывные нарушения, т. е. формирование геосинклинальных структур. Их физико-химическая природа очевидна: движение вниз (прогибание) обеспечивает сила гравитации, а подъем вверх – тепловое расширение, подъем нагретого на глубинах тепло-массопотока.

За последние годы доминирующей стала концепция (теория) горизонтальных движений литосферных пластин, формирующих зоны растяжения (рифтинга) и зоны сжатия (геосинклиналии). Механизм и причины таких горизонтальных движений до конца не выяснены, однако обычно увязываются с так называемыми «вихревыми» движениями в подстилающем их слое – астеносфере. В настоящее время горизонтальные и вертикальные движения литосферы не являются взаимно исключающими друг друга.

С началом космической эры, когда начали внедрять лазерные методы инструментальных наблюдений, масштабы вертикальных и горизонтальных движений были надежно обоснованы. Речь идет обычно о движениях, достигающих первых сантиметров в год. Максимальный горизонтальный дрейф сегодня испытывает Австралийский континент, который перемещается к северо-западу со скоростью 16 см в год.

Вертикальные движения

В недалеком прошлом в качестве свидетельств современных вертикальных движений привлекались, например, погруженные в прибрежные акватории древние города, а точнее - их остатки. Сегодня таким примером может служить Венеция, фундамент домов которой погружен в воду. Быстро поднимается Скандинавия, погружается северо-запад Европы, где Голландия, Бельгия спасают от наступающего моря свои северные территории при помощи

высотных дамб. Масштабы вертикальных перемещений сопоставимы с горизонтальными и достигают первых сантиметров в год.

Надежным индикатором современных вертикальных движений могут служить речные террасы. На Урале, например, реки бассейна Оби имеют четыре горизонтальные площадки, возвышающиеся над поймой. Обычно такие площадки (террасы) имеют высоту несколько метров (обычно 3-5 м). Они в свое время были поймой, однако, вследствие эпейрогенических движений, на фоне которых амплитуда восходящих движений была каждый раз больше, чем нисходящих, такие горизонтальные площадки оказывались приподнятыми. Русло реки каждый раз врезалось все глубже, а новая пойма все ниже. За последний миллион лет геологической истории на восточном склоне Урала по наличию речных террас устанавливается четыре колебательных движения с общей тенденцией к поднятию.

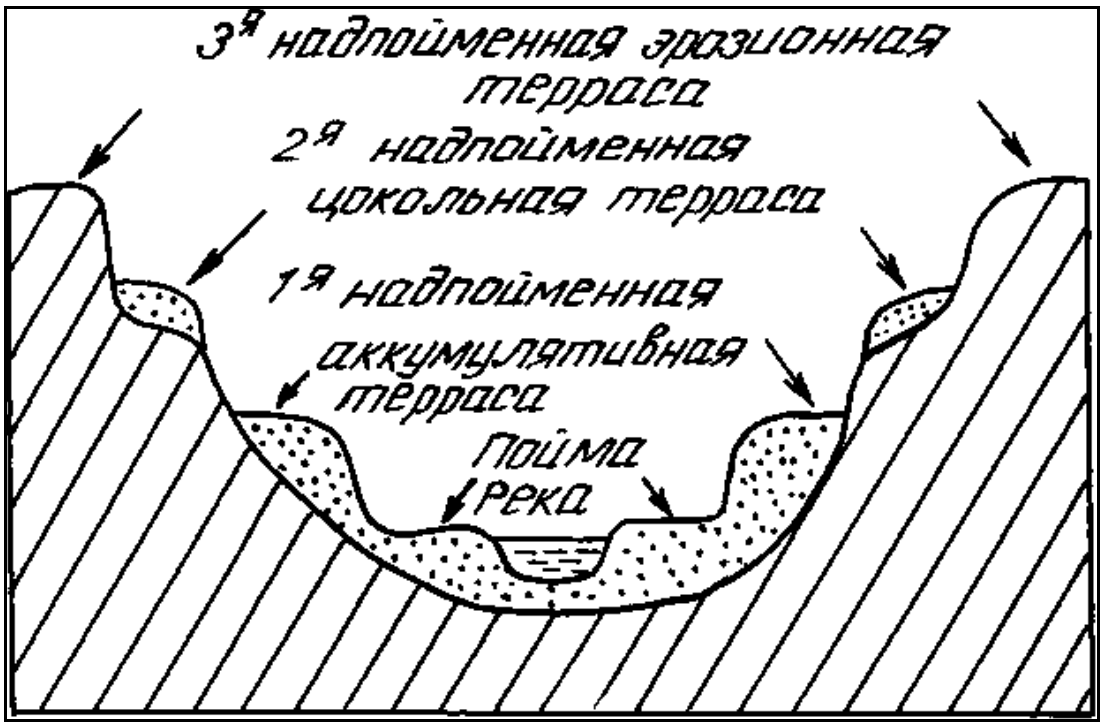


Рис.4. Схематический разрез речных террас

Характер движения и их масштабы фиксируются разрезом террас (рис. 4). Цокольные террасы, сложенные исключительно скальными, коренными породами, могут рассматриваться как свидетели подъема территории без предшествующего опускания, а аккумулятивные террасы, сложенные речными наносами, свидетельствуют о предшествующем опускании территории и т. д.

Классическими геологическими доказательствами вертикальных тектонических движений являются разрезы осадочных терригенных толщ. Быстрая смена вверх по разрезу грубообломочных пород (конгломератов) более мелкообломочными (гравелитами), а затем песчаниками и, наконец, глинистыми породами может рассматриваться как доказательство погружения дна моря, отступания береговой линии. Такой разрез называется

трансгрессивным (трансгрессия – наступление моря). Обратное чередование слоев, когда вверх по разрезу размер зерен становится все более крупным, может служить доказательством обратного тектонического процесса – поднятием морского дна. Такой разрез называется регрессивным. Аргументом в пользу такого толкования разреза может служить распределение осадков в современных морях: чем дальше от береговой линии – тем мельче осадочный материал. Волноприбойные движения строго сортируют привносимый с континента материал, крупный галечник остается в зоне пляжа, а мелкий глинистый материал выносится в глубинные и удаленные от берега зоны моря.

Горизонтальные движения

Убедительные доказательства горизонтальных перемещений литосферных плит (пластин) получены лишь в последние десятилетия, хотя о расколе Пангеи (бывшего единого континента) говорили давно. До недавнего времени трудно было объяснить механизм такого перемещения, его причины и источники энергии. Известная с начала века теория «дрейфа континентов» Вегенера была вскоре опровергнута физико-математическими расчетами советских геофизиков, что надолго затормозило развитие исследований в этой области. Лишь в последние десятилетия теория горизонтальных перемещений литосферных пластин была аргументированно обоснована.

Серьезный сдвиг в восстановлении теории горизонтального дрейфа был получен с открытием астеносферы – слоя размягчения в верхней мантии. Ведь до сих пор главным контраргументом против возможного горизонтального смещения одного слоя верхней оболочки Земли по отношению к другому была математически доказанная невозможность процесса, способного оторвать отдельные слои по горизонтальным плоскостям с последующим движением по ним. Открытие астеносферы сняло это главное возражение геофизиков. Механизм горизонтального скольжения как своеобразного «транспортера» литосферных плит был установлен. Началась интенсивная разработка теории горизонтальных перемещений, известной в последующем как «новая глобальная тектоника», теория мобилизма, плейт-тектоника.

Первые аргументы в пользу горизонтальных перемещений верхней оболочки Земли привел в начале 20-го века немецкий геофизик Вегенер в своей книге «Дрейф континентов». Этот ученый полагал, что континентальные блоки коры перемещаются по океаническим. Как в последствии оказалось, это было невозможно. Возражение было снято лишь во второй половине века, когда была открыта астеносфера. Это открытие стало глобальной вехой в развитии геологических представлений вообще и стало основным аргументом в пользу горизонтальных перемещений литосферных плит в послевегенеровское время. Сегодня можно уверенно говорить о том, что двигаются не только континенты (континентальные блоки), но и блоки океанической коры, захватывая часть верхней мантии.

Тектонические деформации (дислокации)

Естественным следствием тектонических движений являются деформации слоев литосферы, которые нарушают их первоначальные залегания. Складчатые, или пликативные деформации, обычно развиваются на фоне горизонтальных сжатий и проявляются без разрыва сплошности пластов. При этом может наблюдаться их уплотнение, утончение или утолщение, хотя следует отметить, что на практике складчатые деформации обычно всегда сопровождаются сетью тонкой трещиноватости, называемой кливажом. Трещины кливажа могут иметь различную ориентировку, а их образование связывается с неравномерным движением вещества при формировании складок. При изгибе пласта внешние слои растягиваются, а внутренние сжимаются.

По форме складки делятся на ***антиклинальные*** – выпуклые вверх и ***синклинальные*** – вогнутые вниз, однако в природе, на отдельных обнажениях, нередко видна лишь часть складки, когда пласты наклонены в одну сторону. Такой фрагмент складки называется моноклиналью.

В относительно спокойных тектонических областях, без проявления интенсивных горизонтальных сжатий, антиклинальные складки могут иметь вид купола – слабо выпуклой складки, изометричной в плане. Если эта изометричность в плане нарушена, но отношение длины складки к ее ширине не превышает 2:1, такие деформации называют брахискладками, в данном случае – ***брахиантиклиналью***. Аналогичные синклинальные структуры называют мульдой или чашей, а в некоторых случаях – ***брахисинклиналью***. Более напряженные складки называют линейными, изоклинальными.

Наиболее часто употребляют классификации складок по морфологическому (форме складок) или генетическому (по происхождению) принципу. Кратко коснемся лишь морфологии складок и, прежде всего, геометрических элементов отдельной складки.

У каждой складки выделяют ряд элементов: замок, крылья, ядро, шарнир, ось, осевая плоскость (рис. 5).

Замок складки – место перегиба пласта; **крылья** – боковые, расходящиеся части складки, которые сочленяются в замке; **ядро складки** – внутренняя часть складки, осевая плоскость делит складку на две симметричные части и проходит через **шарнир** – линию, соединяющую все точки максимального перегиба пласта.

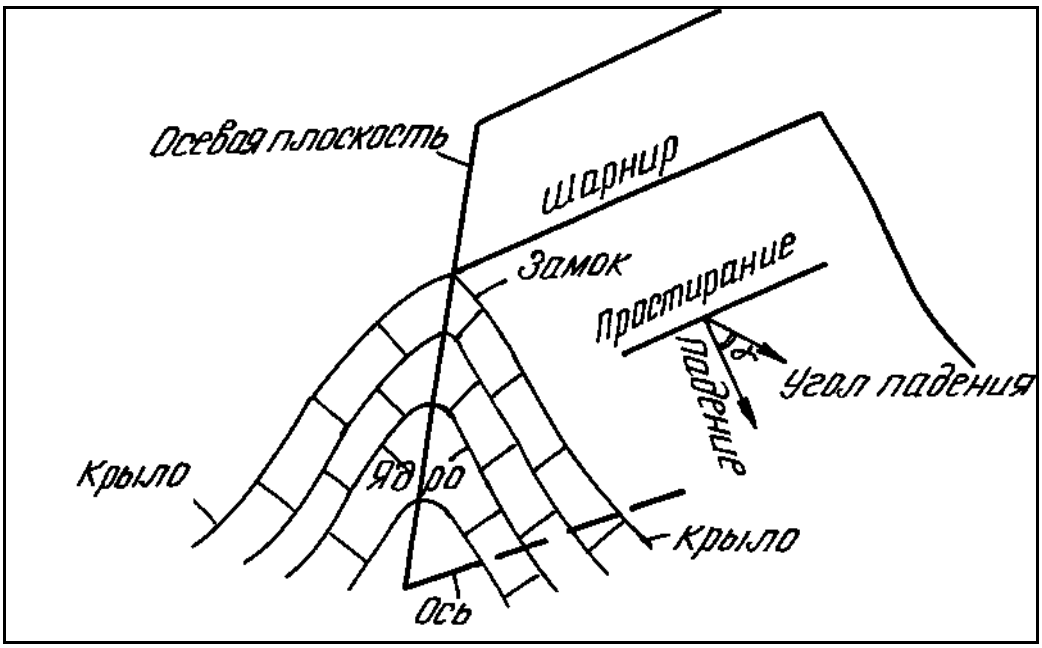


Рис. 5. Элементы складок

Если складка горизонтальна, то шарнир складки совпадает с ее осью, которая представляет собой линию пересечения осевой плоскости с горизонтальной плоскостью. Если складка наклонена, то шарнир, как материальная линия перегиба пласта, тоже наклоняется, или ундулирует. Ось же складки как воображаемая линия пересечения осевой плоскости с горизонтальной остается неизменной, т. е. всегда лежит в горизонтальной плоскости.

По морфологии и положению осевой плоскости складки делятся на *прямые* (а), *наклонные* (б), *опрокинутые* (в), *лежачие* (г), *ныряющие* (д).

В прямых складках осевая поверхность вертикальна, крылья наклонены в разные стороны, а их наклон одинаковый. В *наклонных (косых)* – осевая плоскость наклонна, а крылья падают под разными углами в разные стороны. Опрокинутые складки обладают наклонной осевой плоскостью, а их крылья падают в одну сторону. У *лежачих* складок осевая плоскость совпадает с горизонтальной, а у *опрокинутых* «ныряет» под углом к горизонтальной плоскости (рис. 6).

По форме замка выделяются следующие морфологические типы складок (рис. 6): *нормальные* или *гребневидные* (а), *изоклинальные* (б) – с приблизительно параллельными крыльями и узким замком, *веерообразные* (в) – напоминающие веер с широким замком, *сундучные* (г) – с широким замком и круто наклонными крыльями.

Кроме отмеченных типов складок выделяют более сложные модификации, которые образуются при наложении нескольких этапов деформаций. В этом случае более сложные гармоники складок, естественно, характерны для более древних пластов, залегающих на более глубоких горизонтах.

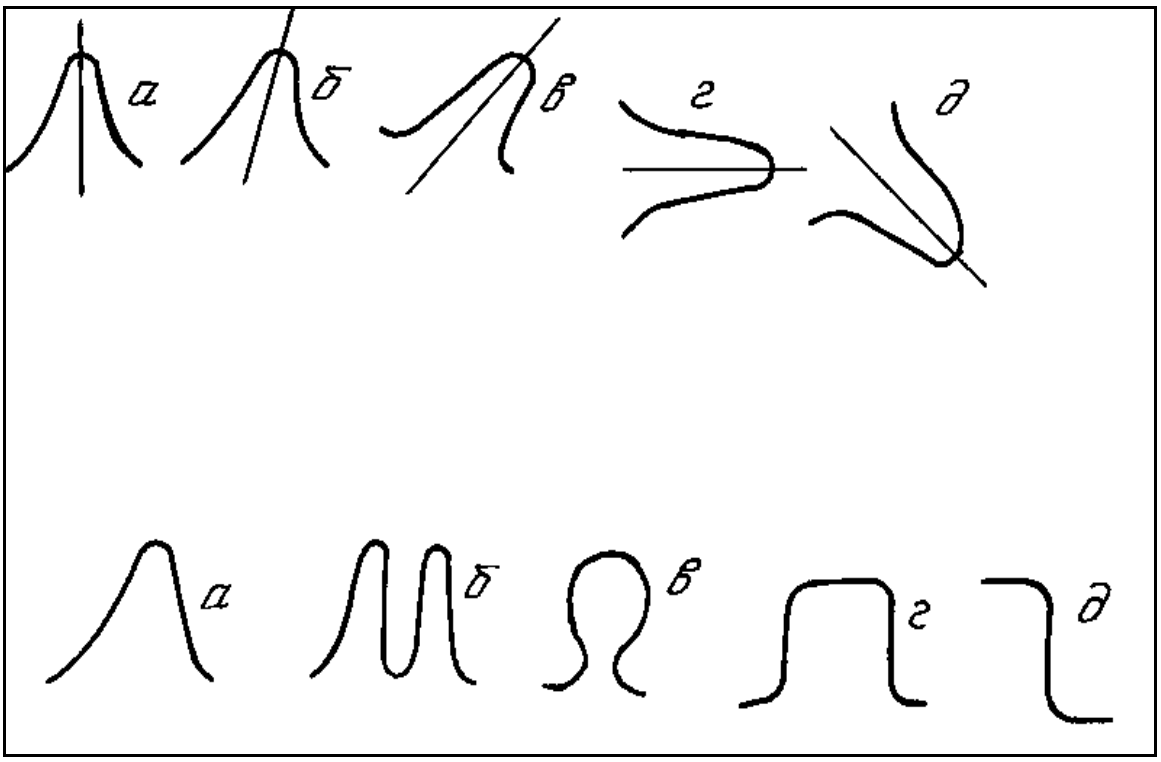


Рис. 6. Типы складок: вверху – по положению осевых плоскостей
(а – прямая, б – косая, наклонная, в – опрокинутая, г – лежачая, д – ныряющая); внизу – по морфологии (а – нормальная, гребневидная, б – изоклинальная, в – веерообразная, г – сундучная, д – флексура)

Разрывные (дизъюнктивные) нарушения формируются при достижении предела текучести пласта, когда происходит разрыв его сплошности. Поэтому хрупкие деформации обычно следуют за пластичными, а вместе они обычно сопровождают друг друга.

Трещины, разрывы сплошности геологических тел, бывают самого различного происхождения. В глубинных частях коры микротрещиноватость нетектонического происхождения обычно связывают с контракционными процессами в обрамлении магматических массивов, а также с диагенезом осадочных пород. Микротрещины обычно имеют петрогенетическую природу. На дневной поверхности трещиноватость обусловлена, прежде всего, экзогенными процессами, обусловленными энергией Солнца.

Рассмотрим главный тип разрывных нарушений в земной коре, обусловленный тектоническими причинами. В условиях больших динамических напряжений дизъюнктивные нарушения приводят к смещению пластов по т.н. плоскости сместителя, или по сместителю. В таких разрывах перемещение отдельных блоков единого в прошлом пласта может происходить как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Геометрия таких перемещений иллюстрируется рисунком элементов ***сброса*** – разрывного нарушения в условиях растяжения, когда сместитель (плоскость сместителя) наклонен в сторону опущенного блока (рис. 7).

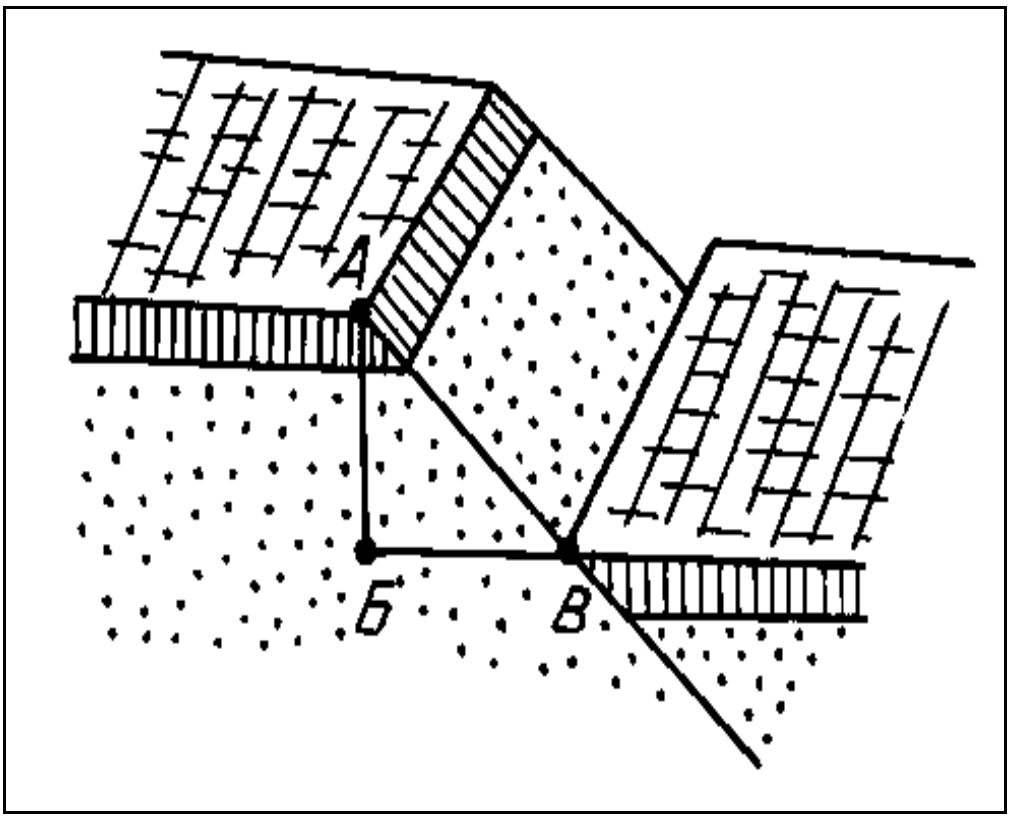


Рис. 7. Элементы сброса

А-Б – вертикальная амплитуда сброса, Б-В – горизонтальная амплитуда сброса, А-В – амплитуда истинного смещения

Аналогичные элементы выделяются у ***взброса*** – разрывного нарушения, развивающегося в условиях сжатия, когда сместитель наклонен в сторону поднятого блока (под него). Похожая на взброс структура, у которой сместитель образует острый угол (<30 °) по отношению к горизонтальной плоскости, называется надвигом. Видимое смещение пластов в горизонтальной плоскости (на карте) называют сдвигами. В природе такие смещения происходят как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях и тогда они называются сбросо-сдвигами, взбросо-сдвигами и т.д. (рис. 8).

Нередко в природе наблюдаются более сложные комбинации упомянутых структур: ступенчатые сбросы, грабены, горсты, сложные грабены и др.

Несколько особо следует упомянуть ***глубинные разломы*** – разрывные нарушения литосферного порядка. О них трудно говорить как о трещине, чаще это довольно мощная (до первых десятков километров в ширину) зона дробления, деструкции литосферы, корни которой нередко достигают мантии. Это особые зоны проницаемости литосферы, по которым происходит дренаж глубинной энергии в виде тепло-массопотоков, определяющих геологический режим целого региона. Такие разрывные нарушения планетарного порядка можно называть разломами первого порядка.

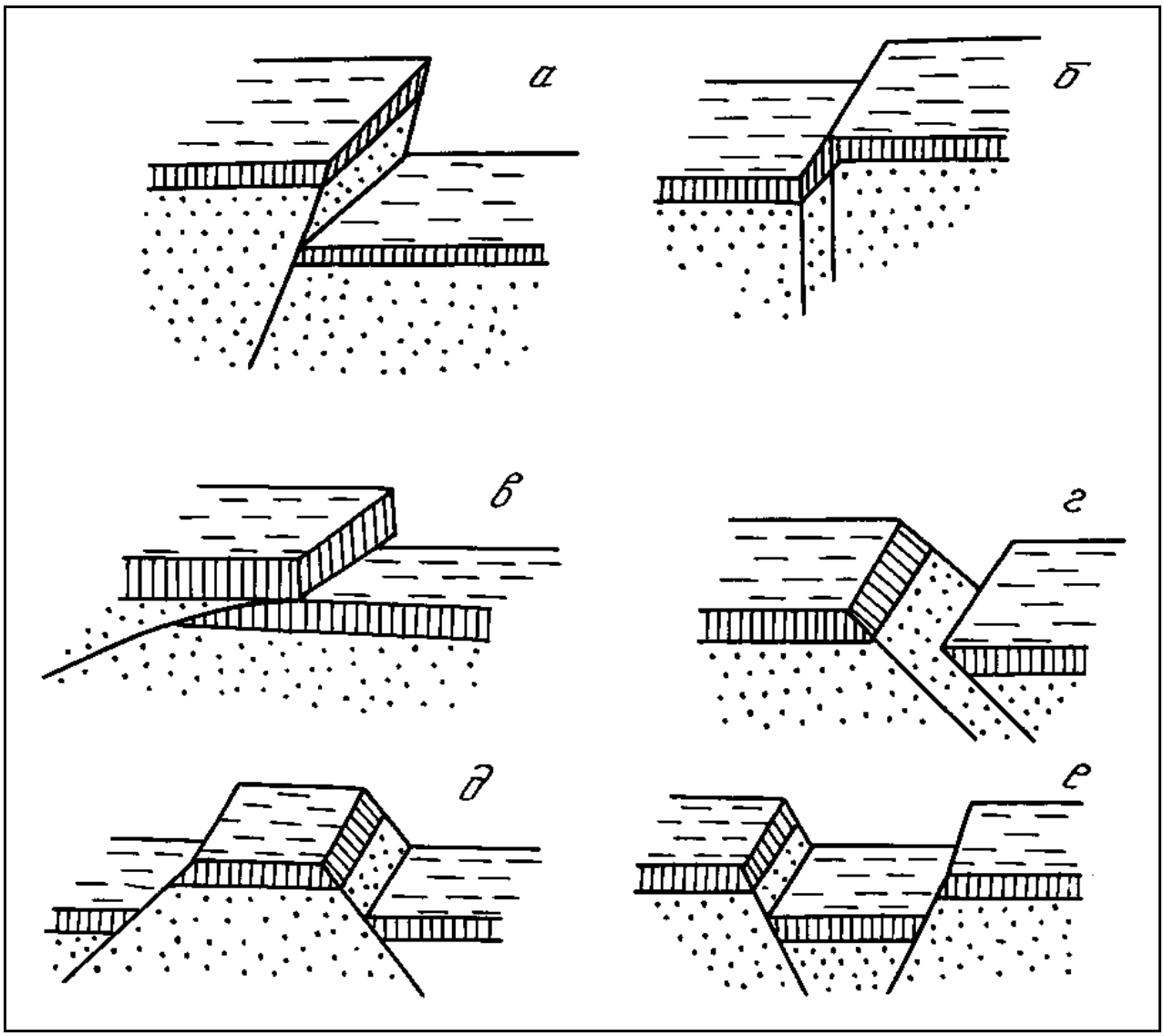


Рис. 8. Основные виды разрывных тектонических нарушений:
а – взброс, б – сдвиг, в – надвиг, г – сбросо-сдвиг, д – горст, е – грабен

К таковым можно отнести, прежде всего, планетарную систему СОХ (срединно-океанических хребтов), зоны Заварицкого-Беньофа, разлом Красного моря, в США – известный разлом Сан-Андреас и др. Нередко такие глубинные разломы на поверхности трассируются ультраосновными массивами, представляющими вещество мантии.

2.2. Экзогенные процессы

К экзогенным процессам относят такие превращения внешней оболочки Земли, которые протекают при участии солнечной энергии. Сюда относят геологическую деятельность ветра, постоянных и временных водотоков, озер и болот, морей, ледников, подземных вод, выветривания. Все они преобразуют лишь тонкую внешнюю оболочку коры.

Несколько отдельно стоят процессы, связанные с гравитационным воздействием на Землю Луны. Они вызывают в пределах морских акваторий приливы и отливы. При реализации этих природных явлений отмечается ряд последовательных стадий (разрушение горных пород, их перенос и транспортировка, сортировка и аккумуляция, осаждение и диагенез), конечным продуктом которых являются осадочные горные породы.

2.2.1. Литогенез

Под литогенезом понимают совокупность экзогенных процессов, позволяющих, в конечном счете, формировать осадочные породы. Сюда относят процессы разрушения горных пород, слагающих континентальную кору, последующую транспортировку и осаждение продуктов разрушения в морских бассейнах, а также процессы формирования и седиментации органогенных и хемогенных образований в пределах морских и океанических акваторий.

Осадочные горные породы представляют собой скопления минерального или органического вещества, образующегося на дне водоёмов или на поверхности суши как результат действия экзогенных процессов. Они покрывают около 75 % поверхности континентов. При этом многие из осадочных горных пород являются полезными ископаемыми: три четверти ежегодно добываемого сырья имеет осадочное происхождение. Это уголь, нефть, газ, вода, железные и марганцевые руды, бокситы, гипсы и ангидриты, соли, фосфориты, цементное сырьё, известняки, пески и глины.

Образуются осадочные горные породы, преимущественно, за счет разрушения и последующего переноса в водные бассейны всех типов пород: магматических, метаморфических и осадочных. Кроме того, они могут формироваться за счет жизнедеятельности и отмирания живых организмов, а также в процессе химических реакций осаждения из водных растворов.

Механизмы формирования осадочных пород, их вещественный и химический состав, в отличие от магматических и метаморфических разновидностей, намного более сложные и разнообразные. Выделяют терригенные («рожденные на суше»), органогенные (образованные за счет жизнедеятельности и отмирания живых организмов) и хемогенные (за счет химических реакций осаждения) разновидности. Широкий диапазон химического и вещественного состава объясняется тонким разделением продуктов разрушения первичных пород и переходом в раствор их составных

частей. Минералогический состав осадочных пород характеризуется широчайшим диапазоном минералов, устойчивых в экзогенных условиях: кварц, халцедон, опал, минералы группы каолинита, силикаты и оксиды железа, марганца, алюминия. Кроме того, осадочные породы могут содержать обломки других пород, скелетные остатки организмов, или продукты их жизнедеятельности (например, зубы акул, коралловые постройки и т. д.), а также состоять из солей.

Такое многообразие пород, обусловленное различиями условий их образования, стало причиной широкого диапазона их текстур и структур. Этим же обстоятельством обусловлены трудности, связанные с классификацией, разночтениями в определении некоторых разновидностей пород.

Современное осадкообразование

Большая часть описываемых пород образуется за счёт осаждения вещества, представляющего собой, в основном, продукты вывётривания, разрушения более древних пород суши. Отсюда их название – ***терригенные*** (образованные на континенте). Скопления таких продуктов, образующихся в современных условиях, называют осадками. Образование осадочного материала осуществляется в различных физико-географических условиях: на поверхности суши и в водных бассейнах в результате различных геологических процессов и явлений, ведущим из которых является выветривание – механическое дробление и химическое разложение пород различного состава и генезиса.

Механическое дробление происходит на поверхности Земли и осуществляется под воздействием внешних климатических факторов (перепада температур днём и ночью, который приводит к формированию сети трещин в породах), а также ветра, речных вод, временных водотоков, морских течений и т. д. Химическое разложение происходит, главным образом, под действием природных вод, заметное влияние при этом оказывают также свободный кислород и углекислый газ. Интенсивность и скорость химического разложения зависит от климатических условий, их величина резко возрастает с приближением к экватору, по мере увеличения температуры. Осадочный материал, образующийся на поверхности суши, перемещается водой, ветром и льдом по её поверхности в водные бассейны. Основным фактором-регулятором распределения обломочного материала, является гидродинамика бассейна, связанная с расстоянием от суши и его глубиной. По мере увеличения глубин и расстояния от суши происходит осаждение всё более и более мелких частиц, так как крупные частицы имеют большую скорость осаждения, чем мелкие.

В прибрежной зоне с активной динамикой вод наблюдается механическая дифференциация вещества – накопление валунов и гальки на пляже и на глубинах в несколько метров, ниже – песка, а ещё ниже (глубины более 60-80 м) – глинистых пород. В прибрежной зоне и на мелководье (глубины до 100 м) в результате жизнедеятельности моллюсков, иглокожих, известковых водорослей и других организмов образуются карбонатные осадки:

ракушняки, пески с ракушками, пески из раковинного детрита (мелких обломков), алевриты и илы, биогермы – постройки водорослей и т.п.

В процессе переноса и осаждения материала происходит осадочная дифференциация, в результате которой под влиянием механических, химических, биологических и физико-химических процессов происходит сортировка или избирательное выделение в твёрдую фазу растворённых и газообразных веществ с последующим переходом отделившихся однородных продуктов в осадок. Образовавшиеся из таких осадков горные породы отличаются простым химическим составом, высокой концентрацией отдельных компонентов или большой однородностью частиц по размеру. Многие осадочные породы благодаря дифференциации представляют собой ценные полезные ископаемые (кварцевые пески, железные руды, каменная соль и др.).

В общем балансе осадочных пород значительно меньший объём занимают органогенные образования, которые представляют собой продукты жизнедеятельности или отмирания живых организмов. Сюда относятся, прежде всего, известняки – продукты отмирания организмов, извлекающих обычно из среды обитания $CaCO_3$, а также опоки, имеющие состав SiO_2, nH_2O, и угли, представляющие собой различные углеродистые соединения.

Ещё реже в разрезе осадочных пород отмечаются ***хемогенные*** образования, которые формируются в процессе химических реакций осаждения из пересыщенных вод (рассолов). Типичными представителями являются соли.

Процессы образования и изменения

Образование осадочных пород (литогенез) представляет собой совокупность ряда последовательных стадий (рис.9):

1. Выветривание (физическое разрушение, дробление пород и последующее химическое разложение до состояния глин), которое приводит к разрушению верхней части всей континентальной коры.
2. Перенос преимущественно речными потоками, а также ветром, ледниками, временными водотоками в сторону водных бассейнов. Продукты выветривания при этом продолжают истираться, измельчаться.
3. Отложение или седиментация рыхлых осадков в водных бассейнах с проявлением процессов дифференциации.

Диагенез включает процессы уплотнения осадка, его цементацию и дегидратацию (удаление воды) вследствие постепенного погружения на большие глубины, увеличения лито- и гидростатической нагрузки, а также повышения температур (до 200-300 ^{o}C) за счёт геотермического градиента. Вследствие диагенеза рыхлый, мокрый песок превращается в сцементированный песчаник, глина – в алевролит, галечник – в конгломерат и т.д.

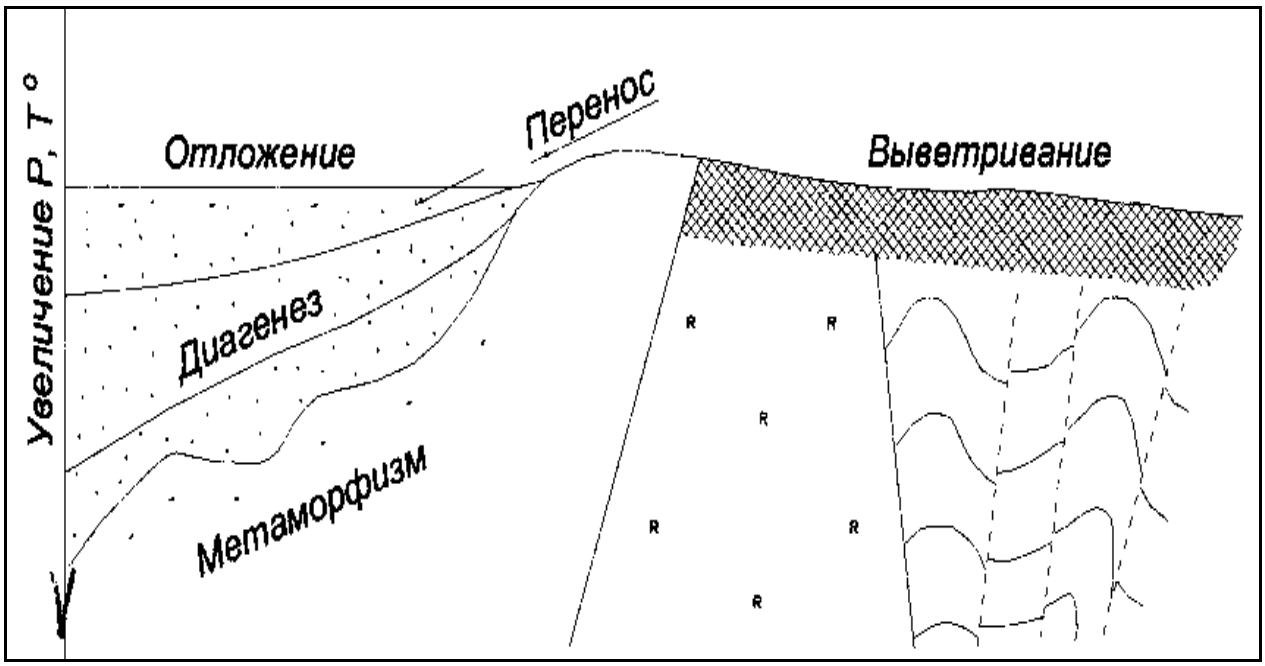


Рис. 9. Соотношение этапов образования и существования осадочных горных пород

Вся упомянутая выше совокупность рыхлых продуктов, вынесенных с территории суши, называется терригенными (рождёнными на континентах, в дословном понимании) породами. Нередко образуются смешанные продукты, когда с терригенными осадками смешиваются с останками органики. Тогда имеем дело с известковистыми песчаниками, глинистыми известняками и т. д. В случае смешивания терригенных осадков с продуктами вулканизма получаем туфогенные песчаники, песчанистые туфы и т. д. Следует отметить, что прилагательное в названии породы относится к тому компоненту, который содержится в меньшем количестве. И, наоборот, существительным обозначается та часть, которая доминирует в породе. Для случаев, когда оба компонента содержатся в примерно одинаковых соотношениях, названия пород обозначаются специальными терминами. Туффитом, например, называют породу, в которой примерно одинаковое соотношение туфового и песчанистого материала. В аналогичном случае для терригенно-карбонатных пород используется термин мергель.

Классификация осадочных горных пород

Общепризнанных классификаций осадочных горных пород нет, что связано, прежде всего, с разнообразием процессов и факторов, контролирующих образование осадков. В нашей стране распространением пользуется классификация осадочных пород, предложенная в 1958 г. М. С. Шевцовым, в основу, которой положено с одной стороны их происхождение, а с другой – их химический и минеральный состав. Подобная классификация осадочных пород по Г. А. Кейльману и В. Б. Болтырову (1985) приведена в виде таблицы 2.

По генетическим признакам среди осадочных горных пород выделяют три главные группы.

Терригенные (обломочные) породы, образуются в результате механического разрушения ранее существовавших горных пород, и накопления обломочного материала. Сюда относят большую группу песчаников, гравелитов, конгломератов, а также их не сцементированные и не окатанные разности: пески, гравий, дресву, галечник и щебень. В эту же группу можно отнести глинистые породы, являющиеся продуктом преимущественно химического разрушения пород, а также переотложения глинистых минералов, освободившихся при выветривании глинистых толщ и тончайшего дробления химически стойких минералов.

Органогенные породы, которые образуются в результате жизнедеятельности организмов (коралловые постройки) и их отмирания (кости рыб, зубы акул и т. д.). В отдельную группу могут выделяться каустобиолиты, образующиеся из растительных и животных (планктон) останков, преобразованных под влиянием биохимических, химических и других геологических факторов и обладающих горючими свойствами. Сюда относят угли, торф, сапропель и др.

Хемогенные породы, образующиеся при химическом разрушении, растворении минералов материнских пород и последующем выпадении новых минералов в осадок из пересыщенных растворов.

Дальнейшее подразделение в пределах выделяемых генетических групп осадочных пород производится по вещественному и минеральному составу. Терригенные осадочные горные породы по размеру обломков (частиц) подразделяются на грубообломочные (псефиты), песчаные (псаммиты), пылеватые (алевролиты) и глинистые (пелиты). По характеру связи (цементации) обломочного материала они делятся на сцементированные и несцементированные (рыхлые).

При классификации органогенных и хемогенных пород определяющим является их химический состав (табл.2.).

Текстуры, структуры, цвет

Текстура – это общий рисунок породы, черты ее строения, определяемые способом заполнения пространства, характером сочетания между собой элементарных частиц (минералов, зерен, обломков). Текстура породы формируется с этапа накопления осадка. Возникшие в процессе осадконакопления первичные текстуры отражают состояние среды в момент накопления осадочного материала и результаты её взаимодействия с осадком. Вторичные текстуры возникают в уже сформировавшейся породе при процессах диагенеза и гипергенеза.

Структура осадочной породы – это особенности её строения, которые определяются размером, формой, степенью однородности составных частей, а также количеством, размером и степенью сохранности органических

остатков. Элементы структуры породы формируются на протяжении всех этапов образования и жизни породы. Напомним, что для магматических пород важным диагностическим признаком был размер зерен, поэтому структуры назывались, например, крупно- или мелкозернистыми. Для метаморфических пород понятие структуры обуславливал другой важный диагностический признак – форма зерна (например, лепидо- или гранобластовая).

Важнейшим признаком, характеризующим строение осадочных пород, является их ***слоистая текстура***. Образование слоистости связано с условиями накопления осадков. Любые перемены этих условий вызывают либо изменение отлагающегося материала, либо обстановку в его поступлении, что внешне выражается в появлении слоёв.

Слои представляют собой более или менее плоские тела, горизонтальные размеры которых во много раз больше их толщины (мощности), и отделяющиеся друг от друга поверхностями напластования. Слоистая текстура обусловлена чередованием слоёв нескольких разностей осадочных пород и может быть вызвана резким изменением размера обломочных частиц и вещественного состава пород, либо ориентировкой осадочного материала.

Для осадочных пород характерна также ***пористая*** текстура, характеризующая степень её проницаемости. По степени пористости выделяются следующие породы:

— ***микропористые***, в которых пористость незаметна на глаз, но устанавливается специальными методами;

— ***мелкопористые***, в которых можно различить мелкие частые поры;

— ***крупнопористые*** – с колебанием размера пор в пределах от 0,5 до 2,5 мм;

— ***кавернозные*** – имеют крупные поры (каверны) на месте выщелоченных раковин и остатков других организмов, а также отдельных частей горной породы.

Для однородных, преимущественно зернистых хемогенных и органогенных пород, характерны ***массивные*** текстуры.

Все несцементированные осадочные горные породы имеют ***рыхлую*** текстуру.

Структура осадочных пород отражает их происхождение. Структуры осадочных пород определяются, главным образом, размером и отчасти формой слагающих их частиц. По величине обломков для терригенных горных пород выделяются следующие структуры:

- ***галечная*** (окатанные обломки) – размер обломков – 10-100 мм;
- ***щебеночная*** (остроугольные обломки) – 10-100 мм;
- ***гравийная*** (окатанные обломки) – 1-10 мм;
- ***дресвяная*** (остроугольные обломки) – 1-10 мм;
- ***псаммитовая*** – 0,1-1 мм;
- ***алевролитовая*** – 0,01-0,1 мм;
- ***пелитовая*** – < 0,01 мм;

Таблица 2.

Классификация осадочных горных пород

Т Е Р Р И Г Е Н Н Ы Е породы				
Рыхлые, несцементированные			Сцементированные	Размер, мм
псефиты	неокатанные	окатанные	Конгломераты	> 10
	Глыбы, щебень Дресва	Валуны, галечники Гравий	Гравелит	1-10
псаммиты		Песок	Песчаник	0,1-1
			песчаник мелкозернистый	0,1-0,25
			песчаник среднезернистый	0,25-0,5
			песчаник крупнозернистый	0,5-1,0
пелиты	Алевриты		Алевролиты	0,01-0,1
	Глины		Аргиллиты	<0,01

О Р Г А Н О Г Е Н Н Ы Е породы	
Название	Химический состав
Известняки, мел	$CaCO_3$
Доломит	$Ca, Mg(CO_3)_2$
Опоки, трепела	$SiO_2 \cdot n H_2O$
Сапропеллиты, торф, угли	Органические соединения углерода

Х Е М О Г Е Н Н Ы Е п о р о д ы		
Название		Химический состав
Соли галоидные:	**галит**	$NaCl$
	сильвин	KCl
Соли сернокислые:	**гипс**	$CaSO_4 \cdot 2 H_2O$
	ангидрит	$CaSO_4$
Соли фосфатные:	**апатит**	$Ca_3(PO_4)_3$
Бурые железняки	**лимонит**	$FeO \cdot n H_2O$, $Fe(OH)_2$
	гематит	Fe_2O_3
Бокситы		$Al_2O_3 \cdot n H_2O$, $Al(OH)_3$ $AlO(OH)$

Для хемогенных пород (известняки, доломит, гипс) характерна кристаллически-зернистая структура. В зависимости от размера слагающих породу зерен выделяют крупнозернистую (преобладают зерна величиной 1,0- 0,5 мм), среднезернистую (0,5-0,25 мм), мелкозернистую (0,25-0,1 мм), иногда выделяют разнозернистую, когда порода плохо отсортирована.

Оолитовая структура наблюдается в случаях, когда в породе в массовых количествах присутствуют мелкие шаровидные стяжения (оолиты) различного размера (боксит, оолитовый известняк).

Структуры пород, в составе которых большое участие принимают остатки организмов (свыше 20-30 % объема породы), определяются степенью сохранности этих останков и их количеством. Выделяются следующие структуры: ***биоморфная*** – в случае хорошей сохранности скелетных остатков организмов; ***детритовая*** – порода почти полностью состоит из скелетных обломков размером крупнее 0,1 мм.

Осадочные породы имеют самую разнообразную окраску и оттенки. При этом иногда окраска является признаком, характерным для определения этих пород и зависит от: 1) – окраски минералов, слагающих пород, 2) – окраски рассеянных в породе примесей и цемента и 3) – цвета тончайшей корочки, часто обволакивающей зерна составляющих породу минералов. Белый и светло-серый цвета обычно обусловлены окраской главных минералов осадочных пород (кварца, каолинита, кальцита, доломита и др.) и свидетельствует до некоторой степени о чистоте породы. Темно-серый и черный цвета чаще всего появляются в результате примеси углеродистого вещества и, реже, оксидов и гидрооксидов марганца. Красный и розовый цвета связаны с примесью в породе оксидов железа, а зеленый цвет зависит от примеси закисного железа и присутствия минералов с зеленой окраской – чаще глауконита, реже хлорита и малахита.

Основные разновидности осадочных пород

Терригенные породы

Грубообломочные породы (псефиты) в зависимости от размера и формы обломков подразделяются на:

— глыбы и валуны, имеющие соответственно угловатые и окатанные обломки размером свыше 100 мм в поперечнике;

— щебень и галечник – угловатые и окатанные обломки размером от 100 до 10 мм в поперечнике;

— дресву и гравий – угловатые и окатанные обломки размером от 10 до 1 мм в поперечнике.

Окатанность материала свидетельствует о длительности времени и дальнем пути переноса обломков от места разрушения породы до места аккумуляции, не окатанные обломки – о кратковременности и незначительных расстояниях переноса.

Сцементированные породы, состоящие из окатанных, округленных обломков, размеры которых превышают 10 мм – называются **конгломераты**; соответственно порода, состоящая из не окатанных, угловатых обломков крупнее 10 мм, называется **брекчией**. Гальки в конгломератах состоят из магматических, метаморфических и осадочных пород, цементом служит

песчано-глинистый, известково-глинистый, карбонатный, кремнистый или иной материал. Возможно выделение олигомиктовых конгломератов, характеризующихся существенно кварцевым составом галек (белый жильный кварц, кварциты) и полимиктовых конгломератов, где гальки имеют разнообразный состав. Брекчии обычно обладают однообразным составом обломков и цементирующего материала.

Гравелиты слагаются обломками различных пород и, реже, минералов с преобладающим размером обломков 1-10 мм. Цемент – карбонатный, карбонатно-глинистый или песчано-глинистый.

Практическое применение грубообломочные породы находят в дорожном строительстве, при отсыпке железнодорожного балласта и изготовлении бетона, иногда используются в строительстве как декоративный материал (некоторые разности брекчий и конгломератов). Иногда грубообломочные породы содержат ценные полезные ископаемые (золото, уран и др.).

Песчаные породы (**псаммиты**) состоят из зерен, размеры которых составляют 0,1-1 мм, и представлены **песками** и **песчаниками.** Первые сложены несцементированными скоплениями обломков, вторые – сцементированные обломками той же величины. В зависимости от размера обломков выделяются крупнозернистые (0,5-1 мм), среднезернистые (0,25-0,5 мм) и мелкозернистые (0,1-0,25 мм) пески и песчаники. В породах существенно преобладает кварц, далее идут полевые шпаты, слюды, халцедон, глауконит, а также глинистые минералы, Цементирующая часть песчаных пород чаще всего представлена глинистым материалом и кальцитом, реже – доломитом, опалом, оксидами железа.

Мономинеральные песчаные породы состоят в основном из кварца, полимиктовые пески и песчаники состоят из зерен различных минералов (кварца, полевых шпатов, слюды).

Пески и песчаники имеют широкое применение для получения кирпича и бетона, а также в дорожном строительстве. Кварцевые пески и песчаники служат сырьем для получения динаса, оконного стекла, в литейном и керамическом производстве.

Пылеватые породы (**алевриты**) состоят из зерен, имеющих размер 0,1-0,01 мм. Рыхлые скопления таких обломков называются **алевритами**, а сцементированные – **алевролитами**. Минеральный состав обломочной части примерно такой же, как и в песчаных породах, но здесь выше доля устойчивых минералов – кварца, мусковита, халцедона. Характерными компонентами их являются частицы глинистых минералов и хлорит. Цементами алевролитов служат кремнисто-глинистая, хлорит-глинистая масса, карбонаты и гидрооксиды железа.

Наиболее характерным представителем является лесс.

Лесс – светлая палево-желтая легкая однородная порода, обычно слабо сцементированная, состоящая, главным образом, из частиц кварца и, меньше, полевых шпатов с примесью глинистых частиц и карбонатов. Наличие

последних легко обнаруживается с помощью соляной кислоты, от которой лесс «вскипает».

Алевролит – сцементированная порода различной окраски, алевролитовой структуры, часто имеет тонкослоистую текстуру с горизонтальной или косой слоистостью. Окраска породы определяется преимущественно окраской цементирующего материала (глинистыми минералами). Характерной особенностью алевролитов является шероховатость пород в изломе, что определяется размером (0,1-0,01 мм) обломочных зерен.

Глинистые породы состоят из мельчайших (< 0,01 мм) кристаллических и аморфных частиц различных глинистых минералов, в меньшей степени, из зерен хлоритов, оксидов и гидроксидов алюминия, глауконита, опала, кварца и других минералов – продуктов химического разложения горных пород в поверхностных условиях. Образование глинистых пород происходит в результате химических процессов, ведущих к накоплению глинистых минералов, и одновременном переносе мельчайших частиц.

Глины – это легко размокающие породы. В сухом состоянии являются или землистыми, рыхлыми, легко растирающимися в порошок, или плотными крепкими агрегатами с землистым или раковистым изломом, имеющими микропористую текстуру. В состав глин входят различные минералы, поэтому окраска глин разнообразна и зависит как от состава глин, так и от примесей.

Каолинитовые глины или **каолины** имеют преимущественно белый или светло-серый цвет, монтмориллонитовые или **бентониты** – светло-серый или с желтоватым, или с зеленоватым оттенком, гидрослюдистые – от белой до зеленой или пестрой окраски.

Глины являются ценным сырьем для изготовления фарфора, фаянса, огнеупорного кирпича и др.

Аргиллиты – уплотненные в процессе диагенеза глины. Обладают землистым или раковистым изломом. Цвет может быть различным, чаще всего, это серые или темно-серые породы. По минеральному составу это преимущественно гидрослюдистые породы с примесью кварца, полевых шпатов, слюд и др.

Мергели – породы смешанного состава, состоящие из кальцита и на 45-75 % из глинистых частиц. Мергели образуются в морских бассейнах, лагунах и пресноводных озерах при одновременном поступлении глинистого и карбонатного материала. В зависимости от содержания глины различают известковистый аргиллит, мергель и глинистый известняк. По внешнему виду это плотная и однородная порода белого, серого, желтоватого цвета. Вскипает при взаимодействии с соляной кислотой, оставляя желтые пятна за счет концентрации на месте реакции глинистых частиц. Мергели широко применяются в цементной промышленности.

Отмеченные продукты настолько часто представляют собой смешанные образования, что их разделение иногда не представляется возможным. Поэтому они рассматриваются под общим названием.

Известняки – наиболее распространенные карбонатные породы. Это обычно мономинеральные породы, состоящие из кальцита. Наиболее типичный признак известняков – интенсивная реакция с соляной кислотой. Цвет их обычно светлый-белый, светло-желтый, светло-серый. Интенсивность окраски определяется присутствием органического вещества. У них обычно *массивная* и *слоистая* текстуры. Структура ***биоморфная, детритовая, биогенно-шламовая, зернистая***.

По генетическим признакам выделяют: 1) органогенные известняки, образующиеся из скоплений раковин, их обломков, скелетов кораллов, внутренних слепков, сложенных кальцитом; 2) хемогенные известняки с характерной оолитовой структурой, пористой текстурой, образующиеся за счет реакций осаждения; 3) обломочные известняки, состоящие в основном из обломков известняков или ракушек в различной мере окатанных.

Мел – специфическая карбонатная порода, состоящая из кальцита. Окраска породы белая, иногда с сероватым или буроватым оттенком. Мел непрочен, легко поддается обработке ножом, стеклом, пачкает руки, высоко порист (до 40-50 %). Порода интенсивно «вскипает» при взаимодействии с соляной кислотой. Основная составная часть породы – органические остатки (раковинки фораминифер, остатки известковых водорослей). Структура мела ***пелитоморфная.***

Доломиты внешне сходны с известняками, но основной составной частью их является минерал доломит. Окраска доломитов преимущественно светлая, серая, кремовая, зеленовато-серая. Структура ***мелко-*** и ***тонкозернистая,*** текстура ***массивная*** и слабо выраженная ***слоистая.***

Карбонатные породы широко используются в различных отраслях промышленности: для производства цемента, в виде флюса при выплавке металлов, для известкования кислых почв и др.

Опоки – твердые породы белого, серого до черного цвета, часто обладающие раковистым изломом. Состоят из мельчайших округлых стяжений (глобулей) опала. Окраска пород в целом более темная, чем у трепелов – от серой до темно-серой и черной.

Трепелы – породы, состоящие из мельчайших зернышек опала, скрепленных опаловым цементом. Трепел может быть рыхлым, компактным, плотным и пористым. Цвет от белого, сероватого до желтовато-серого.

Опоки и трепелы – кремнистые породы, в значительной части состоят из опала $SiO_2.nH_2O$ и халцедона SiO_2. Содержание этих минералов в породах составляет от 50 до 98 %.

Кремнистые породы применяются как теплоизоляционные, строительные и фильтрационные материалы, как наполнители, катализаторы, адсорбенты.

Каустобиолиты образуются из остатков растительных или животных организмов, преобразованных под влиянием различных геологических факторов и способных гореть на воздухе.

Торф представляет собой скопление относительно малоизмененных останков растительных тканей, образующихся в условиях болот. Это более или менее рыхлая бурая или черная гумусовая масса, содержащая в большем или меньшем количестве видимые останки растительности (листья, стебли, корни, древесину, мох), высушенный торф обычно рыхлый, легкий.

Каменные уголь – порода черного цвета, хрупкая, пачкающая руки. Излом раковистый. Образуется, в частности, при преобразовании торфа в результате химического процесса его изменения (углефикации). Большинство углей обладает хорошо выраженной слоистостью. В зависимости от степени преобразования в них могут сохраняться следы растительных тканей, либо они могут состоять из однородной, практически бесструктурной матовой массы.

Каустобиолиты широко используются как промышленное топливо, а также в качестве сырья для химической промышленности.

Соли галлоидные. Каменная соль. Главная составная часть ее – **галит** (NaCl). Окраска породы светло-серая, белая, но иногда может быть красной, черной или синей. Структура породы ***кристаллически-зернистая***, текстура ***массивная*** или ***слоистая.*** Характерный диагностический признак – соленый вкус.

Каменная соль используется в пищевой промышленности для сохранения скоропортящихся продуктов и как приправа к пище. Взрослый человек в течение года потребляет 6 кг соли.

Калийная соль (сильвинит) – наиболее распространенная калийная соляная порода. Состоит из **сильвина** (KCl), обычно с существенной примесью карналлита (KCl, $MgCl_2$.$6H_2O$) и галита. По характеру окраски выделяются красные и пестрые сильвиниты. Текстура их ***слоистая, массивная***, структура ***разнозернистая*** с преобладанием ***мелко-*** и ***среднезернистой.***

Основным потребителем калийных солей является сельское хозяйство, где калий применяется для удобрения почвы. Остальное количество калийных солей потребляется химической промышленностью, выпускающей несколько продуктов, в которых основной составной частью является калий.

Соли сернокислые. Гипс – мономинеральная порода, состоит из минерала гипса. Окраска породы светлая: белая, кремовая, реже серая или бурая. Структура ***мелко-*** и ***среднезернистая***, текстура ***массивная***, реже ***слоистая.*** Порода невысокой твердости, царапается ногтем.

Ангидрит имеет также светлый, голубовато-серый, серый, белый цвета. Плотность его выше, чем у гипса, поэтому по удельному весу он легко отличается от последнего. Отчетливо фиксируется различие по твердости (породы ногтем не царапается). Структура ангидрита ***средне-*** и ***мелкозернистая,*** текстура ***массивная*** и ***слоистая.***

Гипсы и ангидриты используются в строительстве для приготовления вяжущих материалов – алебастра, формовочного гипса и др., а также в производстве серной кислоты, бумаги, в медицине.

Соли фосфатные. **Фосфориты** – довольно распространенная порода, образование которой связано с гибелью, разложением и химической переработкой останков морских организмов. Это осадочные горные породы более чем на 50 % состоящие из фосфатов кальция. Окраска фосфоритов обычно темная, серая, черная, коричнево-серая и зеленовато-серая определяется, главным образом, присутствием органического вещества, сульфидов железа и глауконита. Встречаются и светлоокрашенные разности.

Фосфориты являются сырьем для производства фосфорных удобрений для сельского хозяйства.

Бурые железняки. Образование железистых и марганцевых пород, содержащих минералы железа и марганца (оксиды, гидроксиды и карбонаты) и являющихся рудами, связывается обычно с выветриванием богатых этими минералами горных пород. Из них в процессе диагенезе возникают морские, озерные, болотные и другие руды.

Бурые железняки обладают бурой окраской различных оттенков до черной и сравнительно большой плотностью. Характерна ***оолитовая, землистая, конкреционная, натечная*** структура, ***пористая*** текстура. В составе бурых железняков преобладают минералы – оксиды и гидроксиды железа: гетит, гидрогетит, лимонит, гематит.

Глауконитовые песчаники – глауконит-железистая разновидность гидрослюды характерного ярко-зеленого цвета, является аутигенным минералом морских бассейнов нормальной солености. Для глауконита характерно образование округлых комочков размером 0,2-0,4 мм. Песчаники, содержащие округлые зерна глауконита, называют глауконитовыми. Структура породы ***псаммитовая***, текстура слабо выраженная ***слоистая.***

Бокситы состоят преимущественно из минералов - гидрооксидов алюминия: гидраргиллита, диаспора и бемита, а также постоянной примеси гидроксидов железа. Цвет бокситов буровато-красный, кирпично-красный, охряно-желтый, серый. Встречаются в виде землистых или оолитовых масс.

Бокситы – основная руда для получения алюминия, кроме того, используются для получения огнеупоров, абразивов и в качестве химического сырья.

Вулканические туфы, генетически связаны с магматическими процессами, по условиям образования и внешнему облику относятся к осадочным горным породам. Продукты вулканических извержений, выброшенные в атмосферу, падают на землю и становятся обычными обломками. Этот материал в процессе диагенеза превращается в горные породы – туфы. Текстуры туфов слабо выраженные ***слоистые, пористые***. Структура определяется размерностью обломочного материала. Состав туфов – обломки вулканических пород, минералов, вулканического стекла.

3. ОПИСАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ

Ниже приведено описание ряда геологических маршрутов в окрестностях г. Екатеринбурга, представляющих наибольший интерес для студентов специальности «Защита в чрезвычайных ситуациях». Большинство из них расположены в пределах городской черты, и лишь некоторые – за ее пределами. Участки характеризуются разнообразием геологического строения, а также опасными потенциальными угрозами. За отведенное для практики время предполагается проведение пяти-шести экскурсий.

3.1. По Уктусскому массиву

Нечасто встречаются геологические массивы, в развитии и преобразовании которых принимают участие различные эндогенные и экзогенные процессы.

Наиболее интересными из таких является ***Уктусский дунит-клинопироксенит-габбровый массив,*** который расположен на южной окраине Екатеринбурга и слагает денудационную возвышенность с относительным превышением около 60 м над уровнем р. Исеть. Массив площадью около 50 км^2 имеет в плане овальную форму, слегка вытянут в меридиональном направлении и залегает среди вулканогенно-осадочных толщ предположительно силурийского возраста.

Массив слагают интрузивные породы – пироксениты, дуниты и габбро. Дуниты образуют три обособленных тела – южное, центральное и северное. Габбро отделены от дунитов полем пироксенитов и слагают восточную часть массива (рис. 10).

В пределах описываемого участка проявляются также многочисленные экзогенные процессы и их продукты. Особенностью строения данного участка является широкое проявление процессов речной деятельности с развитием разных типов террас.

Описание маршрута

Маршрут начинается в пос. Уктус, на правом берегу р. Исети, в устьевой части р. Патрушихи, у каменного моста, сложенного из бутового камня, памятника архитектуры начала XIX в. (троллейбусная остановка «Уктус»).

Поселок Уктус был основан вокруг казенного железоделательного завода (одновременно с Алапаевским, Каменским и др.) в 1704 г., когда для войны со шведами Петру I потребовалось большое количество металла для пушек.

Т.Н. 1. В 500 м выше каменного моста сохранились остатки плотины пруда Уктусского завода. Место для пруда было выбрано весьма удачно. Здесь река имеет широкую (300-400 м) корытообразную долину с крутым скальным правым берегом и терасированным высоким левым берегом, где разместились

цеха завода (ныне лифтостроительный) и основные гражданские постройки поселка Уктус.

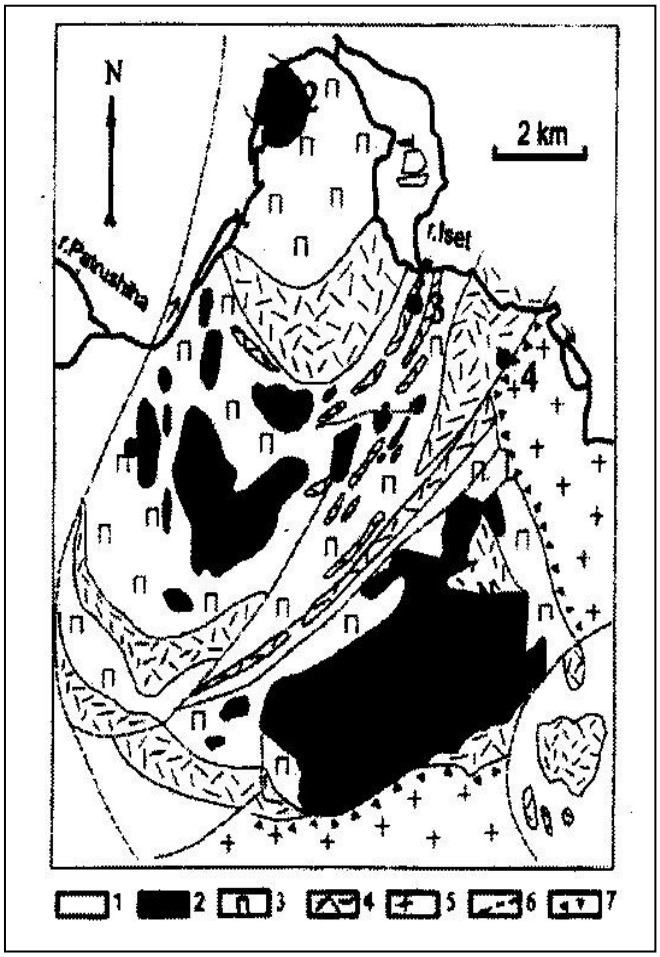


Рис. 10. Схема геологического строения Уктусского дунит клинопироксенит-габбрового массива.

1 – вмещающие вулканогенно-осадочные и метаморфические породы палеозоя; 2 – дуниты; 3 – клинопироксениты и верлиты; 4 – оливиновые и амфибол-пироксеновые габброиды;5 – гранитоиды; 6 – тектонические нарушения; 7 – зоны развития эруптивных гипербазит-гранитных брекчий

Скальные выходы сложены породами черного, темно-зеленого цвета средне- и крупнозернистой структуры, массивной текстуры, по составу представлены слабо серпентинизированными пироксенитами и перидотитами.

В настоящее время, когда воды пруда спущены, хорошо просматривается строение русла, которое можно описать. Можно также построить поперечный профиль р. Патрушихи в районе развилки автомобильных дорог.

Т.Н. 2. На данном участке русло реки делает меандрирующий (извивающийся) изгиб**,** обусловленный зонами дробления и выветривания в тектонических нарушениях. С этой точки хорошо видны надпойменные террасы левого берега, представленные эрозионно-аккумулятивным типом, верхний плодородный слой которых жители используют под огороды.

В пойменной части отчетливо выделяются пойменные и старичные отложения. На берегу реки можно видеть отложения русловой отмели и береговой вал. Экскурсанты составляют поперечный профиль реки.

Следует обратить внимание, что профиль реки асимметричный: левый борт пологий, а правый крутой. В случае аварийного спуска воды из Елизаветинского пруда могут пострадать строения, находящиеся в пойме реки на левом берегу. Поэтому строить объекты на левом берегу не рекомендуется.

Т.Н. 3. Карьер по разработке дунитов, которые в 50-е гг. XX столетия добывали в качестве сырья для получения магнезиальных огнеупоров. Размеры 60х30 м, борта отвесные, высота до 12 м. Выработкой вскрываются дуниты черного цвета с зеленоватым оттенком, массивные, мелко- и среднезернистые. С поверхности породы выветрелые, из-за чего их цвет становится светло-коричневым. Толщина корки выветривания 1-2 см. Окраска корочки выветривания обусловлена наличием глинистого минерала – керолита и гидрокарбоната магния. Дуниты разбиты густой сетью тектонических трещин.

По плоскостям некоторых трещин развита серпентинизация с образованием корок толщиной до 0,5 см. Серпентин светло-желто-зеленый. На плоскостях трещин видны борозды скольжения и уступчики, по которым участники экскурсии могут определить направление перемещения блоков.

На этой точке наблюдения можно сделать зарисовки одной из стенок карьера и произвести массовый замер для последующего построения диаграммы трещиноватости. Студентам напоминают устройство горного компаса, учат пользоваться им при определении элементов залегания пород и трещин.

По ходу движения к следующей точке наблюдения маршрут проходит у подножия техногенного отвала, образованного при строительстве трассы большого лыжного трамплина, и вдоль старицы р. Патрушихи. Здесь внимание участников экскурсии акцентируется на гравитационной дифференциации техногенного делювия (от лат. Deluer – смывать).

Т.Н. 4. Карьер размером 35х45 м с высотой бортов до 15 м. Карьером вскрыты те же дуниты**,** что и в Т.Н. 3. На этой точке наблюдения можно произвести хорошие зарисовки обнажения и набрать дополнительный материал для статистического измерения трещиноватости. Трещины более пологие и в верхней части имеют куполообразный изгиб. По некоторым плоскостям трещиноватости развивается корочка серпентинитов, что может способствовать перемещению больших блоков при искусственной встряске или при землетрясении. Необходимо обратить внимание студентов на то, что борта карьера в Т.Н. 3 почти вертикальные, а в Т.Н. 4 – не более 30 градусов. Пологие борта обусловлены соответствующей системой трещин. Рекомендуется сделать массовые замеры трещиноватости с последующим обобщением результатов.

Т.Н. 5. Выше по течению р. Патрушиха запружена. Выше плотины расположен Ново-Елизаветинский пруд. Водохранилище, к сожалению, затопило практически полностью старые песчано-глинистые карьеры кирпичного завода**.** Карьеры вскрывали аллювиальные (от лат. alluvio – нанос) отложения первой и второй надпойменных террас, в которых были найдены кости и бивни мамонтов, шерстистых носорогов и других животных, часть из которых можно видеть в экспозиции Уральского геологического музея. Разрез террасы можно наблюдать в западном борту пруда, у самой плотины. Возле плотины можно видеть небольшое зарастающее озерко, по-видимому, имеющее старичное происхождение. Здесь же можно проследить начальную стадию процесса торфообразования. Сама плотина имеет длину более 100 метров. Ее

восточная часть упирается в плотные магматические породы, а западная – в рыхлые песчано-глинистые отложения, что может быть причиной ее подмыва, если контакт недостаточно надежно закреплен.

Рис.11. Забой во 2-м дунитовом карьере

Т.Н. 6. На крутом склоне реки (Ново-Елизаветинского пруда) небольших размеров коренные выходы перидотитов**.** Горные породы темного цвета, чаще полосчатые или рассланцованные, реже массивные, мелко- среднезернистые. Пространство между коренными выходами задерновано, но геологическим молотком можно вскрыть растительный слой и докопаться до делювия, представленного остроугольными обломками перидотитов и сцементированных глинистой породой темно-зеленого цвета.

Т.Н. 7. Коренные гребневидные выходы пироксенитов на берегу водоема. Горные породы от черного до темно-зеленого цвета, средне- и крупнозернистые, массивные. В обнажении хорошо наблюдаются тектонические трещины различных направлений, элементы, залегания которых легко измерить.

Отчетливо видно, что пироксениты имеют высокую механическую устойчивость, чего нельзя сказать о перидотитах в предыдущем обнажении, которые образуют значительно сглаженные небольшие выходы.

Рис.12. Ново-Елизаветинский пруд. На противоположном берегу видны выходы пород Камышловской террасы

Т.Н. 8. Двигаясь дальше по тропе вдоль берега пруда до места впадения реки, наблюдаем практически непрерывно коренные скальные выходы, чаще гребневидного характера, пироксенитов, довольно сильно трещиноватых.

Особенностью данного участка горного массива является появление хорошо выраженной трещиноватости уже северо-восточного направления, что проявляется в тектонических ограничениях выходов пород и ориентировке логов и оврагов на склоне массива.

Северо-западное направление тектонических нарушений выражается здесь в спрямленных субпараллельных участках меандрирующей реки и частично в образовании оврагов на склоне.

Т.Н. 9. Маршрут переходит по склону на хребет Уктусского габбро-пироксенит-дунитового массива, по которому прорублена меридиональная просека. Двигаясь на юг по ходу маршрута, встречаем коренные выходы преимущественно пироксенитов. Породы черного, темно-зеленого цвета, массивной текстуры, крупнозернистой структуры, состоят преимущественно из пироксена с небольшим количеством оливина.

Хребтовая часть массива представлена чередованием небольших увалов и понижений. На вершинах этих увалов пироксениты образуют гребневидные выходы с тектоническими ограничениями северо-восточного простирания и углами падения 80-90 °.

Рис. 13. Крупный лог на западном склоне Уктусского массива, сформированный вдоль тектонического нарушения

В понижениях на хребте постоянно наблюдаются родники, которые свидетельствуют о заложении этих понижений на зонах трещиноватости, по которым циркулируют трещинные воды. Можно определить дебит (расход воды) источников, вкусовые качества воды.

Подытоживая маршрут, преподаватель делает акценты на потенциально возможном развитии на участке природных угроз. Сюда относится возможность прорыва плотины Елизаветинского пруда, суффозионных процессов вдоль русла реки с рыхлыми отложениями, подтопления построек на пойме реки, обвалов техногенного делювия с крутых склонов. При знакомстве с зеркалами скольжения преподаватель показывает механизм реализации тектонических движений, которые протекают и в новейшее время.

3.2. Елизаветинское месторождение

Маршрут начинается в пос. Рудном (куда доставит автобус № 17). На юго-западной окраине поселка размещается Елизаветинское месторождение природно-легированных бурых железняков. Месторождение было открыто в 1829 г. и отрабатывалось около 150 лет.

На месторождении рудоносной является кора выветривания в различной степени серпентизированных дунитов.

По генезису кора выветривания остаточная.

По морфологии – площадная, с линейными участками заглубления, развитыми по тектоническим нарушениям, образующими значительное количество глубоких карманов в палеозойском фундаменте.

Общая мощность элювиальных (от лат. eluo – вымываю) отложений колеблется от 5 до 80 и более метров, в среднем составляет 30-40 м.

Считают, что древний элювий сформировался в юрско-меловое время и отвечает тропическому или субтропическому, теплому и влажному климату.

Наиболее полно профиль коры выветривания описан А. Л. Яницким (1965), который приводит его в таком виде (снизу вверх):

1) зона дезинтеграции в различной степени серпентинизированных дунитов;

2) зона выщелачивания, сложенная карбонатизированными, слабо нонтронитизированными дунитами и аподунитовыми серпентинитами (мощность 1-5 и более метров);

3) зона охр представлена охристыми порошковатыми глинистыми рудами и кремнисто-железистыми породами.

Зона дезинтеграции серпентинизированных дунитов**.** Дуниты, обнажающиеся в основании и по бортам карьера, мелко- или тонкозернистые, плотные. Крепкие, иногда почти свежие или слабо выветрелые дуниты наиболее полно вскрыты в щебеночном карьере в 200 м к западу от основного карьера.

Породы по тектоническим трещинам разбиты на блоки и практически превращены в щебень. По плоскостям трещин нередко можно видеть зеркала скольжения, свидетельствующие о тектонических перемещениях отдельных блоков.

В южном борту карьера можно в миниатюре увидеть всю зональность химического выветривания с образованием зон выщелачивания.

З о н а в ы щ е л а ч и в а н и я . Дуниты и серпентинизированные дуниты, как у поверхности, так и на глубине вдоль зон тектонических нарушений в разной степени подвергались процессам выветривания. Процессы выветривания выразились в разложении и выщелачивании материнских пород, в их карбонатизации, частичной нонтронитизации и керолитизации. Породы в большей части сохраняют основные черты первичной структуры материнских пород, в некоторых случаях эти породы могут переходить в кавернозно-пористые образования различной крепости.

Под влиянием процессов выветривания породы принимают зеленовато-серую или серовато-белую окраску, иногда с бурыми, желтыми или черными пятнами. Эта пестроцветная окраска обусловлена скоплениями различных минеральных агрегатов: магнезита, кальцита, нонтронита, керолита, минералов марганца и др.

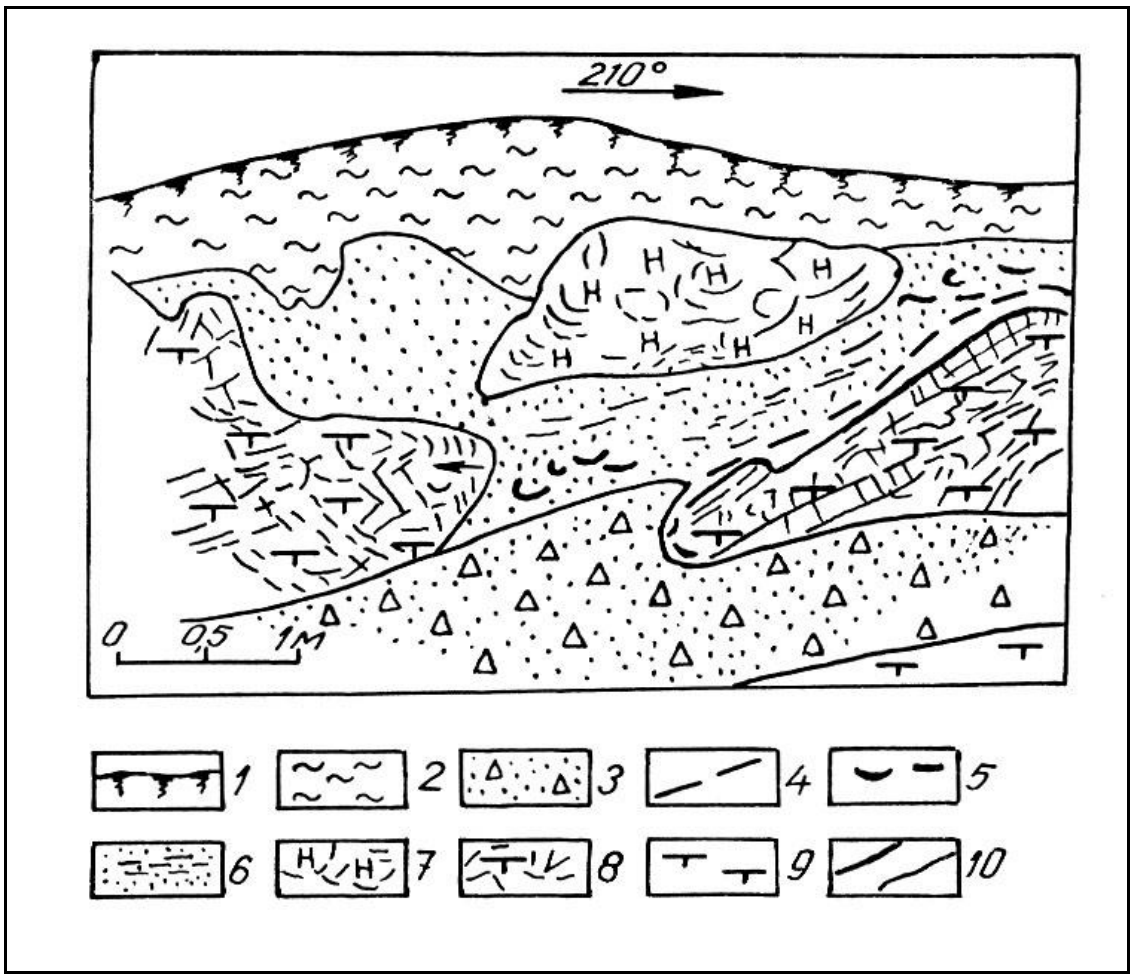


Рис.14. Карман коры выветривания серпентинизированных дунитов в борту щебеночного карьера (Елизаветинское месторождение).

Условные обозначения: 1 – почвенно-растительный слой; 2 – глины, суглинки; 3 – осыпь; 4 – скопления магнезита; 5 – жеоды бурых железняков; 6 – охристые бурые железняки; 7 – нонтронитизированные серпентиниты; 8 – зона дезинтеграции дунитов; 9 – дуниты с корочкой выветривания; 10 – геологические границы.

Тектонические трещины (сместители, разломы), многочисленные трещины отдельности, а также микропоры и пустоты, образовавшиеся вследствие выветривания и выщелачивания эндогенных минералов, выполнены преимущественно магнезитом, местами кальцитом, доломитом или керолитом, кварцем, опалом с образованием их гнезд и прожилков. Мощность некоторых прожилков магнезита достигает 2-3 см и более.

Рыхлые, землистые выветрелых дунитов представляют собой породы, подвергшиеся более глубокому изменению. Они не только дезинтегрированы механически, но и разложены и преобразованы химически. Они находятся в таком состоянии, что при слабом ударе рассыпаются на мелкий щебень или сыпучую землистую массу зеленовато-серого или грязно-серого цвета. На некоторых участках поверхность щебня покрыта многочисленными мельчайшими черными дендритами марганцевых минералов, а иногда пленками карбонатов, на которых также наблюдаются ветвистые дендриты марганцевых образований.

Зона охр залегает в верхней части разреза и представлена рыхлой буровато-желтой или лимонно-желтой слабо сцементированной массой, состоящей из порошковатых и комковатых образований гетита, гидрогетита, гематита, магнетита, и марганцовых минералов. Охристые порошковатые руды заполняют также имеющиеся на поверхности карманообразные и воронкообразные углубления, развитые вдоль зон тектонических нарушений и уходящие на глубину на многие метры.

Такие взаимоотношения руд с подстилающими породами можно наблюдать в основном карьере. Среди охристых руд в железорудном карьере можно наблюдать останцовые глыбы и куски выветрелых карбонатизированных дунитов и серпентинитов, выделяющихся на буром фоне серовато-зеленой окраской. Здесь же отмечаются отдельные глыбы и куски кремнисто-железистых пород желтовато-бурого или бурого цвета.

Описываемые породы относятся к природно-легированным хромоникелевым железным рудам.

В ряде мест кремнисто-железистые породы слагают значительные участки. В некоторых обнажениях они образуют скальные выступы, положительные формы рельефа, что объясняется их сравнительно высокой прочностью. В карьере студенты могут познакомиться с различными формами выветривания: физического, химического, органического.

Здесь видно как разные продукты выветривания влияют на величину естественных откосов. Уменьшение механической прочности первичных ультраосновных пород приводит к уменьшению угла откоса искусственных выработок (карьера). Рыхлые породы в результате воздействия на них талой воды очень быстро оплывают. Здесь же в карьере можно проследить процессы естественной рекультивации земель.

3.3. Шабровское рудное поле

Шабровский рудный район расположен в 25 км к юго-западу от г. Екатеринбурга. В пределах Шабровского рудного района (рис.15) развиты месторождения железистых кварцитов, гондитов, родонитов, мраморов, тальк-магнезитового камня, талька, декоративно-облицовочного серпентинита и золота. Все они достаточно тесно сопряжены в пространстве, часто приурочиваются к одним и тем же тектоническим структурам – шовным зонам.

Шабровское рудное поле приурочено к полосе метаморфических пород, образующих крупную Шабровскую моноклиналь с крутопадающими крыльями и разделяющих Сысертский и Шабровский массивы гранодиоритов – гранитов (рис. 15).

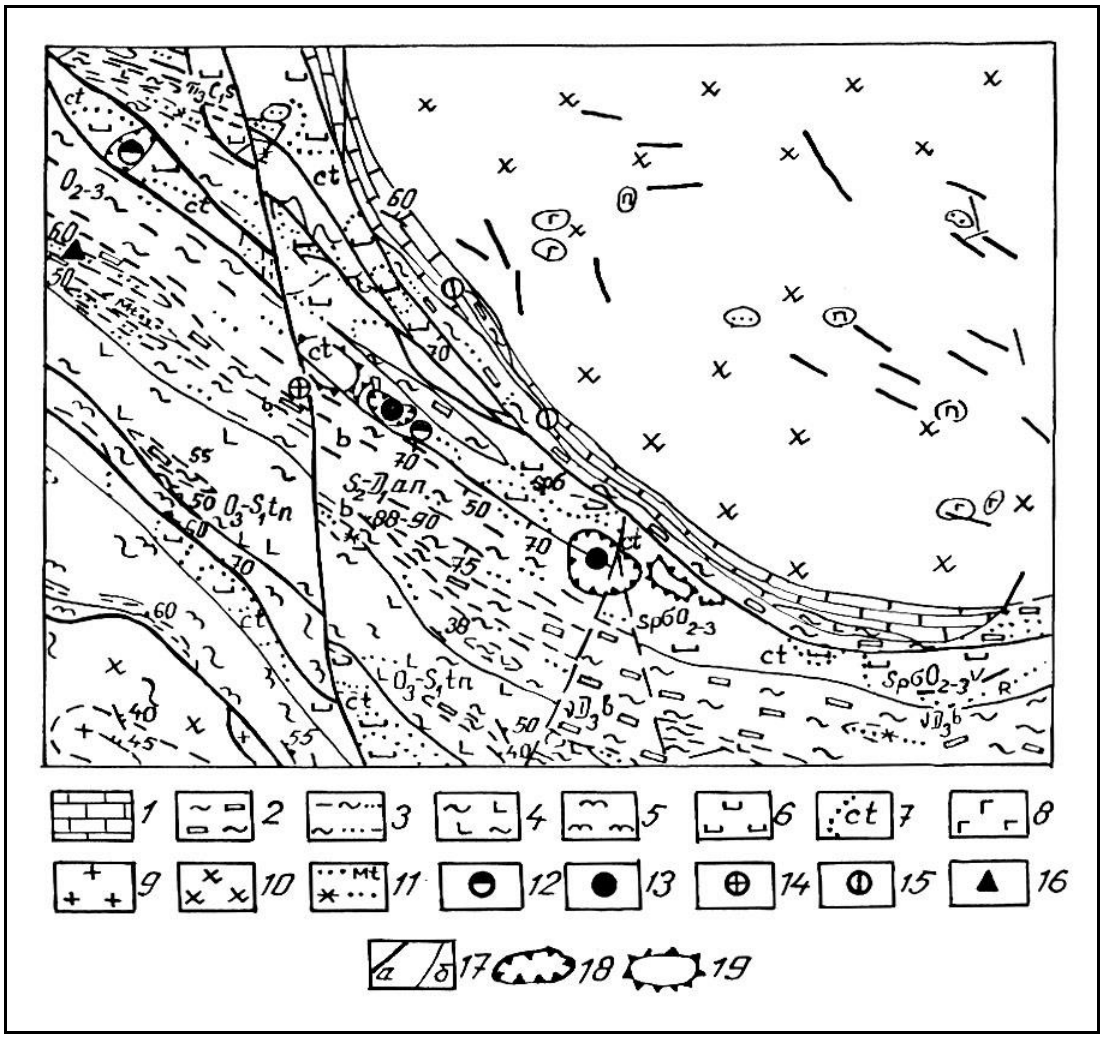


Рис. 15. Геологическое строение Шабровского рудного поля:

1 – мраморы; 2 – сланцы преимущественно углисто-графит-кварцевые; 3 – серицит-кварцевые, филлитовидные сланцы; 4 – зеленые сланцы по афировым базальтам; 5 – кристаллические сланцы; 6 – серпентиниты; 7 – тальк-карбонатные породы; 8 – габбро; 9 – граниты; 10 – гранодиориты; 11 – кварциты магнетит- и марганецсодержащие; 12 – 16 месторождения: 12 –антигоритовых змеевиков, 13 – тальк-магнезитового камня, 14 – золота, 15 – мрамора, 16 – железистых кварцитов; 17 границы разломов (а), стратиграфические (б); 18 – карьеры; 19 - отвалы

Среди метаморфических толщ в Шабровском районе, по последним данным геологосъемочных работ (Г. В. Ярославцев и др., 1995 г.), выделяется четыре свиты (сверху вниз): кунгурковская (D_1kn), андреевская (S_2-D_1an), тенякская (O_3-S_1tn) и саитовская (R_2st).

Основание разреза слагают высокометаморфизованные породы **саитовской свиты ( )**: кристаллические сланцы мусковитовые, биотитовые и мусковит-биотитовые, часто с гранатом, частично мигматизированные; амфиболиты, участками биотитизированные, часто с гранатом, частично мигматизированные; прослои железистых кварцитов, единичные линзы мраморов. Мощность более 1000 м.

Тенякская свита ( ) представлена преимущественно вулканогенными образованиями основного состава, преобразованными в зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фациях регионального метаморфизма. Мощность 600-800 м. Породы свиты имеют преимущественно моноклинальное падение на СВ под углом 30-60 °. Контакт пород свиты с нижележащими образованиями саитовской свиты везде тектонический, а с породами вышележащей андреевской свиты согласный.

Андреевская свита ( ) развита в виде широкой полосы и ряда небольших линз в юго-западной части района. В составе свиты преобладают серицит-кварцевые (филлитовидные), хлорит-серицит-кварцевые, альбит-серицит-кварцевые, серицит-биотит-кварцевые и слюдисто-кварцитовые сланцы по алевролитам и песчаникам; углисто-графит-кварцевые сланцы; кварциты железистые, магнетитсодержащие, марганецсодержащие и углисто-графитсодержащие. Мощность свиты превышает 1700 м.

Кунгурковская свита ( ) развита в северной части площади и представлена метаморфизованными вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями. Мощность более 2000 м. Границы свиты, как нижняя, так и верхняя, повсеместно тектонические. На контакте с телами гранитоидов породы свиты ороговикованы.

Среди пород метаморфизованного вулканогенно-осадочного комплекса широко развиты протрузии гипербазитов дунит-гарцбургитовой (альпинотипной) формации, контролируемые зонами глубинных разломов. Возраст протрузий ультрабазитов 401+12 млн. лет (Пушкарев,1999), габбро, габбро-диабазов D_{2-3}, гранитоидов поздней фазы 312-262 млн. лет (А. А. Машаров, 1990 г.).

Тела ультрабазитов фиксируются в виде линейно вытянутого пояса, согласного с общим простиранием пород района. Все эти массивы по существу представляют собой бескорневые тектонические линзы, залегающие согласно со сланцеватостью вмещающих их метаморфизованных вулканогенных и осадочных пород. Ультрабазиты гидротермально изменены, представлены серпентинитами, тальк-карбонатными и другими породами. На Шабровском тальковом месторождении среди тальк-карбонатных пород встречаются

жильные тела талько-хлоритов и хлоритолитов (мощностью до 0,1-1,0 м). Они характеризуются повышенным (до 5-10 %) содержанием магнетита.

Формирование интрузивных тел Шабровского комплекса (C_1) происходило в три фазы: в первую формировались гранодиориты; во вторую – граниты и адамеллиты; в третью – мелкозернистые граниты, граниты, гранит-порфиры, лейкократовые граниты, пегматиты. Шабровский массив округлой формы занимает площадь 50-55 км^2. В массиве много ксенолитов, провесов кровли, что свидетельствует о незначительном эрозионном срезе. Вмещающие породы – преимущественно пироксениты и габбро.

Сложен массив среднезернистыми, часто порфировидными, биотитовыми, реже роговообманково-биотитовыми гранодиоритами. Вмещающими массив породами являются: с севера ультрабазиты и габбро Уктусского массива, с запада, юга и востока – сланцы андреевской свиты и частично вулканиты кунгурковской свиты. Мощность массива 2,0 - 2,5 км. Западный контакт массива тектонический.

Осиновский комплекс (C_1) сложнопостроенный, формировался в четыре фазы: 1 – кварцевые диориты, гранодиориты; 2 – мелко- среднезернистые граниты; 3 – дайки лейкократовых гранитов, пегматитов; 4 – дайки порфировидных, мелкозернистых гранитов. В объеме массива резко преобладают граниты второй фазы.

Описание маршрута

Т.Н. 1. Начинается маршрут на Белоусовском месторождении благородных змеевиков, расположенном в 500 м к северу от автобусной остановки (автобус № 105). Карьер по отработке Белоусовского месторождения расположен на небольшой возвышенности в пределах поселка Шабровский. Проходка карьера проводилась с применением буро-взрывных работ, поэтому по причинам безопасности разработка месторождения остановлена.

Карьер вскрывает небольшую часть Большой линзы тальк-карбонатных пород, в зоне преимущественного развития благородных змеевиков. Здесь по художественно-декоративным свойствам выделено три разновидности змеевика - пятнистый, полосчатый и пятнисто-полосчатый.

Тальк-карбонатные породы занимают здесь не менее половины площади месторождения. Форма их залежей чрезвычайно сложная и обусловлена очертаниями пород кровли массива ультрабазитов, с одной стороны, и тел антигоритовых серпентинитов, с другой.

Т.Н. 2. Далее маршрут переходит на Северо-Шабровское месторождение железистых кварцитов, которое находится в районе п. Шабровского к западу от Белоусовского карьера. Месторождение в центральной части рассекается затопленным карьером после отработки Вознесенской золотой россыпи (рис. 16).

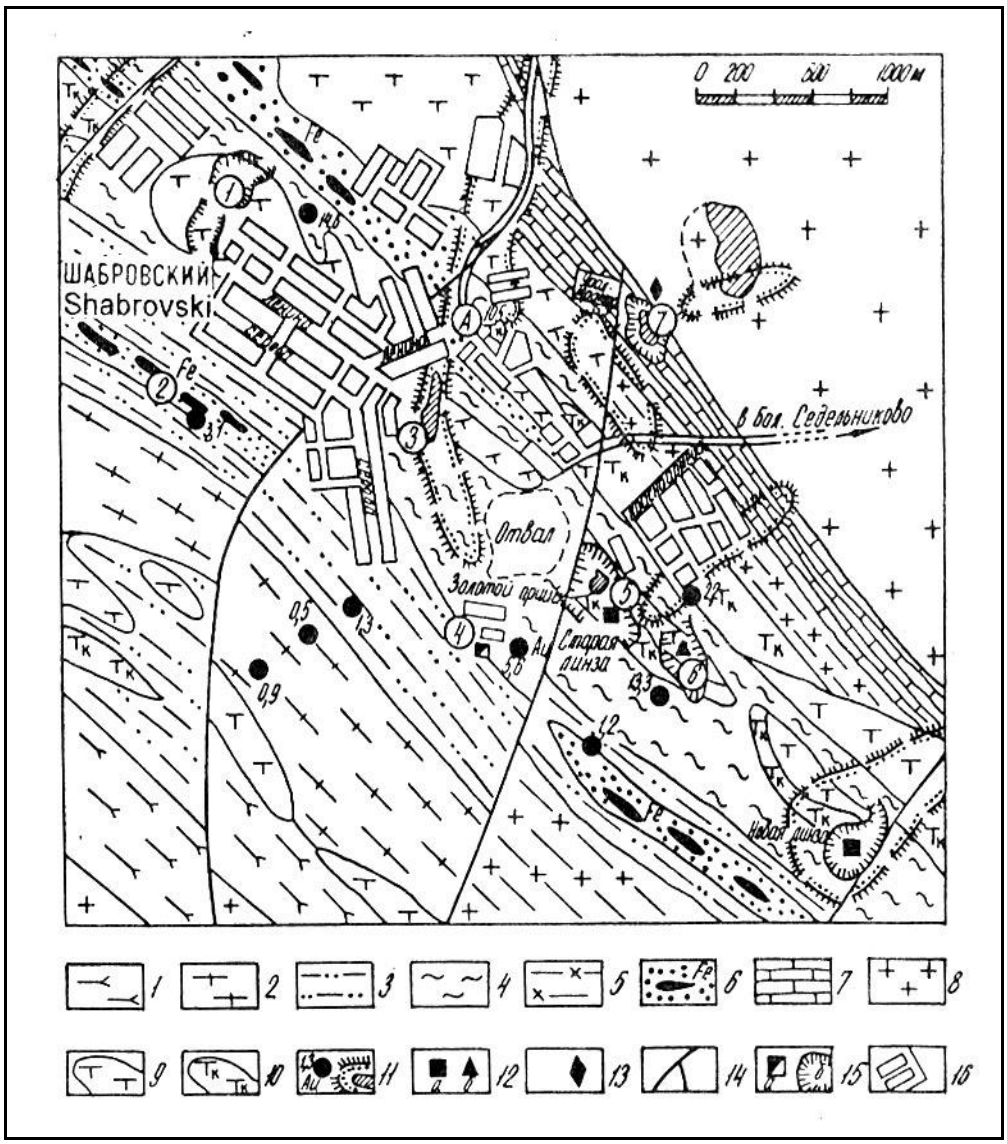


Рис. 16. Схематическая геологическая карта Шабровского рудного поля:
1 – амфиболиты; 2 – актинолитовые сланцы; 3 – серицито-кварцевые сланцы с карбонатом; 4 – филлиты; 5 – серицит-хлоритовые сланцы; 6 – железистые кварциты; 7 – мраморы; 8 – гранодиориты; 9 – серпентиниты; 10 – тальк-карбонатные породы; 11 – золотопроявления и контуры россыпей; 12 – месторождения талька (а) и змеевиков (б); 13 – месторождения мрамора; 14 – тектонические нарушения; 15 – шахта (а) и контуры карьеров (б); 16 – поселок Шабры

При отработке россыпи старатели породы вскрыши укладывали в узкие отвалы, которые расположены по бортам карьера. Взяв пробы песчано-глинистого материала с днища россыпи в западной сухой части выработки, где раньше размещалась промывальная установка, промываем их здесь же в карьере. Увидеть мелкие знаки золота в ковше – обычное дело.

От Вознесенской россыпи по бетонному тротуару перемещаемся в южном направлении к тальковой обогатительной фабрике, посещение которой можно предусмотреть в программе экскурсии, далее по асфальтовой дороге к карьеру тальк-магнезитового камня «Старая линза».

По возрасту выросших на отвалах деревьев студенты могут определить время отработки россыпи, а также наблюдать регуляторы естественной рекультивации открытой горной выработки.

Т.Н. 3. Шабровское месторождение тальк-магнезитового камня известно с 80-х годов 19-го столетия. В этот период оно отрабатывалось кустарным способом, и только возросшие потребности горно-металлургического и цементного производства в огнеупорном сырье в 1927 г положили начало планомерным разведочным работам на месторождении с последующей его механизированной эксплуатацией. Добыча тальк-магнезитового камня производилась карьерным способом со специальной технологией отработки и была прекращена в 1978 г. На момент остановки добычных работ глубина карьера составила чуть более 50 м. Буровыми скважинами месторождение разведано до глубины 200-220 м.

Производство огнеупорных тальк-магнезитовых блоков осуществлялось непосредственно в карьере машинами вертикальной и горизонтальной резки состемы А. М. Столярова. Отходы от распиловки шли на получение чистого высококачественного талька, который извлекался здесь же на обогатительной фабрике путем флотации. Подъем на поверхность нарезанных кирпичей осуществлялось с помощью трех лебедочных установок, которые в настоящее время можно видеть на бортах карьера.

Борта карьера очень крутые, а в некоторых участках с высокими вертикальными уступами (стенками), поэтому при подходе к краю этой искусственной выработки со стороны обогатительной фабрики перед исследователем открывается потрясающая панорама – идеальный срез ультраосновного массива со всеми деталями его внутреннего строения (рис. 18).

Рис. 17. Панорама карьера «Старая линза»

Маршрут по Шабровскому карьеру «Старая линза» начинается с его общего обзора (рис. 17). При спуске в карьер во вскрышных более пологих бортах выходят вмещающие породы, представленные в основном филлитовыми сланцами с тонкими маломощными прослойками мраморизованных известняков, слюдисто-кварцевых, серицит-хлоритовых и хлоритовых сланцев, с тонкими кварцевыми прожилками и будинками.

При переходе со вскрышных бортов на добычные, хорошо наблюдается северо-восточный контакт между вмещающими сланцами и продуктивным телом гипербазитов, превращенных в тальк-карбонатные породы (рис. 18). Контакт резкий, достаточно ровный с крутым, почти вертикальным падением. Участками фиксируются полости отслоения, в некоторых из них можно наблюдать разгрузку трещинных подземных вод в виде красочных водопадов. Вода пригодная для питья.

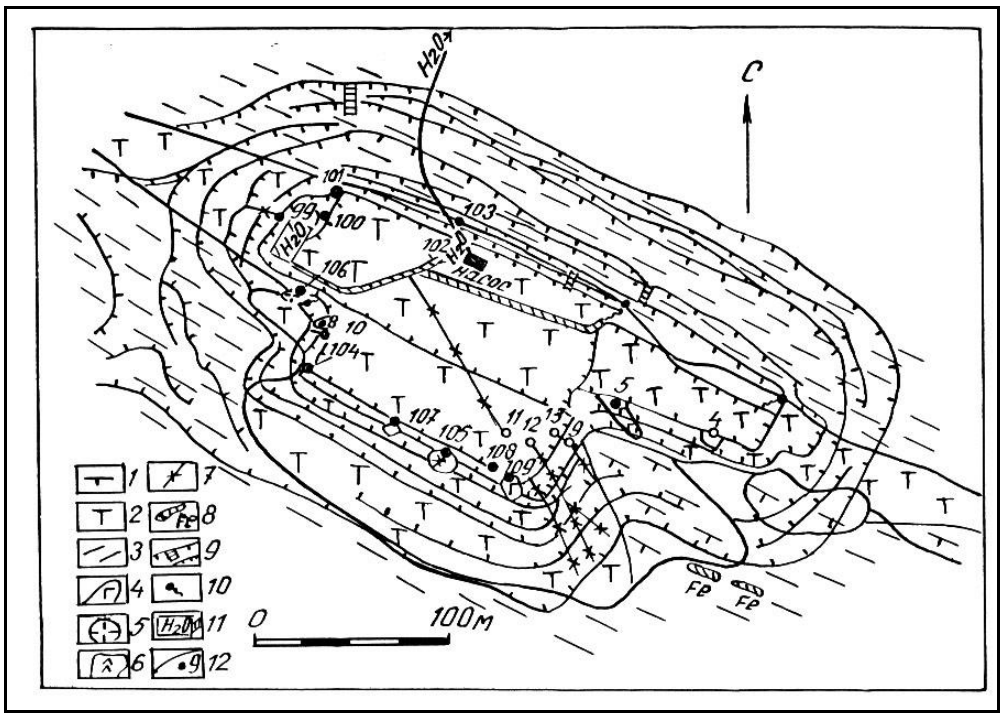


Рис. 18. Геологический план карьера «Старая линза»:
1 – серпентиниты; 2 – тальк-карбонатные породы; 3 – филлитовидные сланцы; 4 – габброиды; 5 – плагиограниты; 6 – лиственит; 7 – хлоритолиты по дайкам основного состава; 8 – железистые кварциты; 9 – контуры бортов карьера и лестницы; 10 – выходы трещинных вод; 11 – дренажные канавы; 12 – точки наблюдений

Наибольшую площадь вскрытых бортов карьера «Старая линза» (см. рис. 18) занимают тальк-карбонатные породы светло-серого цвета, массивной или сланцевой текстуры. На 40-50 % порода состоит из талька и на 50-60 % из карбоната, представленного магнезит-брейнеритовой разновидностью. Из рудных минералов чаще всего встречается гематит, очень редко встречаются кристаллики магнетита и хромита. Эта порода и являлась объектом добычных работ.

В юго-восточной части юго-западной стенки карьера хорошо «отпрепарированы» две дайки основного состава, секущие массив в субмеридиональном направлении. На дневной поверхности дайки выходов скорей всего не имели и вскрываются только карьером. Габброиды имеют мелкозернистую структуру, массивную текстуру. Окраска темная, серовато-зеленая. Породы метаморфизованные и состоит из вторичного амфибола, полевого шпата, карбоната и эпидота.

В западном борту карьера вскрыто тектоническое нарушение, которое сопровождается мощными излияниями трещинных вод.

Поднявшись на поверхность, на борту карьера можно осмотреть систему лебедочного хозяйства.

При спуске в карьер следует обратить внимание на технику безопасности работы в карьерах. Крутые борта карьера обусловлены крутым падением рудного тела, углы падения в сланцах также составляют 70-90 градусов. По вскрытым тектоническим трещинам и разломам в карьере наблюдается дренирование подземных вод. Следует обратить внимание на то, что спуск по лестнице может осуществляться только небольшими партиями (не более 5 человек на одном прогоне).

Необходимо также обратить внимание студентов на осыпи и оползни на стенках карьера обусловленные просачивающимися подземными водами. Накапливаемые на дне карьера воды поднимаются трубами на дневную поверхность. Вся территория в плане обвалована по бортам карьера для предотвращения прорыва поверхностных вод, а также прохода к обрывистым бортам скота.

Т.Н. 4. Продолжая маршрут, по дороге, выходим на северный борт карьера «Новая линза» (рис. 19), вскрывающим крупное тело тальк-магнезитовых пород. Перед нами разворачивается панорама карьера, показывающая технологию разработки с применением буровзрывных работ, экскавации с последующей вывозкой горной массы железнодорожными составами по узкоколейке на обогатительную фабрику.

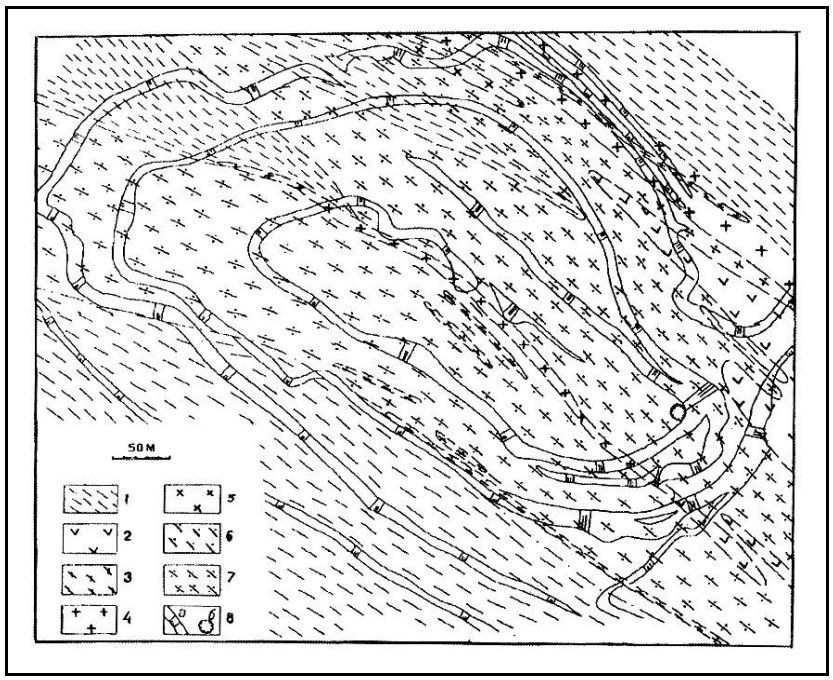


Рис. 19. Геологический план карьера «Новая линза»:
1 – сланцы; 2 – серпентиниты; 3 – амфиболиты; 4 – плагиограниты; 5 – диориты; 6 – хлоритовые метасоматиты; 7 – тальк-карбонатные породы; 8 – карьер: а - борта, б - водосборный зумф

Геологическое строение «Новой линзы» во многом схоже с таковым «Старой линзы». Отличие состоит в том, что здесь развиты дайки только среднего и кислого состава.

Т.Н.5. В западной части пос. Шабровский расположен отработанный мраморный карьер, а вблизи дороги на Б.Седельниково недавно заложен новый мраморный карьер. Он вскрывает полосу мрамора мощностью 80-90 м вдоль гранитоидов шабровской интрузии. Падение полосчатого мрамора на северо-восток под углом 70 °. Мрамор мелкозернистый, светло-серого цвета с оттенками от светло-голубого до темно-синего. Текстура неотчетливо полосчатая. Полируемость породы хорошая. В верхних горизонтах широко проявлены процессы карста. Пустоты в настоящее время заполнены глинами и бурыми железняками. На борту старого мраморного карьера расположен цех по обработке крупноблочных глыб мрамора, змеевика, гранитов и других облицовочных пород. Здесь можно ознакомиться с технологией обработки камня.

3.4. Шиловское месторождение

Шиловское месторождение более известно как меднорудное на восточной окраине пос. Медный (авт. № 185). Оно открыто в 1703 г. крестьянином И. Шиловым «со товарищами». Собственно Шиловское месторождение (рис. 21) расположено на краю поселка Медный, представлено карьером (35х15х10 м) и группой небольших горных выработок. В карьере обнажаются тела скарнов (в торцевой части карьера) на контакте габбро,

габбро-диоритов (забой слева) с мраморизованными известняками (правая часть карьера). Золотосодержащая медная минерализация наблюдается в маломощных зонах бортов карьера.

К северо-востоку от карьера на расстоянии нескольких сот метров по простиранию рудных скарнов размещаются еще несколько заросших карьеров со штольнями в их бортах и около десятка обрушенных шахт. Поэтому при движении по лесу необходимо соблюдать осторожность.

Шиловское месторождение локализуется в юго-восточном экзоконтакте Верхисетского массива гранитоидов. В этом экзоконтакте развиты сравнительно небольшие интрузии среднего-основного (от диоритов до габбро) состава. На контакте одного из них (Решетинского) с известняками сформировались скарны Шиловского месторождения. На контакте диоритов (реже габбро) с известняками развиты гранатовые, гранат-пироксеновые, гранат-эпидотовые скарны с магнетитом и наложенной медно-сульфидной минерализацией (Мурзин, Сазонов, 1990; Сазонов и др., 1994).

Месторождение локализовано в тектонической структуре с простиранием на северо-восток. Скарновые тела встречаются на всем протяжении этого разлома. Однако они вскрывались преимущественно шахтным способом. На современном этапе крепление шахт прогнило и поэтому горные выработки представляют большую опасность для посетителей.

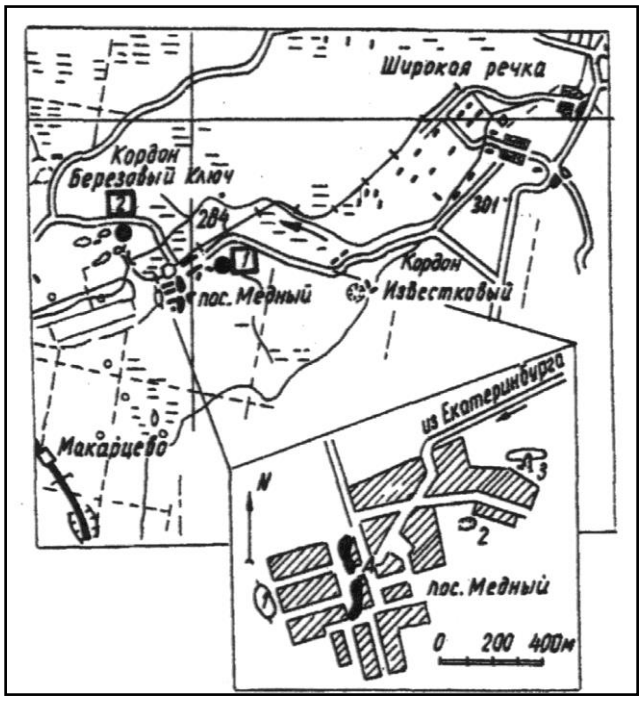


Рис. 20. Географическая схема Шиловской экскурсии:
1 — Шиловское медно-скарное месторождение;
2 — Пушкинское золоторудное месторождение.
На врезке: 1, 2 - обнажения доступные для осмотра;
3 – карьер Шиловского месторождения

Медно-магнетитовые руды отработаны практически полностью. Медно-судьфидная минерализация фиксируется в тектонических нарушениях северо-западной ориентировки, локализуясь как в скарнах, так и в пропилитизированных габбро.

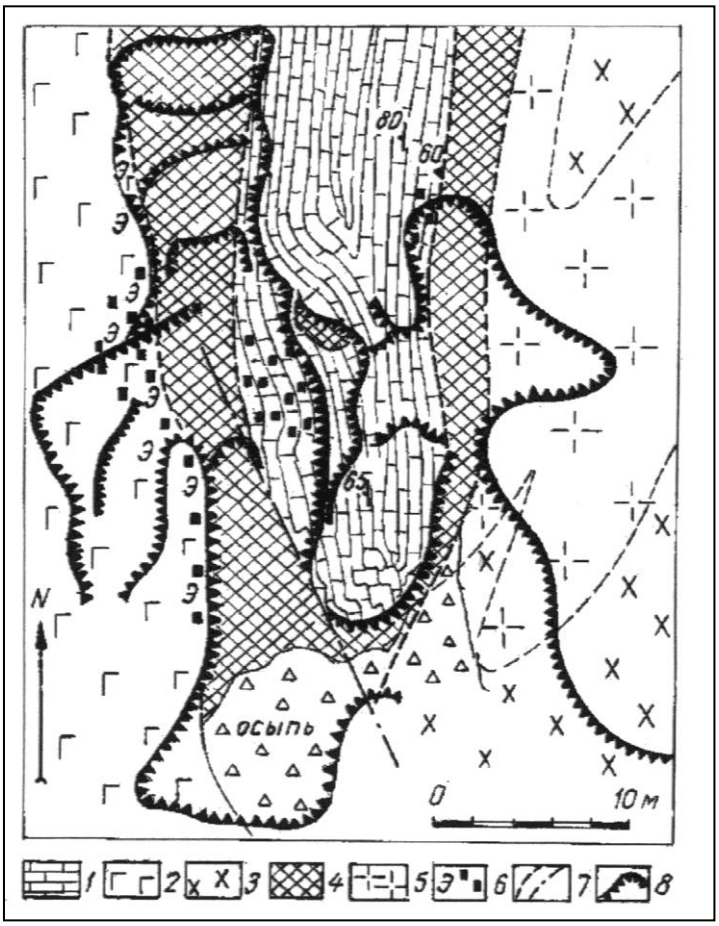


Рис. 22. Геологическая карта Шиловского месторождения:
1 – мраморизованные известняки, участками с сульфидами (черные квадраты);
2 – меланократовые габбро;
3 – диориты;
4 – скарны (гранатовые, гранат-пироксеновые, гранат-эпидотовые с магнетитом и сульфидами);
5 – грано-диориты (иногда дайки аплитов) с участками развития кварц-серицитовых метасоматитов;
6 – места развития эпидотизации (э) и сульфидизации (черные квадраты);
7 – контакты пород и разрывные нарушения; 8 – границы карьера

В скарнах выделяются участки перекристаллизованных эпидозитов, сложенные зеленым эпидотом и кальцитом.

Характерной для месторождения является повышенная (участками до промышленной) золотоносность руд. На окраине поселка можно видеть затопленные выработки на месте старательской отработки небольших золоторудных россыпей. Бассейн р. Шиловки, вдоль русла которой сейчас размещается крупный торфяник, является золотоносным.

Здесь, в окрестностях пос. Медный расположено одно из наиболее крупных на Урале месторождений торфа. Размер торфяника здесь достигает 20 квадратных километров, мощность достигает 6-9 метров. Торф древесно-осоковый, в кусках коричневого цвета, с остатками древесины и коры, главным образом березы, реже ольхи и ивы. Осоковыми формами сложена большая часть залежей торфяников, которые залегают непосредственно на магматических породах. Заторфовывание водоемов – одна из природных угроз для человека, она приводит к постепенному сокращению водоемов и последующему их исчезновению. Начало такого процесса несколько различается для озер с пологими и крутыми берегами. При зарастании болот с пологими берегами зарастание дна происходит в строгом порядке и зависит от глубины. На глубоких местах (2,0-2,5 м) поселяются водные лилии, на глубинах 1,0-1,5 м растут камыш и тростник, а прибрежных зонах – осоки. После отмирания этих растений на дне водоема отлагаются их остатки – стебли, корневища, листья. При этом лишь часть этих остатков разлагается, другая остается в полуразрушенном состоянии. Такое накопление растительных остатков со временем приводит к обмелению водоема. В дальнейшем более молодые растения вынуждены сдвигать свои ареалы обитания на большую глубину, отдаляясь от берега. В конце концов, все озеро высыхает, покрываясь осокой.

Несколько иной способ зарастания озер отмечается в случае наличия крутых берегов. При глубине прибрежных зон более 2,0 метров развитием пользуются растения, способные держаться на поверхности воды. Они прикрепляются ко дну у береговой линии и распространяют свои стебли далеко от берега. Переплетаясь между собой, стебли таких растений образуют прочную сеть, на которой могут развиваться другие растения-сателлиты. Питательной средой таких растений являются: растворенные в воде соли, мелкая пыль, попадающая в воду из атмосферы. Разрастание таких колоний растений приводит, в конечном счете, к полному покрытию всей водной поверхности озер. В процессе отмирания растительности происходит естественное обмеление водоемов и последующее их исчезновение. Однако при обмелении озера до приемлемых глубин в нем могут поселяться упомянутые выше растения, характерные для мелководных водоемов которые ускоряют процессы его исчезновения.

В связи с интенсивным проведением дренажных работ ранее заболоченные участки торфяников стали сухими. В летнее время, особенно в засушливую погоду, над торфяниками носится пыль, что является чрезвычайно

опасным в случае возгорания торфа. При такой большой мощности отложений торфа тушение сильно затруднено из-за возможности подземных пожаров. В настоящее время разработка торфа на участке Медном временно прекращена, за несколько лет площадь покрылась подлеском, который в определенной степени спасает торфяник от случайных пожаров. Торфяники поселка Медный являются главным объектом наблюдения студентов групп ЗЧС.

В данном районе, наряду с заторфовыванием озер, можно наблюдать процессы заболачивания лесов и лугов. Здесь, наряду с природными процессами, определенную роль играют техногенные процессы, связанные, прежде всего, со строительством плотин, запруд и других гидротехнических сооружений. Заболачивание связывается с созданием условий избыточной увлажненности участков, когда полезная для человека луговая или лесная растительность меняется на болотную. При этом из обращения изымается часть полезных земель

Кроме упомянутых выше процессов заболачивания культурных угодий и заторфовывания водоемов, значительную опасность на данном участке представляют собой древние шахты и глубокие шурфы, крепления которых давно прогнили. Студентам запрещается подходить близко к этим горным выработкам и заглядывать в них во избежание осыпей и провалов, что имело место в прошлом. Студентам следует напомнить некоторые правила поведения в таких участках. Все опасные участки развития старых горных выработок должны быть ограждены, а также иметь предупредительные знаки.

Кроме того, на участке Шиловского месторождения студентам следует напоминать правила противопожарной безопасности в связи с широким развитием здесь легковоспламеняющихся торфяников.

3.5. Березовское рудное поле

Березовское рудное поле расположено в 12км на северо-восток от г. Екатеринбурга. Оно является крупнейшим на Урале собственно золоторудным объектом. Ввод его в эксплуатацию (1748 г.) определил начало золотой промышленности региона, да и Российского государства в целом. Практически до конца 50-х гг. XX столетия Березовское рудное поле было крупнейшим по запасам золота в бывшем СССР. Месторождение на сегодня отрабатывается на горизонте до 520 м. Структурным бурением установлено, что в центральной и южной частях месторождения оруденение прослеживается до глубины 1 - 1,2 км.

Березовское рудное поле широко известно в мире. Оно рассматривается как классический золоторудный объект кварц-жильного типа во всех курсах полезных ископаемых практически во всем мире. Березовское месторождение представлено крупной серией даек гранитоид-порфиров, имеющих преимущественно субмеридиональное и северо-восточное, реже субширотное простирание. Большая часть даек имеет крутое (до вертикального) падение. Дайки по большей части березитизированы, вмещают «лестничные» кварцевые жилы, ориентированные по нормали к зальбандам даек. Кроме лестничных, на

месторождении развиты красичные кварцевые жилы. Последние представляют собой разновиднсти жил, вышедших из даек во вмещающие породы или же не имеющие связи с дайками иформирующиеся по тектонически ослабленным зонам (разломам), ориентированным, как правило, широтно или субширотно.

Вулканиты и вулканогенно-осадочные толщи в пределах Березовского рудного поля имеют моноклинальное залегание, полого падают на север и подразделяются на две толщи: нижнюю – чередование базальтовых лав, туфобрекчий, туффитов, кремнистых осадков, и верхнюю – диабазы. Общая мощность толщ превышает 1,2 км.

Описание маршрута

Начало маршрута — южный фланг Березовского рудного поля.

Т.Н.1. На остановке общественного транспорта «Каменные Палатки» в скальном обнажении с этим же названием можно наблюдать типичные шарташские адамеллиты, а также разноориентированные трещины, характерные для Шарташского массива в целом, горизонтальные и пологопадающие, волнисто изогнутые трещины обусловливают матрацевидную отдельность, отчетливо подчеркнутую процессами выветривания.

На примере фигур «Каменных палаток» наблюдают результаты физического выветривания в гранитах, а также продукты эоловой деятельности: ***дефляции и коррозии***. Подобные изменения потенциально можно ожидать на техногенных объектах.

Т.Н.2. Далее маршрут проходит через Шарташский щебеночный карьер. Борта карьера представлены средне-крупнозернистыми адамеллитами. Величина зерен биотита в них составляет 0,1 – 3 мм, а количество не превышает 5 – 10 % от общей массы.

Т.Н.3. Карьер расположен в северо-восточном эндоконтакте Шарташского массива адамеллитов. Здесь можно наблюдать адамеллиты, а также даечный комплекс, гранит-пегматиты и кварцевые жилы. Шарташский каменный карьер эксплуатируется как щебеночный — запасы составляют 33,6 млн. $м^3$.В бортах, а также в донной части карьера можно наблюдать дайки гранит-порфиров, лампрофиров, аплитов, пегматитов, кварцевых с калишпатом жил.

Шарташский и Изоплитовый карьеры в настоящее время разрабатываются частными предпринимателями. Значительно проще посещение «Сибирского» карьера, вскрывающего южную часть Шарташского массива. Карьер расположен вблизи Сибирского тракта (остановка автобусов № 31, 1 - «Путевка»).

Рис. 22. Сибирский карьер по добыче облицовочных блоков гранитоидов

Сибирский разрабатывает монументальные блоки для облицовки или каменных архитектурных изделий, особенно на ранних стадиях разработки.

Отбор блоков гранитоидов осуществляется газо-плазменной резкой и клиновым отслоением через серию шпуров. Данную технологию можно видеть в северном забое карьера. Здесь же можно наблюдать самую мощную (около 1 м) дайку лампрофиров, выполняющую субмеридиональную трещину скалывания. Более мелкие дайки широко развиты в южном борту карьера (рис. 24). В бортах карьера картируются многочисленные дайки кислого состава: аплиты, гранит-порфиры, пегматиты.

Рис. 23. Дайка лампрофира (справа) и пересечение двух пегматитовых прожилков (слева) в гранитоидах Сибирского карьера

Во всех карьерах, пройденных в гранитоидах, следует обратить внимание студентов на крутые борта карьеров, что возможно только в крепких, устойчивых породах. На этих же объектах следует обратить внимание на систему водоотлива, которая защищает карьеры от затопления. Продолжаем маршрут в г. Березовском.

Т.Н. 5. Расположена на северной окраине г. Березовский в районе хвостохранилища. Здесь на правом берегу р. Пышмы высятся отходы от обогащения золотосодержащих руд. Отходы представлены тонко- и мелкозернистым кварцевым материалом. На хвостохранилище хорошо наблюдаются процессы ветровой и дождевой эрозии. В ветреную погоду поднимается кварцевая пыль, которая может вызвать у человека болезнь, известную под названием силикоз.

В данном маршруте в окрестностях г. Березовского для студентов специальности ЗЧС следует особое внимание обратить на провалы, которые расположены над шахтными полями. Здесь категорически нельзя вести строительство жилых зданий и сооружений. Обратить внимание на возможностях защиты таких территорий от потенциальной угрозы провалов.

3.6. Гора Хрустальная

На Среднем Урале в южной эндоконтактовой части Верх-Исетского гранитоидного массива расположен ряд крупных месторождений стекловидного и молочно-белого кварца.

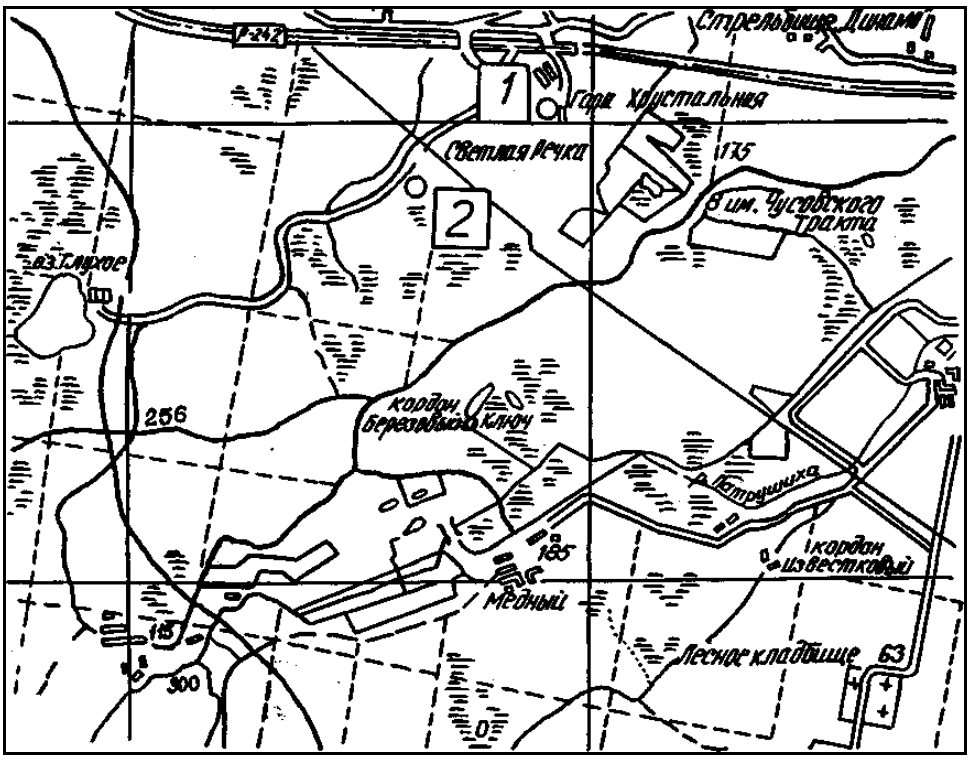


Рис. 24. Географическая схема размещения месторождений кварцевого сырья

Наиболее значительными и разведанными из них являются гора Хрустальная (1) и Светлореченское (2).

Кварц является наиболее распространенным минералом в природе, на описываемых месторождениях содержит большое количество минеральных и газово-жидких включений, довольно сильно «загрязнен» химически. В основном используется для варки различных специальных стекол, в качестве шихты для выращивания искусственных кристаллов кварца, в качестве заполнителя фильтров водоочистки, для футеровки различных агрегатов, в строительстве и для других нужд. При желании и дополнительных затратах всегда можно выбрать участки кварца, пригодные и для более ответственных назначений, но обычно это пока экономически нецелесообразно.

Понятие «молочно-белый кварц» сложилось исторически и не несет генетической или минералогической информации, в какой-то мере определяя лишь его замутненность газово-жидкими включениями.

Район месторождений характеризуется напряженной структурно-тектонической обстановкой. Восточная часть южного замыкания Верх-Исетского гранитоидного массива разбита многочисленными различно ориентированными тектоническими нарушениями преимущественно субмеридионального простирания. В эндоконтактовой зоне главного тела Верх-Исетского гранитоидного массива почти повсеместно развиты гранитоиды повышенной основности – диориты, кварцевые диориты, залегающие среди биотит-амфиболовых гнейсов. Возраст гранитоидов установлен как позднепалеозойский, т. к. они прорывают все породы района. Это подтверждается и определением абсолютного возраста (260-340 млн. лет).

Месторождение горы Хрустальной представляет собой (Оболкин, 1981) крупное тело, вытянутое на 370-380 м в СВ (330-340 °) направлении. Форма его каплевидная в плане и неправильная в разрезе (рис. 26).

На глубину месторождение имеет тупое выклинивание с пологим падением (погружением) ЮЗ контакта к СВ под углом 8-10 °. Падение восточного контакта жильного тела крутое (75-90 °) к востоку, западный контакт до гор. 310-270 м падает к западу. Длина тела по вертикали непостоянная и колеблется от 90 м в его западной части до 190 м восточной. Ширина тела достигает 140 м.

Восточный контакт тела четкий крутопадающий (75-90 °) и контролируется тектоническим нарушением, западный контакт имеет более сложную конфигурацию, обусловленную заполнением пегматоидным и кварцевым материалом крупноглыбовой зоны брекчирования в диоритах.

Породы западного блока представлены сильно метаморфизованными диоритами. В них встречается тонкая и редкая вкрапленность пирита и халькопирита, а темноцветный минерал превращен в агрегат мелкочешуичатого биотита.

В породах восточного блока наблюдаются метасоматические образования, состоящие из биотита (флогопита), хлорита и тальковых сланцев, образованных по серпентинитам.

В жильном кварце месторождения выявлено и исследовано 22 минерала, являющихся вредными примесями: сера самородная, пирит, рутил, брусит, псиломелан, гематит, гидрогетит, апатит, графит, опал, магнетит, серицит, флогопит, альмандин, эпидот, мусковит, биотит, хлорит, актинолит, микроклин, калишпат, кальцит.

По степени минерализации кварц месторождения разделяется на две природные разновидности: мономинеральный или слабоминерализованный (до 8 %) и сильноминерализованный (более 8 %). По данным минералогических анализов (60 проб), содержание твердых минералогических примесей в первом типе кварце в среднем составляет 1,1 %, а во втором – 16,1 %.

Рис.25. Панорама Светлореченского месторождения кварца.
Кварцевая жила светлого оттенка

Другой характерной особенностью жильного кварца месторождения горы Хрустальной является его разлистованность. Впервые это подробно описано Г. Н. Вертушковым в начале 40-х годов и объяснено разлистованием кварца по плоскостям срастания полисинтетических бразильских двойников.

Кварц месторождения горы Хрустальной содержит значительное количество газово-жидких включений. Большинство из них располагаются в системах трещин и являются вторичными.

Светлореченское месторождение жильного кварца расположено в юго-восточной части Верх-Исетского антиклинория. Данные разведочных работ показывают, что месторождение имеет зональное строение. Внешняя зона представлена пегматоидной породой, иногда с выделением в них кристаллов мусковита и калиевого шпата, размером от 1 до 5 см и измененными окварцованными диоритами, представляющими собой эруптивную брекчию, внутренняя – сложена массивным кварцем (кварцевое ядро).

Кварцевое ядро представляет собой крупное тело, простирающееся в северо-западном (330 °) направлении на 300 м.

Выклинивание жильного тела по простиранию в северо-западной и юго-восточной частях. А восточный и западный контакты падают в разные стороны (рис. 26). На глубину тело имеет тупое выклинивание с пологим юго-восточным падением (погружением) под углом 5-10 °. Форма тела линзовидная в плане и приближающаяся к трапециевидной в разрезе.

Восточный и западный контакт тела четкий и контролируется тектоническими нарушениями. Кварцевое тело рассечено системами трещин, в основном северо-западного и северо-восточного простирания с углами падения 30-70 °. Трещины обычно ожелезнены. В кварцевом ядре, особенно в нижнем эндоконтакте, достаточно много ксенолитов вмещающих пород, представленных диоритами и мусковитизированными гранитами. Размеры их достигают 7,5х30 м. Длинные оси ориентированы по простиранию тела параллельно его нижнему контакту.

Кварцевое ядро сложено кварцем светло-серого, серого, белого или дымчато-серого цвета с участками прозрачного или полупрозрачного кварца. Структура кварца среднезернистая, местами крупнозернистая до гигантозернистой. Текстура массивная, реже сланцеватая. Последняя, обусловлена разлистованием кварца по плоскостям срастания полисинтетических бразильских двойников.

Длина тела по вертикали не постоянна и колеблется от 120 м в его центральной части, постепенно уменьшаясь, до 20 м в направлении северного выклинивания и до 80 м в направлении южного выклинивания. Ширина тела достигает 140 м.

В кварце месторождения выявлены и исследованы 17 минералов, являющихся вредными примесями: группа полевых шпатов (в основном микроклин), кальцит, мусковит, биотит, альмандин, хлорит, эпидот, лимонит, гематит, пирит, актинолит, молибденит, пиролюзит, графит, турмалин, рутил, сфен. Наиболее распространены микроклин, мусковит, биотит, эпидот, лимонит, актинолит, кальцит.

Кварц Светлореченского месторождения содержит значительное количество газово-жидких включений. Большинство из них располагаются в системах трещин и являются вторичными. Гораздо реже встречаются первичные включения, которые в основном сгруппированы по зонам роста

индивидов. Их цепочки косо ориентированы по плоскостям трещин с вторичными включениями.

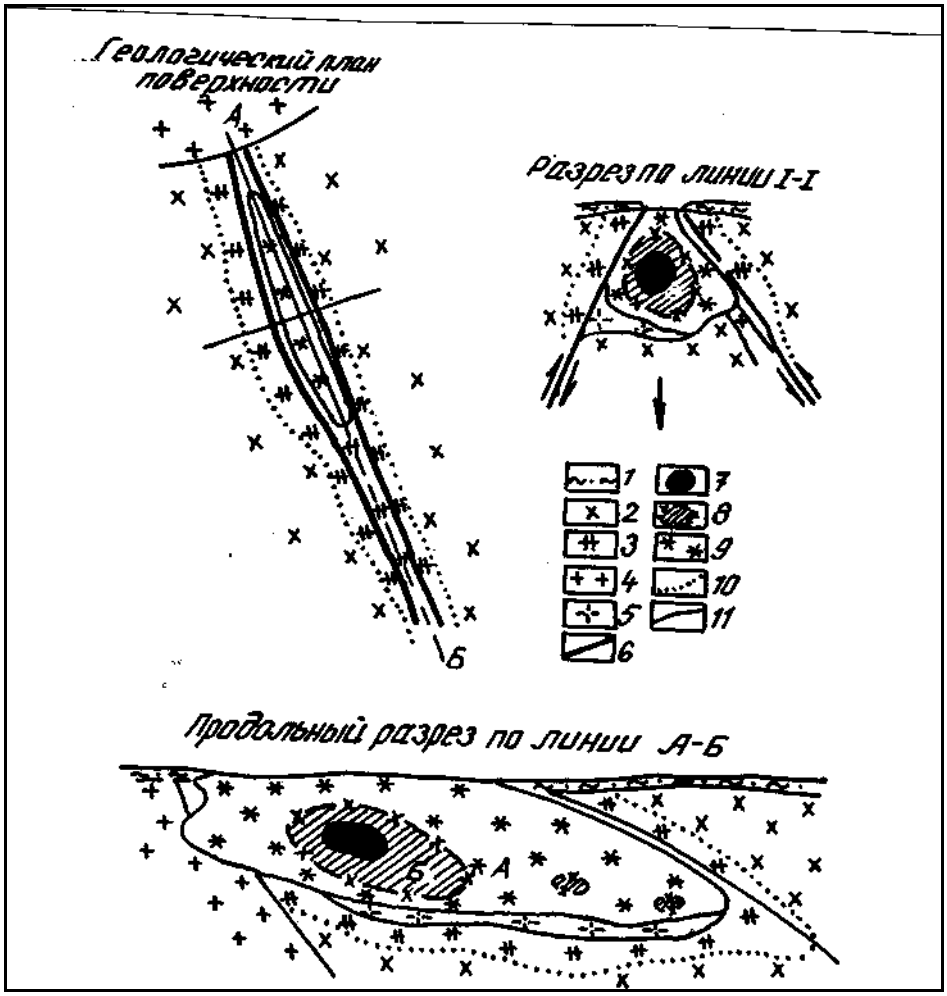


Рис. 26. Геологическое строение Светлореченского месторождения

Условные обозначения:

1 - рыхлые отложения; 2 - диориты; 3 - диориты окварцованные, полевошпатизированные, мусковитизированные, аплитовой структуры; 4 -граниты биотитовые; 5 - пегматиты; 6 - тектонические нарушения; 7-9 - зоны распространения кварца с различным коэффициентом светопропускания, 10 - граница изменения диоритов; 11 - геологические границы.

Характерной особенностью локализации крупных месторождений жильного кварца является их приуроченность к большим тектоническим нарушениям (месторождение горы Хрустальной) или тектоническим нарушениям, оперяющим под острым углом более мощную тектоническую зону (Светлореченское месторождение).

Формирование кварцевых тел происходило путем многократного раскрытия и заполнения трещин, образующихся при перемещении и расхождении блоков вмещающих пород и кристаллизации кварца в трещинных полостях в тектонически ослабленных зонах. Полученные результаты показывают несомненную связь крупных кварцевых месторождений с

тектоническими нарушениями южного обрамления Верх-Исетского гранитоидного массива.

Наиболее важными объектами наблюдения на участке с позиций специальности «Защита в чрезвычайных ситуациях» являются процессы формирования коры выветривания по породам различной устойчивости. Кварцевое тело в силу большой прочности образует в рельефе гребневидное тело, в то время как рыхлые продукты выветривания по измененным диоритам создают понижения в рельефе. Следует отметить, как меняется уровень обводненности карьера в зависимости от работы откачных насосов. С месторождениями кварца следует знакомить также как с объектами народнохозяйственного значения. Кварц данных месторождений потенциально может стать объектом получения особо чистого сырья – ценного продукта современных технологий. На промплощадке следует знакомить студентов с технологиями получения кварцевой продукции.

3.7. Билимбаевское месторождение

Участок расположен в 3,5 км южнее от г. Билимбай Свердловской области. От железнодорожной станции Билимбай карьер расположен в 7 км на восток. Добыча известняка ведется здесь, главным образом в Галкинском карьере, который в плане имеет изометричную форму, высота его бортов составляет около 20 метров.

Участок исследований расположен в Улсовско-Билимбаевской складчато-блоковой зоне, разделяющей два антиклинория: Уфалейский и Вишерско-Чусовской, которые, в свою очередь, входят в пределы Центрально-Уральского поднятия.

Галкинский карьер вскрывает известняки Билимбаевской свиты ордовикской системы. В разрезе свиты, кроме упомянутых известняков встречаются также: слабо метаморфизованные породы (филлиты), алевролиты, эффузивные образования. В известняках встречается фауна ордовикского возраста – остатки морских лилий, головоногих моллюсков. В известняках отмечаются находки остатков флоры в виде битуминозных примесей. Известняки в карьере сильно трещиноваты, преобладают разрывы с юго-восточными и юго-западными падениями. Углы падения пологие – 23-37 градусов. Мощность мезозойских пород, слагающих породы вскрыши составляет 4-5 метров, однако на отдельных участках она возрастает до 30-40 метров.

Известняки состоят преимущественно из кальцита – $CaCO_3$. Изредка встречается примесь доломита. Содержание двух минералов в породе составляет более 99,0 %, поэтому они представляют высококачественное флюсовое сырье для металлургической промышленности. Окраска известняков светлая, светло-серая, примеси железа местами придают породе рыжую окраску.

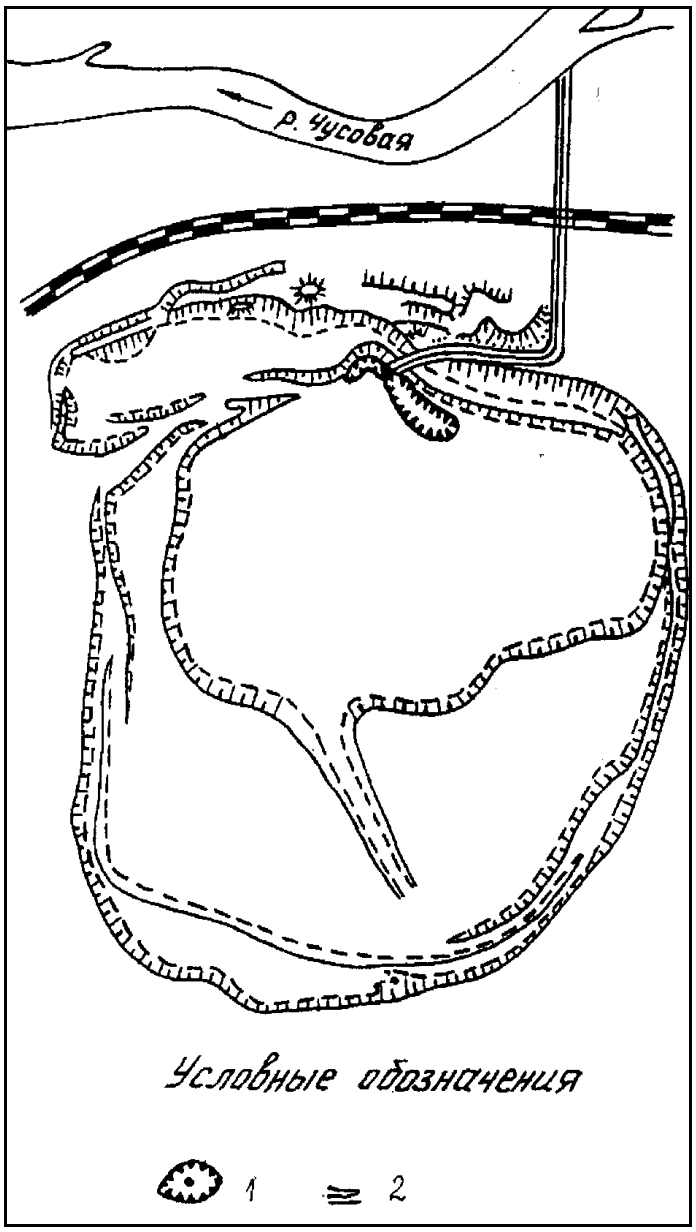


Рис. 27. План Галкинского карьера
Условные обозначения: 1 – зумпф карьера, 2 – водоотлив

Состав пород в карьере, а также обильные водопритоки создают на этом участке условия для карстовых процессов, которые здесь наблюдаются в изобилии. Следует, однако, отметить, что на поверхности пород чаще отмечаются суффозионные процессы, связанные с вымыванием (выносом) механических частиц фильтрующейся водой, что сопровождается оседанием пород с образованием провалов и воронок. Такая суффозия называется механической, при химическом растворении ее называют химической и в этом случае растворимая часть породы выносится в виде раствора.

Внимание студентов обращается на многочисленных следах начальных процессов суффозии, проявленных в геоморфологи. Делается акцент на различиях карстовой и суффозионной деятельности в различных по литологии породах.

Рис. 28. Вид северо-восточного борта Галкинского карьера

Закарстованность района Галкинского карьера составляет на поверхности около 25 %, с глубиной она уменьшается и к глубине 100 м практически не фиксируется. Под закарстованностью принимают соотношение закарстованных площадей участка к его общей, суммарной, площади. Снижение общей закарстованности с глубиной обусловлено несколькими причинами. Главная из них – снижение количества трещин и их объема по мере увеличения глубины, что, в свою очередь, снижает объем циркулирующей воды, а также скорость ее движения. Заполнителями карстовых полостей являются глины и суглинки, а также щебень и песок. Форма пустот клиновидная со сужением вниз.

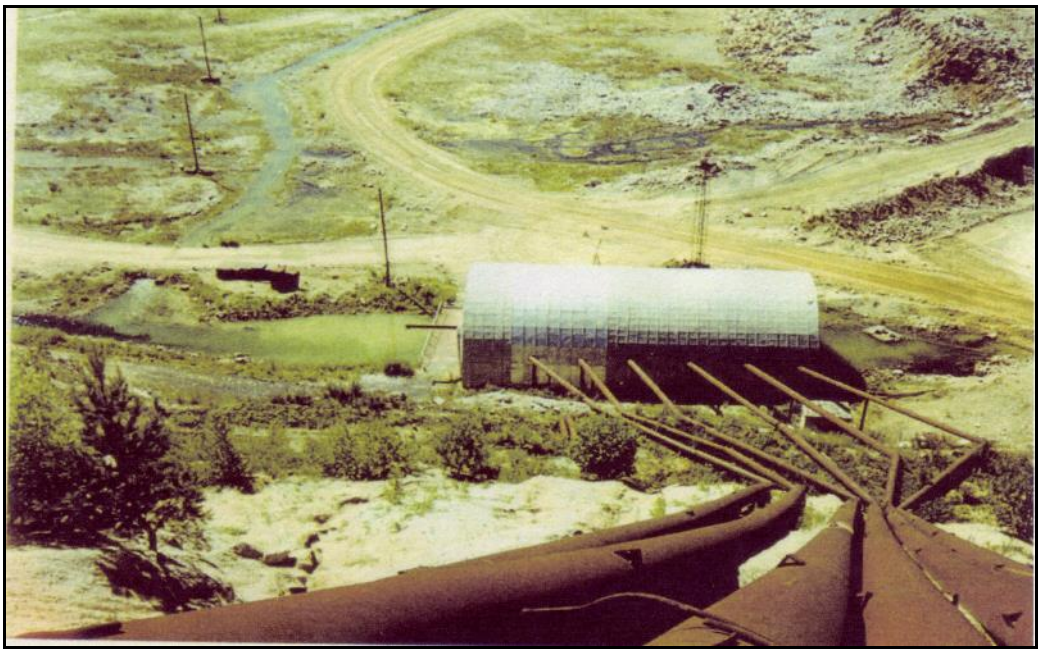


Рис 29. Система осушения Галкинского карьера: водосборные канавы, зумпф, модуль с насосами и водопроводные трубы

Водопроницаемость известняков близка нулю, поэтому обводненность карьера имеет трещинный характер. Общий водоприток в карьере составляет около 1500 $м^3$/час, однако, в настоящее время ежегодно он постепенно возрастает, в связи с изменением технологии процесса добычи и привлечения водных ресурсов из р. Чусовой. Плотность известняков составляет 2,70 $г/см^3$, временное сопротивление одноосному сжатию перпендикулярно слоистости – 130,0 МПа, а параллельно слоистости – до 55,0 МПа.

Известняки светло-серого цвета, часто массивной текстуры, скрытокристаллической структуры. Иногда отмечается мелкокристаллическая структура, которая фиксирует локальные участки слабого метаморфизма пород. В таких случаях в прослоях терригенных пород отмечаются переходы к филлитовидным разностям. В зонах наименее метаморфизованных пород можно встретить фауну ордовикского возраста. Элементы залегания известняков определяются с трудом. Такая возможность представляется благодаря наличию прослоев терригенных пород: алевролитов, алевропесчаников, реже – вулканитов.

Осушение карьера производится методом поверхностного дренажа, который включает в себя дренажные канавы и зумпф, куда вода стекается самотеком. Накопленная таким образом вода затем поднимается насосами вверх и сбрасывается в Чусовую. Перепад уровней воды в зумпфе карьера и реке Чусовой составляет 28 м.

В окрестностях Галкинского карьера, в поле развития известняков наблюдаются многочисленные воронки – небольшие карстовые провалы, фиксирующие начало карстообразования (рис. 31). Размер воронок различный, иногда не превышающий 1 метра. Как показывают результаты наблюдений, образование наблюдаемых воронок «молодого» карста началось сравнительно недавно и, по всей вероятности, увязывается с началом работ карьера. В данном маршруте студенты знакомятся с процессами суффозии и карста, производят локальное картирование воронок и описывают их. Для закрепления навыков работы с горным компасом здесь, в карьере, проводится массовый замер трещин с последующим построением розы-диаграммы трещиноватости.

На участке студенты знакомятся также с системой водоотлива, осушения месторождения. Характерной особенностью этого района являются многочисленные оползни, на которых можно наблюдать «пьяный лес». В самом карьере студенты знакомятся с характером выветривания известняков и других пород. При этом продукты всех этих процессов рекомендуется тщательно документировать, некоторые элементы – фотографировать и делать зарисовки.

Рис. 31. Свежая суффозионная воронка на левобережной пойменной террасе р. Чусовой, в 50 м от русла

3.8. Суффозионные процессы вдоль линий метро

Маршрут проходит непосредственно в пределах городской черты, сначала вдоль ул. 8-е Марта, где наблюдаются многочисленные разрушения домов, которые обтянуты стальными конструкциями. Начало маршрута на перекрестке улиц 8-е Марта и Декабристов. Наибольшему разрушению здесь подвергся старый дом с магазином «Гастроном», который стоит на ветке строящегося метро между станциями «Геологическая» и «Бажовская».

При движении к центру города студенты наблюдают здание сравнительно недавно построенного цирка, которое несет следы многочисленных реконструкций, призванных укрепить постройку. Причины деформаций в здании цирка могут объясняться двумя причинами. С одной стороны, строение стоит в непосредственной близости от сложной развязки двух веток метро, а, с другой – цирк, расположенный на контакте с активно живущим разломом, который расположен по руслу реки Исеть.

Инженерные меры защиты предприняты к старому зданию на перекрестке улиц 8-е Марта – Куйбышева. Как и в других местах, здесь здание «обвязано» стальным каркасом для предотвращения его дальнейшего развала.

Далее студенты наблюдают суффозионные процессы на западном берегу городского пруда. Каменная ограда пруда в нижней части в значительной степени разрушена. На улице Набережная рабочей молодежи видны следы

нового асфальта, закрывающего трещины, появившиеся в результате формирования оползневых процессов вдоль западного берега городского пруда.

Далее маршрут проходит между станциями метро «Уральская» и «Динамо». Вследствие процессов осушения, понижения уровня подземных вод, вдоль линии метро развиваются суффозионные процессы, которые приводят к многочисленным деформациям зданий и сооружений. Водопонижение осуществляется здесь с 1993 года с помощью 5 скважин диаметром 890 мм и насосами. Снижение уровня грунтовых вод привело к развитию суффозионных процессов, которые осуществляются путем механического выноса частиц фильтрующейся водой. Через некоторое время этот процесс привел к образованию пустот и полостей, что, в свою очередь, привело к проседанию зданий и сооружений и их видимых деформаций. Для спасения домов применены инженерные меры защиты, многочисленные стяжки.

Опасные явления природного и техногенного характера можно наблюдать в самом центре города, в районе городской «плотинки». На западном берегу городского пруда, на уровне поверхности воды наблюдаются процессы подмыва берега, что грозит обвалом чугунной ограды. Особенно хорошо заметны эти процессы зимой, когда наблюдения можно вести в непосредственной близости со льда. В 150 метрах от «плотинки» на север, в районе городского драмтеатра берег пруда укреплен бетонным сооружением.

В основании городской «плотинки» расположены две арки, одна из них недавно укреплена бетоном, в ней сделан переход. Другая арка, расположенная со стороны площади 1905 года, находится в аварийном состоянии. Только благодаря арочной конструкции потолки в ней не обрушиваются.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Паняк С.Г. Динамическая геология. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 280 с.

Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Григорьев В.В., Паняк С.Г., Дубейковский С.Г. Учебная геологическая практика. Изд-во УГГГА, Екатеринбург, 1995. 223 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. Геологические маршруты по Екатеринбуржью. Изд-во УГГГА, Екатеринбург, 1997. 227 с.

Стефан Григорьевич Паняк
Татьяна Сергеевна Бобина

УЧЕБНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА

Учебное пособие

для студентов специальности
21.05.04 – «Горное дело» (ГД)

Корректура кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Печать на ризографе.
Печ. л. 6.0. Уч.- изд. л. 5.8. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет
Лаборатория множительной техники

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры управления персоналом
(протокол № 1 от 08.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. А. Беляева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.В.01 ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Автор: Полянок О.В., к.пс.н., доцент

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..…3

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ…….……..….6

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ……..…8

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ……..12

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ……...……...….13

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……...…..28

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям (в т.ч. подготовка к практико-ориентированным заданиям и др.).

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;

- уровень образования и степень подготовленности студентов;

- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим (семинарским) занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки, подготовка к выполнению практико-ориентированных заданий);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Особенности информационных технологий для людей с ограниченными возможностями.

Информационные технологии
Универсальный дизайн
Адаптивные технологии

Тема 2. Тифлотехнические средства/ Сурдотехнические средства/ Адаптивная компьютерная техника (Материал изучается по подгруппам в зависимости от вида ограничений здоровья обучающихся)

Брайлевский дисплей
Брайлевский принтер
Телевизионное увеличивающее устройство
Читающая машина
Экранные лупы
Синтезаторы речи
Ассистивные тифлотехнические средства
Ассистивные сурдотехнические средства
Адаптированная компьютерная техника
Ассистивные технические средства

Тема 3. Дистанционные образовательные технологии

Дистанционные образовательные технологии
Иинформационные объекты

Тема 4. Интеллектуальный труд и его значение в жизни общества

Система образования
Образовательная среда вуза
Интеллектуальный труд
Интеллектуальный ресурс
Интеллектуальный продукт

Тема 5. Развитие интеллекта – основа эффективной познавательной деятельности

Личностный компонент
Мотивационно-потребностный компонент
Интеллектуальный компонент
Организационно-деятельностный компонент
Гигиенический компонент
Эстетический компонент
Общеучебные умения
Саморегуляция

Тема 6. Самообразование и самостоятельная работа студента – ведущая форма умственного труда.

Самообразование
Самостоятельная работа студентов
Технологии интеллектуальной работы
Технологии групповых обсуждений

Тема 7. Технологии работы с информацией студентов с ОВЗ и инвалидов

Традиционные источники информации
Технологии работы с текстами
Технологии поиска, фиксирования, переработки информации
Справочно-поисковый аппарат книги
Техника быстрого чтения
Реферирование
Редактирование
Технология конспектирования
Методы и приемы скоростного конспектирования

Тема 8. Организация научно-исследовательской работы

Доклад
Реферат
Курсовая работа
Выпускная квалификационная работа
Техника подготовки работы
Методика работы над содержанием Презентация

Тема 9. Тайм-менеджмент

Время
Планирования времени
Приемы оптимизации распределения времени

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным;

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением,

содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;
- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении

конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование –наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных задания от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их потребуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

1. В соответствии с опросником «Саморегуляция» (ОС) (модификация методики А.К. Осницкого) оцените свои качества, возможности, отношение к деятельности в протоколе (132 высказывания) по 4-х бальной шкале: 4 балла – да; 3 балла – пожалуй да; 2 балла – пожалуй нет; 1 балл – нет.

Текст опросника

1. Способен за дело приниматься без напоминаний.
2. Планирует, организует свои дела и работу.
3. Умеет выполнить порученное задание.
4. Хорошо анализирует условия.
5. Учитывает возможные трудности.
6. Умеет отделять главное от второстепенного.
7. Чаще всего избирает верный путь решения задачи.
8. Правильно планирует свои занятия и работу.
9. Пытается решить задачи разными способами.
10. Сам справляется с возникающими трудностями.
11. Редко ошибается, умеет оценить правильность действий.
12. Быстро обнаруживает свои ошибки.
13. Быстро находит новый способ решения.
14. Быстро исправляет ошибки.
15. Не повторяет ранее сделанных ошибок.
16. Продумывает свои дела и поступки.
17. Хорошо справляется и с трудными заданиям.
18. Справляется с заданиями без посторонней помощи.
19. Любит порядок.
20. Заранее знает, что будет делать.
21. Аккуратен и последователен.
22. Продумывает, все до мелочей.
23. Ошибается чаще из-за того, что смысл задания целом не понят, хотя все детали продуманы.
24. Старателен, хотя часто не выполняет заданий.
25. Долго готовится, прежде чем приступить к делу.
26. Избегает риска.
27. Сначала обдумывает, потом делает.
28. Решения принимает без колебаний.
29. Уверенный в себе.
30. Действует решительно, настойчив.
31. Предприимчивый, решительный.
32. Активный.
33. Ведущий.
34. Реализует почти все, что планирует.
35. Начатое дело доводит до конца.
36. Предпочитает действовать, а не обсуждать.

37. Обдумывает свои дела и поступки.
38. Анализирует свои ошибки и неудачи.
39. Планирует дела, рассчитывает свои силы.
40. Прислушивается к замечаниям.
41. Редко повторяет одну и ту же ошибку.
42. Знает о своих недостатках.
43. Сделает задание на совесть.
44. Как всегда сделает на отлично.
45. Для него важно качество, а не отметка.
46. Всегда проверяет правильность работы.
47. Старается довести дело до конца.
48. Стирается добиться лучших результатов.
49. Действует самостоятельно, мало советуясь с другими.
50. Предпочитает справляться с трудностями сам.
51. Может принять не зависимое от других решение.
52. Любит перемену в занятиях.
53. Легко переключается с одной работы на другую.
54. Хорошо ориентируется в новых условиях.
55. Аккуратен.
56. Внимателен.
57. Усидчив.
58. С неудачами и ошибками обычно справляется.
59. Неудачи активизируют его.
60. Старается разобраться в причинах неудач.
61. Умеет мобилизовать усилия.
62. Взвешивает все «за» и «против».
63. Старается придерживаться правил.
64. Всегда считается с мнением других.
65. Его нетрудно убедить в чем-то.
66. Прислушивается к замечаниям.
67. Нужно напоминать о том, что необходимо закончить дело.
68. Не планирует, мало организует свои дела, и работу.
69. Не выполняет заданий оттого, что отвлекается.
70. Условия анализирует плохо.
71. Не учитывает возможных трудностей.
72. Не умеет отделять главное от второстепенного.
73. Пути решения выбирает не лучшие.
74. Не умеет планировать работу и занятия.
75. Не пытается решать задачи разными способами.
76. Не может справиться с трудностями без помощи других.
77. Часто допускает ошибки в работе, часто их повторяет.
78. С трудом находит ошибки в своей работе.
79. С трудом находит новые способы решения.
80. С большим трудом и долго исправляет ошибки.

81. Повторяет одни и те же ошибки.
82. Часто поступает необдуманно, импульсивно.
83. С трудными заданиями справляется плохо.
84. Не справляется с заданием без напоминаний и помощи.
85. Не любит порядок.
86. Часто не знает заранее, что ему предстоит делать.
87. Непоследователен и неаккуратен.
88. Ограничивается лишь общими сведениями, общим впечатлением.
89. Ошибается чаще из-за того, что не продуманы мелочи, детали.
90. Не очень старателен, но задания выполняет.
91. Приступает к делу без подготовки.
92. Часто рискует, ищет приключений.
93. Сначала сделает, лотом подумает.
94. Решения принимает после раздумий и колебаний.
95. Часто сомневается в своих силах.
96. Нерешителен, небольшие помехи уже останавливают его.
97. Нерешительный.
98. Вялый, безучастный.
99. Ведомый.
100. Задумывает много, а делает мало.
101. Редко, когда начатое дело доводит до конца.
102. Предпочитает обсуждать, а не действовать.
103. Действует без раздумий, «с ходу».
104. Не анализирует ошибок.
105. Не планирует почти ничего, не рассчитывает своих сил.
106. Не прислушивается к замечаниям.
107. Часто повторяет одну и ту же ошибку.
108. Не хочет знать и исправлять свои недостатки.
109. Сделает «спустя рукава».
110. Сделает как получится.
111. Сделает из-за угрозы получения плохой оценки.
112. Не проверяет правильность результатов своих действий.
113. Часто бросает работу, не доделав ее.
114. Результат неважен – лишь бы поскорее закончить работу.
115. О его трудностях и делах знают почти все.
116. Всегда надеется на друзей, на их помощь.
117. Действует по принципу: как все, так и я!
118. Любит однообразные занятия.
119. С трудом переключается с одной работы на другую.
120. Плохо ориентируется в новых условиях.
121. Неаккуратен.
122. Невнимателен.
123. Неусидчив.
124. Ошибку может исправить, если его успокоить.

125. Неудачи быстро сбивают с толку.
126. Равнодушен к причинам неудач.
127. С трудом мобилизуется на выполнение задания.
128. Поступает необдуманно, импульсивно.
129. Не придерживается правил.
130. Не считается с мнением окружающих.
131. Его трудно убедить в чем-либо.
132. Не прислушивается к замечаниям.

Ключ для обработки и интерпретации данных

В тесте оценивается 132 характеристики саморегуляции. Они разбиты на тройки.

Всего 22 пары противоположных характеристик.

1. Целеполагание - 23. Неустойчивость целей.
2. Моделирование условий - 24. Отсутствие анализа условий.
3. Программирование действий - 25. Спонтанность действий.
4. Оценивание результатов - 26. Ошибки в работе.
5. Коррекции результатов и способ» действий - 27. Повторные ошибки.
6. Обеспеченность регуляции в целом - 28. Импульсивность.
7. Упорядоченность деятельности - 29. Непоследовательность, неаккуратность.
8. Детализация регуляции действий - 30. Поверхностность.
9. Осторожность в действиях - 31. Необдуманность, рискованность.
10. Уверенность в действиях - 32. Неуверенность в своих силах.
11. Инициативность в действиях - 33. Нерешительность.
12. Практическая реализуемость намерений - 34. Незавершенность дел.
13. Осознанность действий - 35. Действия наобум.
14. Критичность в делах и поступках -36. Равнодушие к недостаткам.
15. Ориентированность на оценочный балл -37. Попустительство.
16. Ответственность в делах и поступках - 38. Безответственность в делах.
17. Автономность - 39. Зависимость в действиях.
18. Гибкость, пластичность в действиях - 40. Инертность в работе.
19. Вовлечение полезных привычек в регуляцию действий - 41. «Плохиш».
20. Практичность, устойчивость в регуляции действий - 42. Равнодушие к ошибкам, неудачам.
21. Оптимальность (адекватность) регуляции усилий - 43. Отсутствие последовательности.
22. Податливость воспитательным воздействиям - 44. Самодостаточность.

Необходимо найти сумму в каждой из троек характеристик и сопоставить ее с их противоположностью.

4-6 баллов - слабое проявление характеристики.

7-9 баллов - ситуативное проявление.

10-12 баллов - выраженность характеристики.

Бланк для ответов

ФИ_____
Пол_____ Возраст (дата рождения)_____ Гр._____ Дата_____ № ___

Шкала ответов

4 – да; 3 – пожалуй да; 2 – пожалуй нет; 1 – нет.

№			S		№		S
1	1			23	67		
	2				68		
	3				69		
2	4			24	70		
	5				71		
	6				72		
3	7			25	73		
	8				74		
	9				75		
4	10			26	76		
	11				77		
	12				78		
5	13			27	79		
	14				80		
	15				81		
6	16			28	82		
	17				83		
	18				84		
7	19			29	85		
	20				86		
	21				87		
8	22			30	88		
	23				89		
	24				90		
9	25			31	91		
	26				92		
	27				93		

10	28			32	94	
	29				95	
	30				96	
11	31			33	97	
	32				98	
	33				99	
12	34			34	100	
	35				101	
	36				102	
13	37			35	103	
	38				104	
	39				105	
14	40			36	106	
	41				107	
	42				108	
15	43			37	109	
	44				ПО	
	45				111	
16	46			38	112	
	47				113	
	48				114	
17	49			39	115	
	50				116	
	51				117	
18	52			40	118	
	53				119	
	54				120	
19	55			41	121	
	56				122	
	57				123	
20	58			42	124	
	59				125	
	60				126	

21	61			43	127	
	62				128	
	63				129	
22	64			44	130	
	65				131	
	66				132	

Качественные характеристики саморегуляции

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
1	Целеполагание	За дело приниматься без напоминаний, планирует, организует свои дела и работу. Задания и поручения выполняет.	23	Неустойчивость целей	Не планирует, мало организует свою работу. Нужно напоминать о том, что необходимо закончить дело. Отвлекается.
2	Моделирование условий	Анализирует условия предстоящей деятельности, возможные трудности. Выделяет главное.	24	Отсутствие анализа условий	Не умеет отделять главное от второстепенного. Не предвидит ход дел, возможные трудности.
3	Программирование действий	Правильно планирует свои занятия и работу, избирает верный путь решения задачи.	25	Спонтанность действий	Не умеет планировать работу в занятия, затрудняется в выборе путей решения задач.
4	Оценивание результатов	Редко ошибается, умеет оценить правильность действий. Быстро обнаруживает свои ошибки.	26	Ошибки в работе	Часто допускает ошибки в работе, часто их повторяет. Не находит ошибок в своей работе.
5	Коррекция результатов и способов действий	Быстро находит новый способ решения. Быстро исправляет ошибки.	27	Повторные ошибки	С трудом находит новые способы решения. Повторяет одни и те же ошибки.
6	Обеспеченность регуляции в целом	Продумывает свои дела и поступки. Справляется с заданиями без посторонней помо-	28	Импульсивность	Часто поступает необдуманно, импульсивно. С трудными заданиями справляется плохо.

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
		щи.			
7	Упорядоченность деятельности	Любит порядок. Аккуратен и последователен.	29	Непоследовательность	Часто не знает заранее, что ему предстоит делать, непоследователен и неаккуратен.
8	Детализация регуляции действий	Продумывает, все до мелочей. Ошибается чаще из-за того, что смысл задания целом не понят, хотя все детали продуманы.	30	Поверхностность	Ограничивается лишь общими сведениями, общим впечатлением. Ошибается чаще из-за того, что не продуманы мелочи, детали.
9	Осторожность в действиях	Долго обдумывает и готовится, прежде чем приступить к делу. Избегает риска.	31	Необдуманность, рискованность	Приступает к делу без подготовки. Сначала сделает, лотом подумает.
10	Уверенность в действиях	Уверенный в себе. Решения принимает без колебаний. Решителен. Настойчив.	32	Неуверенность в своих силах	Решения принимает после колебаний. Сомневается в своих силах. Нерешителен.
11	Инициативен в действиях.	Предприимчивый, решительный. Активный. Ведущий.	33	Нерешительность	Нерешительный. Вялый, безучастный. Ведомый.
12	Практическая реализуемость намерений	Реализует почти все, что планирует. Начатое дело доводит до конца.	34	Незавершенность дел	Редко, когда начатое дело доводит до конца. Предпочитает обсуждать, а не действовать.
13	Осознанность действий	Обдумывает, планирует свои дела и поступки. Анализирует свои ошибки и неудачи.	35	Действия наобум	Действует без раздумий, «с ходу», не рассчитывает своих сил.
14	Критичность в делах и поступках	Знает о своих недостатках. Редко повторяет ошибки. Прислушивается к замечаниям.	36	Равнодушие к недостаткам	Часто повторяет одну и ту же ошибку. Не хочет знать и исправлять свои недостатки.

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции		№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
15	Ориентированность на оценочный балл	Сделает задание на совесть. Для него важно качество, а не отметка.		37	Попустительство	Делает все «спустя рукава», как получится. Делает из-за угрозы плохой оценки.
16	Ответственность в делах и поступках	Гарантирует доведение дел до конца. Всегда проверяет правильность работы.		38	Безответственность в делах	Не проверяет результатов своих действий. Часто бросает работу, не доделав до конца.
17	Автономность	Действует и принимает самостоятельные решения. Предпочитает сам справляться с трудностями.		39	Зависимость в действиях	Всегда надеется на друзей, на их помощь.
18	Гибкость, пластичность в действиях	Легко переключается с одной работы на другую. Хорошо ориентируется в новых условиях.		40	Инертность в работе	Любит однообразные занятия. С трудом переключается с одной работы на другую.
19	Вовлечение полезных привычек в регуляцию действий	Аккуратен. Внимателен. Усидчив.		41	«Плохиш»	Неаккуратен. Невнимателен. Неусидчив.
20	Практичность, устойчивость в регуляции действий	Справляется с неудачами и ошибками. Неудачи активизируют его. Старается разобраться в их причинах.		42	Равнодушие к ошибкам, неудачам	Неудачи быстро сбивают с толку. Равнодушен к их причинам.
21	Оптимальность (адекватность) регуляции усилий	Взвешивает все «за» и «против». Умеет мобилизовать усилия.		43	Отсутствие последовательности	Поступает необдуманно. С трудом мобилизуется на выполнение задания.
22	Податливость воспитательным воздействиям	Всегда считается с мнением других. Прислушивается к замечаниям.		44	Самодостаточность	Не считается с мнением окружающих. Не прислушивается к замечаниям.

Задание: На основе самодиагностики саморегуляции сформулируйте рекомендации по саморегуляции.

2. Выберите научную статью по своей специальности и напишите к ней аннотацию, реферат, конспект, рецензию.

Методические указания

АННОТАЦИЯ (от лат. annotatio - замечание, пометка) – это краткая характеристика статьи, рукописи, книги, в которой обозначены тема, проблематика и назначение издания, а также содержатся сведения об авторе и элементы оценки книги.

Перед текстом аннотации даются выходные данные (автор, название, место и время издания). Эти данные можно включить в первую часть аннотации.

Аннотация обычно состоит из двух частей. В первой части формулируется основная тема книги, статьи; во второй части перечисляются (называются) основные положения. Говоря схематично, аннотация на книгу (прежде всего научную или учебную) отвечает на вопросы о чем? из каких частей? как? для кого? Это ее основные, стандартные смысловые элементы. Каждый из них имеет свои языковые средства выражения.

Аннотация на книгу помещается на оборотной стороне ее титульного листа и служит (наряду с ее названием и оглавлением) источником информации о содержании работы. Познакомившись с аннотацией, читатель решает, насколько книга может быть ему нужна. Кроме того, умение аннотировать прочитанную литературу помогает овладению навыками реферирования.

Языковые стереотипы, с помощью которых оформляется каждая смысловая часть аннотации:

1. Характеристика содержания текста:

В статье (книге) рассматривается…; Статья посвящена…; В статье даются…; Автор останавливается на следующих вопросах…; Автор затрагивает проблемы…; Цель автора – объяснить (раскрыть)…; Автор ставит своей целью проанализировать…;

2. Композиция работы:

Книга состоит из … глав (частей)…; Статья делится на … части; В книге выделяются … главы.

3. Назначение текста:

Статья предназначена (для кого; рекомендуется кому)…; Сборник рассчитан…; Предназначается широкому кругу читателей…; Для студентов, аспирантов…; Книга заинтересует…

РЕФЕРАТ (от лат.referre- докладывать, сообщать) – это композиционно организованное, обобщенное изложение содержания источника информации (статьи, ряда статей, монографии и др.). Реферат отвечает на вопрос: «Какая информация содержится в первоисточнике, что излагается в нем?»

Реферат состоит из трех частей: общая характеристика текста (выходные данные, формулировка темы); описание основного содержания; выводы референта. Изложение одной работы обычно содержит указание на тему и композицию реферируемой работы, перечень ее основных положений с приведением аргументации, реже - описание методики и проведение эксперимента, результатов и выводов исследования. Такой реферат называется про-

стым информационным. Студенты в российских вузах пишут рефераты обычно на определенные темы. Для написания таких тематических рефератов может быть необходимо привлечение более чем одного источника, по крайней мере двух научных работ. В этом случае реферат является не только информационным, но и обзорным.

Реферирование представляет собой интеллектуальный творческий процесс, включающий осмысление текста, аналитико-синтетичесокое преобразование информации и создание нового текста. Реферат не должен превращаться в «ползанье» по тексту. Цель реферирования – создать «текст о тексте». Реферат – это не конспект, разбавленный «скрепами» типа *далее автор отмечает…* Обильное цитирование превращает реферат в конспект. При чтении научного труда важно понять его построение, выделить смысловые части (они будут основой для плана), обратить внимание на типичные языковые средства (словосочетания, вводные конструкции), характерные для каждой части. В реферате должны быть раскрыты проблемы и основные положения работы, приведены доказательства этих положений и указаны выводы, к которым пришел автор. Реферат может содержать оценочные элементы, например: *нельзя не согласиться, автор удачно иллюстрирует* и др. Обратите внимание, что в аннотации проблемы научного труда лишь обозначаются, а в реферате - раскрываются.

Список конструкций для реферативного изложения**:**

Предлагаемая вниманию читателей статья (книга, монография) представляет собой детальное (общее) изложение вопросов…; Рассматриваемая статья посвящена теме (проблеме, вопросу…);

Актуальность рассматриваемой проблемы, по словам автора, определяется тем, что…; Тема статьи (вопросы, рассматриваемые в статье) представляет большой интерес…; В начале статьи автор дает обоснование актуальности темы (проблемы, вопроса, идеи); Затем дается характеристика целей и задач исследования (статьи);

Рассматриваемая статья состоит из двух (трех) частей…; Автор дает определение (сравнительную характеристику, обзор, анализ)…; Затем автор останавливается на таких проблемах, как…; Автор подробно останавливается на истории возникновения (зарождения, появления, становления)…; Автор подробно (кратко) описывает (классифицирует, характеризует) факты…; Автор доказывает справедливость (опровергает что-либо)…; Автор приводит доказательства справедливости своей точки зрения…; В статье дается обобщение…, приводятся хорошо аргументированные доказательства…;

В заключение автор говорит о том, что…; Несомненный интерес представляют выводы автора о том, что…; Наиболее важными из выводов автора представляются следующие…; Изложенные (рассмотренные) в статье вопросы (проблемы) представляют интерес не только для…, но и для…

КОНСПЕКТИРОВАНИЕ – письменная фиксация основных положений читаемого или воспринимаемого на слух текста. При конспектировании происходит свертывание, компрессия первичного текста.

КОНСПЕКТ- это краткое, но связное и последовательное изложение значимого содержания статьи, лекции, главы книги, учебника, брошюры. Запись-конспект позволяет восстановить, развернуть с необходимой полнотой исходную информацию, поэтому при конспектировании надо отбирать новый и важный материал и выстраивать его в соответствии с логикой изложения. В конспект заносят основные (существенные) положения, а также фактический материал (цифры, цитаты, примеры). В конспекте последующая мысль должна вытекать из предыдущей (как в плане и в тезисах). Части конспекта должны быть связаны внутренней логикой, поэтому важно отразить в конспекте главную мысль каждого абзаца. Содержание абзаца (главная мысль) может быть передано словами автора статьи (возможно сокращение высказывания) или может быть изложено своими словами более обобщенно. При конспектировании пользуются и тем и другим приемом, но важно передать самые главные положения автора без малейшего искажения смысла.

Различают несколько видов конспектов в зависимости от степени свернутости первичного текста, от формы представления основной информации:

1. конспект-план;
2. конспект-схема;
3. текстуальный конспект.

Подготовка конспекта включает следующие этапы:

1. Вся информация, относящаяся к одной теме, собирается в один блок – так выделяются смысловые части.
2. В каждой смысловой части формулируется тема в опоре на ключевые слова и фразы.
3. В каждой части выделяется главная и дополнительная по отношению к теме информация.
4. Главная информация фиксируется в конспекте в разных формах: в виде тезисов (кратко сформулированных основных положений статьи, доклада), выписок (текстуальный конспект), в виде вопросов, выявляющих суть проблемы, в виде назывных предложений (конспект-план и конспект-схема).
5. Дополнительная информация приводится при необходимости.

РЕЦЕНЗИЯ - это письменный критический разбор какого-либо произведения, предполагающий, во-первых, комментирование основных положений (толкование авторской мысли; собственное дополнение к мысли, высказанной автором; выражение своего отношения к постановке проблемы и т.п.); во-вторых, обобщенную аргументированную оценку, в третьих, выводы о значимости работы.

В отличие от рецензии ОТЗЫВ дает самую общую характеристику работы без подробного анализа, но содержит практические рекомендации: анализируемый текст может быть принят к работе в издательстве илина соискание ученой степени.

Типовой план для написания рецензии и отзывов:

1. Предмет анализа: *В работе автора…; В рецензируемой работе…; В предмете ана*лиза…

2. Актуальность темы: Работа посвящена актуальной теме…; Актуальность темы обусловлена…; Актуальность темы не вызывает сомнений (вполне очевидна)…

3. Формулировака основного тезиса: Центральным вопросом работы, где автор добился наиболее существенных (заметных, ощутимых) результатов, является…; В работе обоснованно на первый план выдвигается вопрос о…

4. Краткое содержание работы.

5. Общая оценка: Оценивая работу в целом…; Таким образом, рассматриваемая работа…; Автор проявил умение разбираться в…; систематизировал материал и обобщил его…; Безусловной заслугой автора является новый методический подход (предложенная классификация, некоторые уточнения существующих понятий); Автор, безусловно, углубляет наше представление об исследуемом явлении, вскрывает новые его черты…

6. Недостатки, недочеты: Вместе с тем вызывает сомнение тезис о том…; К недостаткам (недочетам) работы следует отнести допущенные автором длинноты в изложении (недостаточную ясность при изложении)…; Работа построена нерационально, следовало бы сократить…; Существенным недостатком работы является…; Отмеченные недостатки носят чисто локальный характер и не влияют на конечные результаты работы…; Отмеченные недочеты работы не снижают ее высокого уровня, их скорее можно считать пожеланиями к дальнейшей работе автора…; Упомянутые недостатки связаны не столько с…, сколько с…

7. Выводы: Представляется, что в целом работа… имеет важное значение…; Работа может быть оценена положительно, а ее автор заслуживает…; Работа заслуживает высокой (положительной, отличной) оценки…; Работа удовлетворяет всем требованиям…, а ее автор, безусловно, имеет (определенное, законное, заслуженное, безусловное) право…

Задание

а) Выберите научную статью по своей специальности и напишите к ней аннотацию, реферат, конспект, рецензию.

3. Проанализируйте отрывок из студенческой курсовой работы, посвященной проблеме связи заголовка и текста. Соответствует ли язык сочинения нормам научного стиля? На основании анализа проведите правку текста:

Заголовок, будучи неотъемлемой частью газетных публикаций, определяет лицо всей газеты. Сталкиваясь с тем или иным периодическим изданием, читатель получает первую информацию о нем именно из заголовков. На примере газеты «Спорт – экспресс» за апрель – май 1994 г. я рассмотрю связь: заголовок – текст, ведь, как говорится в народной мудрости «встречают по одежке, а провожают – по уму». Но даже при наличии прекрасной одежки (заглавий) и величайшего ума (самих материалов) стилистическая концепция газеты будет не полной, если будет отсутствовать продуманная и логичная связь между содержанием и заголовком. Итак, стараясь выбрать наиболее продуманные заглавия,

я попытаюсь проследить за тем, по какому принципу строится связь между содержанием и заголовком самой популярной спортивной газеты России «Спорт – экспресс». А к тому же я остановлюсь и на классификации заголовков по типу их связей с газетным текстом вообще.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Технологии интеллектуального труда*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры управления персоналом
(протокол № 1 от 08.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. А. Беляева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.02 СРЕДСТВА КОММУНИКАЦИИ В УЧЕБНОЙ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Автор: Полянок О.В., к.пс.н.

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….……..…3

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ……..…..….6

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ…….…..…8

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ……12

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ……...…….…14

ПОДГОТОВКА РЕФЕРАТА……...….36

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……..…..45

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям (в т.ч. подготовка к практико-ориентированным заданиям и др.).

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;

- уровень образования и степень подготовленности студентов;

- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим (семинарским) занятиям (в т.ч. подготовка к выполнению практико-ориентированных заданий, подготовка реферата);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Сущность коммуникации в разных социальных сферах. Основные функции и виды коммуникации

Коммуникации
Межличностное общение
Речевые способности
Профессиональное общение

Тема 2. Специфика вербальной и невербальной коммуникации

Вербальная коммуникация
Невербальная коммуникация

Тема 3. Эффективное общение

Эффективное общение
Обратная связь
Стиль слушания

Тема 4. Основные коммуникативные барьеры и пути их преодоления в межличностном общении. Стили поведения в конфликтной ситуации

Конфликт
Барьер речи

Тема 5. Виды и формы взаимодействия студентов в условиях образовательной организации

Группа
Коллектив
Групповое давление
Феномен группомыслия
Феномен подчинения авторитету
Обособление
Диктат
Подчинение
Вызов
Выгода
Соперничество
Сотрудничество
Взаимодействие
Взаимопонимание

Тема 6. Формы, методы, технологии самопрезентации

Самопрезенгация
Публичное выступление

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным;

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;
- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе –

поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть

логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование –наиболеесложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных задания от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их потребуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Организуйте коллективную сетевую деятельность.

Методические указания:

Под организацией **коллективной сетевой деятельности** понимают совместные действия нескольких пользователей в сети электронных коммуникаций, направленные на получение информации. Участники совместной сетевой деятельности могут быть объединены общими целями, интересами, что позволяет им обмениваться мнениями, суждениями, а также совершать действия с различными объектами, такими как фотографии, программы, записи, статьи, представленными в цифровом виде.

Подобное взаимодействие может заключаться в различных его видах, таких как:

- - общение;
- - обмен данными;
- - организация трудовой деятельности;
- - совместное времяпрепровождение за сетевыми развлечениями.

Рассмотрим каждый из них. Одним из примеров организации **общения** в сети

Интернет могут служить популярные на сегодняшний день сообщества **Livejournal** (www.livejoumal.ru), **Facebook** (www.facebook.com), **Twitter** (http://t witter.com) и др.

По своей сути это социальные сети, которые работают в режиме реального времени, позволяя участникам взаимодействовать друг с другом. Так, социальная сеть Livejournal (Живой журнал) предоставляет возможность публиковать свои и комментировать чужие записи, вести коллективные блоги («сообщества»), получать оперативную информацию, хранить фотографии и видеоролики, добавлять в друзья других пользователей и следить за их записями в «ленте друзей» и др.

Facebook позволяет создать профиль с фотографией и информацией о себе, приглашать друзей, обмениваться с ними сообщениями, изменять свой статус, оставлять сообщения на своей и чужой «стенах», загружать фотографии и видеозаписи, создавать группы (сообщества по интересам).

Система Twitter позволяет пользователям отправлять короткие текстовые заметки, используя web-интерфейс, sms-сообщения, средства мгновенного обмена сообщениями (например, Windows Live Messenger), сторонние программы-клиенты. Отличительной особенностью Твиттера является публичная доступность размещенных сообщений, что роднит его с **блогами** (онлайн-дневник, содержимое которого, представляет собой регулярно обновляемые записи — **посты).**

Другим способом общения, безусловно, является **электронная почта.** Принципы создания ящика электронной почты подробно рассматривались в практикуме параграфа 2.12. При всех своих плюсах электронная почта не позволяет организовать двусторонний оперативный диалог, максимально приближенный к обычному разговору. Отправив письмо, человек уверен, что оно оперативно будет доставлено в ящик адресата, но будет ли получен быстрый ответ? Кроме того, переписка может растянуться, что сводит к минимуму решение возможных актуальных проблем человека в настоящий момент времени.

Именно поэтому возникла необходимость в самостоятельном классе программ, которые выполняли бы две основные задачи:

- 1. Показать, находится ли собеседник в данный момент в сети Интернет, готов ли он общаться.
- 2. Отправить собеседнику короткое сообщение и тут же получить от него ответ.

Такие программы получили название IMS (англ. Instant Messengers Service —

служба мгновенных сообщений). Часто такие программы называют **интернет-пейджерами.** В качестве примера подобных программ можно привести Windows Live Messenger, Yahoo!Messenger, ICQ.

Так, программа Windows Live Messenger является одним из компонентов Windows Live — набора сетевых служб от компании Microsoft. Ранее мы познакомились с такими его модулями, как Семейная безопасность и Киностудия. Доступ к Messenger можно получить по адресу http://download.ru.msn.com/ wl/messenger, либо через кнопку **Пуск** на своем персональном компьютере (предварительно установив основные компоненты службы Windows Live).

В настоящее время произошла интеграция Messenger и программы Skype, функции которой будут рассмотрены позже.

Чтобы начать «разговор», достаточно выполнить двойной щелчок мыши на имени собеседника и ввести сообщение в соответствующее окно. Если друга нет на месте, можно оставить ему сообщение, и он увидит его, когда снова войдет в программу.

Коммуникацию в реальном масштабе времени возможно осуществить с помощью **чатов** (англ. Chatter — болтать). Если ваш компьютер оснащен видеокамерой, вы сможете начать видеочат. Одной из наиболее интересных особенностей видео- чата в Messenger является то, что он позволяет делать через Интернет все, что ранее можно было делать только при личном общении. Например, можно легко обмениваться фотографиями и видеть, как собеседник реагирует на них.

Теперь рассмотрим, каким образом можно организовать коллективную сетевую деятельность, связанную с **обменом данными.** Сразу отметим, что для передачи или открытия доступа к файлам в локальной сети используются стандартные возможности операционной системы компьютера. Для этого достаточно в настройках определенной директории открыть общий доступ на чтение или запись другими пользователями сети.

В настоящее время популярнейшим способом обмена данными является размещение файлов на различных видеохостингах и в социальных сетях. **Хостинг** — это услуга по предоставлению вычислительных мощностей для размещения информации на сервере, постоянно находящемся в сети Интернет. Для размещения видеофайлов, как правило, используются такие крупные видеохос- тинги, как YouTube (www.youtube.com), Rutube (http://mtube.ru). Социальные сети, например Одноклассники (www.odnoklassniki.rn), ВКонтакте (http://vk.com) и др., также можно использовать для размещения видеофотоматериалов.

Хранение, обмен файлов возможно организовать и с помощью облачных сервисов, таких как Яндекс.Диск, SkyDrive, iCloud и т.д. Перечислим ряд достоинств подобного способа организации работы:

- не требуется денежных вложений - сервисы бесплатны;
- возможность резервного хранения данных;
- доступность информации из любой точки мира с разных устройств, подключенных к Интернету;
- пользователь самостоятельно определяет доступность к файлам другим людям;
- большой размер облачного хранилища (7-10 Гб);
- информация не привязана к одному компьютеру;
- доступ к файлам, хранящимся на устройствах с разными аппаратными платформами (Windows, Android, iOS).

В качестве примера рассмотрим работу с программой Яндекс.Диск, которую предварительно следует установить на свой компьютер с адреса http://disk. yandex.ru/download. После инсталляции программы на вашем устройстве создается папка Яндекс.Диск, в которой будет находиться ряд папок, таких как Документы, Музыка, Корзина. Теперь, после того как мы добавим, изменим или удалим файл в папке Яндекс.Диск на своем компьютере, то же самое автоматически произойдет на серверах Яндекс, т. е. происходит процесс синхронизации.

Поделиться файлом с друзьями через web-интерфейс можно, выполнив следующие действия:

1. Зайти в свой почтовый ящик на сервисе Яндекс.

2. Выполнив команду **Файлы/Документы,** выделить нужный файл из списка.

3. Установить переключатель на панели предпросмотра в положение **Публичный** и нажать на одну из кнопок, расположенных ниже, что гарантирует публикацию ссылки на файл в одной из социальных сетей (ВКонтакте, Facebook и т.д.) либо отправку по электронной почте (рис. 1).

Рис. 1. Ссылка на файл

Другой возможностью публикации ссылки на файл - получение ее через ОС Windows. В этом случае порядок действий следующий:

- 1. Открыть папку Яндекс.Диск.
- 2. Выполнить щелчок правой кнопкой мыши на нужном файле.
- 3. В контекстном меню выбрать пункт **Яндекс.Диск: Скопировать публичную ссылку.**

Теперь в буфере обмена находится ссылка на файл, например, http://yadi.Sk/d/91nV8FjiOYnX, с которой вы можете поделиться со своими друзьями.

Перейдем к описанию организации **трудовой деятельности** как способа совместного сетевого взаимодействия. Она может выглядеть самой разной, от простого общения в видеоконференциях, заканчивая использованием серьезных корпоративных решений для управления рабочим процессом в компании. Примерами таких решений являются:

1. 1С-Битрикс: Корпоративный Портал (http://www.lc-bitrix.ru/products/

intranet/) — система управления внутренним информационным ресурсом компании для коллективной работы над задачами, проектами и документами.

2. Мегаплан (www.megaplan.ru) — онлайн-сервис для управления бизнесом.

3. TeamLab (www.teamlab.com/ru) — многофункциональный онлайн-сервис для совместной работы, управления документами и проектами.

4. BaseCamp (http://basecamp.com) — онлайн-инструмент для управления проектами, совместной работы и постановки задач по проектам.

Рассмотрим эти решения на примере облачного сервиса **Мегаплан,** который относится к **модели SaaS** (англ. Software as a service — программное обеспечение как услуга). В рамках модели SaaS заказчики платят не за владение программным обеспечением как таковым, а за его аренду (т. е. за его использование через web-интерфейс). Таким образом, в отличие от классической схемы лицензирования программного обеспечения заказчик несет сравнительно небольшие периодические затраты (от 150 до 400 руб./мес.), и ему не требуется инвестировать значительные средства в приобретение ПО и аппаратной платформы для его развертывания, а затем поддерживать его работоспособность.

Используя на предприятии Мегаплан, можно получить множество современных эффективных средств управления персоналом компании, в частности:

- выстроить иерархическую структуру предприятия, прояснить уровни подчинения, сделать связи сотрудников внутри предприятия логичными и понятными каждому;

- система управления персоналом на предприятии позволит каждому руководителю контролировать деятельность своих подчиненных в режиме реального времени. Кроме того,

можно получать актуальную информацию, даже не находясь в офисе — для этого достаточно иметь доступ в Интернет;

- получить возможность обмениваться документами, выкладывать в общий доступ бизнес-планы, презентации, проекты и распоряжения, ускоряя обмен информацией внутри предприятия;

- системы обмена сообщениями и корпоративный форум делают общение, как деловое, так и личное, более живым и эффективным. Кроме того, выоказывания по ходу исполнения задачи, зафиксированные в Мегаплане, позволяют анализировать ход работы над проектом.

Зарегистрировавшись на вышеуказанном сайте, вы получите бесплатный доступ для знакомства с сервисом Мегаплан. Из трех решений предлагаемых компанией, а именно Совместная работа, Учет клиентов и Бизнес-менеджер, выберите первое — **Совместная работа.** Такой выбор дает возможность эффективно управлять проектами, задачами и людьми. Выбрав модуль **Сотрудники,** добавьте несколько сотрудников, заполнив их личные карточки. Много информации в карточки заносить необязательно, их всегда можно отредактировать, при этом не забывая нажимать на кнопку **Сохранить.** Заполненный модуль **Сотрудники** представлен на рис. 2.

Рис. 2. Модуль Сотрудники

Заполнив базу сотрудников, отметив все необходимые сведения в картотеке, вы получаете автоматизированную систему управления персоналом компании, которая более оперативно, чем любой менеджер по кадрам, будет оповещать вас обо всех изменениях, напоминать о днях рождения, давать доступ к картотеке и персональным сообщениям.

Теперь создайте отделы своей виртуальной организации. Для этого, находясь в модуле **Сотрудники,** выберите блок **Структура,** а в нем ссылку **Добавить отдел.** Чтобы добавить сотрудника в отдел, его надо перетащить мышью из списка **Нераспределенные.** После этого следует установить связь «Начальник-Подчиненный», используя ссылки **Начальники, Подчиненные.** Подобная ситуация представлена на рис. 3.

Красные стрелки на схеме обозначают вашу подчиненность, а зеленые — сотрудники подчиняются вам.

Для того чтобы организовать взаимодействие в команде, выберите модуль **Задачи** и поставьте перед каждым сотрудником задачу, указав сроки ее выполнения. Сотрудник может принять или отклонить задачу, делегировать ее своему подчиненному, комментировать задачу, оперировать списком своих задач (распечатывать, сортировать по признакам). Он может даже провалить задачу — и это немедленно станет известно всем, кто с ней связан.

Используя модуль **Документы,** попробуйте создать несколько текстовых документов (их объем не может превышать 300 Мб). Также имеется возможность импортировать имеющиеся документы, которые Мегаплан будет сортировать по типам: текстовые

документы, презентации, PDF-файлы, таблицы, изображения и др. Таким образом, можно хранить общие для всей компании договоры, банки, анкеты и другие важные файлы.

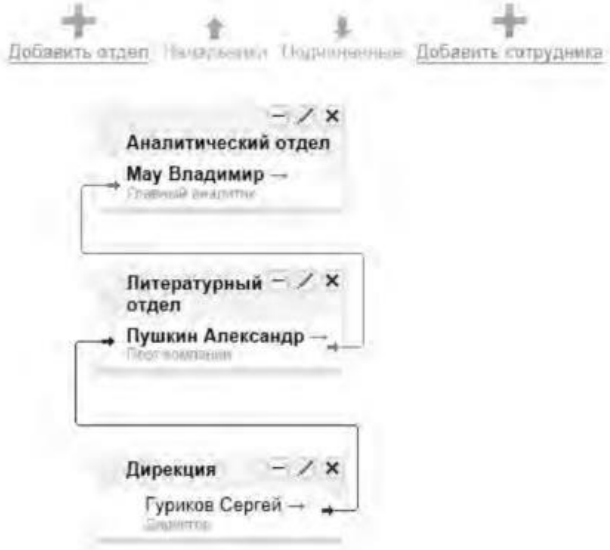


Рис. 3 Организационная структура предприятия

Модуль **Обсуждение** представляет собой корпоративный форум, в рамках которого можно рассматривать любые вопросы. Обсуждение тем может происходить в нескольких уже созданных разделах, а именно Новости, Отдых, Работа. Подобная ситуация представлена на рис. 4.

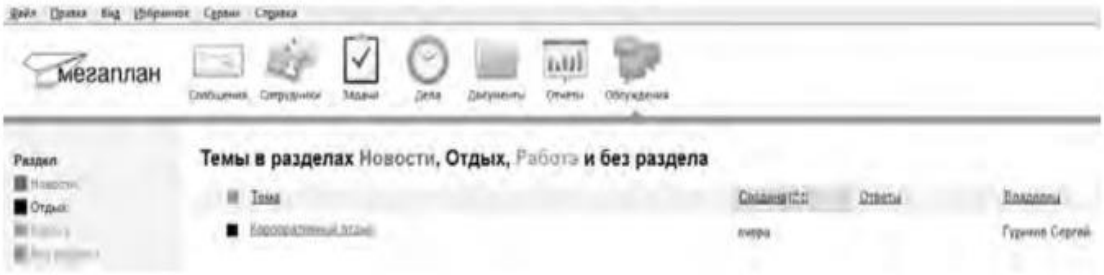


Рис. 4.Создание темы в модуле Обсуждение

Создайте несколько тем, воспользовавшись кнопкой **Добавить.** Обратите внимание на то, что вы можете ограничить просмотр обсуждаемых тем отдельным сотрудникам и группам. Корпоративный форум делает общение внутри компании более открытым. Возможность общения онлайн между сотрудниками, встреча которых могла бы и не произойти в реальной жизни, развивает неформальные отношения, вследствие которых совместная работа над проектами становится более комфортной. Работа над проектом, созданным в виртуальной среде, существенно упрощается за счет системы обмена сообщениями (модуль **Сообщения),** совместной работы, обработки файлов, находящихся в общем доступе.

Итак, освоение базовых функциональных операций в процессе работы с Мегапланом происходит очень быстро. С учетом того, что бесплатная версия продукта позволяет зарегистрировать трех пользователей, можно организовать сетевое взаимодействие, создав учебное предприятие и тем самым, усовершенствовать навыки взаимодействия исполнителей и руководителей в рабочем процессе.

Совместное времяпрепровождение за сетевыми развлечениями — последний вид сетевого взаимодействия, рассматриваемого нами. Сетевыми развлечениями в основном являются компьютерные игры. Вид взаимодействия в играх может быть различным: игроки могут соперничать друг с другом, могут быть в команде, а в некоторых играх возможны оба

вида взаимодействия. Соперничество может выражаться как напрямую, например игра в шахматы, так и в таблице рейтингов в какой-нибудь браузерной игре.

Существует особый жанр игр MMORPG (англ. Massive Multiplayer Online Role-playing Game, массовая многопользовательская онлайновая ролевая игра) — разновидность онлайновых ролевых игр, позволяющая тысячам людей одновременно играть в изменяющемся виртуальном мире через Интернет. Сообщество любителей игр в жанре MMORPG зарегистрировано в сети Интернет по адресу www.mmorpg.su.

Подобные игры, как правило, построены на технологии «клиент-сервер», но есть разновидности, где в качестве клиента выступает обычный браузер. Игрок в такой игре представляется своим **аватаром** — виртуальным представлением его игрового персонажа. Создатели игры поддерживают существование игрового мира, в котором происходит действие игры и который населен ее персонажами.

Когда геймеры попадают в игровой мир, они могут в нем выполнять различные действия вместе с другими игроками со всего мира. Разработчики MMORPG поддерживают и постоянно развивают свои миры, добавляя новые возможности и доступные действия для того, чтобы «гарантировать» интерес игроков. Яркими представителями подобного рода игр на сегодняшний день являются EverQuest, World of Warcraft, Anarchy Online, Asheron's Call, Everquest II, Guild Wars, Ragnarok Online, Silkroad Online, The Matrix Online, City of Heroes.

Задания:

а)Создайте свой аккаунт (если вы его не имеете) в одной из социальных сетей, например Livejournal или Facebook. Выполните скриншоты своего блога. Результат отправьте на электронную почту преподавателя.

б)Используя программу Windows Live Messenger, добавьте в друзья (по предварительной договоренности) своего преподавателя и свяжитесь с ним в режиме реального времени либо оставьте ему сообщение.

в)Установите на свой компьютер программу Яндекс.Диск. Предоставьте доступ к нескольким файлам своему преподавателю.

г)Создайте учебное предприятие, используя облачный сервис Мегаплан. Заполните информацией все имеющиеся в программе модули. Установите связи между отделами. Пригласите нескольких своих друзей в проект. Продемонстрируйте результат преподавателю, открыв ему доступ.

д)Напишите краткий отчет о результатах своей работы по созданию виртуального предприятия, указав в нем этапы его создания, результаты совместной сетевой деятельности.

е)Являетесь ли вы участником какой-либо игры в жанре MMORPG? Если да, расскажите об основных правилах той игры, в которой вы участвуете. Каким образом происходит ваше взаимодействие в ней с друзьями?

3. Организация форумов

Методические указания

В настоящее время перед каждым образовательным учреждением стоит задача формирования открытой информационной образовательной среды. Эффективным механизмом является использование коммуникационных возможностей сети Интернет. В частности, организация на сайтах или в информационных системах образовательных учреждений форумов (дискуссий).

Форум — это web-страница, созданная на основе клиент-серверной технологии для организации общения пользователей сети Интернет. Концепция форума основана на создании разделов, внутри которых происходит обсуждение различных тем в форме сообщений. От чата форум отличается тем, что общение может происходить не в реальном времени. Таким образом, человек имеет возможность подумать над своим ответом или над создаваемой темой.

По методу формирования набора тем форумы бывают:

- **тематические. В** рамках таких форумов пользователи обсуждают предварительно опубликованную статью, новость СМИ и т.д. Обсуждение происходит в одной или нескольких темах;

- **проблемные.** Для обсуждения предлагается ряд проблемных вопросов (тем). Обсуждение каждой проблемы происходит в своей ветке. Чаще всего в подобных типах форумов пользователь не имеет права создавать новую тему;

- **постоянно действующие форумы.** Форумы поддержки (помощи). По такому принципу строятся форумы технической поддержки, различные консультации и пр. Чаще всего это форумы с динамическим списком тем, где простые участники могут создавать новую тему в рамках тематики форума.

Форумы функционируют согласно определенным правилам, которые определяют администраторы и модераторы. **Администратор форума** следит за порядком во всех разделах, контролирует общение на ресурсе и соблюдение правил сайта. **Модератор форума** чаще всего следит за порядком в конкретном разделе, имеет более узкие права, чем администратор. Его основная задача — увеличивать популярность форума, количество участников и число интересных обсуждений. Дополнительные задачи:

- стимулировать появление новых интересных тем;
- стимулировать общение на форуме;
- не допускать конфликтных ситуаций на форуме, а в случае их возникновения — уметь найти выход из сложной ситуации;
- при появлении в темах **спама** (рассылка коммерческой и иной рекламы или иных видов сообщений (информации) лицам, не выражавшим желания их получать) немедленно сообщать об этом администратору сайта;
- следить за культурой сетевого общения.

Для каждого конкретного форума администратором могут быть созданы свои правила, но в целом их можно свести к следующим:

1. На форумах приветствуется поддержание дискуссии, обмен опытом, предоставление интересной информации, полезных ссылок.
2. Не нужно вести разговор на «вольные» темы и размещать бессодержательные (малосодержательные) или повторяющиеся сообщения. Под бессодержательными (малосодержательными) понимаются, в частности, сообщения, содержащие исключительно или преимущественно эмоции (одобрение, возмущение и т. д.).
3. Желательно проверять грамотность сообщений (например, редактором Microsoft Word) — ошибки затрудняют понимание вопроса или ответа и могут раздражать участников обсуждения.
4. Длинные сообщения желательно разбивать на абзацы пустыми строчками, чтобы их было удобно читать.
5. Запрещается размещать заведомо ложную информацию.
6. Не рекомендуется публиковать сообщения, не соответствующие обсуждаемой теме, в том числе личные разговоры в ветках форума.
7. Не следует писать сообщения сплошными заглавными буквами, так как это эквивалентно повышению тона, а также латинскими буквами. При этом сообщение считается нарушающим данное правило, если такого рода текстом набрано более трети всего сообщения.
8. Участники форума не должны нарушать общепринятые нормы и правила поведения. Исключено употребление грубых слов и ненормативной лексики, выражение расистских, непристойных, оскорбительных или угрожающих высказываний, нарушений законодательства в области авторского права или сохранности конфиденциальной информации.
9. Запрещено публично обсуждать нелегальное использование (в том числе взлом) программного обеспечения, систем безопасности, а также публикацию паролей, серийных номеров и адреса (ссылки), по которым можно найти что-либо из вышеназванного.

10. Не следует размещать в форумах, а также рассылать через личные сообщения коммерческую рекламу и спам.

Для создания форумов используется ряд программных решений, написанных на языке PHP (англ. Hypertext Preprocessor — предпроцессор гипертекста) и используемых для ведения своей базы данных сервер MySQL. К их числу относится **Invision Power Board** (www.invisionpower.com), **vBulletin** (www.vbulletin.com), **PHP Bulletin Board** (www.phpbb.com), **Simple Machines Forum** (www.simplemachines.org) и ряд других. Однако создать «движок форума» с помощью перечисленного программного обеспечения начинающему пользователю будет весьма непросто, поскольку и сами программы, и документация к ним написаны на английском языке.

Попробовать свои силы для создания тематического форума можно с использованием российских web-сервисов, предлагающих свои услуги в этом направлении. Остановим свой выбор на сервисе Forum2x2 (www.forum2x2.ru), который предлагает создание и хостинг форумов. Forum2x2 позволяет создать форум бесплатно, всего за несколько секунд и без всяких технических знаний, а после — мгновенно начать общение. Интерфейс форума является наглядным, простым в использовании и легко настраивается.

Определим следующую задачу — создать форум своего учебного заведения. Находясь на сайте сервиса Forum2x2, выберем кнопку **Создать бесплатный форум.** Пользователю будет предложено выбрать одну из четырех версий создания форумов: Phpbb3, Phpbb2, IPB и Punbb. Их краткая характеристика будет представлена в соответствующих вкладках. Воспользуемся самым простым из них - **Punbb,** который предоставляет только базовые опции web-форума, а следовательно, является оптимальным по скорости и простоте использования. Далее нам предстоит выполнить три простых шага:

- 1. Выбрать графический стиль форума.
- 2. Ввести название форума, его интернет-адрес, свой адрес электронной почты, пароль.
- 3. Прочитать информацию о недопустимом содержании создаваемого форума.

На этом создание форума можно считать завершенным. На рис. 5 представлен один из возможных примеров созданного форума.

Рис. 5 Внешний вид созданного форума

В своем электронном почтовом ящике вы обнаружите письмо от администрации сервиса Forum2x2, в котором будут даны несколько полезных советов для успешного начала работы форума, в частности:

- - поместить в форум несколько сообщений, чтобы задать тон обсуждения;
- - внести личный аспект в стиль оформления форума, подобрав цвета и шрифты;

- - сообщить по электронной почте друзьям о новом форуме и пригласить их поучаствовать в форуме;
- - поместить ссылки на форум на других сайтах, форумах и в поисковых системах.

Для администрирования вновь созданного форума необходимо ввести имя пользователя (Admin) и пароль, который вы выбрали при создании форума. После этого вы получаете доступ к ссылке **Панель администратора,** расположенной внизу страницы, которая имеет несколько вкладок (рис. 6).

Рис. 6. Вкладки Панели администратора

Вкладка **Главная** отображает информацию по статистике созданных сообщений, количестве пользователей и тем. Здесь же можно воспользоваться практическими советами по повышению посещаемости созданного форума. Попробуйте пригласить на созданный форум своих друзей, знакомых, с помощью ссылки **Адреса Email,** вводя в соответствующее поле их электронные адреса. Максимальное число приглашений, отправляемых за один раз, — десять.

Вкладка **Общие настройки** позволяет сконфигурировать форум в соответствии с личными целями администратора. В частности, можно изменить название сайта, его описание, определить конфигурацию защиты форума, определить E- mail администратора.

С помощью раздела **Категории и форумы** создайте свои форумы, определите порядок их вывода с помощью соответствующих кнопок **(Сдвинуть вверх, Сдвинуть вниз). Категория** представляет собой совокупность форумов, объединенных общей тематикой. Один из возможных примеров создания форумов приведен на рис. 7.

Сделанные изменения доступны для просмотра после нажатия на кнопку **Просмотр форума.** Находясь на вкладке **Общие настройки,** перейдите в раздел **Раскрутка форума** и выберите пункт **Поисковые системы.** Введите информацию для ваших мета-тегов, чтобы улучшить позицию вашего форума в поисковых системах. **Мета-теги** — это невидимые коды, используемые поисковиками для индексации и позиционирования вашего форума. Зарегистрируйте ваш форум в основных поисковых системах: Yandex, Google, Rambler.

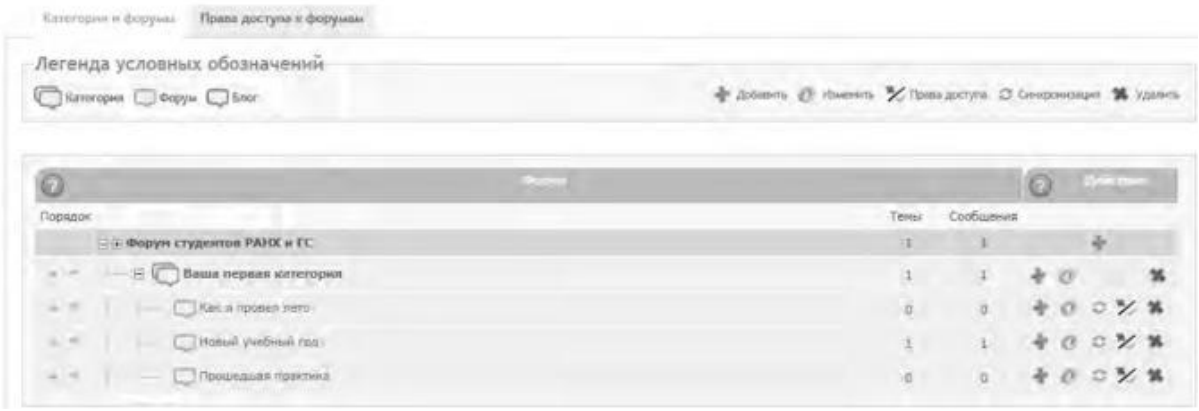


Рис. 7. Структура форумов

Используя вкладку **Оформление,** поэкспериментируйте с различными стилями для того, чтобы повысить привлекательность форума. Здесь же можно поменять версию «движка» форума.

Будучи администратором вашего форума, вы являетесь его единственным полноправным хозяином и полностью контролируете его. С помощью вкладки **Пользователи & Группы** создайте группу модераторов, ответственных за соблюдение установленных вами правил (правил орфографии, правил поведения на форуме и т.д.).

Перейдите на вкладку **Модули.** Здесь вы можете добавить к вашему форуму такие модули, как портал, календарь, галерея, чат или листы персонажей. Выберите ссылку **Портал.** Появится информация о том, что портал не инсталлирован. Нажмите ссылку — инсталлировать. Внешний вид созданного портала представлен на рис. 8.

Рис. 8. Созданный портал

На вкладке **Модули** попробуйте поработать с виджетами (гаджетами) форума, из которых и состоит портал. **Виджет** — это элемент интерфейса, предназначенный для облегчения доступа к информации.

Добавьте/удалите стандартные виджеты форума (Поиск, Календарь, Новости, Последние темы, Самые активные пользователи и др.), отслеживая изменения нажатием кнопки **Просмотр портала.** Оставьте наиболее удачный, с вашей точки зрения, вариант.

Итак, мы приобрели первоначальные практические навыки создания собственного форума и выполнили действия, направленные на увеличение его посещаемости. Кроме того, необходимо создать ссылку на форум с главной страницы сайта учебного заведения. Следует отметить, что, для того чтобы созданный форум не оставался в статичном виде, необходима большая работа администратора, модераторов по его поддержанию.

Альтернативным способом организации форумов является их развертывание в информационной системе учебного заведения. На современном отечественном рынке автоматизированных информационных систем управления учебным процессом представлено достаточно большое количество решений. Свой выбор остановим на ИС ModEUS (http://modeus.krf.ane.ru/index.php), которая разработана с учетом специфики российского образования и обеспечивает автоматизацию учебного процесса, в том числе и дистантного (учет учебного процесса, его планирование и публикация, подготовка отчетной документации).

После регистрации в системе ModEUS, нужно выбрать ссылку **Дискуссии.** Вы можете организовать дискуссию (форум) по любому из находящихся в системе курсов, щелкнув мышью по его названию.

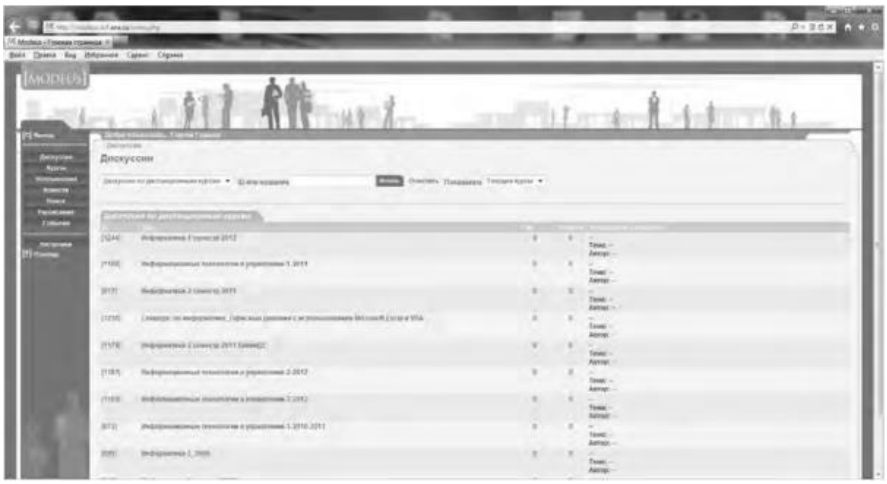


Рис. 9. Страница Дискуссии в ИС ModEUS

Создадим новую тему, нажав одноименную кнопку. Впишем в соответствующие поля название темы и вопрос, предлагаемый для обсуждения. Подобная ситуация представлена на рис. 437. Кроме того, мы имеем возможность прикрепить текстовый файл объемом не более 16 Мб, например список вопросов к экзамену.

После нажатия на кнопку **Создать** тема дискуссии отображается в системе (рис. 10), и любой из студентов может принять участие в ее обсуждении.

Таким образом, можно определить преимущества создания форума в информационной системе учебного заведения:

- - отсутствует необходимость иметь практические навыки работы по созданию web-страниц;
- - нет необходимости заботиться о раскрутке форума - студенты и преподаватели постоянно работают в системе.

В то же время есть и ряд недостатков, в частности:

- - форум доступен исключительно для студентов и преподавателей учебного заведения, в котором функционирует информационная система;
- - стандартизированный типовой интерфейс для всех выполняемых функций;
- - нет возможности организовать дискуссию на вольную тему.

Рис. 10 Создание новой темы

Рис. 11. Создана тема для дискуссии

Использование тестирующих систем в локальной сети образовательного учреждения

Теперь познакомимся с возможностями ИС ModEUS для **организации тестирования студентов в локальной сети образовательного учреждения.** Использование тестирования как наиболее объективного метода оценки качества образования широко используется в учебных заведениях России. Полнота охвата проверкой требований к уровню подготовки студентов предполагает методику конструирования тестовых заданий закрытого и открытого типа. К тестовым заданиям **закрытого типа** относятся задания, предполагающие выбор верного ответа из предложенных вопросов. Тестовые задания **открытого типа** требуют конструирования ответов с кратким и развернутым ответом. И тот, и другой тип заданий успешно реализуются в ИС ModEUS.

Прежде чем создать тестовое задание, необходимо зайти в один из учебных курсов, находящихся в репозитарии (хранилище данных), нажав кнопку **Курсы** в главном меню. Под «курсом» в ПС ModEUS понимается дисциплина, находящаяся в учебном плане.

Найдем в списке **Занятия курса** требуемое занятие и нажмем ссылку **Список заданий,** находящуюся справа от поля **Тип.** Для того чтобы добавить задание в занятие, нажмем кнопку **Добавить.** Подобная ситуация представлена на рис. 11.

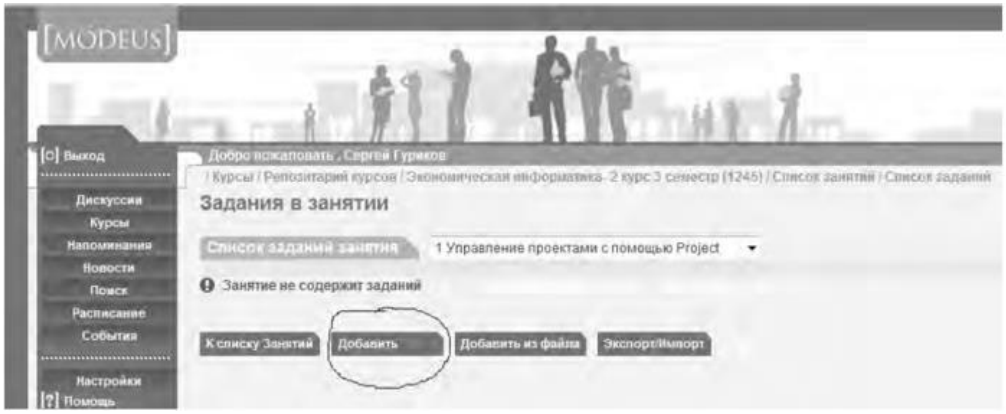


Рис.12. Добавление задания

Тип задания можно выбрать из раскрывающегося списка (рис. 12), кроме того, можно дать название новому заданию, установить балл и выбрать количество попыток сдачи.

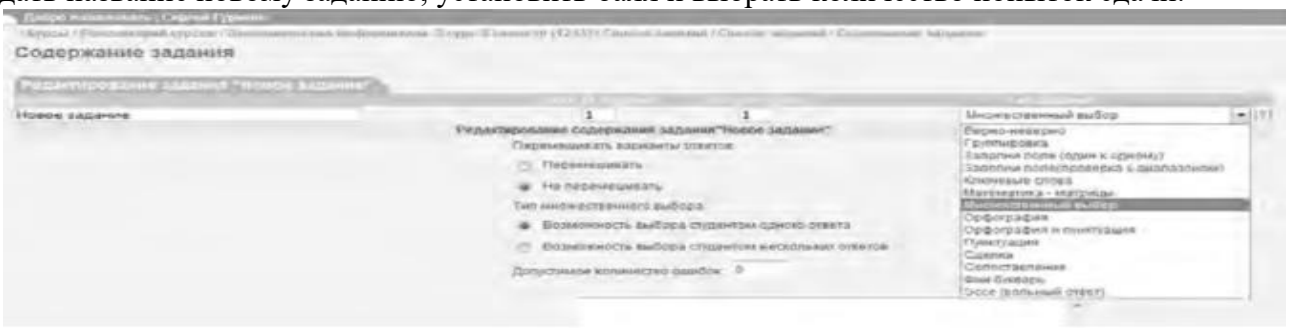


Рис.13. Выбор типа задания

Рассмотрим несколько примеров формирования вопросов закрытого и открытого типа в ИС ModEUS.

Тестовое задание со множественным выбором верных ответов (закрытый тип). Данный тип задания дает вам возможность задать вопрос и варианты ответов на него, из которых обучающийся должен выбрать верный (рис. 14). Правильным может быть один или несколько вариантов. Для того чтобы наполнить задание, выполните следующие действия:

- - в опции **Перемешивать варианты ответов** поставьте метку в поле **Перемешивать,** если вы хотите, чтобы указанные вами варианты ответов выводились на экран в различном порядке, поставьте метку в поле **Не перемешивать,** если варианты ответов должны выводиться всегда в одинаковом порядке;
- - в опции **Тип множественного выбора** поставьте метку в поле **Возможность выбора студентом одного ответа,** если обучающийся из предложенных вариантов ответов может выбрать только один верный, поставьте метку в поле **Возможность выбора студентом нескольких ответов,** если обучающийся может выбрать несколько верных ответов;
- - введите текст задания в поле **Текст задания;**
- - в случае если в задании присутствует приложение, укажите путь к этому приложению, нажав на кнопку I обзор... I и указав путь к файлу на жестком или сетевом диске. Приложением может быть документ любого формата, например изображение;
- - введите тексты вариантов ответов в соответствующие поля;
- - для добавления нового поля под вариант ответа нажмите на кнопку

- каждый вариант ответа может быть дополнен приложением. Для добавления к варианту ответа приложенияукажите путь к нему в поле **Добавить приложение,** нажав на кнопку

и указав путь к файлу на жестком

или сетевом диске;

- установите флажки напротив одного или нескольких правильных вариантов ответа;

- нажмите на кнопку

для сохранения задания в базе данных;

- нажмите на кнопку

, чтобы сохранить задание и сразу

перейти к составлению нового задания.

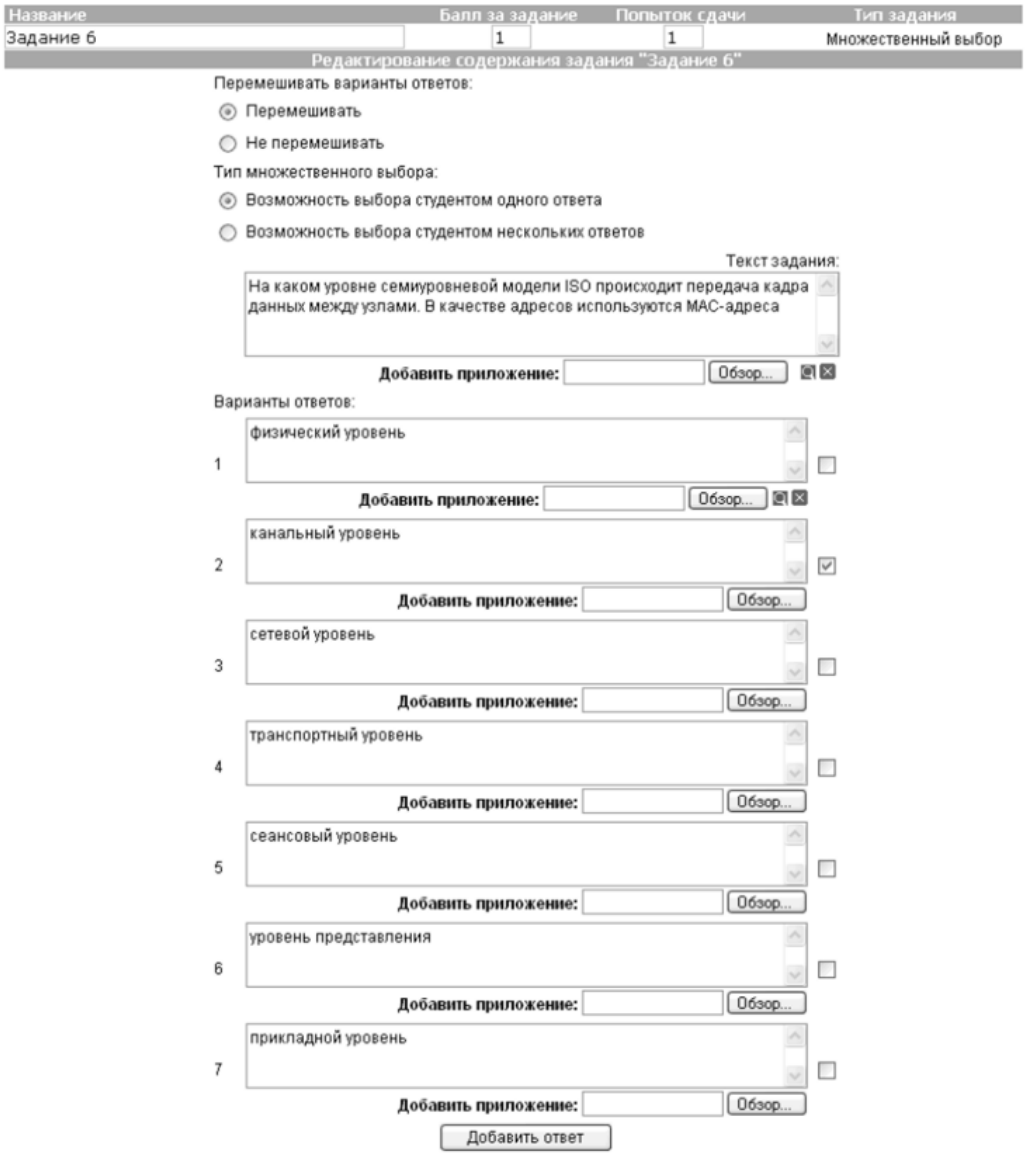


Рис. 14. Создание задания со множественным выбором верных ответов

Тестовое задание с добавлением слова (открытый тип). Данный тип задания (рис. 15) дает вам возможность задать вопрос, на который обучающийся должен ответить, введя ответ с клавиатуры в виде текста, цифры, слова, математической формулы и т.д. Для того чтобы наполнить задание, выполните следующие действия:

- - введите текст задания в поле **Текст задания;**
- - текст задания может представлять собой текст или текст в сочетании с

приложением. Чтобы добавить приложение (изображение или документ), нажмите на кнопку Обзор..., находящуюся под полем **Текст задания,** и
укажите путь к файлу на жестком или сетевом диске;

- - в поле **Вопрос** введите вопрос, на который должен ответить обучающийся;
- - в поле **Ответ** укажите правильный ответ;

- в пределах одного задания вы можете задать обучающемуся несколько вопросов. Для добавления вопроса нажмите на кнопку Добавить вопрос;

- нажмите на кнопку Зафиксировать для сохранения задания в базе данных;

- нажмите на кнопку Сохранить и добавить новое, чтобы сохранить задание и сразу перейти к составлению нового задания.

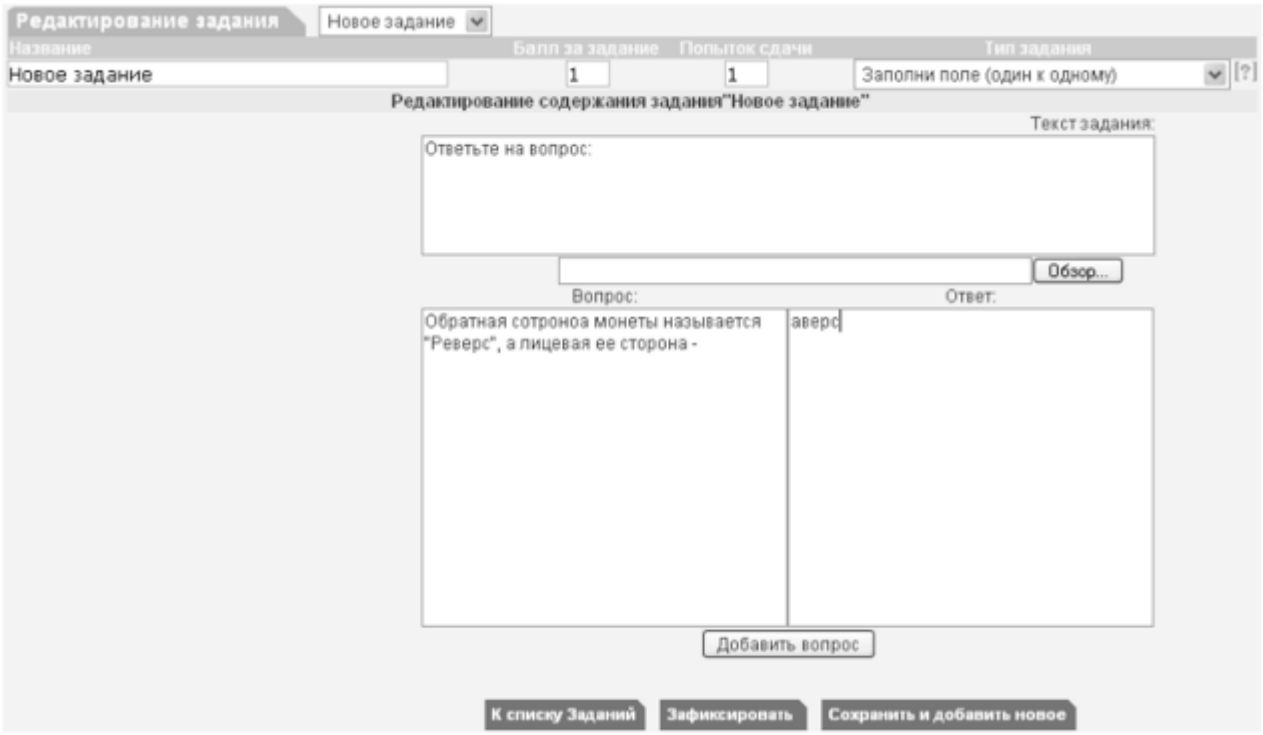


Рис. 15 Создание задания с добавлением слова

Кроме рассмотренных типов заданий, в ИС ModEUS существует и ряд других, в частности:

Верно - неверно. Данный тип задания предоставляет возможность обучающемуся выбрать один из вариантов ответа («верно» или «неверно») на поставленный вопрос.

Группировка. В данном типе задания обучающемуся необходимо распределить заданный список понятий по группам.

Заполни поле (проверка с диапазоном). Данный тип задания дает возможность задать вопрос, на который обучающийся должен ответить, введя с клавиатуры числовой ответ.

Сопоставление. Проверяется способность обучающихся сопоставить понятия по указанному принципу.

Эссе. Обучающийся отвечает в свободной форме на поставленный преподавателем вопрос. Вопрос может быть представлен в виде текста или любого другого документа.

Следует отметить, что в ИС ModEUS можно задать количество вопросов, время на проведение тестовых заданий, а также **мощность теста.** Мощность определяет количество заданий, которые будут предложены студенту для выполнения. Например, если в группе заданий десять вариантов заданий, а мощность группы равна пяти, то студенту будут предложены для выполнения пять заданий из десяти. После проведения тестирования в

информационной системе происходит автоматическое формирование оценок на основании выполненных студентами заданий.

Итак, мы завершили рассмотрение возможностей информационной системы, работающей в локальной сети учебного заведения для организации форумов и проведения тестирования студентов.

Настройка видео web-сессий

В настоящее время миллионы пользователей во всем мире используют видеосвязь с помощью сети Интернет для общения друг с другом. Достоинства такого способа общения очевидны: есть возможность слышать и визуально наблюдать собеседника, находящегося, возможно, за тысячи километров. Для обеспечения полноценной видеосвязи для захвата и воспроизведения видео и звука могут использоваться как встроенные в компьютер камера, микрофон или динамик, так и внешние устройства, такие как web-камера, головная гарнитура, а также следует обеспечить высокоскоростной доступ к Интернету.

Взаимодействие собеседников при организации видео web-сессий возможно в нескольких направлениях: видеоконференция и видеотелефония.

1. **Видеоконференция** — это технология интерактивного взаимодействия двух и более человек, при которой между ними происходит обмен информацией в режиме реального времени. Существует нескольких видов видеоконференций:

- **симметричная (групповая)** видеоконференция позволяет проводить сеансы показа презентаций или рабочего стола;
- **асимметричная** видеоконференция используется для дистанционного образования. Позволяет собрать в конференции множество участников таким образом, что все они будут видеть и слышать одного ведущего, он, в свою очередь, всех участников одновременно;
- **селекторное видеосовещание** — рассчитано на взаимодействие большой группы участников, при котором пользователи имеют возможность активно обсуждать действия при чрезвычайных ситуациях, оперативно решать текущие вопросы.

Для эффективной организации проведения web-конференций, маркетинговых презентаций, онлайн-обучения, совещаний и любых других видов онлайн-встреч существует ряд программных решений. В качестве примера можно привести программы Mirapolis Virtual Room (http://virtualroom.ru/), ВидеоМост (www.videomost.com), TrueConf Online (http://trueconf.ru/) и др.

2. Видеотелефония — реализуется посредством сеанса видеосвязи между двумя пользователями, во время которого они могут видеть и слышать друг друга, обмениваться сообщениями и файлами, вместе работать над документами и при этом находиться в разных местах в комфортной для себя обстановке.

Для того чтобы общаться с близкими и друзьями, можно бесплатно совершать видеозвонки с помощью таких программ, как Skype (http://www.Skype, com/intl/ru/get-skype), Mail.ru Агент (http://agent.mail.ru) и ряд других.

Для того чтобы проверить наличие встроенной web-камеры на компьютере, достаточно войти в меню **Пуск,** выбрать **Компьютер,** щелкнуть на нем правой кнопкой мыши и в контекстно-зависимом меню нажать пункт **Свойства.** Далее следует выбрать пункт меню **Диспетчер устройств,** а в нем пункт **Устройства обработки изображений.** Наличие в нем устройства, например, USB 2.0 Camera свидетельствует о наличии web-камеры.

Кроме того, в документации к компьютеру (Руководство пользователя) или другому устройству должны быть приведены сведения об установленных в систему устройствах и, в частности, инструкция по использованию встроенной камеры и программному обеспечению, отвечающему за данное устройство.

Одной из таких популярных утилит является ArcSoft WebCam Companion — пакет приложений для взаимодействия с web-камерой, который позволяет захватывать, редактировать изображения и записывать видео. Самостоятельно проведите ее инсталляцию,

воспользовавшись web-адресом http://arcsoft-webcam- companion.en.softonic.com. После установки данной программы на компьютер ее можно запустить на выполнение командой **Пуск/Все программы/ArcSoft WebCam Companion/WebCam Companion.** Интерфейс программы представлен несколькими разделами: Захват, Маска, Забавная рамка, Правка, Монитор, Другие приложения (рис. 16).

Рис. 16. Пункты меню программы ArcSoft WebCam Companion

Выберем значок **Захват,** а в нем пункт меню **Параметры web-камеры.** Откроется окно, представленное на рис. 17.

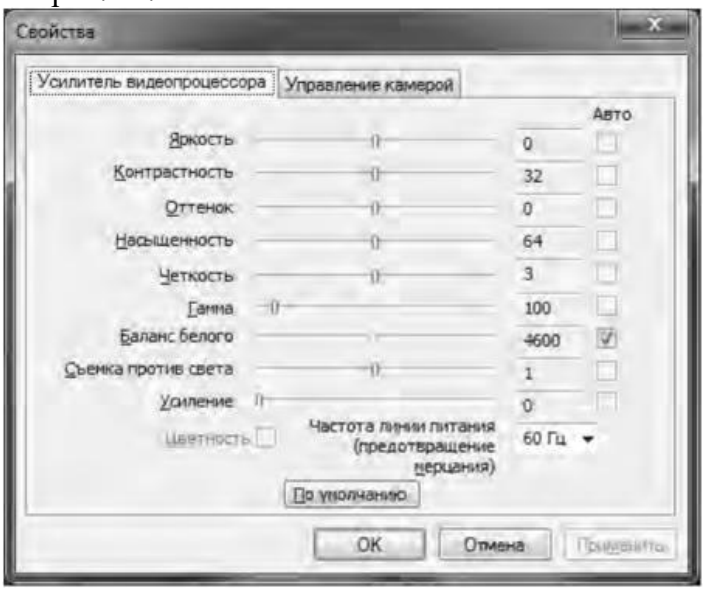


Рис. 17. Окно Свойства web-камеры

Как видно из рис. 17, в данном окне можно изменить основные параметры настройки web-камеры, одновременно наблюдая за результатом на экране. При желании настройки можно вернуть в исходное состояние, нажав на кнопку **По умолчанию.**

Теперь поговорим о том, как организовать web-сессию в такой популярной программе, как Skype. Ее большим преимуществом является такой факт, что звонки между абонентами являются бесплатными. Однако, если вы делаете звонок на мобильный или стационарный телефон, вам потребуется позаботиться о том, чтобы на вашем счете были деньги. Положить деньги на оплату разговоров в Skype вы можете с использованием такого сервиса, как Яндекс.Деньги (https://money.yandex.ru/).

Инсталлируйте программу Skype, воспользовавшись ее адресом в сети Интернет http://www.skype.com/intl/ru/get-skype. После установки программа становится доступной после выполнения команды **Пуск/Все программы/ Skype/Skype. В** окне регистрации введите свой логин и пароль. Обратите внимание на то, что если вы установите флажок в пункте **Автоматическая авторизация при запуске Skype,** то вам не придется каждый раз вводить свои данные.

Добавьте своих друзей, родственников в список контактов, воспользовавшись командой **Контакты/Добавить контакт.** Вам нужно ввести фамилию, имя знакомого, его контактный телефон, адрес электронной почты. В результате ваши контакты будут располагаться в группе **Контакты** и будут видны при каждом запуске программы.

Выполним настройку web-камеры. Последовательно нажмем **Инструменты/Настройки/Настройки видео.** Появится окно, представленное на рис. 18.

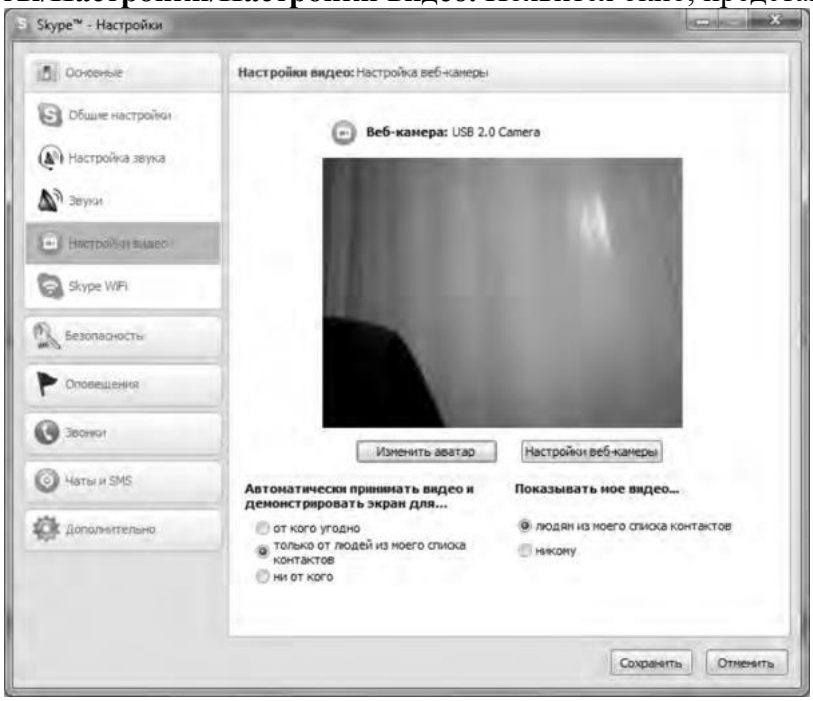


Рис.18. Окно Настройки

Если вы видите изображение - камера настроена и готова к работе. В противном случае, Skype выведет об этом текстовое сообщение. Теперь перейдем в меню **Настройка звука.** Проверьте, что поставлен флажок в опции **Разрешить автоматическую настройку микрофона.** Скажите несколько слов вслух, уровень громкости звука в опции **Громкость** должен изменяться. Окончательно проверить сделанные настройки можно с помощью контрольного звонка. Для этого, находясь в меню **Настройка** звука, выберите пункт **Сделать контрольный звонок в** Skype. В ходе контрольного звонка вы сможете сделать запись своего голоса в течение десяти секунд, а затем прослушать его. Если этот эксперимент окончится удачно, значит, все настройки выполнены правильно и программа готова к работе.

Теперь, когда мы завершили работу с настройками программы, можно попробовать сделать видеозвонок. Для этого необходимо совершить следующие действия:

1. Войти в программу Skype.
2. В группе **Контакты** щелчком мыши выбрать абонента. Во время звонка он должен быть в сети, о чем будет свидетельствовать соответствующий значок в программе Skype.
3. Нажать кнопку **Видеозвонок.**

Через несколько секунд соединение будет установлено и вы можете начать разговор, в процессе которого вы будете видеть и слышать своего собеседника. Подобная ситуация представлена на рис. 19.

Рис. 19 Сеанс связи установлен

Если во время разговоров у вас возникают неполадки со звуком, такие как сильный фоновый шум, эхо, задержка звука, «механический» звук или пропадание слов, следует убедиться в следующем:

1. Использует ли собеседник последнюю версию программы Skype? Информацию о версии программы можно получить, выполнив команду **По- мощь/О** Skype.
2. Нет ли рядом с микрофоном источников шума?
3. Не расположен ли микрофон рядом с динамиками?
4. Достаточно ли высокая скорость соединения?

Кроме того, когда программа Skype обнаруживает неполадки во время звонка, на экране появляется сообщение с рекомендациями, которые помогут вам повысить качество связи. Необходимо выполнить эти рекомендации.

Итак, вы получили теоретические сведения и практические навыки работы с организацией видео web-сессий, которые, несомненно, будут востребованы в вашей повседневной жизни.

Задания:

а)Зарегистрируйтесь на сервисе Forum2x2. Создайте форум своего учебного заведения, выбрав одну из четырех версий создания форумов. Выполните советы для успешного начала работы своего форума, приведенные в параграфе 5.4. После завершения работы отправьте на электронную почту преподавателя ссылку на созданный вами форум.

б)Установите на свой компьютер программу Skype. Сделайте видеозвонок вашему преподавателю (по предварительной договоренности).

2. Проведите диагностику стиля делового общения.

Инструкция. С помощью этого теста вы можете оценить свой стиль делового общения. Вам предложено 80 утверждений. Из каждой пары выберите одно — то, которое, как вы считаете, наиболее соответствует вашему поведению. Обратите внимание па то, что ни одна пара не должна быть пропущена. Тест построен таким образом, что ни одно из приведенных ниже утверждений не является ошибочным.

1. Я люблю действовать.
2. Я работаю над решением проблем систематическим образом.
3. Я считаю, что работа в командах более эффективна, чем на индивидуальной основе.
4. Мне очень нравятся различные нововведения.
5. Я больше интересуюсь будущим, чем прошлым.
6. Я очень люблю работать с людьми.
7. Я люблю принимать участие в хорошо организованных встречах.
8. Для меня очень важными являются окончательные сроки.

9. Я против откладываний и проволочек.
10. Я считаю, что новые идеи должны быть проверены прежде, чем они будут применяться на практике.
11. Я очень люблю взаимодействовать с другими людьми. Это меня стимулирует и вдохновляет.
12. Я всегда стараюсь искать новые возможности.
13. Я сам люблю устанавливать цели, планы и т.п.
14. Если я что-либо начинаю, то доделываю это до конца.
15. Обычно и стараюсь понять эмоциональные реакции других.
16. Я создаю проблемы другим людям.
17. Я надеюсь получить реакцию других на свое поведение.
18. Я нахожу, что действия, основанные на принципе «шаг за шагом», являются очень эффективными.
19. Я думаю, что хорошо могу понимать поведение и мысли других.
20. Я люблю творческое решение проблем.
21. Я все время строю планы на будущее.
22. Я восприимчив к нуждам других.
23. Хорошее планирование — ключ к успеху.
24. Меня раздражает слишком подробный анализ.
25. Я остаюсь невозмутимым, если на меня оказывают давление.
26. Я очень ценю опыт.
27. Я прислушиваюсь к мнению других.
28. Говорят, что я быстро соображаю.
29. Сотрудничество является для меня ключевым словом.
30. Я использую логические методы для анализа альтернатив.
31. Я люблю, когда одновременно у меня идут разные проекты.
32. Я постоянно задаю себе вопросы.
33. Делая что-либо, я тем самым учусь.
34. Полагаю, что я руководствуюсь рассудком, а не эмоциями.
35. Я могу предсказать, как другие будут вести себя в той или иной ситуации.
36. Я не люблю вдаваться в детали.
37. Анализ всегда должен предшествовать действиям.
38. Я способен оценить климат в группе.
39. У меня есть склонность не заканчивать начатые дела.
40. Я воспринимаю себя как решительного человека.
41. Я ищу такие дела, которые бросают мне вызов.
42. Я основываю свои действия на наблюдениях и фактах.
43. Я могу открыто выразить свои чувства.
44. Я люблю формулировать и определять контуры новых проектов.
45. Я очень люблю читать.
46. Я воспринимаю себя как человека, способного интенсифицировать, организовать деятельность других.
47. Я не люблю заниматься одновременно несколькими вопросами.
48. Я люблю достигать поставленных целей.
49. Мне нравится узнавать что-либо о других людях.
50. Я люблю разнообразие.
51. Факты говорят сами за себя.
52. Я использую свое воображение, насколько это возможно.
53. Меня раздражает длительная, кропотливая работа.
54. Мой мозг никогда не перестает работать.
55. Важному решению предшествует подготовительная работа.
56. Я глубоко уверен в том, что люди нуждаются друг в друге, чтобы завершить работу.

57. Я обычно принимаю решение, особо не задумываясь.
58. Эмоции только создают проблемы.
59. Я люблю быть таким же, как другие.
60. Я не могу быстро прибавить пятнадцать к семнадцати.
61. Я примеряю свои новые идеи к людям.
62. Я верю в научный подход.
63. Я люблю, когда дело сделано.
64. Хорошие отношения необходимы.
65. Я импульсивен.
66. Я нормально воспринимаю различия в людях.
67. Общение с другими людьми значимо само по себе.
68. Люблю, когда меня интеллектуально стимулируют.
69. Я люблю организовывать что-либо.
70. Я часто перескакиваю с одного дела на другое.
71. Общение и работа совместно с другими людьми являются творческим процессом.
72. Самоактуализация является крайне важной для меня.
73. Мне очень нравится играть идеями.
74. Я не люблю попусту терять время.
75. Я люблю делать то, что у меня получается.
76. Взаимодействуя с другими, я учусь.
77. Абстракции интересны для меня.
78. Мне нравятся детали.
79. Я люблю кратко подвести итоги, прежде чем прийти к какому-либо умозаключению.
80. Я достаточно уверен в себе.

Обработка результатов.

Обведите те номера, на которые вы ответили положительно, и отметьте их в приведенной ниже таблице. Посчитайте количество баллов по каждому стилю (один положительный ответ равен 1 баллу). Тот стиль, по которому вы набрали наибольшее количество баллов (по одному стилю не может быть более 20 баллов), наиболее предпочтителен для вас.
Если вы набрали одинаковое количество баллов по двум стилям, значит, они оба присущи вам.

Ключ

Стиль 1: 1, 8, 9, 13, 17, 24, 26, 31, 33, 40, 41, 48, 50, 53, 57, 63, 65, 70, 74, 79.
Стиль 2: 2, 7, 10, 14, 18, 23, 25, 30, 34, 37, 42, 47, 51, 55, 58, 62, 66, 69, 75, 78.
Стиль 3: 3, 6, 11, 15, 19, 22, 27, 29, 35, 38, 43, 46, 49, 56, 59, 64, 67, 71, 76, 80.
Стиль 4: 4, 5, 12, J6, 20, 21, 28, 32, 36, 39, 44, 45, 52, 54, 60, 61, 68, 72, 73, 77.

Интерпретация результатов

Стиль 1 — ориентация на действие. Характерно обсуждение результатов, конкретных вопросов, поведения, ответственности, опыта, достижений, решений. Люди, владеющие этим стилем, прагматичны, прямолинейны, решительны, легко переключаются с одного вопроса на другой.

Стиль 2 — ориентация на процесс. Характерно обсуждение фактов, процедурных вопросов, планирования, организации, контролирования, деталей. Человек, владеющий этим стилем, ориентирован на систематичность, последовательность, тщательность. Он честен, многословен и мало эмоционален.

Стиль 3 ориентация на людей. Характерно обсуждение человеческих нужд, мотивов, чувств, «духа работы в команде», понимания, сотрудничества. Люди этого стиля эмоциональны, чувствительны, умеют сопереживать окружающим.

Стиль 4 — ориентация на перспективу, на будущее. Людям этого стиля присуще обсуждение концепций, больших планов, нововведений, различных вопросов, новых методов, альтернатив. Они обладают хорошим воображением, полны идей, но мало реалистичны и порой их сложно понять.

Задания:

а) На основе самодиагностики определите стиль делового общения

б) Дайте обоснование рекомендаций по совершенствованию делового общения.

ПОДГОТОВКА РЕФЕРАТА

Общая характеристика реферата

Написание реферата практикуется в учебном процессе в целях приобретения магистрантом необходимой профессиональной подготовки, развития умения и навыков самостоятельного научного поиска: изучения литературы по выбранной теме, анализа различных источников и точек зрения, обобщения материала, выделения главного, формулирования выводов и т. п. С помощью реферата магистрант может глубже постигать наиболее сложные проблемы дисциплины, учится лаконично излагать свои мысли, правильно оформлять работу, докладывать результаты своего труда.

Реферат является первой ступенью на пути освоения навыков проведения научно-исследовательской работы. В «Толковом словаре русского языка» дается следующее определение: «**реферат** – краткое изложение содержания книги, статьи, исследования, а также доклад с таким изложением».

Различают два вида реферата:

- *репродуктивный* – воспроизводит содержание первичного текста в форме реферата-конспекта или реферата-резюме. В реферате-конспекте содержится фактическая информация в обобщённом виде, иллюстрированный материал, различные сведения о методах исследования, результатах исследования и возможностях их применения. В реферате-резюме содержатся только основные положения данной темы;
- *продуктивный* – содержит творческое или критическое осмысление реферируемого источника и оформляются в форме реферата-доклада или реферата-обзора. В реферате-докладе, наряду с анализом информации первоисточника, дается объективная оценка проблемы, и он имеет развёрнутый характер. Реферат-обзор составляется на основе нескольких источников и в нем сопоставляются различные точки зрения по исследуемой проблеме.

Магистрант для изложения материала должен выбрать продуктивный вид реферата.

Выбор темы реферата

Магистранту предоставляется право выбора темы реферата из рекомендованного преподавателем дисциплины списка. Выбор темы должен быть осознанным и обоснованным с точки зрения познавательных интересов автора, а также полноты освещения темы в имеющейся научной литературе.

Если интересующая тема отсутствует в рекомендованном списке, то по согласованию с преподавателем магистранту предоставляется право самостоятельно предложить тему реферата, раскрывающую содержание изучаемой дисциплины. Тема не должна быть слишком общей и глобальной, так как небольшой объем работы (до 20-25 страниц без учёта приложений) не позволит раскрыть ее.

Начинать знакомство с избранной темой лучше всего с чтения обобщающих работ по данной проблеме, постепенно переходя к узкоспециальной литературе. При этом следует сразу же составлять

библиографические выходные данные используемых источников (автор, название, место и год издания, издательство, страницы).

На основе анализа прочитанного и просмотренного материала по данной теме следует составить тезисы по основным смысловым блокам, с пометками, собственными суждениями и оценками. Предварительно подобранный в литературных источниках материал может превышать необходимый объем реферата.

Формулирование цели и составление плана реферата

Выбрав тему реферата и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план реферата.

Цель – это осознаваемый образ предвосхищаемого результата. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее в ходе исследования. Формулирование цели реферата рекомендуется осуществлять при помощи глаголов: исследовать, изучить, проанализировать, систематизировать, осветить, изложить (представления, сведения), создать, рассмотреть, обобщить и т. д.

Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно необходимо думать над составлением плана, при этом четко соотносить цель и план работы. Правильно построенный план помогает систематизировать материал и обеспечить последовательность его изложения.

Наиболее традиционной является следующая **структура реферата**:

Титульный лист.

Оглавление (план, содержание).

Введение.

1. (полное наименование главы).
   1.1. (полное название параграфа, пункта);
   1.2. (полное название параграфа, пункта).
2. (полное наименование главы).
   2.1. (полное название параграфа, пункта);
   2.2. (полное название параграфа, пункта).

Основная часть

Заключение (выводы).

Библиография (список использованной литературы).

Приложения (по усмотрению автора).

Титульный лист оформляется в соответствии с Приложением.

Оглавление (план, содержание) включает названия всех глав и параграфов (пунктов плана) реферата и номера страниц, указывающие их начало в тексте реферата.

Введение. В этой части реферата обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи работы, указываются используемые материалы и дается их краткая характеристика с точки зрения полноты освещения избранной темы. Объем введения не должен превышать 1-1,5 страницы.

Основная часть реферата может быть представлена двумя или тремя главами, которые могут включать 2-3 параграфа (пункта).

Здесь достаточно полно и логично излагаются главные положения в используемых источниках, раскрываются все пункты плана с сохранением связи между ними и последовательности перехода от одного к другому.

Автор должен следить за тем, чтобы изложение материала точно соответствовало цели и названию главы (параграфа). Материал в реферате рекомендуется излагать своими словами, не допуская дословного переписывания из литературных источников. В тексте обязательны ссылки на первоисточники, т. е. на тех авторов, у которых взят данный материал в виде мысли, идеи, вывода, числовых данных, таблиц, графиков, иллюстраций и пр.

Работа должна быть написана грамотным литературным языком. Сокращение слов в тексте не допускается, кроме общеизвестных сокращений и аббревиатуры. Каждый раздел рекомендуется заканчивать кратким выводом.

Заключение (выводы). В этой части обобщается изложенный в основной части материал, формулируются общие выводы, указывается, что нового лично для себя вынес автор реферата из работы над ним. Выводы делаются с учетом опубликованных в литературе различных точек зрения по проблеме рассматриваемой в реферате, сопоставления их и личного мнения автора реферата. Заключение по объему не должно превышать 1,5-2 страниц.

Библиография (список использованной литературы) – здесь указывается реально использованная для написания реферата литература, периодические издания и электронные источники информации. Список составляется согласно правилам библиографического описания.

Приложения могут включать графики, таблицы, расчеты.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕФЕРАТА

Общие требования к оформлению реферата

Рефераты по дисциплинам магистратуры направления подготовки 38.04.02 – «Менеджмент», как правило, требуют изучения и анализа значительного объема статистического материала, формул, графиков и т. п. В силу этого особое значение приобретает правильное оформление результатов проделанной работы.

Текст реферата должен быть подготовлен в печатном виде. Исправления и помарки не допускаются. Текст работы оформляется на листах формата А4, на одной стороне листа, с полями: левое – 25 мм, верхнее – 20 мм, правое – 15 мм и нижнее – 25 мм. При компьютерном наборе шрифт должен быть таким: тип шрифта Times New Roman, кегль 14, междустрочный интервал 1,5.

Рекомендуемый объем реферата – не менее 20 страниц. Титульный лист реферата оформляется магистрантом по образцу, данному в приложении 1.

Текст реферата должен быть разбит на разделы: главы, параграфы и т. д. Очередной раздел нужно начинать с нового листа.

Все страницы реферата должны быть пронумерованы. Номер страницы ставится снизу страницы, по центру. Первой страницей является титульный лист, но на ней номер страницы не ставится.

Таблицы

Таблицы по содержанию делятся на аналитические и неаналитические. Аналитические таблицы являются результатом обработки и анализа цифровых показателей. Как правило, после таких таблиц делается обобщение, которое вводится в текст словами: «таблица позволяет сделать вывод о том, что…», «таблица позволяет заключить, что…» и т. п.

В неаналитических таблицах обычно помещаются необработанные статистические данные, необходимые лишь для информации и констатации фактов.

Таблицы размещают после первого упоминания о них в тексте таким образом, чтобы их можно было читать без поворота работы или с поворотом по часовой стрелке.

Каждая таблица должна иметь нумерационный и тематический заголовок. Тематический заголовок располагается по центру таблицы, после нумерационного, размещённого в правой стороне листа и включающего надпись «Таблица» с указанием арабскими цифрами номера таблицы. Нумерация таблиц сквозная в пределах каждой главы. Номер таблицы состоит из двух цифр: первая указывает на номер главы, вторая – на номер таблицы в главе по порядку (например: «Таблица 2.2» – это значит, что представленная таблица вторая во второй главе).

Цифры в графах таблиц должны проставляться так, чтобы разряды чисел во всей графе были расположены один под другим. В одной графе количество десятичных знаков должно быть одинаковым. Если данные отсутствуют, то в графах ставят знак тире. Округление числовых значений величин до первого, второго и т. д. десятичного знака для различных значений одного и того же наименования показателя должно быть одинаковым.

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу, при этом заголовок таблицы помещают только над ее первой частью, а над переносимой частью пишут «Продолжение таблицы» или «Окончание таблицы». Если в работе несколько таблиц, то после слов «Продолжение» или «Окончание» указывают номер таблицы, а само слово «таблица» пишут сокращенно, например: «Продолжение табл. 1.1», «Окончание табл. 1.1».

На все таблицы в тексте курсовой работы должны быть даны ссылки с указанием их порядкового номера, например: «…в табл. 2.2».

Формулы

Формулы – это комбинации математических знаков, выражающие какие-либо предложения.

Формулы, приводимые в реферате, должны быть наглядными, а обозначения, применяемые в них, соответствовать стандартам.

Пояснения значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой, в той последовательности, в какой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента дается с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия после него.

Формулы и уравнения следует выделять из текста свободными строками. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знака (+), минус (–), умножения (х) и деления (:).

Формулы нумеруют арабскими цифрами в пределах всей курсовой работы (реферата) или главы. В пределах реферата используют нумерацию формул одинарную, в пределах главы – двойную. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках.

В тексте ссылки на формулы приводятся с указанием их порядковых номеров, например: «…в формуле (2.2)» (второй формуле второй главы).

Иллюстрации

Иллюстрации позволяют наглядно представить явление или предмет такими, какими мы их зрительно воспринимаем, но без лишних деталей и подробностей.

Основными видами иллюстраций являются схемы, диаграммы и графики.

Схема – это изображение, передающее обычно с помощью условных обозначений и без соблюдения масштаба основную идею какого-либо устройства, предмета, сооружения или процесса и показывающее взаимосвязь их главных элементов.

Диаграмма – один из способов изображения зависимости между величинами. Наибольшее распространение получили линейные, столбиковые и секторные диаграммы.

Для построения линейных диаграмм используется координатное поле. По горизонтальной оси в изображенном масштабе откладывается время или факториальные признаки, на вертикальной – показатели на определенный момент (период) времени или размеры результативного независимого признака. Вершины ординат соединяются отрезками – в результате получается ломаная линия.

На столбиковых диаграммах данные изображаются в виде прямоугольников (столбиков) одинаковой ширины, расположенных вертикально или горизонтально. Длина (высота) прямоугольников пропорциональна изображенным ими величинам.

Секторная диаграмма представляет собой круг, разделенный на секторы, величины которых пропорциональны величинам частей изображаемого явления.

График – это результат обработки числовых данных. Он представляет собой условные изображения величин и их соотношений через геометрические фигуры, точки и линии.

Количество иллюстраций в работе должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста.

Иллюстрации обозначаются словом «Рис.» и располагаются после первой ссылки на них в тексте так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота

работы или с поворотом по часовой стрелке. Иллюстрации должны иметь номер и наименование, расположенные по центру, под ней. Иллюстрации нумеруются в пределах главы арабскими цифрами, например: «Рис. 1.1» (первый рисунок первой главы). Ссылки на иллюстрации в тексте реферата приводят с указанием их порядкового номера, например: «…на рис. 1.1».

При необходимости иллюстрации снабжаются поясняющими данными (подрисуночный текст).

Приложения

Приложение – это часть основного текста, которая имеет дополнительное (обычно справочное) значение, но, тем не менее, необходима для более полного освещения темы. По форме они могут представлять собой текст, таблицы, графики, карты. В приложении помещают вспомогательные материалы по рассматриваемой теме: инструкции, методики, положения, результаты промежуточных расчетов, типовые проекты, имеющие значительный объем, затрудняющий чтение и целостное восприятие текста. В этом случае в тексте приводятся основные выводы (результаты) и делается ссылка на приложение, содержащее соответствующую информацию. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы. В правом верхнем углу листа пишут слово «Приложение» и указывают номер приложения. Если в реферате больше одного приложения, их нумеруют последовательно арабскими цифрами, например: «Приложение 1», «Приложение 2» и т. д.

Каждое приложение должно иметь заголовок, который помещают ниже слова «Приложение» над текстом приложения, по центру.

При ссылке на приложение в тексте реферата пишут сокращенно строчными буквами «прил.» и указывают номер приложения, например: «…в прил. 1».

Приложения оформляются как продолжение текстовой части реферата со сквозной нумерацией листов. Число страниц в приложении не лимитируется и не включается в общий объем страниц реферата.

Библиографический список

Библиографический список должен содержать перечень и описание только тех источников, которые были использованы при написании реферата.

В библиографическом списке должны быть представлены монографические издания отечественных и зарубежных авторов, материалы профессиональной периодической печати (экономических журналов, газет и еженедельников), законодательные и др. нормативно-правовые акты. При составлении списка необходимо обратить внимание на достижение оптимального соотношения между монографическими изданиями, характеризующими глубину теоретической подготовки автора, и периодикой, демонстрирующей владение современными экономическими данными.

Наиболее распространенным способом расположения наименований литературных источников является алфавитный. Работы одного автора перечисляются в алфавитном порядке их названий. Исследования на

иностранных языках помещаются в порядке латинского алфавита после исследований на русском языке.

Ниже приводятся примеры библиографических описаний использованных источников.

Статья одного, двух или трех авторов из журнала

Зотова Л. А., Еременко О. В. Инновации как объект государственного регулирования // Экономист. 2010. № 7. С. 17–19.

Статья из журнала, написанная более чем тремя авторами

Валютный курс и экономический рост / С. Ф. Алексашенко, А. А. Клепач, О. Ю. Осипова [и др.] // Вопросы экономики. 2010. № 8. С. 18–22.

Книга, написанная одним, двумя или тремя авторами

Иохин В. Я. Экономическая теория: учебник. М.: Юристъ, 2009. 178 с.

Книга, написанная более чем тремя авторами

Экономическая теория: учебник / В. Д. Камаев [и др.]. М.: ВЛАДОС, 2011. 143 с.

Сборники

Актуальные проблемы экономики и управления: сборник научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. 146 с.

Статья из сборника

Данилов А. Г. Система ценообразования промышленного предприятия // Актуальные проблемы экономики и управления: сб. научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. С. 107–113.

Статья из газеты

Крашаков А. С. Будет ли обвал рубля // Аргументы и факты. 2011. № 9. С. 3.

Библиографические ссылки

Библиографические ссылки требуется приводить при цитировании, заимствовании материалов из других источников, упоминании или анализе работ того или иного автора, а также при необходимости адресовать читателя к трудам, в которых рассматривался данный вопрос.

Ссылки должны быть затекстовыми, с указанием номера соответствующего источника (на который автор ссылается в работе) в соответствии с библиографическим списком и соответствующей страницы.

Пример оформления затекстовой ссылки

Ссылка в тексте: «При оценке стоимости земли необходимо учесть все возможности ее производственного использования» [17, С. 191].

В списке использованных источников:

17. *Борисов Е. Ф.* Основы экономики. М.: Юристъ, 2008. 308 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ РЕФЕРАТА

Необходимо заранее подготовить тезисы выступления (план-конспект).

Порядок защиты реферата.

1. Краткое сообщение, характеризующее цель и задачи работы, ее актуальность, полученные результаты, вывод и предложения.
2. Ответы магистранта на вопросы преподавателя.
3. Отзыв руководителя-консультанта о ходе выполнения работы.

Советы магистранту:

- Готовясь к защите реферата, вы должны вспомнить материал максимально подробно, и это должно найти отражение в схеме вашего ответа. Но тут же необходимо выделить главное, что наиболее важно для понимания материала в целом, иначе вы сможете проговорить все 15-20 минут и не раскрыть существа вопроса. Особенно строго следует отбирать примеры и иллюстрации.
- Вступление должно быть очень кратким – 1-2 фразы (если вы хотите подчеркнуть при этом важность и сложность данного вопроса, то не говорите, что он сложен и важен, а покажите его сложность и важность).
- Целесообразнее вначале показать свою схему раскрытия вопроса, а уж потом ее детализировать.
- Рассказывать будет легче, если вы представите себе, что объясняете материал очень способному и хорошо подготовленному человеку, который не знает именно этого раздела, и что при этом вам обязательно нужно доказать важность данного раздела и заинтересовать в его освоении.
- Строго следите за точностью своих выражений и правильностью употребления терминов.
- Не пытайтесь рассказать побольше за счет ускорения темпа, но и не мямлите.
- Не демонстрируйте излишнего волнения и не напрашивайтесь на сочувствие.
- Будьте особенно внимательны ко всем вопросам преподавателя, к малейшим его замечаниям. И уж ни в коем случае его не перебивайте!
- Не бойтесь дополнительных вопросов – чаще всего преподаватель использует их как один из способов помочь вам или сэкономить время. Если вас прервали, а при оценке ставят в вину пропуск важной части материала, не возмущайтесь, а покажите план своего ответа, где эта часть стоит несколько позже того, на чем вы были прерваны.
- Прежде чем отвечать на дополнительный вопрос, необходимо сначала правильно его понять. Для этого нужно хотя бы немного подумать, иногда переспросить, уточнить: правильно ли вы поняли поставленный вопрос. И при ответе следует соблюдать тот же принцип экономности мышления, а не высказывать без разбора все, что вы можете сказать.
- Будьте доброжелательны и тактичны, даже если к ответу вы не готовы (это вина не преподавателя, а ваша).

ТЕМЫ РЕФЕРАТА

1. Общение как социально-психологическая категория.
2. Коммуникативная культура в деловом общении.
3. Условия общения и причины коммуникативных неудач.
4. Роль невербальных компонентов в речевом общении.
5. Речевой этикет, его основные функции и правила.
6. Причины отступлений от норм в речи, типы речевых ошибок, пути их устранения и предупреждения.
7. Деловая беседа (цели, задачи, виды, структура).
8. Особенности телефонного разговора.
9. Новые тенденции в практике русского делового письма.
10. Культура дискутивно-полемической речи. Виды споров, приемы и уловки в споре
11. Основные правила эффективного общения.
12. Личность как субъект общения. Коммуникативная компетентность личности.
13. Конфликтное поведение и причины его возникновения в деструктивном взаимодействии.
14. Деловое общение и управление им.
15. Отношения сотрудничества и конфликта в представлениях российских работников.
16. Реформы в России и проблемы общения молодого поколения и работодателей.
17. Культура речи в деловом общении.
18. Содержание закона конгруэнтности и его роль в деловом общении.
19. Этика использования средств выразительности деловой речи.
20. Особенности речевого поведения.
21. Культура устной и письменной речи делового человека в современной России.
22. Вербальные конфликтогены в практике современного российского общества.
23. Этические нормы телефонного разговора.
24. Основные тенденции развития Российской деловой культуры.
25. Характеристика манипуляций в общении.
26. Приемы, стимулирующие общение и создание доверительных отношений.
27. Правила подготовки публичного выступления.
28. Правила подготовки и проведения деловой беседы.
29. Типология конфликтных личностей и способы общения с ними.
30. Этикет и имидж делового человека.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете*(в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры управления персоналом
(протокол № 1 от 08.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Е. А. Беляева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

ФТД.В.03 ОСНОВЫ СОЦИАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ И ПРАВОВЫХ ЗНАНИЙ

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Методические рекомендации по решению практико-ориентированных заданий	5
2	Методические указания по подготовке к опросу	9
3	Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям	11
4	Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям	13
5	Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов	14
	Заключение	17
	Список использованных источников	18

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов может рассматриваться как организационная форма обучения - система педагогических условий, обеспечивающих управление учебной деятельностью студентов по освоению знаний и умений в области учебной и научной деятельности без посторонней помощи.

Самостоятельная работа студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитияисследовательских умений;
- получения навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

Подразумевается несколько категорий видов самостоятельной работы студентов, значительная часть которых нашла отражения в данных методических рекомендациях:

- работа с источниками литературы и официальными документами (*использование библиотечно-информационной системы*);
- выполнение заданий для самостоятельной работы в рамках учебных дисциплин (*рефераты, эссе, домашние задания, решения практико-ориентированных заданий*);

- реализация элементов научно-педагогической практики (*разработка методических материалов, тестов, тематических портфолио*);
- реализация элементов научно-исследовательской практики (*подготовка текстов докладов, участие в исследованиях*).

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентовonline и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

1. Методические рекомендации по решению практико-ориентированных заданий

Практико-ориентированные задания - метод анализа ситуаций. Суть его заключается в том, что студентам предлагают осмыслить реальную жизненную ситуацию, описание которой одновременно отражает не только какую-либо практическую проблему, но и актуализирует определенный комплекс знаний, который необходимо усвоить при разрешении данной проблемы. При этом сама проблема не имеет однозначных решений.

Использование метода практико-ориентированного задания как образовательной технологии профессионально-ориентированного обучения представляет собой сложный процесс, плохо поддающийся алгоритмизации [1] . Формально можновыделить следующиеэтапы:

- ознакомление студентовс текстом;
- анализ практико-ориентированного задания;
- организация обсуждения практико-ориентированного задания, дискуссии, презентации;
- оценивание участников дискуссии;
- подведение итогов дискуссии.

Ознакомление студентов с текстом практико-ориентированного задания и последующий анализ практико-ориентированного задания чаще всего осуществляются за несколько дней до его обсуждения и реализуются как самостоятельная работа студентов; при этом время, отводимое на подготовку, определяется видом практико-ориентированного задания, его объемом и сложностью.

Общая схема работы с практико-ориентированное заданием на данном этапе может быть представлена следующим образом: в первую очередь следует выявить ключевые проблемы практико-ориентированного задания и понять, какие именно из представленных данных важны для решения; войти в ситуационный контекст практико-ориентированного задания, определить, кто его главные действующие лица, отобрать факты и понятия, необходимые для анализа, понять, какие трудности могут возникнуть при решении задачи; следующим этапом является выбор метода исследования.

Знакомство с небольшими практико-ориентированного заданиями и их обсуждение может быть организовано непосредственно на занятиях. Принципиально важным в этом случае является то, чтобы часть теоретического курса, на которой базируется практико-ориентированное задание, была бы прочитана и проработана студентами.

Максимальная польза из работы над практико-ориентированного заданиями будет извлечена в том случае, если аспиранты при предварительном знакомстве с ними будут придерживаться систематического подхода к их анализу, основные шаги которого представлены ниже:

1. Выпишите из соответствующих разделов учебной дисциплины ключевые идеи, для того, чтобы освежить в памяти теоретические концепции и подходы, которые Вам предстоит использовать при анализе практико-ориентированного задания.
2. Бегло прочтите практико-ориентированное задание, чтобы составить о нем общее представление.
3. Внимательно прочтите вопросы к практико-ориентированное задание и убедитесь в том, что Вы хорошо поняли, что Вас просят сделать.
4. Вновь прочтите текст практико-ориентированного задания, внимательно фиксируя все факторы или проблемы, имеющие отношение к поставленным вопросам.
5. Прикиньте, какие идеи и концепции соотносятся с проблемами, которые Вам предлагается рассмотреть при работе с практико-ориентированное заданием.

---

[1] Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально -ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

Организация обсуждения практико-ориентированного задания предполагает формулирование перед студентами вопросов, включение их в дискуссию. Вопросы обычно подготавливают заранее и предлагают студентам вместе с текстом практико-ориентированного задания. При разборе учебной ситуации преподаватель может занимать активную или пассивную позицию, иногда он «дирижирует» разбором, а иногда ограничивается подведением итогов дискуссии.

Организация обсуждения практико-ориентированных заданий обычно основывается на двух методах. Первый из них носит название традиционного Гарвардского метода - открытая дискуссия. Альтернативным методом является метод, связанный с индивидуальным или групповым опросом, в ходе которого аспиранты делают формальную устную оценку ситуации и предлагают анализ представленного практико-ориентированного задания, свои решения и рекомендации, т.е. делают презентацию. Этот метод позволяет некоторым студентам минимизировать их учебные усилия, поскольку каждый аспирант опрашивается один- два раза за занятие. Метод развивает у студентов коммуникативные навыки, учит их четко выражать свои мысли. Однако, этот метод менее динамичен, чем Гарвардский метод. В открытой дискуссии организация и контроль участников более сложен.

Дискуссия занимает центральное место в методе. Ее целесообразно использовать в том случае, когда аспиранты обладают значительной степенью зрелости и самостоятельности мышления, умеют аргументировать, доказывать и обосновывать свою точку зрения. Важнейшей характеристикой дискуссии является уровень ее компетентности, который складывается из компетентности ее участников. Неподготовленность студентов к дискуссии делает ее формальной, превращает в процесс вытаскивания ими информации у преподавателя, а не самостоятельное ее добывание.

Особое место в организации дискуссии при обсуждении и анализе практико-ориентированного задания принадлежит использованию метода генерации идей, получившего название «мозговой атаки» или «мозгового штурма».

Метод «мозговой атаки» или «мозгового штурма» был предложен в 30-х годах прошлого столетия А. Осборном как групповой метод решения проблем. К концу XX столетия этот метод приобрел особую популярность в практике управления и обучения не только как самостоятельный метод, но и как использование в процессе деятельности с целью усиления ее продуктивности. В процессе обучения «мозговая атака» выступает в качестве важнейшего средства развития творческой активности студентов. «Мозговая атака» включает в себя три фазы.

Первая фаза представляет собой вхождение в психологическую раскованность, отказ от стереотипности, страха показаться смешным и неудачником; достигается созданием благоприятной психологической обстановки и взаимного доверия, когда идеи теряют авторство, становятся общими. Основная задача этой фазы - успокоиться и расковаться.

Вторая фаза - это собственно атака; задача этой фазы - породить поток, лавину идей. «Мозговая атака» в этой фазе осуществляется по следующим принципам:

- есть идея, - говорю, нет идеи, - не молчу;
- поощряется самое необузданное ассоциирование, чем более дикой покажется идея, тем лучше;
- количество предложенных идей должно быть как можно большим;
- высказанные идеи разрешается заимствовать и как угодно комбинировать, а также видоизменять и улучшать;
- исключается критика, можно высказывать любые мысли без боязни, что их признают плохими, критикующих лишают слова;
- не имеют никакого значения социальные статусы участников; это абсолютная демократия и одновременно авторитаризм сумасшедшей идеи;
- все идеи записываются в протокольный список идей;

• время высказываний - не более 1-2 минут.

Третья фаза представляет собой творческий анализ идей с целью поиска конструктивного решения проблемы по следующим правилам:

- анализировать все идеи без дискриминации какой-либо из них;
- найти место идее в системе и найти систему под идею;
- не умножать сущностей без надобности;
- не должна нарушаться красота и изящество полученного результата;
- должно быть принципиально новое видение;
- ищи «жемчужину в навозе».

В методе мозговая атака применяется при возникновении у группы реальных затруднений в осмыслении ситуации, является средством повышения активности студентов. В этом смысле мозговая атака представляется не как инструмент поиска новых решений, хотя и такая ее роль не исключена, а как своеобразное «подталкивание» к познавательной активности.

Презентация, или представление результатов анализа практико-ориентированного задания, выступает очень важным аспектом метода ***case-study***. Умение публично представить интеллектуальный продукт, хорошо его рекламировать, показать его достоинства и возможные направления эффективного использования, а также выстоять под шквалом критики, является очень ценным интегральным качеством современного специалиста. Презентация оттачивает многие глубинные качества личности: волю, убежденность, целенаправленность, достоинство и т.п.; она вырабатывает навыки публичного общения, формирования своего собственного имиджа.

Публичная (устная) презентация предполагает представление решений практико-ориентированного задания группе, она максимально вырабатывает навыки публичной деятельности и участия в дискуссии. Устная презентация обладает свойством кратковременного воздействия на студентов и, поэтому, трудна для восприятия и запоминания. Степень подготовленности выступающего проявляется в спровоцированной им дискуссии: для этого необязательно делать все заявления очевидными и неопровержимыми. Такая подача материала при анализе практико-ориентированного задания может послужить началом дискуссии. При устной презентации необходимо учитывать эмоциональный настрой выступающего: отношение и эмоции говорящего вносят существенный вклад в сообщение. Одним из преимуществ публичной (устной) презентации является ее гибкость. Оратор может откликаться на изменения окружающей обстановки, адаптировать свой стиль и материал, чувствуя настроение аудитории.

Непубличная презентация менее эффектна, но обучающая роль ее весьма велика. Чаще всего непубличная презентация выступает в виде подготовки отчета по выполнению задания, при этом стимулируются такие качества, как умение подготовить текст, точно и аккуратно составить отчет, не допустить ошибки в расчетах и т.д. Подготовка письменного анализа практико-ориентированного задания аналогична подготовке устного, с той разницей, что письменные отчеты-презентации обычно более структурированы и детализированы. Основное правило письменного анализа практико-ориентированного задания заключается в том, чтобы избегать простого повторения информации из текста, информация должна быть представлена в переработанном виде. Самым важным при этом является собственный анализ представленного материала, его соответствующая интерпретация и сделанные предложения. Письменный отчет - презентация может сдаваться по истечении некоторого времени после устной презентации, что позволяет студентам более тщательно проанализировать всю информацию, полученную в ходе дискуссии.

Как письменная, так и устная презентация результатов анализа практико-ориентированного задания может быть групповая и индивидуальная. Отчет может быть индивидуальным или групповым в зависимости от сложности и объема задания. Индивидуальная презентация формирует ответственность, собранность, волю;

групповая - аналитические способности, умение обобщать материал, системно видеть проект.

Оценивание участников дискуссии является важнейшей проблемой обучения посредством метода практико-ориентированного задания. При этом выделяются следующие требования к оцениванию:

- объективность - создание условий, в которых бы максимально точно выявлялись знания обучаемых, предъявление к ним единых требований, справедливое отношение к каждому;
- обоснованность оценок - их аргументация;
- систематичность - важнейший психологический фактор, организующий и дисциплинирующий студентов, формирующий настойчивость и устремленность в достижении цели;
- всесторонность и оптимальность.

Оценивание участников дискуссии предполагает оценивание не столько набора определенных знаний, сколько умения студентов анализировать конкретную ситуацию, принимать решение, логически мыслить.

Следует отметить, что оценивается содержательная активность студента в дискуссии или публичной (устной) презентации, которая включает в себя следующие составляющие:

- выступление, которое характеризует попытку серьезного предварительного
- анализа (правильность предложений, подготовленность,
- аргументированность и т.д.);
- обращение внимания на определенный круг вопросов, которые требуют углубленного обсуждения;
- владение категориальным аппаратом, стремление давать определения, выявлять содержание понятий;
- демонстрация умения логически мыслить, если точки зрения, высказанные раньше, подытоживаются и приводят к логическим выводам;
- предложение альтернатив, которые раньше оставались без внимания;
- предложение определенного плана действий или плана воплощения решения;
- определение существенных элементов, которые должны учитываться при анализе практико-ориентированного задания;
- заметное участие в обработке количественных данных, проведении расчетов;
- подведение итогов обсуждения.

При оценивании анализа практико-ориентированного задания, данного студентами при непубличной (письменной) презентации учитывается:

- формулировка и анализ большинства проблем, имеющихся в практико-ориентированное задание;
- формулировка собственных выводов на основании информации о практико-ориентированное задание, которые отличаются от выводов других студентов;
- демонстрация адекватных аналитических методов для обработки информации;
- соответствие приведенных в итоге анализа аргументов ранее выявленным проблемам, сделанным выводам, оценкам и использованным аналитическим методам.

2. Методические указанияпо подготовке к опросу

Самостоятельная работа обучающихся включает подготовку к устному или письменному опросу на семинарских занятиях. Для этого обучающийся изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

Письменный опрос

В соответствии с технологической картой письменный опрос является одной из форм текущего контроля успеваемости студента по данной дисциплине. При подготовке к письменному опросу студент должен внимательно изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

При изучении материала студент должен убедиться, что хорошо понимает основную терминологию темы, умеет ее использовать в нужном контексте. Желательно составить краткий конспект ответа на предполагаемые вопросы письменной работы, чтобы убедиться в том, что студент владеет материалом и может аргументировано, логично и грамотно письменно изложить ответ на вопрос. Следует обратить особое внимание на написание профессиональных терминов, чтобы избегать грамматических ошибок в работе. При изучении новой для студента терминологии рекомендуется изготовить карточки, которые содержат новый термин и его расшифровку, что значительно облегчит работу над материалом.

Устный опрос

Целью устного собеседования являются обобщение и закрепление изученного курса. Студентам предлагаются дляосвещения сквозные концептуальные проблемы. При подготовке следует использовать лекционный материал и учебную литературу. Для более глубокого постижения курса и более основательной подготовки рекомендуется познакомиться с указанной дополнительной литературой. Готовясь к семинару, студент должен, прежде всего, ознакомиться с общим планом семинарского занятия. Следует внимательно прочесть свой конспект лекции по изучаемой теме и рекомендуемую к теме семинара литературу. С незнакомыми терминами и понятиями следует ознакомиться в предлагаемом глоссарии, словаре или энциклопедии[2].

Критерии качества устного ответа.

1. Правильность ответа по содержанию.
2. Полнота и глубинаответа.
3. Сознательность ответа(учитывается понимание излагаемого материала).
4. Логика изложенияматериала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться профессиональной терминологией).
5. Рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели).
6. Своевременностьи эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе).
7. Использованиедополнительного материала (приветствуется, но не обязательно для всех студентов).

[2]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

8. Рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов)[3].

Ответ на каждый вопрос из плана семинарского занятия должен быть содержательным и аргументированным. Для этого следует использовать документы, монографическую, учебную и справочную литературу.

Для успешной подготовки к устному опросу, студент должен законспектировать рекомендуемую литературу, внимательно осмыслить лекционный материал и сделать выводы. В среднем, подготовка к устному опросу по одному семинарскому занятию занимает от 2 до 4 часов в зависимости от сложности темы и особенностей организации обучающимся своей самостоятельной работы.

3.Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям

На практических занятиях необходимо стремиться к самостоятельному решению задач, находя для этого более эффективные методы. При этом студентам надо приучить себя доводить решения задач до конечного «идеального» ответа. Это очень важно для

[3]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: http://priab.ru/images/metod_agro/Metod_Inostran_yazyk_35.03.04_Agro_15.01.2016.pdf

будущих специалистов. Практические занятия вырабатывают навыки самостоятельной творческой работы, развивают мыслительные способности.

Практическое занятие – активная форма учебного процесса, дополняющая теоретический курс или лекционную часть учебной дисциплины и призванная помощь обучающимся освоиться в «пространстве» (тематике) дисциплины, самостоятельно прооперировать теоретическими знаниями на конкретном учебном материале.

Продолжительность одного практического занятия – от 2 до 4 академических часов. Общая доля практических занятий в учебном времени на дисциплину – от 10 до 20 процентов (при условии, что все активные формы займут в учебном времени на дисциплину от 40 до 60 процентов).

Для практического занятия в качестве темы выбирается обычно такая учебная задача, которая предполагает не существенные эвристические и аналитические напряжения и продвижения, а потребность обучающегося «потрогать» материал, опознать в конкретном то общее, о чем говорилось в лекции. Например, при рассмотрении вопросов оплаты труда, мотивации труда и проблем безработицы в России имеет смысл провести практические занятия со следующими сюжетами заданий: «Расчет заработной платы работников предприятия». «Разработка механизма мотивации труда на предприятии N». «В чем причины и особенности безработицы в России?». Последняя тема предполагает уже некоторую аналитическую составляющую. Основная задача первой из этих тем - самим посчитать заработную плату для различных групп работников на примере заданных параметров для конкретного предприятия, т. е. сделать расчеты «как на практике»; второй – дать собственный вариант мотивационной политики для предприятия, учитывая особенности данного объекта, отрасли и т.д.; третьей – опираясь на теоретические знания в области проблем занятости и безработицы, а также статистические материалы, сделать авторские выводы о видах безработицы, характерных для России, и их причинах, а также предложить меры по минимизации безработицы.

Перед проведением занятия должен быть подготовлен специальный материал – тот объект, которым обучающиеся станут оперировать, активизируя свои теоретические (общие) знания и тем самым, приобретая навыки выработки уверенных суждений и осуществления конкретных действий.

Дополнительный материал для практического занятия лучше получить у преподавателя заранее, чтобы у студентов была возможность просмотреть его и подготовить вопросы.

Условия должны быть такими, чтобы каждый мог работать самостоятельно от начала до конца. В аудитории должны быть «под рукой» необходимые справочники и тексты законов и нормативных актов по тематике занятия. Чтобы сделать практическое занятие максимально эффективным, надо заранее подготовить и изучить материал по наиболее интересным и практически важным темам.

Особенности практического занятия с использованием компьютера

Для того чтобы повысить эффективность проведения практического занятия, может использоваться компьютер по следующим направлениям:

- поиск информации в Интернете по поставленной проблеме: в этом случае преподаватель представляет обучающимся перечень рекомендуемых для посещения Интернет-сайтов;
- использование прикладных обучающих программ;
- выполнение заданий с использованием обучающимися заранее установленных преподавателем программ;
- использование программного обеспечения при проведении занятий, связанных с моделированием социально-экономических процессов.

4.Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям

Семинар представляет собой комплексную форму и завершающее звено в изучении определенных тем, предусмотренных программой учебной дисциплины. Комплексность данной формы занятий определяется тем, что в ходе её проведения сочетаются выступления обучающихся и преподавателя: рассмотрение обсуждаемой проблемы и анализ различных, часто дискуссионных позиций; обсуждение мнений обучающихся и разъяснение (консультация) преподавателя; углубленное изучение теории и приобретение навыков умения ее использовать в практической работе.

По своему назначению семинар, в процессе которого обсуждается та или иная научная проблема, способствует:

- углубленному изучению определенного раздела учебной дисциплины, закреплению знаний;
- отработке методологии и методических приемов познания;
- выработке аналитических способностей, умения обобщения и формулирования выводов;
- приобретению навыков использования научных знаний в практической деятельности;
- выработке умения кратко, аргументированно и ясно излагать обсуждаемые вопросы;
- осуществлению контроля преподавателя за ходом обучения.

Семинары представляет собой дискуссию в пределах обсуждаемой темы (проблемы). Дискуссия помогает участникам семинара приобрести более совершенные знания, проникнуть в суть изучаемых проблем. Выработать методологию, овладеть методами анализа социально-экономических процессов. Обсуждение должно носить творческий характер с четкой и убедительной аргументацией.

По своей структуре семинар начинается со вступительного слова преподавателя, в котором кратко излагаются место и значение обсуждаемой темы (проблемы) в данной дисциплине, напоминаются порядок и направления ее обсуждения. Конкретизируется ранее известный обучающимся план проведения занятия. После этого начинается процесс обсуждения вопросов обучающимися. Завершается занятие заключительным словом преподавателя.

Проведение семинарских занятий в рамках учебной группы (20 - 25 человек) позволяет обеспечить активное участие в обсуждении проблемы всех присутствующих.

По ходу обсуждения темы помните, что изучение теории должно быть связано с определением (выработкой) средств, путей применения теоретических положений в практической деятельности, например, при выполнении функций государственного служащего. В то же время важно не свести обсуждение научной проблемы только к пересказу случаев из практики работы, к критике имеющих место недостатков. Дискуссии имеют важное значение: учат дисциплине ума, умению выступать по существу, мыслить логически, выделяя главное, критически оценивать выступления участников семинара.

В процессе проведения семинара обучающиеся могут использовать разнообразные по своей форме и характеру пособия (от доски смелом до самых современных технических средств), демонстрируя фактический, в том числе статистический материал, убедительно подтверждающий теоретические выводы и положения. В завершение обсудите результаты работы семинара и сделайте выводы, что хорошо усвоено, а над чем следует дополнительно поработать.

В целях эффективности семинарских занятий необходима обстоятельная подготовка к их проведению. В начале семестра (учебного года) возьмите в библиотеке необходимые методические материалы для своевременной подготовки к семинарам. Во время лекций, связанных с темой семинарского занятия, следует обращать внимание на то, что необходимо дополнительно изучить при подготовке к семинару (новые официальные документы, статьи в периодических журналах, вновь вышедшие монографии и т.д.).

5.Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов

Экзамен - одна из важнейших частей учебного процесса, имеющая огромное значение.

Во-первых, готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, семинарах, практических и лабораторных занятиях, разбирается в том, что осталось непонятным, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью. А это чрезвычайно важно для будущего специалиста.

Во-вторых, каждый хочет быть волевым и сообразительным., выдержанным и целеустремленным, иметь хорошую память, научиться быстро находить наиболее рациональное решение в трудных ситуациях. Очевидно, что все эти качества не только украшают человека, но и делают его наиболее действенным членом коллектива. Подготовка и сдача экзамена помогают студенту глубже усвоить изучаемые дисциплины, приобрести навыки и качества, необходимые хорошему специалисту.

Конечно, успех на экзамене во многом обусловлен тем, насколько систематически и глубоко работал студент в течение семестра. Совершенно очевидно, что серьезно продумать и усвоить содержание изучаемых дисциплин за несколько дней подготовки к экзамену просто невозможно даже для очень способного студента. И, кроме того, хорошо известно, что быстро выученные на память разделы учебной дисциплины так же быстро забываются после сдачи экзамена.

При подготовке к экзамену студенты не только повторяют и дорабатывают материал дисциплины, которую они изучали в течение семестра, они обобщают полученные знания, осмысливают методологию предмета, его систему, выделяют в нем основное и главное, воспроизводят общую картину с тем, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины. Вся эта обобщающая работа проходит в условиях напряжения воли и сознания, при значительном отвлечении от повседневной жизни, т. е. в условиях, благоприятствующих пониманию и запоминанию.

Подготовка к экзаменам состоит в приведении в порядок своих знаний. Даже самые способные студенты не в состоянии в короткий период зачетно-экзаменационной сессии усвоить материал целого семестра, если они над ним не работали в свое время. Для тех, кто мало занимался в семестре, экзамены принесут мало пользы: что быстро пройдено, то быстро и забудется. И хотя в некоторых случаях студент может «проскочить» через экзаменационный барьер, в его подготовке останется серьезный пробел, трудно восполняемый впоследствии.

Определив назначение и роль экзаменов в процессе обучения, попытаемся на этой основе пояснить, как лучше готовиться к ним.

Экзаменам, как правило, предшествует защита курсовых работ (проектов) и сдача зачетов. К экзаменам допускаются только студенты, защитившие все курсовые работы проекты) и сдавшие все зачеты. В вузе сдача зачетов организована так, что при систематической работе в течение семестра, своевременной и успешной сдаче всех текущих работ, предусмотренных графиком учебного процесса, большая часть зачетов не вызывает повышенной трудности у студента. Студенты, работавшие в семестре по плану, подходят к экзаменационной сессии без напряжения, без излишней затраты сил в последнюю, «зачетную» неделю.

Подготовку к экзамену следует начинать с первого дня изучения дисциплины. Как правило, на лекциях подчеркиваются наиболее важные и трудные вопросы или разделы дисциплины, требующие внимательного изучения и обдумывания. Нужно эти вопросы выделить и обязательно постараться разобраться в них, не дожидаясь экзамена, проработать их, готовясь к семинарам, практическим или лабораторным занятиям, попробовать самостоятельно решить несколько типовых задач. И если, несмотря на это, часть материала осталась неусвоенной, ни в коем случае нельзя успокаиваться, надеясь на

то, что это не попадется на экзамене. Факты говорят об обратном; если те или другие вопросы учебной дисциплины не вошли в экзаменационный билет, преподаватель может их задать (и часто задает) в виде дополнительных вопросов.

Точно такое же отношение должно быть выработано к вопросам и задачам, перечисленным в программе учебной дисциплины, выдаваемой студентам в начале семестра. Обычно эти же вопросы и аналогичные задачи содержатся в экзаменационных билетах. Не следует оставлять без внимания ни одного раздела дисциплины: если не удалось в чем-то разобраться самому, нужно обратиться к товарищам; если и это не помогло выяснить какой-либо вопрос до конца, нужно обязательно задать этот вопрос преподавателю на предэкзаменационной консультации. Чрезвычайно важно приучить себя к умению самостоятельно мыслить, учиться думать, понимать суть дела. Очень полезно после проработки каждого раздела восстановить в памяти содержание изученного материала. кратко записав это на листе бумаги. создать карту памяти (умственную карту), изобразить необходимые схемы и чертежи (логико-графические схемы), например, отобразить последовательность вывода теоремы или формулы. Если этого не сделать, то большая часть материала останется не понятой, а лишь формально заученной, и при первом же вопросе экзаменатора студент убедится в том, насколько поверхностно он усвоил материал.

В период экзаменационной сессии происходит резкое изменение режима работы, отсутствует посещение занятий по расписанию. При всяком изменении режима работы очень важно скорее приспособиться к новым условиям. Поэтому нужно сразу выбрать такой режим работы, который сохранился бы в течение всей сессии, т. е. почти на месяц. Необходимо составить для себя новый распорядок дня, чередуя занятия с отдыхом. Для того чтобы сократить потерю времени на включение в работу, рабочие периоды целесообразно делать длительными, разделив день примерно на три части: с утра до обеда, с обеда до ужина и от ужина до сна.

Каждый рабочий период дня надо заканчивать отдыхом. Наилучший отдых в период экзаменационной сессии - прогулка, кратковременная пробежка или какой-либо неутомительный физический труд.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программа учебной дисциплины и студенческий конспект, которые указывают, что наиболее важно знать и уметь делать. Основной материал должен прорабатываться по учебнику (если такой имеется) и учебным пособиям, так как конспекта далеко недостаточно для изучения дисциплины, Учебник должен быть изучен в течение семестра, а перед экзаменом сосредоточьте внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением по памяти его краткого содержания в логической последовательности.

За один - два дня до экзамена назначается консультация. Если ее правильно использовать, она принесет большую пользу. Во время консультации студент имеет полную возможность получить ответ на нее ни ясные ему вопросы. А для этого он должен проработать до консультации все темы дисциплины. Кроме того, преподаватель будет отвечать на вопросы других студентов, что будет для вас повторением и закреплением знаний. И еще очень важное обстоятельство: преподаватель на консультации, как правило, обращает внимание на те вопросы, по которым на предыдущих экзаменах ответы были неудовлетворительными, а также фиксирует внимание на наиболее трудных темах дисциплины. Некоторые студенты не приходят на консультации либо потому, что считают, что у них нет вопросов к преподавателю, либо полагают, что у них и так мало времени и лучше самому прочитать материал в конспекте или и учебнике. Это глубокое заблуждение. Никакая другая работа не сможет принести столь значительного эффекта накануне экзамена, как консультация преподавателя.

Но консультация не может возместить отсутствия длительной работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На консультации студент получает ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы и, следовательно, дорабатывается материал. Консультации рекомендуется посещать,

подготовив к ним все вопросы, вызывающие сомнения. Если студент придет на консультацию, не проработав всего материала, польза от такой консультации будет невелика.

Очень важным условием для правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальным сон. Подготовка к экзамену не должна идти в ущерб сну, иначе в день экзамена не будет чувства свежести и бодрости, необходимых для хороших ответов. Вечер накануне экзамена рекомендуем закончить небольшой прогулкой.

Итак, *основные советы* для подготовки к сдаче зачетов и экзаменов состоят в следующем:

- лучшая подготовка к зачетам и экзаменам - равномерная работа в течение всего семестра;
- используйте программы учебных дисциплин - это организует вашу подготовку к зачетам и экзаменам;
- учитывайте, что для полноценного изучения учебной дисциплины необходимо время;
- составляйте планы работы во времени;
- работайте равномерно и ритмично;
- курсовые работы (проекты) желательно защищать за одну - две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии;
- все зачеты необходимо сдавать до начала экзаменационной сессии;
- помните, что конспект не заменяет учебник и учебные пособия, а помогает выбрать из него основные вопросы и ответы;
- при подготовке наибольшее внимание и время уделяйте трудным и непонятным вопросам учебной дисциплины;
- грамотно используйте консультации;
- соблюдайте правильный режим труда и отдыха во время сессии, это сохранит работоспособность и даст хорошие результаты;
- учитесь владеть собой на зачете и экзамене;
- учитесь точно и кратко передавать свои мысли, поясняя их, если нужно, логико-графическими схемами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания по выполнению самостоятельной работы обучающихся являются неотъемлемой частью процесса обучения в вузе. Правильнаяорганизация самостоятельной работы позволяет обучающимся развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, способствует формированию навыков совершенствования профессионального мастерства. Также внеаудиторное время включает в себя подготовку к аудиторным занятиям и изучение отдельных тем, расширяющих и углубляющих представления обучающихся по разделам изучаемой дисциплины.

Таким образом, обучающийся используя методические указания может в достаточном объеме усвоить и успешно реализовать конкретные знания, умения, навыки и получить опыт при выполнении следующих условий:

1) систематическаясамостоятельная работа по закреплению полученных знаний и навыков;

2) добросовестноевыполнение заданий;

3) выяснениеи уточнение отдельных предпосылок, умозаключений и выводов, содержащихся в учебном курсе;

4) сопоставление точек зрения различных авторов по затрагиваемым в учебном курсе проблемам; выявление неточностей и некорректного изложения материала в периодической и специальной литературе;

5) периодическое ознакомление с последними теоретическими и практическими достижениями в области управления персоналом;

6) проведение собственных научных и практических исследований по одной или нескольким актуальным проблемам для *HR*;

7) подготовка научных статей для опубликования в периодической печати, выступление на научно-практических конференциях, участие в работе студенческих научных обществ, круглых столах и диспутах по проблемам управления персоналом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брандес М. П. Немецкий язык. Переводческое реферирование: практикум. М.: КДУ, 2008. – 368с.

2. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально -ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

3. Методические рекомендации по написанию реферата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hse.spb.ru/edu/recommendations/method-referat-2005.phtml

4. Фролова Н. А. Реферирование и аннотирование текстов по специальности: Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. - С.5.

5. Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа:http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДЕНЫ
На заседании кафедры геологии и защиты
в чрезвычайных ситуациях
(протокол № 1 от 11.09.2025)
Заведующий кафедрой
_____ Л. А. Стороженко

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.В.04 ОСНОВЫ ВОЕННОЙ ПОДГОТОВКИ

Специальность
21.05.04 Горное дело

Специализация
Мехатроника и робототехника промышленных комплексов

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……3

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ……....5

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ ……..…5

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОПРОСУ……...9

4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ……...10

5. ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ…….....28

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ……31

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества специалиста и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;

- уровень образования и степень подготовленности студентов;

- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Основы военной подготовки*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Основы военной подготовки*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки, подготовка к выполнению практических заданий);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В современных условиях подготовка граждан Российской Федерации к военной службе является приоритетным направлением государственной политики. Важнейшими вопросами образования на всех уровнях является воспитание любви к Родине, чувства патриотизма, готовности к защите Отечества.

Образовательная дисциплина «Основы военной подготовки» (далее – дисциплина) реализуется исходя из базовых принципов и направлений военной подготовки, дисциплина состоит из основных разделов военной подготовки, тем военно-политической и правовой подготовки.

Основной целью освоения дисциплины является получение знаний, умений и навыков, необходимых для становления обучающихся образовательных организаций высшего образования (далее – вуз) в качестве граждан способных и готовых к выполнению воинского долга и обязанности по защите своей Родины в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Задачами дисциплины «Основы военной подготовки» являются:

1) формирование у обучающихся понимания главных положений военной доктрины Российской Федерации, а также основ военного строительства и структуры Вооруженных Сил Российской Федерации (далее - ВС РФ);

2) формирование у обучающихся высокого общественного сознания и воинского долга;

3) воспитание дисциплинированности, высоких морально-психологических качеств личности гражданина – патриота;

4) освоение базовых знаний и формирование ключевых навыков военного дела;

5) раскрытие специфики деятельности различных категорий военнослужащих ВС РФ;

6) ознакомление с нормативными документами в области обеспечения обороны государства и прохождения военной службы;

7) формирование строевой подтянутости, уважительного отношения к воинским ритуалам и традициям, военной форме одежды;

8) изучение и принятие правил воинской вежливости;

9) овладение знаниями уставных норм и правил поведения военнослужащих.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации

Тема 1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации, их основные требования и содержание.

Структура, требования и основное содержание общевоинских уставов. Права военнослужащих. Общие обязанности военнослужащих. Воинские звания. Единоначалие. Начальники и подчиненные. Старшие и младшие. Приказ и приказание. Порядок отдачи и выполнение приказа. Воинская вежливость и воинская дисциплина военнослужащих.

Тема 2. Внутренний порядок и суточный наряд.

Размещение военнослужащих. Распределение времени и внутренний порядок. Суточный наряд роты, его предназначение, состав.

Дневальный, дежурный по роте. Развод суточного наряда.

Тема 3. Общие положения Устава гарнизонной и караульной службы.

Общие положения Устава гарнизонной и караульной службы.

Обязанности разводящего, часового.

Раздел 2. Строевая подготовка

Тема 4. Строевые приемы и движение без оружия.

Строй и его элементы. Виды строя. Сигналы для управления строем. Команды и порядок их подачи. Обязанности командиров, военнослужащих перед построением и в строю. Строевой расчет. Строевая стойка. Выполнение команд: «Становись», «Равняйсь», «Смирно», «Вольно», «Заправиться». Повороты на месте. Строевой шаг. Движение строевым шагом. Движение строевым шагом в составе подразделения. Повороты в движении. Движение в составе взвода. Управление подразделением в движении.

Раздел 3. Огневая подготовка из стрелкового оружия

Тема 5. Основы, приемы и правила стрельбы из стрелкового оружия.

Требования безопасности при обращении со стрелковым оружием.

Требования безопасности при проведении занятий по огневой подготовке.

Приемы и правила стрельбы из стрелкового оружия.

Тема 6. Назначение, боевые свойства, материальная часть и применение стрелкового оружия, ручных противотанковых гранатометов и ручных гранат.

Назначение, состав, боевые свойства и порядок сборки разборки АК-74 и РПК-74.

Назначение, состав, боевые свойства и порядок сборки разборки пистолета ПМ.

Назначение, состав, боевые свойства РПГ-7.

Назначение, боевые свойства и материальная часть ручных гранат.

Сборка разборка пистолета ПМ и подготовка его к боевому применению.

Сборка разборка АК-74, РПК-74 и подготовка их к боевому применению.

Снаряжение магазинов и подготовка ручных гранат к боевому применению.

Тема 7. Выполнение упражнений учебных стрельб из стрелкового оружия.
Требования безопасности при организации и проведении стрельб из стрелкового оружия. Порядок выполнения упражнения учебных стрельб. Меры безопасности при проведении стрельб и проверка усвоения знаний и мер безопасности при обращении со стрелковым оружием. Выполнение норматива №1 курса стрельб из стрелкового оружия.

Раздел 4. Основы тактики общевойсковых подразделений

Тема 8. Вооруженные Силы Российской Федерации их состав и задачи.
Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ. Вооруженные Силы Российской Федерации их состав и задачи. Назначение, структура мотострелковых и танковых подразделений сухопутных войск, их задачи в бою. Боевое предназначение входящих в них подразделений.
Тактико-технические характеристики основных образцов вооружения и техники ВС РФ.
Тема 9. Основы общевойскового боя.
Сущность современного общевойскового боя, его характеристики и виды. Способы ведения современного общевойскового боя и средства вооруженной борьбы.
Тема 10. Основы инженерного обеспечения.
Цели и основные задачи инженерного обеспечения частей и подразделений. Назначение, классификация инженерных боеприпасов, инженерных заграждений и их характеристики.
Полевые фортификационные сооружения: окоп, траншея, ход сообщения, укрытия, убежища.
Тема 11. Организация воинских частей и подразделений, вооружение, боевая техника вероятного противника.
Организация, вооружение, боевая техника подразделений мпб и тб армии США.
Организация, вооружение, боевая техника подразделений мпб и тб армии Германии.

Раздел 5. Радиационная, химическая и биологическая защита

Тема 12. Ядерное, химическое, биологическое, зажигательное оружие.
Ядерное оружие. Средства их применения. Поражающие факторы ядерного взрыва и их воздействие на организм человека, вооружение, технику и фортификационные сооружения.
Химическое оружие. Отравляющие вещества (ОВ), их назначение, классификация и воздействие на организм человека. Боевые состояния, средства применения, признаки применения ОВ, их стойкость на местности.
Биологическое оружие. Основные виды и поражающее действие.
Средства применения, внешние признаки применения.

Зажигательное оружие. Поражающие действия зажигательного оружия на личный состав, вооружение и военную технику, средства и способы защиты от него.

Тема 13. Радиационная, химическая и биологическая защита.

Цель, задачи и мероприятия РХБ защиты.

Мероприятия специальной обработки:

дегазация, дезактивация, дезинфекция, санитарная обработка.

Цели и порядок проведения частичной и полной специальной обработки.

Технические средства и приборы радиационной, химической и биологической защиты. Средства индивидуальной защиты и порядок их использования.

Подгонка и техническая проверка средств индивидуальной защиты.

Раздел 6. Военная топография

Тема 14. Местность как элемент боевой обстановки.

Измерения и ориентирование на местности без карты, движение по азимутам.

Местность как элемент боевой обстановки.

Способы ориентирования на местности без карты.

Способы измерения расстояний. Движение по азимутам.

Тема 15. Топографические карты и их чтение, подготовка к работе.

Определение координат объектов и целеуказания по карте.

Геометрическая сущность, классификация и назначение топографических карт.

Определение географических и прямоугольных координат объектов по карте.

Целеуказание по карте.

Раздел 7. Основы медицинского обеспечения

Тема 16. Медицинское обеспечение войск (сил), первая медицинская помощь при ранениях, травмах и особых случаях.

Медицинское обеспечение – как вид всестороннего обеспечения войск.

Обязанности и оснащение должностных лиц медицинской службы тактического звена в бою. Общие правила оказания самопомощи и взаимопомощи.

Первая помощь при ранениях и травмах.

Первая помощь при поражении отравляющими веществами, бактериологическими средствами. Содержание мероприятия доврачебной помощи.

Раздел 8. Военно-политическая подготовка

Тема 17. Россия в современном мире. Основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны.

Новые тенденции и особенности развития современных международных отношений.

Место и роль России в многополярном мире.

Основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития Российской Федерации.
Цели, задачи, направления и формы военно-политической работы в подразделении, требования руководящих документов.

Раздел 9. Правовая подготовка

Тема 18. Военная доктрина Российской Федерации. Законодательство Российской Федерации о прохождении военной службы.
Основные положения Военной доктрины Российской Федерации.
Правовая основа воинской обязанности и военной службы.
Понятие военной службы, ее виды и их характеристики.
Обязанности граждан по воинскому учету.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОПРОСУ

Раздел 3. Огневая подготовка из стрелкового оружия

1. Каковы виды стрелкового оружия
2. Какие бывают боеприпасы
3. Марки ручных гранат.

Раздел 4. Основы тактики общевойсковых подразделений

1. Из чего состоит организационно-штатная структура общевойсковых подразделений
2. Перечислите Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ
3. Каковы основные факторы, определяющие характер, организацию и способы ведения современного общевойскового боя
4. Перечислите основные инженерно-технических мероприятия.
5. Какие знаете защитные сооружения.
6. Виды заграждений
7. На чем основывается полевое водоснабжение.
8. Каковы емкости РДВ
9. Назначение ТУФ-200
10. Назначение МТК
11. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии США
12. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии Германии

Раздел 5. Радиационная, химическая и биологическая защита

1. Общие сведения о ядерном оружии
2. Общие сведения о химическом оружии
3. Общие сведения о биологическом оружии
4. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях радиоактивного заражения
5. Каковы правила поведения и меры профилактики при применении отравляющих веществ

6. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях применения бактериальных средств
7. Какие знаете индивидуальные средства РХБ защиты
8. Каковы мероприятия радиационной, химической и биологической защиты?

Раздел 6. Военная топография

1. Каковы тактические свойства местности, их влияние на действия подразделений в боевой обстановке
2. Назначение, номенклатура и условные знаки топографических карт
3. Способы ориентирования на местности по карте и без карты
4. Что такое номенклатура топографических карт
5. Как задается координаты объекта
6. Уточнение координат по "улитке"

Раздел 8. Военно-политическая подготовка

1. Каковы тенденции и особенности развития современных международных отношений, место и роль России в многополярном мире, основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны, основные положения Военной доктрины РФ
2. Правовое положение и порядок прохождения военной службы.

Раздел 9. Правовая подготовка

1. Что значит нормативно-правовой акт
2. Чем определяется порядок прохождения военной службы

4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Кем утверждаются ОВУ?
- Вариант ответа
Государственной Думой
- Вариант ответа
Правительством РФ
- Вариант ответа
Федеральным собранием РФ
- Вариант ответа
Президентом РФ

2. Кем присваивается первое офицерское звание?
- Вариант ответа
Мин. Обороны РФ
- Вариант ответа
Президентом РФ
- Вариант ответа
Правительством РФ
- Вариант ответа
Командующим ВВО

- Вариант ответа
Командиром в/ч

3. К какому виду ответственности могут быть привлечены офицеры запаса за уклонение от призыва на действительную в/службу?
- Вариант ответа
моральной
- Вариант ответа
нравственной
- Вариант ответа
административной
- Вариант ответа
уголовной
- Вариант ответа
общественной

4. На чем основываются взаимоотношения между военнослужащими?
- Вариант ответа
на дружбе
- Вариант ответа
на чувстве взаимного уважения
- Вариант ответа
на товариществе
- Вариант ответа
на любви
- Вариант ответа
на вере в силу армии РФ

5. Какое минимальное количество часов отдыха разрешено военнослужащим согласно распорядку дня?
- Вариант ответа
не > 10
- Вариант ответа
не < 8
- Вариант ответа
не > 8
- Вариант ответа
не > 6
- Вариант ответа
не < 6

6. Какое минимальное количество унитазов (очек) должно быть в подразделении (роте)?
- Вариант ответа

не < 15 шт
- Вариант ответа
1 на 30 чел
- Вариант ответа
не > 20 шт
- Вариант ответа
1 на 20 чел
- Вариант ответа
1 на 10-12 чел

7. Сколько должно быть умывальников для умывания в подразделении (роте)?
- Вариант ответа
1 на 5-7 чел
- Вариант ответа
не > 10 шт
- Вариант ответа
не < 10 шт
- Вариант ответа
1 на 10 чел
- Вариант ответа
1 на 8-9 чел

8. Сколько форм одежды для проведения утренней физзарядки?
- Вариант ответа
1
- Вариант ответа
2
- Вариант ответа
3
- Вариант ответа
6
- Вариант ответа
5

9. На чем основывается воинская дисциплина?
- Вариант ответа
на чувстве ответственности за порученное дело
- Вариант ответа
на страхе перед командиром
- Вариант ответа
на осознании каждым в/с воинского долга и личной ответственности за защиту своего Отечества, на его беззаветной преданности своему народу
- Вариант ответа
на взаимном уважении военнослужащих

- Вариант ответа
на чувстве преданности Родине

10. Какие поощрения могут применяться к младшим офицерам?
- Вариант ответа
внеочередной отпуск до 10 суток
- Вариант ответа
увольнение
- Вариант ответа
благодарность, награждение грамотой, присвоение внеочередного воинского звания
- Вариант ответа
фотографированием у развернутого б/знамени части
- Вариант ответа
награждение путевкой в санаторий

11. Какие взыскания могут накладываться на мл. офицеров?
- Вариант ответа
до 3 нарядов вне очереди на службу
- Вариант ответа
лишение увольнения
- Вариант ответа
арест с содержанием на г/вахте
- Вариант ответа
отлучение от офицерского собрания
- Вариант ответа
выговор, строгий выговор, снятие с должности, понижение в в/звании

12. Каким взысканием может подвергнуться солдат, проходящий военную службу по призыву, за нарушение воинской дисциплины?
- Вариант ответа
арест с содержанием на г/вахте до 30 сут
- Вариант ответа
арест с содержанием на г/вахте до 20 сут
- Вариант ответа
лишение очередного отпуска на родину
- Вариант ответа
задержка в выплате денежного довольствия
- Вариант ответа
выговор, строгий выговор, лишение очередного увольнения, до 10 суток ареста с содержанием на г/вахте, лишением нагрудного знака отличника, снижением в должности в в/звании на одну ступень, с переводом на низшую должность, до 5 нарядов вне очереди на работу

13. Каким взысканиям может подвергаться КО за нарушения воинской дисциплины?
- Вариант ответа
снятие с должности, выговор, строгий выговор
- Вариант ответа
лишение в/звания «сержант»
- Вариант ответа
лишение очередного отпуска
- Вариант ответа
арест на г/вахту до 5 суток
- Вариант ответа
лишение денежного довольствия

14. Какие поощрения могут применяться к солдату?
- Вариант ответа
до 10 увольнений вне очереди
- Вариант ответа
снятие ранее наложенного взыскания, благодарность, награждение грамотой, ценным подарком, присвоение в/звания «ефрейтор», фотографированием у развернутого б/знамени
- Вариант ответа
до 15 суток кратковременного отпуска
- Вариант ответа
награждение боевым именным орудием
- Вариант ответа
выдача дополнительного продовольственного пайка

15. Обязанности КВ по отношению к подчиненным при их поощрении?
- Вариант ответа
присваивать в/звания «мл. сержант», «сержант», «ст. сержант»
- Вариант ответа
отправлять в отпуск на родину на срок до 10 сут
- Вариант ответа
объявлять благодарность, снятие ранее наложенного взыскания
- Вариант ответа
освобождать с г/вахты
- Вариант ответа
водить в чайную за свое денежное довольствие

16. Права КВ по отношению к подчиненным при применении дисциплинарных взысканий?
- Вариант ответа
арестовывать на срок до 3 суток
- Вариант ответа

лишать отпуска с выездом на Родину
- Вариант ответа
объявлять до 6 нарядов вне очереди
- Вариант ответа
объявлять выговор, стр. выговор, лишать очередного увольнения, объявлять до 4 нарядов вне очереди на работу
- Вариант ответа
лишать выдачи печенья и сахара вместо сигарет некурящим в/служащим

17. Чем вооружается наряд по роте?
- Вариант ответа
АК
- Вариант ответа
РПГ
- Вариант ответа
лопатами
- Вариант ответа
вениками
- Вариант ответа
штык-ножами

18. Основные задачи наряда по КПП
- Вариант ответа
открывать ворота КПП
- Вариант ответа
открывать и закрывать ворота КПП
- Вариант ответа
смотреть на проходящих мимо красивых девушек
- Вариант ответа
осуществлять строгий контрольно-пропускной режим в части
- Вариант ответа
пропускать только в/служащих и членов семей на территорию части

19. Основная задача наряда по роте
- Вариант ответа
никуда не сбегать
- Вариант ответа
мыть полы в спальных помещениях
- Вариант ответа
следить за соблюдением распорядка дня, сохранностью КДХО, имущества роты и личных вещей в/служащих
- Вариант ответа
находиться в роте
- Вариант ответа

убирать грязную посуду за л/с роты в столовой

20. Какие бывают парки в ВС РФ?
- Вариант ответа
зоопарки
- Вариант ответа
развлечений и отдыха
- Вариант ответа
постоянные и полевые
- Вариант ответа
аквапарки
- Вариант ответа
стационарные

21. Кто назначается в наряд по парку?
- Вариант ответа
дежурный и дневальный
- Вариант ответа
дежурный и водитель-механик дежурного тягача
- Вариант ответа
дежурный, дневальные и барабанщик
- Вариант ответа
дежурный, дневальные, механик-водитель дежурного тягача
- Вариант ответа
механик-водитель дежурного тягача и барабанщик

22. Состав суточного наряда при перевозках войск
- Вариант ответа
дежурный по эшелону, помощник, дежурные по вагонам и дневальные
- Вариант ответа
дежурные по вагонам, дневальные, барабанщик, фельдшер
- Вариант ответа
дежурный, горнист, фельдшер
- Вариант ответа
барабанщик и горнист
- Вариант ответа
дневальные

23. Сколько времени должно отводиться распорядком дня подготовки лиц суточного наряда
- Вариант ответа
не менее 3 ч
- Вариант ответа
не более 1 ч

- Вариант ответа
не менее 4 ч
- Вариант ответа
не более 1 ч
- Вариант ответа
не менее 30 мин

24. С какого момента караул переходит в подчинение дежурному по части
- Вариант ответа
после того, как помощник дежурного по части дает команду ”равнение на –…“ и “смирно” и докладывает дежурному по воинской части
- Вариант ответа
при выходе дежурного по части на строевой плац
- Вариант ответа
когда дежурный по части выдает пароль
- Вариант ответа
при докладе о смене караулов
- Вариант ответа
при первом прибытии в караул дежурного по части

25. С чего начинается прием дежурства дежурным по роте
- Вариант ответа
со счета кроватей в подразделении
- Вариант ответа
со счета тумбочек в подразделении
- Вариант ответа
с проверки количества оружия и его качественного состояния
- Вариант ответа
с перекура
- Вариант ответа
с убытием на улицу

26. Кто инструктирует дежурного по парку
- Вариант ответа
командир части
- Вариант ответа
начальник штаба в/ч
- Вариант ответа
начальник штаба батальона
- Вариант ответа
командиром батальона
- Вариант ответа
заместителем командира части по вооружению

27. Что не должен принимать дежурный по парку
- Вариант ответа
объекты, охраняемые внутренним караулом
- Вариант ответа
количество деревьев на территории парка
- Вариант ответа
количество автомобильной техники в/ч
- Вариант ответа
состояние деж. тягача
- Вариант ответа
количество и состояние оттисков печатей на хранилищах с техникой

28. Где должно храниться оружие в подразделении
- Вариант ответа
под кроватями
- Вариант ответа
под подушками
- Вариант ответа
за тумбочками
- Вариант ответа
в каптерке
- Вариант ответа
в комнате для хранения оружия, в пирамидах

29. У кого должны храниться ключи от комнаты для хранения оружия
- Вариант ответа
у дежурного по роте
- Вариант ответа
у командира взвода
- Вариант ответа
у командира батальона
- Вариант ответа
у командира роты
- Вариант ответа
у дежурного по части

30. Кто дает разрешение на вскрытие комнате для хранения оружия
- Вариант ответа
старшина роты
- Вариант ответа
командир взвода
- Вариант ответа
заместитель командира роты по воспитательной работе
- Вариант ответа

командир роты
- Вариант ответа
командир части

31. Чьими печатями должна опечатываться комната для хранения оружия
- Вариант ответа
командира части и командира роты
- Вариант ответа
командира роты и дежурного по роте
- Вариант ответа
дежурного по роте и дежурного по части
- Вариант ответа
старшины роты и командира роты
- Вариант ответа
командира роты и дежурного по части

Тесты по медицинской подготовке:

1. Объем первой медицинской помощи с динамическими (механическими) факторами поражения:
- Вариант ответа
временная остановка кровотечения, искусственное дыхание
- Вариант ответа
временная остановка наружного кровотечения, устранение асфиксии, искусственное дыхание, непрямой массаж сердца, введение обезболивающих средств, наложение асептических повязок, транспортная иммобилизация
- Вариант ответа
простейшие противошоковые мероприятия, временная остановка кровотечения, эвакуация
- Вариант ответа
закрытие ран повязками, иммобилизация конечностей табельными и подручными средствами

2. Методы временной остановки наружного кровотечения на месте поражения:
- Вариант ответа
наложение асептической повязки, пальцевое прижатие кровоточащего сосуда, давящая повязка, наложение жгута
- Вариант ответа
наложение кровоостанавливающего жгута, давящая повязка, тугая тампонада раны, форсированное сгибание конечности с последующей фиксацией, пальцевое прижатие кровоточащего сосуда
- Вариант ответа
давящая повязка, наложение жгута, наложение зажима на кровоточащий сосуд, форсированное сгибание конечности
- Вариант ответа

наложение зажима на кровоточащий сосуд, наложение асептической повязки

3. Объем первой медицинской помощи при проникающем ранении живота:
- Вариант ответа
при эвентрации вправление выпавших органов в брюшную полость, наложение асептической повязки на рану, эвакуация в положении лежа
- Вариант ответа
введение анальгетиков, теплое питье, асептическая повязка, эвакуация на носилках
- Вариант ответа
обезболивание, наложение асептической повязки, вынос из очага на носилках, эвакуация в первую очередь
- Вариант ответа
введение аналептиков, теплое питье, асептическая повязка, эвакуация на носилках

4. Первая медицинская помощь при повреждении таза и тазовых органов:
- Вариант ответа
инъекция спазмолитиков, наложение асептических повязок, щадящая эвакуация на носилках на спине, при подозрении на перелом таза - в положении лягушки
- Вариант ответа
инъекция промедола, наложение асептических повязок на раны, дача противобактериальных препаратов, эвакуация в положении лягушки
- Вариант ответа
инъекция морфина, наложение асептических повязок на раны, при кровотечении прием гомеостатических средств, эвакуация на носилках спиной вниз
- Вариант ответа
инъекция морфина, наложение асептических повязок на раны, при кровотечении прием гомеостатических средств, эвакуация на носилках лежа

5. Максимально допустимая длительность клинической смерти:
- Вариант ответа
1-2 минуты
- Вариант ответа
5-7 минут
- Вариант ответа
3-5 минут
- Вариант ответа
10-15 минут

6. Порядок реанимационных мероприятий одним человеком:
- Вариант ответа
2 вдувания + 30 компрессий
- Вариант ответа

1 вдувание + 5 компрессий
- Вариант ответа
3 вдувания + 10 компрессий
- Вариант ответа
5 вдуваний + 20 компрессий

7. Положение рук реаниматора при проведении непрямого массажа сердца:
- Вариант ответа
лучезапястные и локтевые суставы максимально разогнуты
- Вариант ответа
лучезапястные и локтевые суставы максимально согнуты
- Вариант ответа
локтевые суставы согнуты, лучезапястные – разогнуты
- Вариант ответа
локтевые суставы разогнуты, лучезапястные – согнуты

8. Темп непрямого массажа сердца должен составлять в минуту:
- Вариант ответа
5 сжатий
- Вариант ответа
12 сжатий
- Вариант ответа
20 сжатий
- Вариант ответа
100-110 сжатий

9. Реанимация это:
- Вариант ответа
раздел клинической медицины, изучающий терминальные состояния
- Вариант ответа
отделение многопрофильной больницы
- Вариант ответа
практические действия, направленные на восстановление жизнедеятельности
- Вариант ответа
раздел клинической медицины, изучающий термические состояния

10. Реанимация показана:
- Вариант ответа
в каждом случае смерти больного
- Вариант ответа
только при внезапной смерти молодых больных
- Вариант ответа
при внезапно развившихся терминальных состояниях
- Вариант ответа

только при внезапной смерти детей

11. Максимальная продолжительность клинической смерти в обычных условиях составляет:
- Вариант ответа
10-15 мин
- Вариант ответа
5-6 мин
- Вариант ответа
2-3 мин

12. Необходимыми условиями при проведении искусственной вентиляции легких являются:
- Вариант ответа
применение воздуховода
- Вариант ответа
достаточный объем вдуваемого воздуха
- Вариант ответа
валик под лопатками больного
- Вариант ответа
применение воздуховода

13. Первая медицинская помощь при сдавлении конечностей:
- Вариант ответа
новокаиновая блокада, транспортная иммобилизация, введение обезболивающих, сердечных, антигистаминных и противобактериальных средств, прием внутрь соды, ингаляции кислорода
- Вариант ответа
введение промедола, прием внутрь противобактериального средства, тугое бинтование придавленных конечностей от периферии к центру, охлаждение конечности, транспортная иммобилизация
- Вариант ответа
прием внутрь соды и утоление жажды, инъекция атропина, морфия, кофеина и димедрола
- Вариант ответа
иммобилизация транспортными шинами, быстрая эвакуация
личии у них травм позвоночника транспортируются в положении:
- Вариант ответа
на боку на обычных носилках
- Вариант ответа
на животе на обычных носилках
- Вариант ответа
на боку на щите
- Вариант ответа

на спине на щите

14. Шок – это:
- Вариант ответа
острая сердечная недостаточность
- Вариант ответа
острая сердечно-сосудистая недостаточность
- Вариант ответа
острое нарушение периферического кровообращения
- Вариант ответа
острая легочно-сердечная недостаточность

15. При болевом шоке первой развивается:
- Вариант ответа
торпидная фаза шока
- Вариант ответа
эректильная фаза шока
- Вариант ответа
фаза сопротивления
- Вариант ответа
фаза истощения

16. Первое действие при оказании ПМП при синдроме длительного сдавления:
- Вариант ответа
обезболить, наложить жгут
- Вариант ответа
освободить конечность
- Вариант ответа
наложить асептическую повязку
- Вариант ответа
транспортная иммобилизация

17. При сдавливании конечности в течение 4-7 часов возникает:
- Вариант ответа
легкая степень СДР
- Вариант ответа
тяжелая степень СДР
- Вариант ответа
крайне тяжелая степень СДР
- Вариант ответа
средняя степень СДР

18. Какая повязка накладывается при растяжении голеностопных связок:
- Вариант ответа

черепашья
- Вариант ответа
восьмиобразная
- Вариант ответа
уздечка
- Вариант ответа
Колосовидная

19. Какая повязка накладывается при ранениях волосистой части головы:
- Вариант ответа
Восьмиобразная
- Вариант ответа
Т-образная
- Вариант ответа
"Чепец"
- Вариант ответа
Уздечка

20. Какая повязка накладывается при обширных повреждениях груди:
- Вариант ответа
окклюзионная
- Вариант ответа
спиральная
- Вариант ответа
восьмиобразная
- Вариант ответа
Колосовидная

21. При повреждении плеча показана повязка:
- Вариант ответа
колосовидная
- Вариант ответа
восьмиобразная
- Вариант ответа
черепашья
- Вариант ответа
спиральная

22. При обширных отморожениях конечностей используют:
- Вариант ответа
рыцарскую перчатку
- Вариант ответа
варежку
- Вариант ответа

термоизолирующую повязку
- Вариант ответа
асептическую

23. Смешанное кровотечение:
- Вариант ответа
при одновременном ранении артерий и вен
- Вариант ответа
при ранениях вен и капилляров
- Вариант ответа
при ранении вен
- Вариант ответа
при ранении артерий

24. Первая медицинская помощь при ранении наружной сонной артерии:
- Вариант ответа
пальцевое ее прижатие
- Вариант ответа
прошивание раны
- Вариант ответа
наложение давящей повязки
- Вариант ответа
наложение стерильной повязки

25. Первая медицинская помощь при закрытых переломах костей конечностей:
- Вариант ответа
наложение транспортной шины
- Вариант ответа
транспортировка без транспортной иммобилизации
- Вариант ответа
транспортировка пешком
- Вариант ответа
транспортировка в «позе лягушки»

26. Мероприятия первой медицинской помощи, проводимые пострадавшему с ожогами:
- Вариант ответа
промывание ожоговой поверхности
- Вариант ответа
обезболивание
- Вариант ответа
инфузионная терапия
- Вариант ответа
наложение клеоловой повязки

27. Общие принципы неотложной помощи при отравлениях:
- Вариант ответа
вызывание рвоты различными методами, зондовое промывание желудка, стимуляция мочеотделения, удаление неабсорбированчых ядов,
- Вариант ответа
прекращение дальнейшего поступания яда в организм, применение антидота, восстановление и поддержание нарушенных функций организма, устранение отдельных симптомов интоксикации
- Вариант ответа
удаление неабсорбированных токсических веществ, форсированный диурез, гемодиализ, слабительные средства, гемоперфузия, полная санитарная обработка, применение антидота
- Вариант ответа
антибиотикотерапия, применение противосудорожных средств

28. Территория, на которой произошел выброс ядовитого вещества в окружающую среду и продолжается его испарение в атмосферу, называется:
- Вариант ответа
очагом экологического заражения
- Вариант ответа
очагом химического заражения
- Вариант ответа
зоной химического заражения
- Вариант ответа
зоной экологического заражения

29. Территория, подвергнутая воздействию паров ядовитого вещества, называется:
- Вариант ответа
очагом химического заражения
- Вариант ответа
зоной экологического заражения
- Вариант ответа
зоной химического заражения
- Вариант ответа
очагом экологического заражения

30. Промывание желудка при отравлениях кислотами и щелочами производится:
- Вариант ответа
после обезболивания рефлекторным методом
- Вариант ответа
противопоказано

- Вариант ответа
после обезболивания зондовым методом
- Вариант ответа
после обезболивания физиологическим методом

31. Промывание желудка при отравлениях кислотами и щелочами производится:
- Вариант ответа
нейтрализующими растворами
- Вариант ответа
холодной водой
- Вариант ответа
водой комнатной температуры
- Вариант ответа
теплой водой

32. Наиболее эффективно удаляется яд из желудка:
- Вариант ответа
холодной водой
- Вариант ответа
горячей водой
- Вариант ответа
при промывании рефлекторным методом
- Вариант ответа
при промывании зондовым методом

33. При наличии в атмосфере паров хлора необходимо перемещаться:
- Вариант ответа
в верхние этажи зданий
- Вариант ответа
на улицу
- Вариант ответа
в нижние этажи и подвалы
- Вариант ответа
на крышу

34. При наличии в атмосфере паров хлора дыхательные пути нужно защитить:
- Вариант ответа
ватно-марлевой повязкой, смоченной в растворе питьевой соды
- Вариант ответа
ватно-марлевой повязкой, смоченной в растворе уксусной кислоты
- Вариант ответа
ватно-марлевой повязкой, смоченной кипяченой водой
- Вариант ответа

сухой ватно-марлевой повязкой

35. Пары хлора и аммиака вызывают:
- Вариант ответа
возбуждение и эйфорию
- Вариант ответа
раздражение верхних дыхательных путей
- Вариант ответа
слезотечение
- Вариант ответа
Ларингоспазм

36. Способы защиты пищевых продуктов от заражения, загрязнения* при применении оружия массового поражения:
- Вариант ответа
герметизация складов и других хранилищ пищевых продуктов, дезинфекция
- Вариант ответа
автоклавирование посуды
- Вариант ответа
расфасовка пищевых продуктов в герметическую тару, строительство объектов пищевого надзора за городом, герметизация складов и других хранилищ пищевых продуктов
- Вариант ответа
ассредоточение пищевых продуктов и строительство объектов пищевого надзора за городом, кипячение

37. Средства обеззараживания воды в очагах массового поражения:
- Вариант ответа
гиперхлорирование (с последующим дехлорированием), кипячение, фильтрация, отстаивание, применение перекиси водорода, пергидроля, пантоцида
- Вариант ответа
хлорирование, фильтрация, применение перекиси водорода
- Вариант ответа
хлорирование, использование пергидроля, пантоцида
- Вариант ответа
кипячение, фильтрация, применение перекиси водорода

5. ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Основы военной подготовки*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить ин-

формацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Основы военной подготовки*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЕТУ

1. Каковы виды стрелкового оружия?
2. Какие бывают боеприпасы?
3. Назовите марки ручных гранат.
4. Из чего состоит организационно-штатная структура общевойсковых подразделений?
5. Перечислите Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ.
6. Каковы основные факторы, определяющие характер, организацию и способы ведения современного общевойскового боя?
7. Перечислите основные инженерно-технических мероприятия.
8. Какие существуют защитные сооружения?
9. Какие бывают виды заграждений?
10. На чем основывается полевое водоснабжение?
11. Каковы емкости РДВ?

12. Назовите назначение ТУФ-200.
13. Назовите назначение МТК.
14. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии США.
15. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии Германии.
16. Перечислите общие сведения о ядерном оружии.
17. Перечислите общие сведения о химическом оружии
18. Перечислите общие сведения о биологическом оружии
19. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях радиоактивного заражения?
20. Каковы правила поведения и меры профилактики при применении отравляющих веществ?
21. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях применения бактериальных средств?
22. Какие существуют индивидуальные средства РХБ защиты?
23. Каковы мероприятия радиационной, химической и биологической защиты?
24. Каковы тактические свойства местности, их влияние на действия подразделений в боевой обстановке?
25. Опишите назначение, номенклатура и условные знаки топографических карт.
26. Назовите способы ориентирования на местности по карте и без карты.
27. Что такое номенклатура топографических карт?
28. Как задаются координаты объекта?
29. Что такое уточнение координат по "улитке"?
30. Каковы тенденции и особенности развития современных международных отношений?
31. Назовите место и роль России в многополярном мире.
32. Перечислите основные направления социально-экономического развития России.
33. Перечислите основные направления политического развития России.
34. Перечислите основные направления военно-технического развития России.
35. Какие существуют основные положения Военной доктрины РФ?
36. Назовите правовое положение и порядок прохождения военной службы.
37. Что значит нормативно-правовой акт?
38. Чем определяется порядок прохождения военной службы?
39. Назовите основные задачи укрепления безопасности страны.
40. Чем актуальны положения военной доктрины?
41. Перечислите основные тенденции развития военно-политической обстановки.
42. Какие существуют основные требования и категории военной доктрины России?
43. Как взаимосвязаны военная безопасность и жизненно важные интересы?

44. Напишите методологическое значение определения жизненно важных интересов.
45. Перечислите военно-политические основы военной доктрины РФ.
46. Перечислите военно-стратегические основы военной доктрины РФ.
47. Перечислите военно-экономические основы военной доктрины РФ.
48. Перечислите военно-технические основы военной доктрины РФ.
49. Назовите роль и место вооруженных сил в демократическом государстве.
50. Перечислите особенности гражданского контроля за вооруженными силами в демократических государствах.
51. Какие вы знаете особенности дисциплинарной практики?
52. Что такое «статус военнослужащего»?

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование	Кол-во экз.
1	Общевоинские уставы Вооруженных сил Российской Федерации : курс лекций / составители В. А. Борисов, И. Е. Акулов, В. К. Фоменко. — Томск : Томский политехнический университет, 2019. — 87 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/106173.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
2	Основы огневой подготовки : учебное пособие / А. В. Рыжов, В. М. Коняев, С. В. Пожидаев, Д. В. Горденко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 110 с. — ISBN 978-5-4497-1170-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/109245.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: https://doi.org/10.23682/109245	Эл. ресурс
3	Огневая подготовка : учебное пособие / В. В. Белевцев, Д. В. Горденко, Д. Н. Резеньков, Е. В. Кособлик. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 132 с. — ISBN 978-5-4497-1289-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/109244.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: https://doi.org/10.23682/109244	Эл. ресурс
4	Общевоенная подготовка. В 2 частях. Ч.1 : учебное пособие / А. Г. Борисов, К. В. Анистратенко, Е. Ю. Лубашев [и др.] ; под редакцией А. Г. Борисова. — Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2022. — 414 с. — ISBN 978-5-9275-4192-8 (ч.1), 978-5-9275-4191-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127091.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. -	Эл. ресурс
5	Общевоенная и тактическая подготовка : учебное пособие / С. А. Чеховский, В. Н. Алёшичев, А. С. Евтехов, С. К. Бушанский. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2021. — 280 с. — ISBN 978-5-7433-3472-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/124344.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI:	Эл. ресурс

	https://doi.org/10.23682/124344	
6	Баранов, А. Р. Военная топография в служебно-боевой деятельности оперативных подразделений : учебник для курсантов и слушателей военных учебных заведений / А. Р. Баранов, Ю. Г. Маслак, В. И. Ягодинцев. — Москва : Академический проект, 2020. — 159 с. — ISBN 978-5-8291-2944-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/110047.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.	Эл. ресурс
7	Оказание первой доврачебной помощи в образовательных организациях : учебно-методическое пособие / Ю. В. Азизова, С. К. Касимова, А. В. Трясучев [и др.]. — Астрахань : Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет», 2020. — 70 с. — ISBN 978-5-9926-1188-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/108843.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
8	Маслова, Л. Ф. Первая помощь пострадавшим : учебное пособие / Л. Ф. Маслова. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2020. — 40 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/121690.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
9	Кутепов, В. А Тактическая подготовка. Радиационная, химическая и биологическая защита : учебное пособие / В. А Кутепов, А. Б. Адемченко, С. В Ковалев. — Омск : Омский государственный технический университет, 2017. — 226 с. — ISBN 978-5-8149-2523-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/78509.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
10	Техническое обеспечение средств радиационной, химической и биологической защиты : учебное пособие / А. В. Шаламов, С. Р. Ахметов, Н. Р. Минуллин [и др.]. — Казань : Издательство КНИТУ, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-7882-3135-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/129262.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
11	Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Часть 2. Батальон, рота. — Саратов : Вузовское образование, 2023. — 286 с. — ISBN 978-5-4487-0918-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127500.html (дата обращения: 23.01.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
12	Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Часть 3. Взвод, отделение, танк. — Саратов : Вузовское образование, 2023. — 224 с. — ISBN 978-5-4487-0917-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127501.html (дата обращения: 23.01.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
13	Баранов, А. Р. Тактико-специальная подготовка войскового разведчика внутренних войск : учебно-практическое пособие / А. Р. Баранов, Ю. Г. Маслак ; под редакцией Ю. Г. Маслак. — Москва : Академический Проект, Трикста, 2015. — 368 с. — ISBN 978-5-8291-1490-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/36874.html (дата обращения: 16.05.2022). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс