МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

НОВИКОВА Н.А

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

По курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов направления:
15.03.01 - «Машиностроение»,
15.03.02 - «Технологические машины иоборудование»,
15.03.06 - «Мехатроника и робототехника»

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 00899356C4B8E7194321D0145B60B2398C
Владелец: Зубов Владимир Владимирович
Действителен: с 26.06.2024 до 19.09.2025

Екатеринбург

Учебно-методическое пособие

По курсу «Метрология, стандартизация и сертификация»

для студентов направления: 15.03.01 - «Машиностроение», 15.03.02 - «Технологические машины и оборудование», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Метрология, стандартизация и сертификация» является одной из важнейших дисциплин, так как неразрывно связана с главной задачей современного машиностроения – обеспечение высокого качества выпускаемой продукции. Качество изделий машиностроения, как и любого другого вида продукции, является физической категорией, зависящей от множества конструкторских, технологических и организационно-технологических факторов, проявляющихся на этапах жизненного цикла изделия. Установлено, что до 90% эксплуатационных свойств деталей изделий машиностроения может быть достигнуто за счет соответствующего нормирования точностей геометрических параметров элементов деталей и их поверхностей. К таким эксплуатационным свойствам следует отнести взаимозаменяемость деталей и сборочных единиц, износостойкость трущихся поверхностей, долговечность, герметичность и прочность соединений и др.

Знания, умения и навыки, полученные в результате изучения дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация»

помогут студентам пользоваться государственными стандартами при нормировании точности геометрических параметров гладких цилиндрических и типовых деталей и сборочных единиц, обозначать их на рабочих чертежах.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

Взаимозаменяемость – свойство независимо изготовленных деталей и сборочных единиц занимать свое место в изделии без дополнительной механической или ручной обработки при сборке, обеспечивая при этом нормальную работу собираемых узлов, механизмов, машин. Взаимозаменяемость не обеспечивается только точностью геометрических параметров, Взаимозаменяемыми должны быть форма, механические, электрические и другие количественные и качественные характеристики деталей и сборочных единиц. Такая взаимозаменяемость называется полной. Полную взаимозаменяемость экономически целесообразно применять для деталей, изготовленных с допусками не точнее 6-го квалитета.

При полной взаимозаменяемости:

- упрощается процесс сборки – он сводится к простому соединению деталей рабочими преимущественно невысокой квалификации;

- появляется возможность точно нормировать процесс сборки во времени, устанавливать необходимый темп работы и применять поточный метод;

- создаются условия для автоматизации процессов изготовления и сборки изделий;

-упрощается и удешевляется ремонт изделий, гак как любая

изношенная или поломанная деталь или сборочная единица может быть заменена новой (запасной).

Иногда для удовлетворения эксплуатационных требований необходимо изготовлять детали и сборочные единицы с малыми экономически неприемлемыми или технологически трудно выполнимыми допусками. В этих случаях для получения требуемой точности сборки применяют групповой подбор деталей (селективную сборку), компенсаторы, регулирование положения некоторых частей машин и приборов, пригонку и другие дополнительные технологические мероприятия при обязательном выполнении требовании к качеству сборочных единиц и изде7ий. Такую взаимозаменяемость называют неполной (ограниченной). Ее можно осуществлять не по всем, а только по отдельным геометрическим или другим параметрам.

Внешняя взаимозаменяемость — это взаимозаменяемость покупных и кооперируемых изделий (монтируемых в другие более сложные изделия) и сборочных единиц по эксплуатационным показателям, а также по размерам и форме присоединительных поверхностей. Например, в электродвигателях внешнюю взаимозаменяемость обеспечивают по частоте вращения вала и мощности, а также по размерам присоединительных поверхностей; в подшипниках качения — по наружному диаметру наружного кольца и внутреннему диаметру внутреннего кольца.

Внутренняя взаимозаменяемость распространяется на детали, сборочные единицы и механизмы, входящие в изделие. Например, в подшипнике качения внутреннюю групповую взаимозаменяемость

имеют тела качения и кольца.

2. ПОНЯТИЯ О РАЗМЕРАХ, ДОПУСКАХ И ПОСАДКАХ

Под размером понимают числовое значение линейной или угловой величины в выбранных единицах измерения. Различают номинальный, действительный и предельные размеры.

Номинальный размер — это размер, относительно которого определяются предельные размеры и который служит также началом отсчета отклонений. Номинальный размер, общий для отверстия и вала, образующих соединение, называется номинальным размером соединения. Это основной размер, полученный на основе кинематических, динамических и прочностных расчетов или выбранный из конструктивных, технологических, эксплуатационных, эстетических и других соображений и указанный на чертеже. Полученный, таким образом номинальный размер должен быть округлен до ближайшего стандартного из ряда нормальных линейных размеров по ГОСТ 6636-69 «Нормальные линейные размеры».

Действительный — это размер, установленный измерением с допустимой погрешностью. Величина допускаемой погрешности измерения, по которой выбирается необходимое средство измерения, регламентируется ГОСТ 8.051-81 в зависимости от точности изготовления, заданной на чертеже.

Предельные размеры — это два предельно допустимых размера, между которыми должен находиться или которым может быть равен действительный размер. Больший из двух предельных размеров

называется *наибольшим предельным размером,* а меньший- *наименьшим предельным размером.*

Принято обозначать номинальный, действительный и предельные размеры для отверстий - D, D_r, D_{max}, D_{min};

для валов – d, d_r, d_{max}, d_{min}..

При выходе действительного размера за предельные – деталь считается бракованной.

Условие годности для отверстий*:* $D_{min} \leq D_r \leq D_{max}$;

для валов $d_{min.} \leq d_r \leq d_{max}$.

Для упрощения простановки размеров на чертежах вместо предельных размеров проставляют предельные отклонения. Предельные отклонения подразделяют на верхнее и нижнее.

Верхнее — это алгебраическая разность между наибольшим предельным и номинальным размерами, *нижнее отклонение* — это алгебраическая разность между наименьшим предельным и номинальным размерами.

В ГОСТ 25346-89 приняты условные обозначения: верхнее отклонение отверстия —*ES*, вала — *es*, нижнее отклонение отверстия — *El*, вала — *ei.*

Согласно определениям:

Для отверстий

$$ES = D_{max} - D; \qquad El = D_{min} - D;$$

Для валов

$$es = d_{max.} - d\ ; \qquad ei = d_{min} - d\ ;$$

Предельные отклонения могут иметь положительные и отрицательные значения, или одно из них может быть равным нулю.

Допуск размера — это разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или алгебраическая разность между верхним и нижним отклонениями. Допуск обозначается *IT* или T_D – допуск отверстия и T_d – допуск вала.

Согласно определениям:

Допуск отверстия

$$T_D = D_{max} - D_{min}\ ;$$

Допуск вала

$$T_d = d_{max} - d_{min}\ .$$

Допуск размера всегда положительная величина.

Поле допуска - это поле, ограниченное верхним и нижним отклонениями. Для графического изображения полей допусков, позволяющего понять соотношения номинального и предельных размеров, предельных отклонений и допуска, введено понятие нулевой линии.

Нулевая линия — это линия, соответствующая номинальному размеру, от которой откладываются предельные отклонения размеров при графическом изображении допусков и посадок. При горизонтальном расположении нулевой линии положительные

отклонения откладываются вверх от нее, а отрицательные — вниз (рис. 2.1 и 2.2).

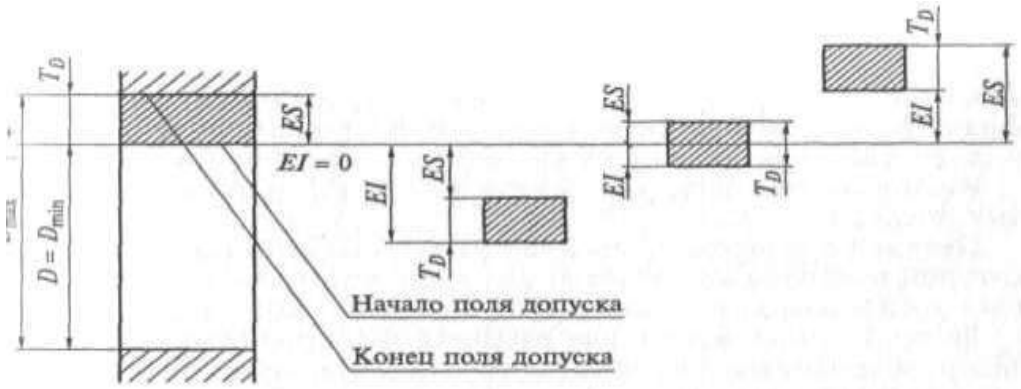


Рис. 1.4. Схема расположения полей допусков отверстий

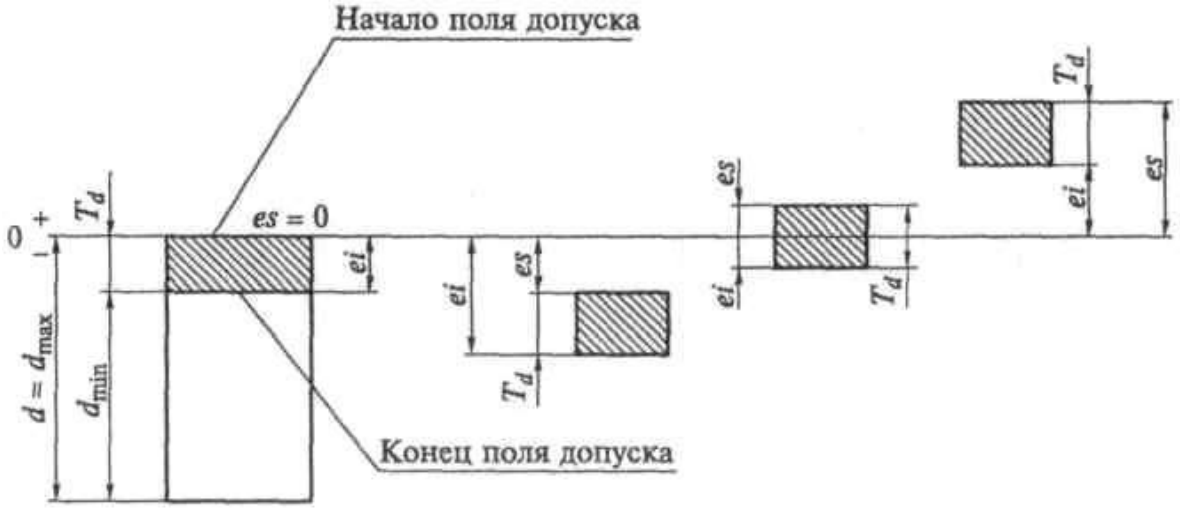


Рис. 1.5. Схема расположения полей допусков валов

В машинах и механизмах детали не находятся обособленно друг от друга, они собираются в определенные узлы, комплекты, группы. Поверхности деталей, по которым

происходит сопряжение одной детали с другой называют сопрягаемыми поверхностями.

Остальные поверхности называются свободными. Поверхности могут быть как цилиндрическими (ось вагона, подшипник скольжения), так и плоскими (шпонка, шпоночный паз). В терминологии по допускам и посадкам: *вал* - все охватываемые наружные поверхности, о*тверстие* - внутренние охватывающие поверхности.

Посадкой – называется характер соединения деталей, определяемый разностью действительных размеров вала и отверстия. Различают три вида посадок: с зазором, с натягом и переходные посадки.

Посадкой с зазором называют такое соединение, у которого действительный размер отверстия больше действительного размера вала. Поле допуска отверстия располагается над полем допуска вала. (рис. 2.3). Основными характеристиками посадки с зазором являются:

Наименьший зазор $S_{min} = D_{min} - d_{max}$;

наибольший зазор $S_{max} = D_{max} - d_{min}$;

средний зазор $S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$;

действительный зазор $S_д = D_д - d_d$;

допуск зазора (допуск посадки с зазором) $T_s = S_{max} - S_{min} = T_D + T_d$

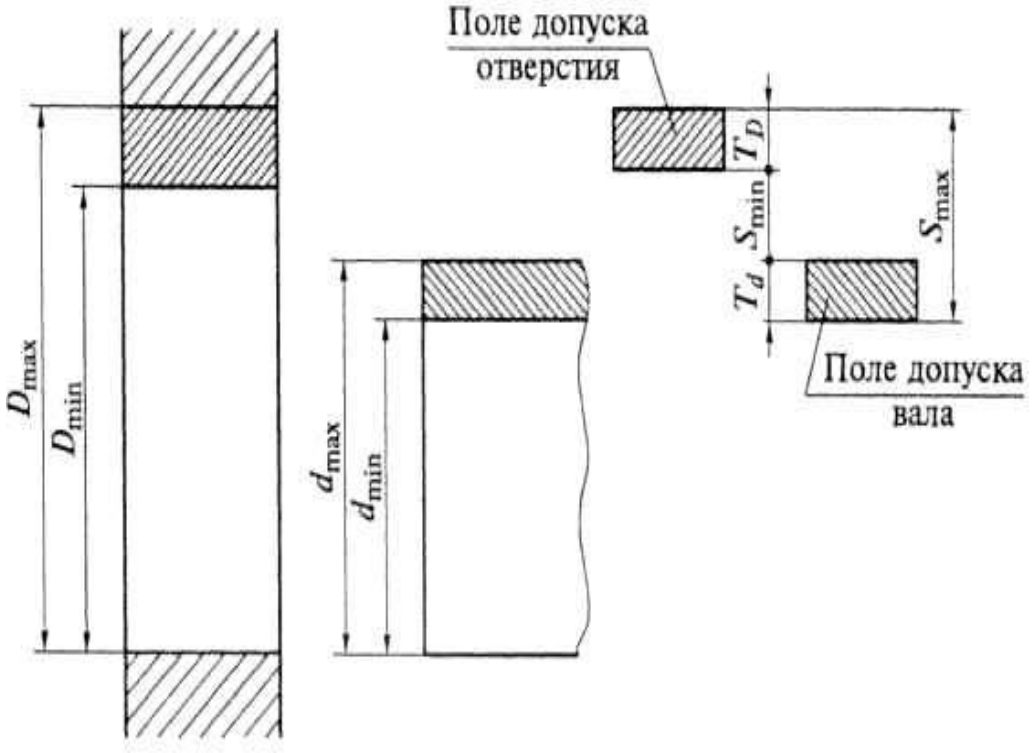


Рис.2.3 Схемы расположения полей допусков при посадках с зазором

посадкой с натягом называется посадка, у которой при любых условиях сборки, действительный размер вала больше действительного размера отверстия (поле допуска вала расположено над полем допуска отверстия) (рис. 2.4). Натяг обеспечивает взаимную неподвижность деталей после их сборки. Основными характеристиками посадки с натягом являются:

наименьший натяг $N_{min} = d_{min} - D_{max}$;

наибольший натяг $N_{max} = d_{max} - D_{min}$;

средний натяг $N_m = \frac{N_{max} + N_{min}}{2}$;

действительный натяг $N_д = d_d - D_д$

допуск натяга (допуск посадки с натягом) $T_N = N_{max} - N_{min} = T_D + T_d$.

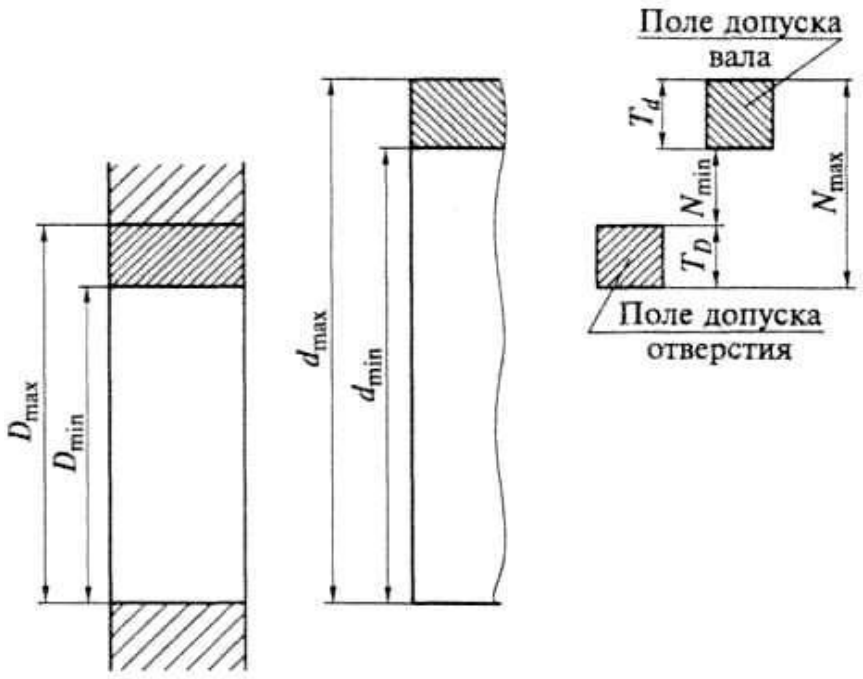


Рис.2.4 Схемы расположения полей допусков при посадках с натягом

Переходной посадкой называется посадка, при которой возможно получение как зазора, так и натяга (поля допусков отверстия и вала перекрываются частично или полностью) (рис.2.5). Переходные посадки используются для неподвижных соединений, когда при эксплуатации необходима частая разборка и сборка, а также когда к центрированию деталей предъявляются повышенные требования.

Основными характеристиками переходных посадок являются:

наибольший натяг $N_{max} = d_{max} - D_{min}$;

наибольший зазор $S_{max} = D_{max} - d_{min}$;

действительный натяг $N_д = d_d - D_д$

действительный зазор $S_д = D_д - d_d$;

допуск посадки $T_{N(S)} = N_{max} + S_{max} = T_D + T_d$.

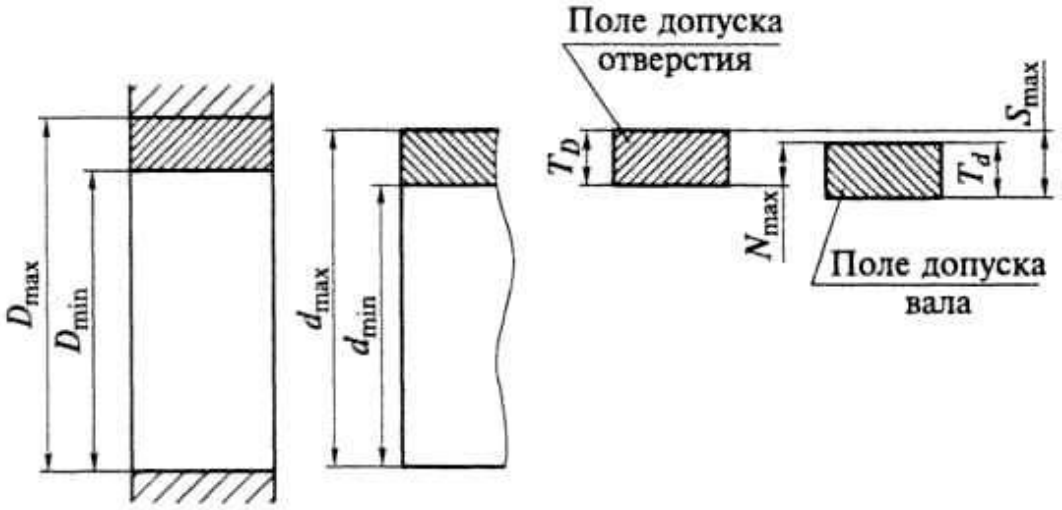


Рис.2.5 Схемы расположения полей допусков при переходных посадках

3. ЕДИНАЯ СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК

Системой допусков и посадок называют совокупность допусков и посадок, закономерно построенных на основе опыта, теоретических и экспериментальных исследований и оформленных в видестандартов. Система предназначена для выбора минимально необходимых, но достаточных для практики вариантов допусков и по-

садок типовых соединений деталей машин. Единая система допусков и посадок (ЕСДП) гладких соединений изложена в стандартах: ГОСТ 25346-89; ГОСТ 25347-82; Согласно стандартам в ЕСДП установлены допуски и посадки для размеров до 1 мм; свыше 1 мм до 500 мм; свыше 500 мм до 3150 мм. Детали, размеры которых входят в каждый из этих диапазонов, имеют свои особенности при проектировании, обработке и контроле. Так, размеры диапазона свыше 0 до 1 мм наиболее часто реализуются в микроэлектронике с использованием нанотехнологий, размеры свыше 1 до 500 мм – в машиностроении, а размеры свыше 500 мм – в станкостроении, тяжелом машиностроении. Рассмотрим построение системы допусков и посадок для размеров от 1 до 500 мм.

3.1 Закономерности построения допусков

Основная закономерность построения допусков размеров *IT*, имеет вид

$$IT\,(T) = a\,i \qquad (1.1)$$

Где a – число единиц допуска; i- единица допуска, мкм

Единица допуска функционально связана с номинальным размером и является масштабом для измерения допуска в закономерности (1.1).

На основании исследований точности механической обработки установлены следующие зависимости единиц допуска для размеров до 500 мм

$$i = 0{,}45\sqrt[3]{D} + 0{,}001D, \qquad (1{,}2)$$

где i — единица допуска, мкм; D — среднее геометрическое крайних размеров каждого интервала размеров, мм.

Каждый диапазон размеров разбивается на *интервалы* — основные и промежуточные. В пределах каждого интервала основные отклонения и допуски неизменны. Основные интервалы используются для определения всех допусков системы. В СДП для номинальных размеров от 1 до 500 мм предусмотрено 13 основных интервалов размеров. Для полей допусков, образующих посадки с большими величинами зазоров или натягов, введены дополнительные промежуточные интервалы, что позволяет уменьшить колебание зазоров и натягов и

Интервалы подразделяются на основные и промежуточные.

диапазон размеров до 500 мм разбит на 13 основных интервалов:

свыше1 до З мм; свыше 30 до 50 мм; свыше 250 до 315 мм;
свыше З до б мм; свыше 50 до 80 мм; свыше 315 до 400 мм;
свыше б до10 мм; свыше 80 до 120 мм; свыше 400 до 500мм.
свыше 10 до 18 мм; свыше 120 до 180 мм;
свыше 18 до 30 мм; свыше 180 до 250 мм;

Промежуточные интервалы введены для номинальных размеров свыше 10 мм и делят каждый основной интервал на две, а в некоторых случаях – на три части. В пределах каждого интервала по зависимости (1.2.) установлена единица допуска

Детали разного назначения в различных машинах и механизмах должны быть изготовлены с различной точностью. Нормирование требуемых уровней точности осуществляется с

помощью квалитетов. Под ***квалитетом*** понимается совокупность допусков, изменяющихся в зависимости от номинального размера так, что уровень точности для всех номинальных размеров остается одинаковым. Допуск, характеризующий точность, в пределах одного квалитета зависит только от номинального размера, входящего в единицу допуска *i*.

В ЕСДП предусмотрено 20 квалитетов, которые обозначаются арабскими цифрами (01; 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; …;18). С увеличением номера квалитета точность понижается (допуск увеличивается).

Самые точные квалитеты (01, 0, 1, 2, 3, 4), как правило, применяются при изготовлении образцовых мер и калибров.

Квалитеты с 5-го по 12-й, как правило, применяются для сопрягаемых элементов деталей при образовании посадок.

Квалитеты с 12-го по 18-й применяют для несопрягаемых элементов деталей.

Допуск по квалитету обозначается буквами *IT* с указанием номера квалитета, например *IT*8 - допуск по 8 квалитету.

Квалитеты отличаются друг от друга коэффициентом точности *a* (количеством единиц допуска) В табл. 1 приведено количество единиц допуска для каждого квалитета, начиная с 5 по 18.

Таблица 1

Число единиц допуска

квалитет	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

«*a*»	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000	1600	2500

3.2 системы допусков и посадок

Стандарты предусматривают две равноправные системы посадок: систему отверстия и систему вала.

Система отверстия – система допусков и посадок, при которой для данного номинального размера и данного квалитета предельные отклонения отверстия остаются постоянными, а требуемые посадки достигаются за счет изменения предельных размеров вала (рис.3.1). В системе отверстия основной деталью является *основное отверстие,* которого нижнее отклонение $EI=0$, а верхнее $ES = + T_D$.

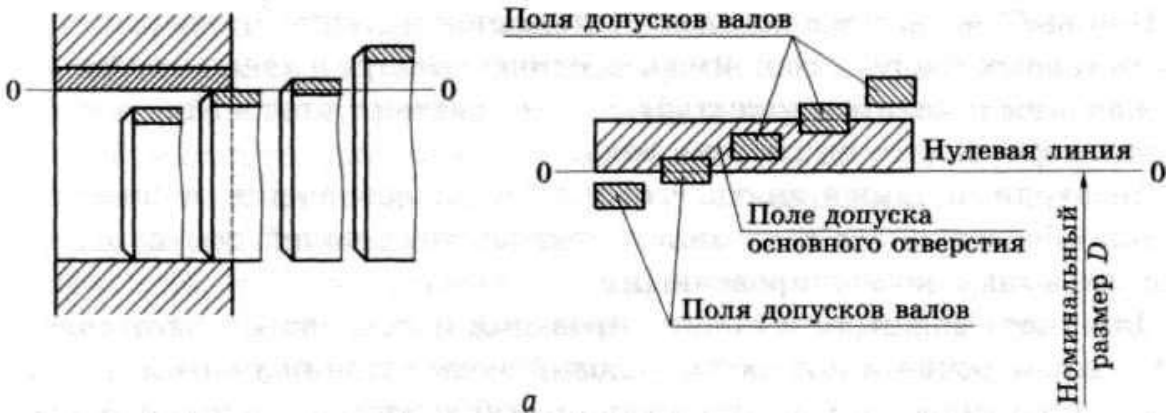


Рис.3.1 Посадки в системе отверстия

Система вала – система допусков и посадок, при которой для данного номинального размера и данного квалитета предельные отклонения вала остаются постоянными, а

требуемые посадки достигаются за счет изменения предельных размеров отверстия (рис.3.2). В системе вала основной деталью является *основной вал,* у которого верхнее отклонение $es=0$, а нижнее $ei = -T_d$.

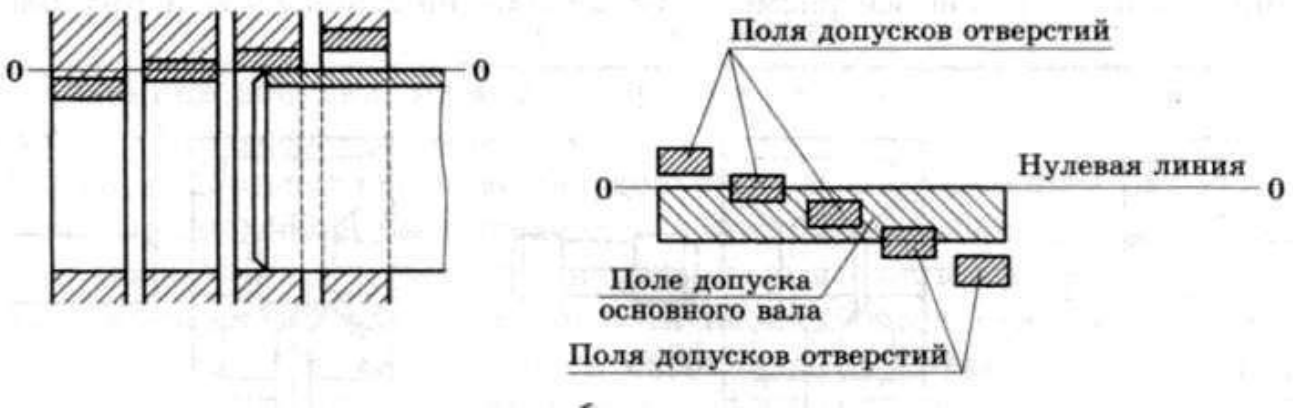
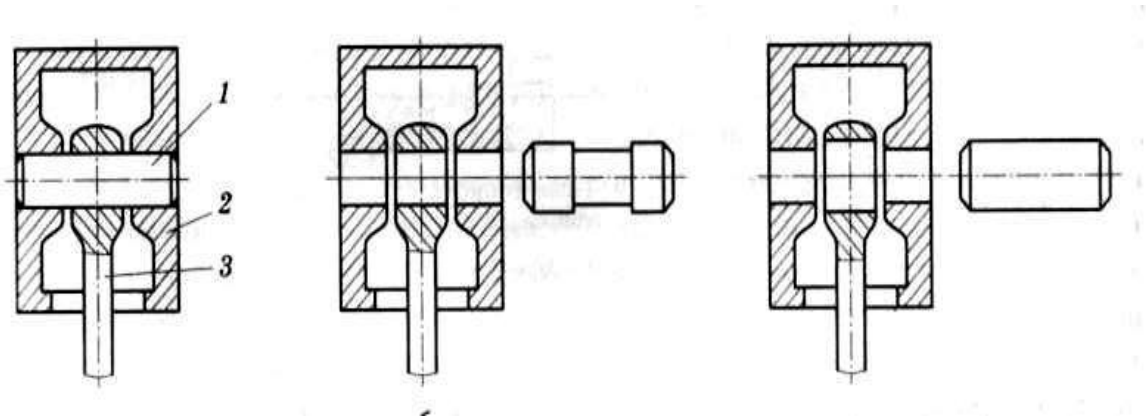


Рис.3.2. посадки в системе вала

Выбор системы посадки (отверстия или вала) определяют исходя из конструктивных, технологических и экономических соображений.

Предпочтительной является система отверстия. Это связано с тем, что отверстия обрабатываются дорогостоящим режущим инструментом (сверлом, протяжкой, зенкером, разверткой и т.п.), предназначенным для обработки только одного размера с определенным полем допуска. Вал, независимо от размера, в большинстве своем обрабатывается одним и тем же инструментом (резцом, шлифовальным кругом). Таким образом, количество типоразмеров инструмента для обработки отверстий будет значительно меньше при назначении посадки в системе отверстия. Система вала применяется в следующих случаях:

- когда на одном валу необходимо чередовать соединения нескольких отверстий одного номинального размера с различными посадками. На рис. 3.3, *а* представлено соединение поршневого пальца *1* с поршнем *2* и шатуном *3*. Для нормальной работы этого узла соединение поршня и пальца должно быть выполнено по неподвижной посадке, а шатуна с пальцем — по подвижной посадке. Назначение посадок в системе отверстия (рис. 3.3, *б)* привело бы к неудобствам при обработке ступенчатого пальца и, главное, к порче отверстия шатуна при сборке. При назначении посадок в системе вала (рис. 3.3, *в*) эти недостатки исключаются.



а *б* *в*

Рис.3.3 Соединение поршневого пальца с поршнем и шатуном двигателя автомобиля;

а – общий вид соединения: 1 – поршневой палец; 2- поршень; 3- шатун; *б*- соединение в системе отверстия*; в*- соединение в системе вала

- система вала также применяется в случаях, когда детали типа валиков или осей изготавливаются из калиброванных холодно-

тянутых прутков, дополнительная механическая обработка которых не предусматривается.

- и, наконец, посадка в системе вала назначается в случаях, когда вал является стандартной деталью или сборочной единицей (штифт, шплинт, шпонка, наружное кольцо подшипника и т.п.).

Необходимо также отметить, что возможно назначение и внесистемных посадок, образованных сочетанием стандартных полей допусков, которые иногда называют комбинированными.

3.3 Ряды основных отклонений

Основное отклонение- это одно из двух предельных отклонений (верхнее или нижнее), по величине и знаку которого определяется положение поля допуска относительно нулевой линии.

По ЕСДП таким отклонением является отклонение, ближайшее к нулевой линии. Стандарт предусматривает 28 рядов основных отклонений для валов и столько же основных отклонений для отверстий. Отклонения валов обозначаются строчными буквами латинского алфавита от *a* до *z*, а отверстия прописными буквами от *A* до *Z*.

Схематично ряды основных отклонений показаны на рис.3.4 Каждому основному отклонению на схеме соответствуют горизонтальная черта, от которой начинается поле допуска. Штриховкой показано направление поля допуска, а второе

отклонение зависит от того, по какому квалитету будет выполнено данное предельное отклонение.

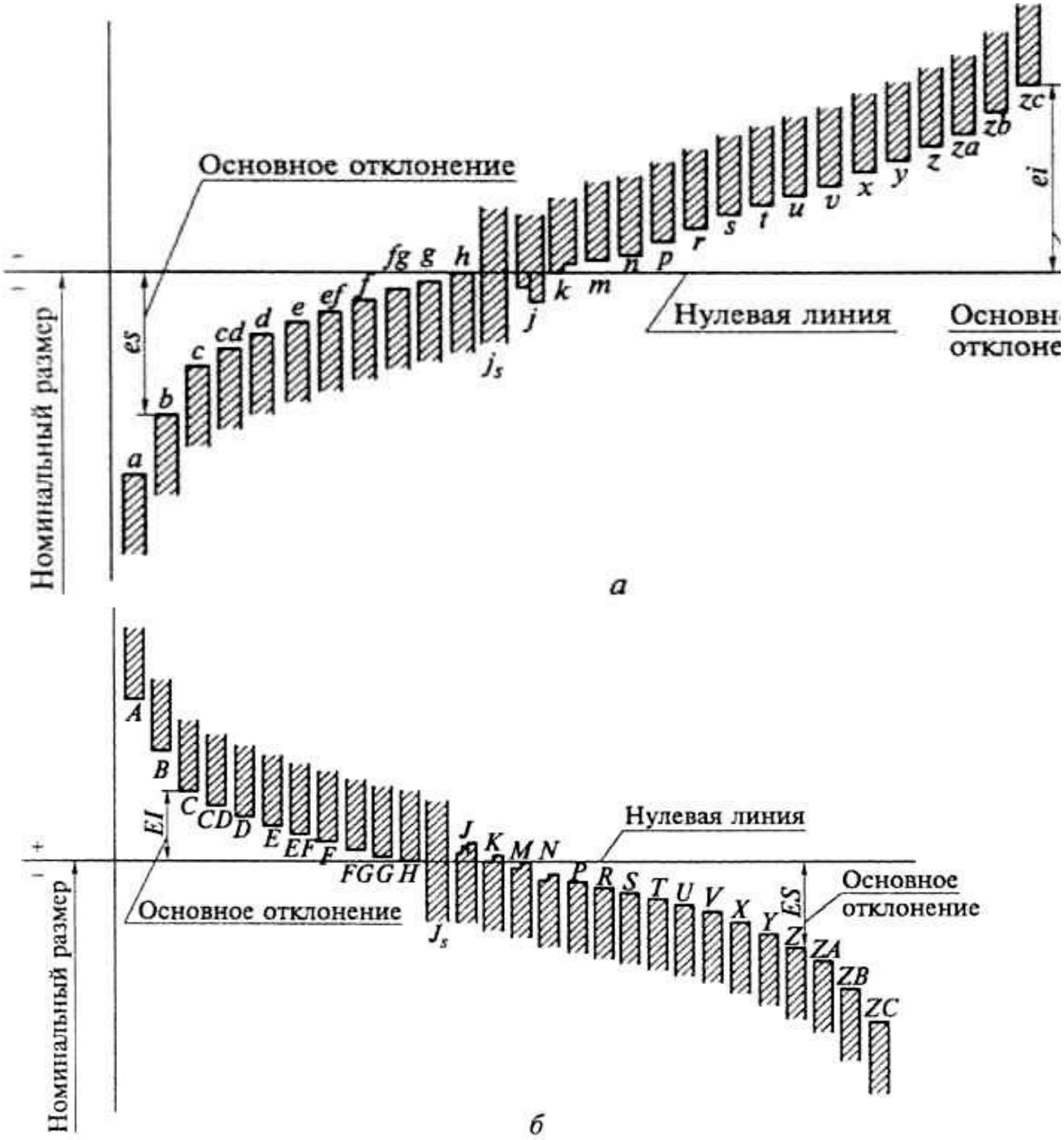


Рис.3.4. основные отклонения для валов (а), для отверстий (б)

3.4 Поля допусков

Поле допуска в ЕСДП образуется сочетанием одного из основных отклонений с допуском по одному из квалитетов. В соответствии с этим поля допусков обозначаются буквой основного отклонения и номерами квалитетов, например

для валов $h6,\ d11,\ b12,\ s8$ и т.д.;

для отверстий $A11,\ H8,\ S7$ и т.д.

По основному отклонению и допуску вычисляют второе предельное отклонение, ограничивающее данное поле допуска.

Если основное отклонение - верхнее, то нижнее отклонение определяют по зависимости:

для вала $ei = es - IT$;

для отверстия $El = ES - IT$.

Если основное отклонение – нижнее, то верхнее отклонение:

для вала $es = ei + IT$;

для отверстия $ES = El + El$.

В системе ЕСДП можно образовывать поля допусков для любого квалитета, что позволяет получить более 500 полей допусков для валов и столько же полей допусков для отверстий. Однако не все возможные поля допусков могут найти применение даже в перспективе, на которую ориентирован стандарт, так как одновременное применение на практике всех полей допусков неприемлемо по экономическим соображениям (затрудняет унификацию изделий, различных инструментов и калибров). В ЕСДП

для диапазона размеров от 1 до 500 мм применяется отбор полей допусков, которые делятся на основные и дополнительные.

Основные поля допусков включают в себя предпочтительные (имеющие первоочередное применение) и рекомендуемые. Дополнительные поля допусков являются полями ограниченного применения и используются тогда, когда применение основных полей допусков не позволяет выполнить требования, предъявляемые к изделию.

3.5 Образование посадок

Посадки в системе ЕСДП образуются сочетанием полей допусков отверстия и вала.

Принципиально допускается любое сочетание полей допусков отверстия и вала. Предпочтение следует отдавать посадкам, образованным в системе отверстия или в системе вала. ГОСТ 25347 -82 устанавливает ряд стандартных посадок в системе отверстия и в системе вала. В каждой системе выделяются предпочтительные посадки, выделенные рамочками.

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный
горный университет»

А. И. Афанасьев, Ю. М. Казаков, С. А. Ляпцев

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Учебно-методическое пособие
и контрольные задания на курсовой проект
«Кинематический, силовой анализ и синтез
плоского механизма»

Екатеринбург
2014

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горно-механического факультета
«20» октября 2014 г.
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

А. И. Афанасьев, Ю. М. Казаков, С. А. Ляпцев

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Учебно-методическое пособие
и контрольные задания на курсовой проект
«Кинематический, силовой анализ и синтез
плоского механизма»

Рекомендовано УМО РАЕ по классическому
университетскому и техническому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника

Издание УГГУ Екатеринбург, 2014

А 94

Рецензент: *Н. М. Суслов*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики 4 сентября 2014 г. протокол № 1 и рекомендовано для издания в УГГУ.

Афанасьев А. И., Казаков Ю. М., Ляпцев С. А.

А94 ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН: учебно-методическое пособие и контрольные задания на курсовой проект «Кинематический, силовой анализ и синтез плоского механизма» для студентов специальности 15.03.06 Мехатроника и робототехника очного и заочного обучения / А. И. Афанасьев, Ю. М. Казаков, С. А. Ляпцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. – 80 с.

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов содержит краткие методические указания, контрольные задания и пример выполнения курсового проекта по теме: «Кинематический и динамический анализ плоского рычажного механизма, синтез профиля кулачка с плоским или роликовым толкателем».

© Афанасьев А. И.,
Казаков Ю. М., Ляпцев С. А., 2014
©Уральский государственный горный университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ 5
ВВЕДЕНИЕ 6
1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА 7
1.1. Структурный анализ механизма 7
1.2. Графическое определение положений звеньев механизма 9
1.3. Кинематический анализ плоского механизма 10
1.4. Силовой анализ механизма 17
1.5. Синтез кулачкового механизма 20
2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ 28
3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА 51
3.1. Структурный анализ механизма 52
3.2. Построение плана механизма 55
3.3. Построение плана скоростей механизма 57
3.4. Построение плана ускорений механизма 61
3.5. Кинетостатический расчёт механизма 66
3.6. Определение движущего момента на валу кривошипа
по методу Н. Е. Жуковского 75
3.7. Построение профиля кулачка 77
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 82

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Задание на курсовой проект по анализу плоского рычажного механизма и синтезу профиля кулачка с плоским или роликовым толкателем включает в себя кинематическую схему механизма и его параметры, вид кулачкового механизма и характер движения толкателя.

Варианты заданий содержат схемы плоских рычажных механизмов, таблицы исходных данных и параметры движения толкателя. Способ выбора варианта задания приведены в разделе 2.

Учебно-методическое пособие содержит сводку основных понятий, необходимых для кинематического и динамического анализа плоского механизма, а также пример выполнения курсового проекта.

Все схемы и чертежи к курсовому проекту выполняются на одном листе формата А1. Пояснительная записка выполняется на листах формата А4. При оформлении записки на титульном листе указать тему курсового проекта, фамилию, инициалы студента, специальность и группу.

При выполнении задания все преобразования и числовые расчёты должны быть последовательно проделаны с необходимыми пояснениями.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение курсового проекта по прикладной механике связано с решением ряда задач по определению рациональных параметров механизмов на основе их кинематического и динамического анализа и последующий синтез механизма. Студент, самостоятельно выполняющий задание, часто сталкивается с трудностями выбора методов решения и вынужден обращаться к соответствующей литературе. К сожалению, в последнее время такой литературы становится все меньше, а справочные материалы, содержащие весь комплекс вопросов, связанных с проектированием механизмов и машин, достаточно редки.

В учебно-методическом пособии приведено решение одной из основных задач курса прикладной механики – **анализ механизма**, который заключается в исследовании кинематических и динамических свойств плоского рычажного механизма по заданной его схеме. Задача **синтеза механизма** в настоящем пособии ограничена конструированием профиля кулачка, обеспечивающего заданное движение толкателя.

В основе методик решения задач курсового проекта лежат фундаментальные положения механики, математики, сопротивления материалов, что позволяет считать курс прикладной механики связующим звеном между общенаучными и специальными дисциплинами. Все излагаемые материалы служат основой выполнения заданий по расчету и проектированию механизмов горных машин и могут быть использованы для самостоятельной работы.

1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1.1. Структурный анализ механизма

Механизм есть система тел, предназначенная для преобразования движения одного или нескольких твердых тел в требуемые движения других твердых тел. Твердое тело, входящее в состав механизма, называется **звеном**. В каждом механизме имеется неподвижное звено, называемое **стойкой,** а также **входное звено,** которому сообщается движение, и **выходное звено,** совершающее заданное движение. Остальные подвижные звенья называются соединительными, или промежуточными.

Подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев называется **кинематической парой**. По характеру соприкосновения звеньев в паре сами пары подразделяются на низшие и высшие. Кинематическую пару называют **низшей**, если соприкосновение происходит по поверхности, и **высшей**, если соприкосновение происходит по линии или в точке. Низшие кинематические пары могут выдерживать большую нагрузку, а высшие имеют меньшие потери на трение.

Число связей, налагаемых кинематической парой, определяет **класс пары**. В курсовом проекте рассматриваются плоские механизмы, в которых все звенья соединены поступательными или вращательными кинематическими парами, относящиеся к пятому классу.

Одним из методов нахождения структурной схемы механизма является метод присоединения к ведущему звену структурных групп Ассура. **Группой Ассура** называется кинематическая цепь, которая в случае ее присоединения элементами внешних пар к стойке получает нулевую степень подвижности, то есть образует ферму. Связь между числом подвижных звеньев группы Ассура и количеством входящих в неё кинематических пар определяется по структур-

ной формуле плоской кинематической цепи: $3n = 2p_5$, где n, p_5 – число подвижных звеньев и число кинематических пар 5-го класса в группе Ассура.

Группы Ассура II класса соответствуют значениям $n = 2$, $p_5 = 3$; группы Ассура III класса – значениям $n = 4$, $p_5 = 6$. На рис. 1.1 приведены возможные виды групп Ассура II класса.

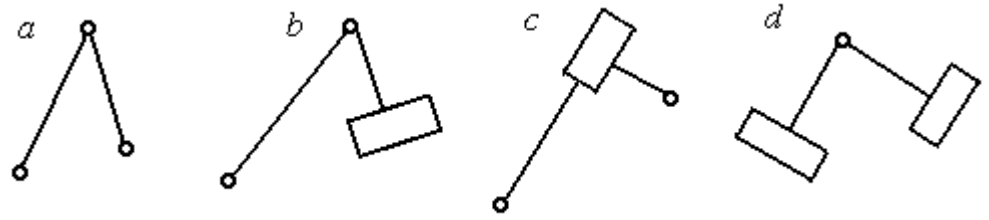


Рис. 1.1. Группы Ассура II класса:
a – первого вида; *b* – второго вида; *c* – третьего вида; *d* – четвёртого вида

Разложение механизма на группы Ассура следует начинать с последней, наиболее отдалённой от ведущего звена и наиболее простой группы.

Структурная классификация механизмов заключается в следующем. Начальное звено и стойка, образующие кинематическую пару 5-го класса, принимаются за **механизм I класса**. Далее исходный механизм разбивается на группы Ассура, присоединяемые к механизму I класса. Для каждой из присоединённых групп Ассура определяется её класс. **Класс механизма** равен максимальному классу входящих в его состав групп Ассура.

Структурным анализом механизма является определение количества звеньев и кинематических пар, определение степени подвижности механизма, а также установление класса механизма. Проводя структурный анализ механизма, необходимо придерживаться следующей схемы решения:

1. Определить количество ведущих звеньев механизма как степень его подвижности, которая может быть вычислена по формуле П. Л. Чебышева для плоских механизмов: $W = 3n - 2p_5$, где n, p_5 – число подвижных звеньев в механизме и число кинематических пар 5-го класса.

2. Изобразить звенья механизма, образующие кинематические пары, определить вид относительного движения звеньев в паре, дать наименование пары и определить её класс.

3. Изобразить группы Ассура механизма, дать им наименование и определить класс.

4. Описать схему образования механизма группами Ассура, определить класс механизма.

Результаты структурного анализа механизма приводятся в табл. 1.1 – 1.2.

Таблица 1.1

Анализ кинематических пар

Обозначение кинематической пары						
Звенья, образующие пару						
Наименование пары						
Класс пары						

Таблица 1.2

Анализ групп Ассура

Группы Ассура			
Наименование группы Ассура			
Класс групп Ассура			
Класс механизма			

1.2. Графическое определение положений звеньев механизма

Построение плана механизма следует начинать с определения масштабного коэффициента длины k_ℓ. Масштабный коэффициент длины выбирается таким образом, чтобы длина самого большого звена $\ell_{\max}$, заданная в метрах, не превышала на чертеже 100 ÷ 150 мм. Тогда масштабный коэффициент длины равен: $k_\ell = \dfrac{\ell_{\max}}{(100-150)} \dfrac{\text{м}}{\text{мм}}$. Например, максимальная длина звена механизма

ℓ_{max} = 0,4 м. Предположим, что на чертеже длина 0,4 м должна быть равной 100 мм. Масштабный коэффициент длины в этом случае равен: $k_\ell = \frac{0,4}{100}$ = = 0,004 $\frac{\text{м}}{\text{мм}}$. В соответствии с выбранным масштабным коэффициентом определяем длины остальных звеньев на чертеже по формуле: $\ell'_i = \frac{\ell_i}{k_\ell}$ мм, где ℓ_i – заданная длина *i*-го звена, м; ℓ'_i – длина *i*-го звена на чертеже, мм.

В начале построения плана механизма на чертеже фиксируются неподвижные точки – оси вращения кривошипа, коромысла и расстояния, определяющие положения прямых, вдоль которых движется ползун. По заданным значениям длины кривошипа и угла, задающего его начальное положение, определяется первая точка плана механизма. Далее построение проводится методом зацепов. Для этого из фиксированных центров проводятся дуги радиусами, равными длинам звеньев механизма, рассчитанным в соответствии с масштабным коэффициентом. Точки пересечения дуг являются точками соединения звеньев механизма.

Построение плана механизма проводится на листе формата А1. Масштаб выбирается самостоятельно.

1.3. Кинематический анализ плоского механизма

1.3.1. Построение плана скоростей плоского механизма

Основу построения плана скоростей составляет векторная формула определения скорости точки *M* плоской фигуры: $\vec{V}_M = \vec{V}_P + \vec{V}_{MP}$, где $\vec{V}_P$ – вектор скорости точки *P*, выбранной за полюс; $\vec{V}_{MP}$ – вектор скорости точки *M* во вращательном движении плоской фигуры относительно полюса *P*. Величина скорости V_{MP} определяется из выражения: $V_{MP} = \omega \cdot MP$, где ω – угловая скорость плоской фигуры.

Чтобы воспользоваться векторной формулой построения скорости точки на чертеже, необходимо выбрать масштабный коэффициент скорости k_v, который равен отношению скорости полюса к длине отрезка, изображающего эту скорость. Для обеспечения требуемой точности длину отрезка принимают равной 40 ÷ 80 мм, тогда $k_v = \frac{V_P}{(40 \div 80)} \ \frac{\text{м/с}}{\text{мм}}$. Построение плана скоростей для заданного положения механизма начинается с определения модуля и направления вектора скорости точки конца кривошипа, которая в дальнейшем принимается за полюс. Результаты вычислений абсолютных и относительных скоростей точек, скоростей центров масс звеньев механизма и их угловых скоростей приводятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Абсолютные скорости центров масс и угловые скорости звеньев

Звено				
Обозначение скорости центра масс звена				
Величина скорости, м/с				
Обозначение угловой скорости звена				
Величина угловой скорости, рад/с				

Построение плана скоростей точек механизма с учётом масштабирования проводится на том же листе формата А1, где изображена схема механизма.

1.3.2. Построение плана ускорений плоского механизма

Построение плана ускорений состоит в многократном применении векторной формулы определения ускорения точки *M* плоской фигуры, совершающей плоское движение: $\vec{a}_M = \vec{a}_P + \vec{a}^{\,n}_{MP} + \vec{a}^{\,\tau}_{MP}$, где $\vec{a}_P$ – ускорение точки *P*, выбранной за полюс; $\vec{a}^{\,n}_{MP}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{MP}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки *M* во вращательном движении плоской фигуры относительно полюса *P*.

Величины ускорений $\vec{a}^{n}_{MP}$, $\vec{a}^{\tau}_{MP}$ определяются из выражений: $a^{n}_{MP} = \omega^2 \cdot MP$, $a^{\tau}_{MP} = \varepsilon \cdot MP$, где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение плоской фигуры. Сложение векторов производится по обычному правилу, когда к концу первого вектора присоединяется второй, к концу второго – третий. Тогда вектор, направленный из начала первого в конец последнего, называется суммой этих векторов.

Чтобы воспользоваться векторной формулой построения ускорения точки на чертеже необходимо выбрать масштабный коэффициент ускорения k_a, который равен отношению ускорения полюса к длине отрезка, изображающего это ускорение. Для обеспечения требуемой точности длину отрезка принимают равной $40 \div 80$ мм, тогда $k_a = \dfrac{a_P}{(40 \div 80)} \ \dfrac{\text{м/с}^2}{\text{мм}}$.

Построение плана ускорений для заданного положения механизма начинается с определения модуля и направления вектора ускорения точки конца кривошипа. Это связано с тем, что ведущее звено – кривошип вращается с постоянной скоростью и потому вектор ускорения точки конца кривошипа совпадает по величине и направлению со своей нормальной составляющей. В дальнейшем точка конца кривошипа принимается за полюс.

Результаты вычислений ускорений центров масс звеньев, а также угловых ускорений звеньев механизма приводятся в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Ускорения центров масс звеньев механизма и угловые ускорения звеньев

Звено				
Обозначение ускорения центра масс звена				
Величина ускорения, м/с^2				
Обозначение углового ускорения звена				
Величина углового ускорения, рад/с^2				

Построение плана ускорений точек механизма с учётом масштабирования проводится на том же листе формата А1, где изображены схема механизма в заданном положении и план скоростей.

1.3.3. Особенности построений планов скоростей и ускорений кулисного механизма

В кулисных механизмах одно из звеньев, называемое *кулисным камнем*, может перемещаться поступательно относительно другого подвижного звена – *кулисы* (на рис. 1.2 звено 2 является кулисой). В результате кулисный камень совершает **сложное движение**.

Напомним, что сложное движение твердого тела раскладывается на два составляющих движения: относительное (относительно подвижной системы отсчета) и переносное (движение подвижной системы отсчета относительно неподвижной).

Скорость точки в сложном движении определяется как векторная сумма: $\vec{V}_M = \vec{V}_r + \vec{V}_e$, где $\vec{V}_M$ – абсолютная скорость точки; $\vec{V}_r$ – скорость точки в относительном движении; $\vec{V}_e$ – скорость той точки подвижной системы отсчета, с которой в данный момент времени совпадает подвижная точка (переносная скорость точки).

При определении ускорения точки в сложном движении следует, наряду с относительным и переносным ускорением, учитывать ускорение Кориолиса: $\vec{a}_M = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_K$. Для плоского переносного движения модуль ускорения Кориолиса равен: $a_K = 2\omega V_r$.

Рассмотрим пример построения планов скоростей и ускорений для кулисного механизма (рис. 1.2, *a, b*). Проведем графические построения для положения механизма, в котором кривошип *OA* (звено 1) перпендикулярен линии O_1O. Предположим следующие исходные данные: OA = 0,2 м; O_1O = 0,34 м; угловая скорость кривошипа ω_1 = 10 рад/с.

Начальное звено 1 совершает вращательное движение, и потому скорость точки A звена 1 $\vec{V}_{A1}$ находится как $V_{A1} = \omega_1 \cdot OA$ = 10·0,2 = 2 м/с. Вектор скорости $\vec{V}_{A1}$ направлен перпендикулярно звену 1 в сторону его движения.

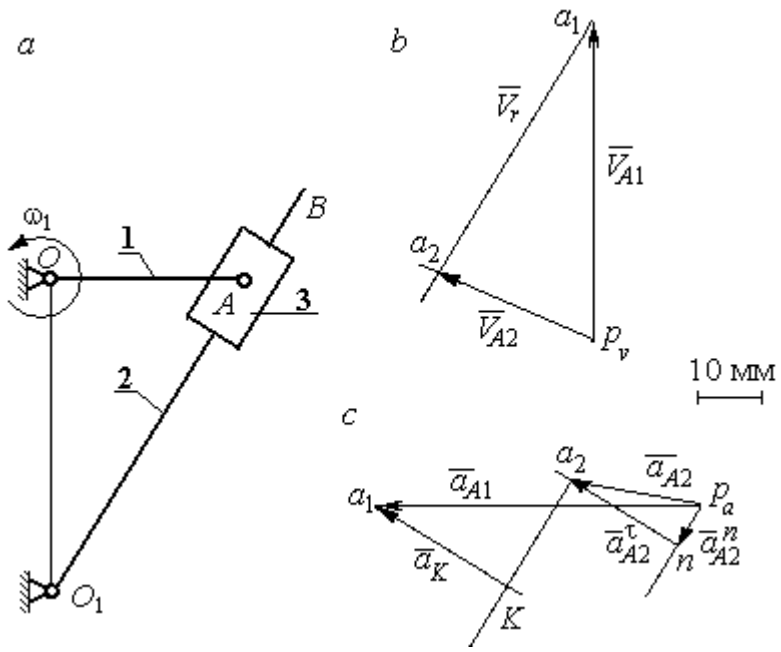


Рис. 1.2 Кинематика кулисного механизма:
a – схема механизма; *b* – план скоростей; *c* – план ускорений

Выбрав произвольную точку p_v за полюс плана скоростей (см. рис. 1.2, *b*), изобразим вектор скорости $\vec{V}_{A1}$, задавшись его длиной l_{V_A} = 50 мм на плане скоростей. В этом случае масштабный коэффициент скорости $k_v = \dfrac{V_A}{l_{V_A}} = \dfrac{2}{50}$ = 0,04 (м/с)/мм. В конце вектора $\vec{V}_{A1}$ на плане скоростей отметим точку a_1.

Точка A кулисного камня 3 совершает сложное движение. Относительным движением точки будет движение камня вдоль прямой O_1B, переносным – вращение звена 2 вокруг оси O_1. В результате абсолютная скорость точки (скорость $\vec{V}_{A1}$) может быть представлена в виде суммы векторов относительной и переносной скоростей: $\vec{V}_{A1} = \vec{V}_r + \vec{V}_{A2}$. Вектор переносной скорости точки A звена 2 $\vec{V}_{A2}$ направлен перпендикулярно к O_1A (так как переносное движение

вращательное), а вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ – вдоль прямой O_1A (так как относительное движение прямолинейное).

Из полюса плана скоростей проведём прямую, перпендикулярную O_1A – направление переносной скорости $\vec{V}_{A2}$, а из точки a_1 – прямую, параллельную O_1A – направление относительной скорости $\vec{V}_r$. Обозначим точку пересечения этих прямых a_2. Тогда отрезок $p_v a_2$ в выбранном масштабе отображает переносную скорость.

Измерив на плане скоростей (рис. 1.2, *b*) отрезок $p_v a_2$ ($p_v a_2 = 25$ мм), найдем величину переносной скорости $V_{A2} = p_v a_2 \cdot k_v$ = 25·0,04 = 1 м/с. Аналогично, измерив отрезок $a_1 a_2$ (43 мм), получим величину относительной скорости $V_r = a_1 a_2 \cdot k_v$ = 43·0,04 = 1,72 м/с. При заданном направлении движения вектор относительной скорости направлен от a_2 к a_1.

Вычислив длину O_1A в данном положении механизма $O_1A = \sqrt{(OA)^2 + (O_1O)^2} = \sqrt{0{,}2^2 + 0{,}34^2} = 0{,}39$ м, найдём величину угловой скорости звена 2 как отношение $\omega_2 = \dfrac{V_{A2}}{O_1A} = \dfrac{1}{0{,}39} = 2{,}56$ рад/с.

Переходим к построению ***плана ускорений***. При равномерном вращении звена 1 ускорение точки *A* звена 1 равно: $a_{A1} = a^n_{A1} = \omega_1^2 \cdot OA$ = 100·0,2 = 20 м/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_{A1}$ направлен вдоль звена 1 от точки *A* к оси вращения *O*.

Выбрав произвольную точку p_a за полюс плана ускорений (рис. 1.2, *c*), изобразим вектор ускорения $\vec{a}_{A1}$, положив его длину на плане l_{a_A} = 50 мм. Тогда масштабный коэффициент ускорения $k_a = \dfrac{a_{A1}}{l_{a_A}} = \dfrac{20}{50}$ = 0,4 (м/с^2)/мм.

В конце вектора $\vec{a}_{A1}$ на плане ускорений отметим точку a_1.

Абсолютное ускорение $\vec{a}_{A1}$ может быть представлено в виде векторной суммы: $\vec{a}_{A1} = \vec{a}_r + \vec{a}_{A2} + \vec{a}_K$, где ускорение точки *A* звена 2 (переносное ускоре-

ние $\vec{a}_{A2}$) имеет две составляющие: $\vec{a}_{A2} = \vec{a}^{n}_{A2} + \vec{a}^{\tau}_{A2}$. В результате абсолютное ускорение $\vec{a}_{A1}$ представляется в виде: $\vec{a}_{A1} = \vec{a}_r + \vec{a}^{n}_{A2} + \vec{a}^{\tau}_{A2} + \vec{a}_K$.

Величина нормального ускорения в переносном движении $a^{n}_{A2} = \omega_2^2 \cdot O_1A =$ 2,56²·0,39 = 2,56 м/с². Вектор ускорения направлен вдоль звена 2 от точки *A* в сторону оси вращения O_1.

Ускорение Кориолиса $a_K = 2\omega_2 V_r =$ 2·2,56·1,72 = 8,81 м/с², вектор ускорения перпендикулярен звену 2 и направлен в сторону переносного вращения.

На плане ускорений из полюса ускорений p_a параллельно линии AO_1 изображаем вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}^{n}_{A2}$ длиной $l_{a^{n}_{A2}} = \dfrac{a^{n}_{A2}}{k_a} = \dfrac{2,56}{0,4}$ = 6,4 мм. В конце вектора ставим точку *n*.

Касательная составляющая переносного ускорения точки *A* звена 2 $\vec{a}^{\tau}_{A2}$ перпендикулярна линии AO_1. На плане ускорений из точки *n* перпендикулярно вектору $\vec{a}^{n}_{A2}$ (линии p_an) проводим прямую, показывающую направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{A2}$ – касательной составляющей ускорения точки *A*.

Сумма ускорений должна быть равна абсолютному ускорению $\vec{a}_{A1}$. Тогда векторный многоугольник должен замкнуться в точке a_1. Для этого построим вектор ускорения Кориолиса перпендикулярно линии AO_1 так, чтобы он был направлен в точку a_1. Длина вектора на плане $l_{a_K} = \dfrac{a_K}{k_a} = \dfrac{8,81}{0,4} =$ 22,03 мм. Начало вектора обозначим точкой *K*.

Относительное ускорение точки *A* направлено вдоль звена 2 (линии AO_1), поэтому на плане ускорений из точки *K* проводим перпендикуляр к a_1K до пересечения с прямой, перпендикулярной p_an, показывающей направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{A2}$ – касательной составляющей ускорения точки *A*. Полученную точку обозначим a_2.

Таким образом, на плане ускорений (рис. 1.2, *с*) вектор na_2 отображает касательную составляющую ускорения точки *A* в переносном движении, a_2K – относительное ускорение, Ka_1 – ускорение Кориолиса.

Соединив точку p_a с точкой a_2, найдем ускорение точки *A* звена 2. Измерив на плане расстояние $p_a a_2$ (23 мм), найдём величину ускорения $a_{A2} = p_a a_2 \cdot k_a = 23 \cdot 0{,}4 = 9{,}2$ м/с^2.

Результаты вычислений ускорений центров масс звеньев, а также угловых ускорений звеньев механизма приводятся в таблице, аналогичной табл. 1.4.

Построение плана ускорений точек механизма с учётом масштабирования проводится на том же листе формата А1, где изображены схема механизма в заданном положении и план скоростей.

1.4. Силовой анализ механизма

1.4.1. Определение движущего момента, приведённого к оси вала кривошипа, на основе кинетостатического расчёта механизма

Кинетостатическим расчётом механизма называется его силовой расчёт с учётом сил инерции. В первом приближении расчёт производится без учёта сил трения в кинематических парах. Реакции определяются в кинематических парах по группам Ассура. Расчёт реакций производится на основании принципа Д'Аламбера, согласно которому все силы, приложенные к механизму (или части его), уравновешиваются силами инерции.

Модули главных векторов сил инерции звеньев механизма и главных моментов сил инерции определяют по формулам: $F^{ин} = ma_S$, $M^{ин} = J_S \varepsilon$, где $F^{ин}$, $M^{ин}$ – модули главных векторов сил инерции звеньев механизма и главных моментов сил инерции; a_S, ε – ускорение центра масс звена и его угловое ускорение; J_S – момент инерции звена относительно его центра масс.

Силовой расчёт производится в следующей последовательности:

1. На чертеже в выбранном масштабе изображается группа Ассура. Расчёт начинается с последней – рабочего органа.

2. В соответствующих точках звеньев прикладываются силы. Силы тяжести из центров тяжести звеньев направляют вертикально вниз. Главные векторы сил инерции звеньев изображаются согласно плану ускорений в сторону, противоположную ускорению центра масс данного звена. Направление главного момента сил инерции противоположно направлению углового ускорения звена, задаваемого касательной составляющей ускорения.

3. Реакции во вращательных кинематических парах раскладывают на две составляющие – вдоль одного из звеньев и перпендикулярно ему. Реакцию стойки на ползун изображают перпендикулярно направляющим ползуна.

4. Неизвестные силы реакции определяются из уравнений равновесия в форме равенства нулю суммы моментов всех сил и из силового многоугольника, выражающего равенство нулю векторной суммы всех сил.

При построении силового многоугольника (плана сил) необходимо выбрать масштабный коэффициент так, чтобы длина максимального вектора была не более $150 \div 200$ мм.

5. На ведущее звено механизма – стойку и кривошип – действуют сила тяжести кривошипа, приложенная на его оси вращения, и реакция шарнира A в конце кривошипа.

Движущий момент, приведённый к оси вала кривошипа и обеспечивающий вращение кривошипа с постоянной угловой скоростью, прикладывается к кривошипу и находится из уравнения моментов сил, действующих на ведущее звено.

1.4.2. Определение движущего момента, приведённого к валу кривошипа, по методу Н. Е. Жуковского

Для вычисления движущего момента, приведённого к валу кривошипа, необходимо знать уравновешивающую силу.

Величина уравновешивающей силы определяется по методу «жёсткого рычага» Н. Е. Жуковского следующим образом:

1. Вычисляем силы тяжести, для чего заданные массы звеньев умножаем на ускорение свободного падения (принимаем g = 9,8 м/с^2).

2. Вычисляем силы инерции, действующие на механизм. Для этого заданные массы звеньев умножаем на ускорения центров тяжести этих звеньев, которые определили при построении плана ускорения.

3. Вычисляем моменты сил инерции, действующие на механизм. Для этого заданные моменты инерции звеньев относительно их центров тяжести умножаем на угловые ускорения звеньев, которые определили при построении плана ускорения.

Определение приведенной силы «методом жесткого рычага» сводится к следующему:

– строится повернутый на 90° план скоростей механизма;

– в соответствующих точках плана скоростей изображаются заданные силы и силы инерции;

– момент каждой пары сил представляется как две антипараллельные силы, приложенные в двух произвольных точках звена (обычно, крайних точках), направленных перпендикулярно отрезку, соединяющему эти точки;

– уравновешивающую силу $F_{\text{ур}}$ прикладывают в крайней точке кривошипа, перпендикулярно ему. Величина уравновешивающей силы находится по теореме Н. Е. Жуковского, что сумма моментов всех действующих на механизм сил, приложенных к соответствующим точкам повёрнутого на 90º плана скоростей механизма, относительно полюса равна нулю.

Величина приведенного к валу кривошипа движущего момента равна: $M_{\text{пр}} = F_{\text{ур}} \ell_{\text{кр}}$, где $F_{\text{ур}}$ – уравновешивающая сила, приведённая к кривошипу; $\ell_{\text{кр}}$ – длина кривошипа.

В конце расчётов проводится сравнение результатов и определяется относительная величина погрешности расчёта движущего момента методом кинетостатического анализа по сравнению с методом Н. Е. Жуковского.

1.5. Синтез кулачкового механизма

Рассматривается процесс синтеза кулачкового механизма с центральным плоским и нецентральным роликовым толкателем, состоящий в определении профиля кулачка по заданному закону движения толкателя.

1.5.1. Построение кинематических диаграмм движения толкателя

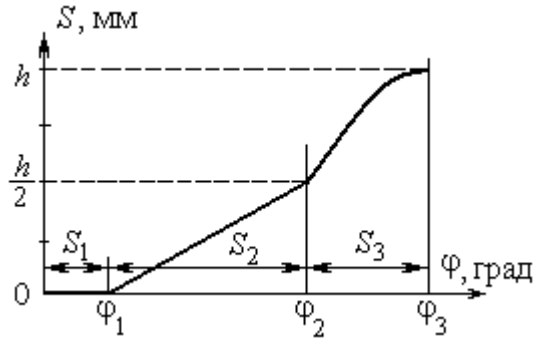
Целью построения кинематических диаграмм перемещения толкателя и аналога его скорости в зависимости от угла поворота кулачка является необходимость определения в дальнейшем зависимости аналога скорости толкателя от его перемещения. Такой график, обычно, строится по точкам.

Движение толкателя может быть задано как законом изменения пути, пройденного толкателем, в зависимости от угла поворота кулачка, так и законами изменения аналогов скорости и ускорения в той же зависимости.

Если движение толкателя задано законом перемещения толкателя $S(\varphi)$, то для получения аналога скорости следует произвести дифференцирование: $S' = \frac{dS}{d\varphi}$. Если движение толкателя задано законом изменения аналога ускорения $S''(\varphi)$, то для получения аналога скорости и перемещения толкателя необходимо произвести двукратное интегрирование: $S' = \int S'' d\varphi$, $S = \int S' d\varphi$.

Рассмотрим пример построения графиков. Предположим, закон движения толкателя при его подъёме в зависимости от угла поворота кулачка задан графически (рис. 1.4). В задании уточняется аналитический вид законов (линейный или параболический) по фазам движения кулачка.

График движения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.



$S_{\max} = h = 20$ мм

Вид законов движения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$, $S_1 = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$.

Линейный закон движения.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$.

Параболический закон движения, вершина параболы при $\varphi = \varphi_3$.

$\varphi_1 = 60^\circ$, $\varphi_2 = 130^\circ$, $\varphi_3 = 180^\circ$

Рис. 1.4. Примерный закон движения толкателя

При заданном законе движения толкателя на первом участке движения при $0 < \varphi < \varphi_1$ перемещения толкателя нет (см. рис. 1.4).

На втором участке движение толкателя происходит по линейному закону в виде: $S_2 = a_2\varphi + b_2$. Из графика найдём величину перемещения толкателя в граничных точках участка φ_1 и φ_2: $S_2(\varphi_1) = 0$ и $S_2(\varphi_2) = \frac{h}{2}$ = 10 мм. Подставляя их в уравнение движения (при этом значения граничных точек $\varphi_1 = 60^\circ$, $\varphi_2 = 130^\circ$ следует перевести в радианы), получим два алгебраических уравнения относительно неизвестных a_2 и b_2: $0 = a_2 \cdot 1{,}05 + b_2$, $10 = a_2 \cdot 2{,}27 + b_2$.

Решая систему, находим a_2 = 8,20; b_2 = – 8,61. Таким образом, закон движения толкателя на втором участке $S_2 = 8{,}20\varphi - 8{,}61$ при $1{,}05 < \varphi < 2{,}27$.

Аналог скорости толкателя на этом участке не зависит от угла поворота кулачка и равен: $S_2' = \frac{dS_2}{d\varphi} = 8{,}20$ мм/рад.

На третьем участке, на отрезке $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$, толкатель движется по параболическому закону. Представим закон движения в виде: $S_3 = a_3\varphi^2 + b_3\varphi + d_3$, где коэффициенты a_3, b_3, d_3 подлежат определению. Первые два уравнения

для определения коэффициентов получим, подставив в уравнение параболы её значения в граничных точках: при φ_2 = 2,27 рад $S_3(\varphi_2)=\frac{h}{2}=10$ мм и при φ_3 = 3,14 рад $S_3(\varphi_3)=h=20$ мм. Получим уравнения:

$$10=a_3\cdot 2{,}27^2+b_3\cdot 2{,}27+d_3,\ \ 20=a_3\cdot 3{,}14^2+b_3\cdot 3{,}14+d_3.$$

По условию вершина параболы находится в точке $\varphi=\varphi_3$, следовательно, выполняется равенство: $S_3'(\varphi_3)=0$. Третье уравнение найдём, подставив координату точки вершины параболы (φ_3 = 3,14) в уравнение $S_3'=2a_3\varphi+b_3=0$. Получим: $2a_3\cdot 3{,}14+b_3=0$. Решая совместно систему уравнений

$$10=a_3\cdot 5{,}15+b_3\cdot 2{,}27+d_3,\ \ 20=a_3\cdot 9{,}86+b_3\cdot 3{,}14+d_3,\ \ a_3\cdot 6{,}28+b_3=0$$

Найдём коэффициенты: a_3 = –13,33; b_3 = 83,71; d_3 = – 111,37.

Окончательно, закон движения толкателя на третьем участке

$$S_3=-13{,}33\varphi^2+83{,}71\varphi-111{,}37\quad \text{при } 2{,}27\le\varphi\le 3{,}14.$$

Соответственно, аналог скорости $S_3'=-26{,}66\varphi+83{,}71$ мм/рад.

Графики движения толкателя и аналога его скорости приведены на рис. 1.5, *a, b*. Масштабы выбраны произвольно.

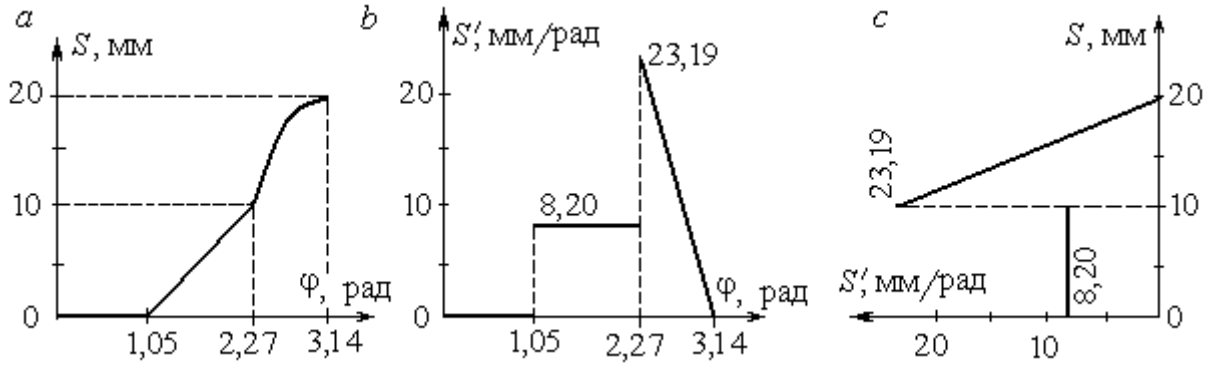


Рис. 1.5. Кинематические диаграммы движения толкателя:
a – график перемещения; *b* – график аналога скорости; *c* – зависимость аналога скорости от перемещения толкателя

График зависимости аналога скорости S' от перемещения толкателя S, построенный по точкам, взятым с диаграмм перемещения на фазе подъёма кулачка, приведён на рис. 1.5, *c*. Ось S, обычно, располагают вертикально вверх,

а ось S' – горизонтально влево. Масштабные коэффициенты по обеим осям должны быть одинаковы и равны масштабному коэффициенту длины.

1.5.2. Синтез кулачкового механизма с центральным плоским толкателем

На рис. 1.6 изображена расчётная схема кулачкового механизма с центральным плоским толкателем. Обозначения, принятые на схеме: φ – угол поворота кулачка; R_0 – минимальный начальный радиус кулачка; β – угол давления кулачка в точке контакта с толкателем; S – перемещение толкателя; R – радиус-вектор точки контакта кулачка с толкателем; θ – полярный угол радиус-вектора R в точке контакта.

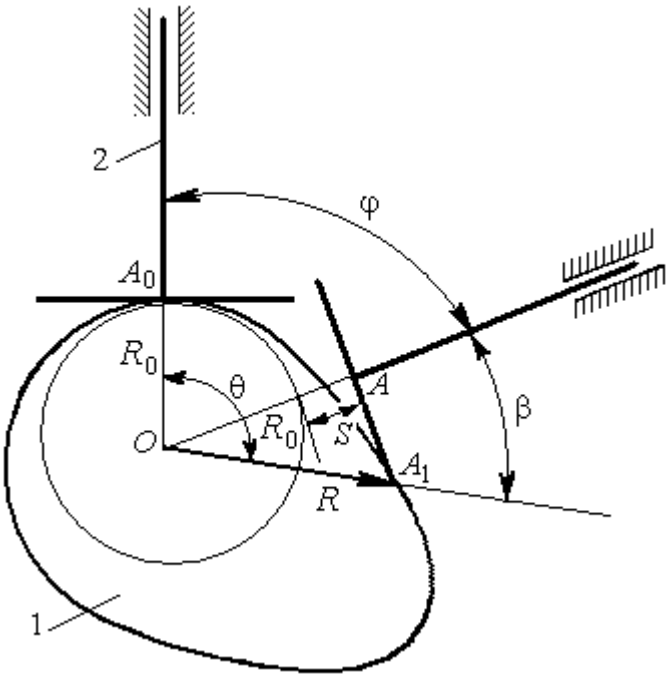


Рис. 1.6. Расчётная схема кулачкового механизма с центральным плоским толкателем: 1 – профиль кулачка с осью вращения в точке *O*; 2 – плоский толкатель, движущийся поступательно

Для построения профиля кулачка используется метод инверсии (обращения движения), при котором вращение подвижного кулачка заменяется поворотом толкателя вокруг неподвижного кулачка.

Построение профиля кулачка начинается с определения начального (минимально допустимого) радиуса кулачка R_0. Для этого необходимо:

1. Построить график зависимости аналога скорости S' от перемещения толкателя S.

2. Задаться максимально допустимым значением угла давления $\theta_{доп}$, которое для кулачка с плоским толкателем находится в пределах $20^\circ \le \theta_{доп} \le 30^\circ$.

3. Под углом $\theta_{доп}$ к оси S построить прямую, касательную к графику $S'(S)$, и путём измерения на графике соответствующих расстояний, определить координаты S_B и S'_B точки касания.

4. Вычислить начальный радиус кулачка R_0, который связан с максимальным значением угла давления соотношением: $\mathrm{tg}\theta_{доп} = \dfrac{S'_B}{R_0 + S_B}$.

Вычисление начального радиуса R_0 кулачка с центральным плоским толкателем рассмотрим на примере движения толкателя, разобранного в предыдущем п. 1.5.1, и где построен график зависимости аналога скорости толкателя от перемещения.

Положим, что максимально допустимое значение угла давления равно $\theta_{доп}$ = 27º.

На графике зависимости аналога скорости толкателя от перемещения (рис. 1.7) проведём прямую *aa* под углом $\theta_{доп}$ к оси перемещений *S* и касающуюся графика. Точку пересечения касательной с осью *S* обозначим *O*, а точку касания с графиком – *B*. Расстояние *AO* на графике с учётом масштабного коэффициента длины выражает величину начального радиуса R_0.

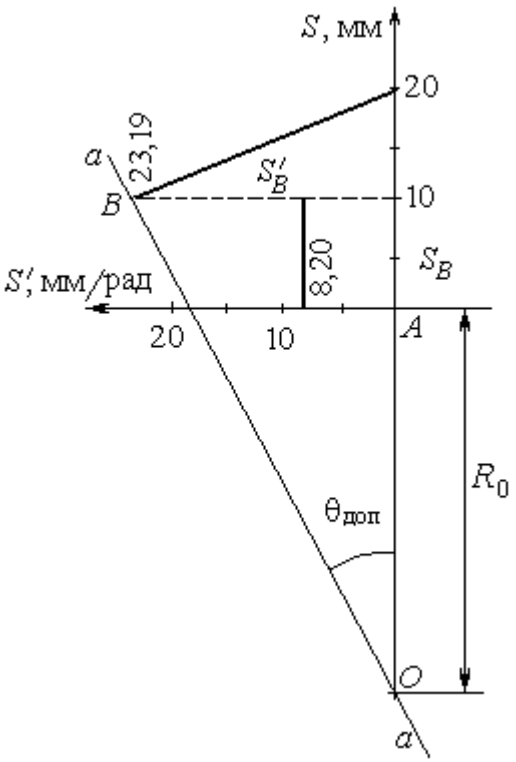


Рис. 1.7. Схема вычисления начального радиуса кулачка с центральным толкателем

Обозначим координаты точки *B* на графике S'_B и S_B. В рассматриваемом примере в соответствии с масштабом длин координаты точки *B*: S'_B= 23,19 мм/рад, S_B=10 мм. Соотношение между выбранным допустимым углом давления и

начальным радиусом имеет вид: $\mathrm{tg}27^\circ = 0{,}51 = \dfrac{S'_B}{R_0 + S_B} = \dfrac{23{,}19}{R_0 + 10}$, откуда величина начального радиуса $R_0 = 35{,}47$ мм.

Построение профиля кулачка производится в полярной системе координат. Для этого, задавшись углом φ поворота толкателя, необходимо найти полярный угол θ радиус-вектора R в точке контакта A_1 (см. рис. 1.6):

$$\theta = \varphi + \beta = \varphi + \mathrm{arctg}\,\frac{S'}{R_0 + S},$$

где S' и S – аналог скорости толкателя и его перемещение при одном и том же значении угла φ поворота толкателя. Длина радиус-вектора R в точке контакта находится по формуле: $R = \sqrt{(R_0 + S)^2 + (S')^2}$.

Отмечая точками на графике длины радиус-векторов, вычисленных при соответствующих полярных углах θ, и обводя их гладкой кривой линией, получим профиль кулачка. Масштаб длин выбирается произвольно.

Для более точного построения профиля желательно внутри каждой фазы движения толкателя выбирать по два – три значения угла поворота кулачка.

1.5.3. Синтез кулачкового механизма с роликовым толкателем

Построение профиля кулачка со смещённым роликовым толкателем начинается с определения начального (минимально допустимого) радиуса кулачка R_0. Величина начального радиуса кулачка со смещённым толкателем находится следующим образом:

1. Построить график аналога скорости S' толкателя в зависимости от его перемещения S.

2. Выбрать максимально допустимое значение угла давления $\theta_{\text{доп}}$ (для кулачка с роликовым толкателем находится в пределах $20^\circ \le \theta_{\text{доп}} \le 45^\circ$).

3. Под углом $\theta_{доп}$ к оси S построить прямую aa, касательную к графику $S'(S)$.

4. Параллельно оси S на расстоянии e (смещение оси толкателя относительно оси вращения кулачка) провести прямую до пересечения её с касательной aa в точке O' (см. рис. 1.8).

Расстояние $O'A$ выражает величину начального радиуса R_0, которая находится путём измерения её на графике.

Выбор начального минимально допустимого радиуса кулачка R_0 показан на рис. 1.8 на примере с исходными данными движения толкателя, взятыми из п. 1.5.1 при $\theta_{доп} = 30^{\circ}$, $e = 5$ мм.

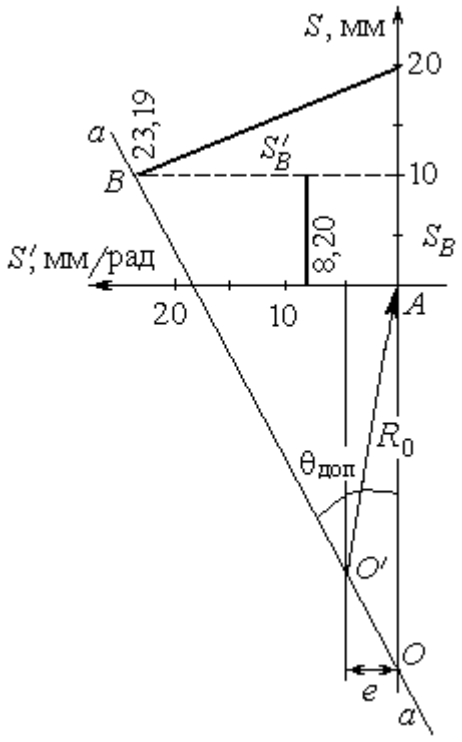


Рис. 1.8. Схема вычисления начального радиуса кулачка с нецентральным толкателем

Расчетная схема для определения профиля кулачка с роликовым толкателем со смещением изображена на рис. 1.9.

Обозначения, принятые на схеме: φ – угол поворота кулачка; R_0 – минимальный начальный радиус кулачка; S – перемещение толкателя; R – радиус-вектор центра ролика толкателя; θ – полярный угол радиус-вектора R в точке контакта относительно начального положения центра роликового толкателя; β – угол для промежуточных вычислений; S_0 – начальная высота центра ролика толкателя относительно оси вращения кулачка; e – смещение оси толкателя относительно оси вращения кулачка (дезаксиал).

Построение профиля кулачка производится в полярной системе координат. Для этого сначала строим окружность радиусом e (см. рис. 1.9), равным величине дезаксиала, и с центром в точке O. Затем из того же центра проводим окружность радиусом R_0. Проводим вертикальную касательную CB_0 к окруж-

ности радиуса e до пересечения её с окружностью радиусом R_0. Точка пересечения B_0 является центром ролика в начальном положении толкателя.

В обращенном движении ось толкателя всегда расположена вдоль касательной к окружности радиуса e.

Задавшись углом φ поворота толкателя, необходимо найти полярный угол θ радиус-вектора R при перемещении центра ролика из положения B_0 в положение B_1. С учётом, что $B_2C_1 = S_0$, $S_0 = \sqrt{R_0^2 - e^2}$ и $B_1B_2 = S$ (см. рис. 1.9), угол θ находится по формуле

$$\theta = \varphi + \operatorname{arctg}\frac{S_0 + S}{e} - \operatorname{arctg}\frac{S_0}{e}.$$

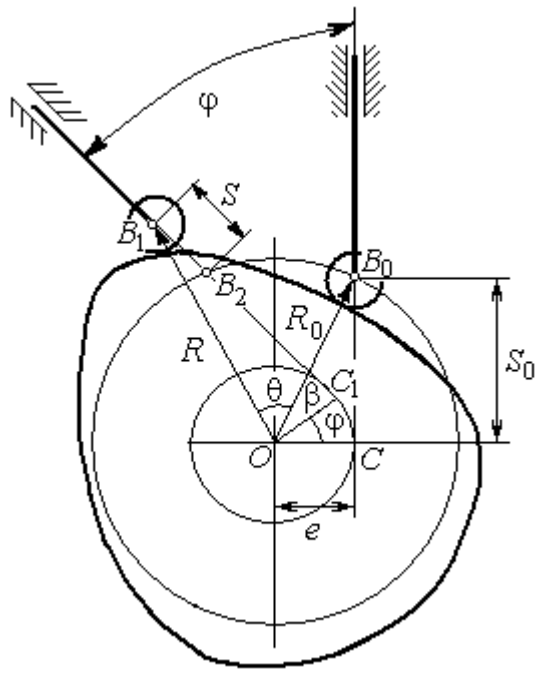


Рис.1.9. Расчётная схема построения профиля кулачка с роликовым толкателем

Величина радиуса-вектора R для данного угла θ:

$$R = \sqrt{(S_0 + S)^2 + e^2}.$$

Отмечая точками на графике длины радиус-векторов, вычисленных при соответствующих полярных углах θ, и обводя их гладкой кривой линией, получим профиль кулачка.

Масштаб длин выбирается произвольно.

Для более точного построения профиля желательно внутри каждой фазы движения толкателя выбирать по два – три значения угла поворота кулачка.

2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

При курсовом проектировании механизма необходимо выполнить следующие виды работ:

– провести структурный анализ механизма;

– выполнить кинематический анализ механизма, для чего при заданном положении кривошипа построить планы механизма, скоростей и ускорений (масштабы выбираются самостоятельно); определить ускорения центров масс звеньев механизма и их угловые ускорения;

– провести кинетостатический расчёт механизма и определить усилия в кинематических парах; определить движущий момент, приведённый к оси вала кривошипа;

– определить величину движущего момента, приведённого к оси вала кривошипа, с помощью «жесткого рычага» Н. Е. Жуковского и провести оценку расхождения результата по сравнению с кинетостатическим расчётом;

– определить профиль кулачка механизма, обеспечивающий заданное движение толкателя.

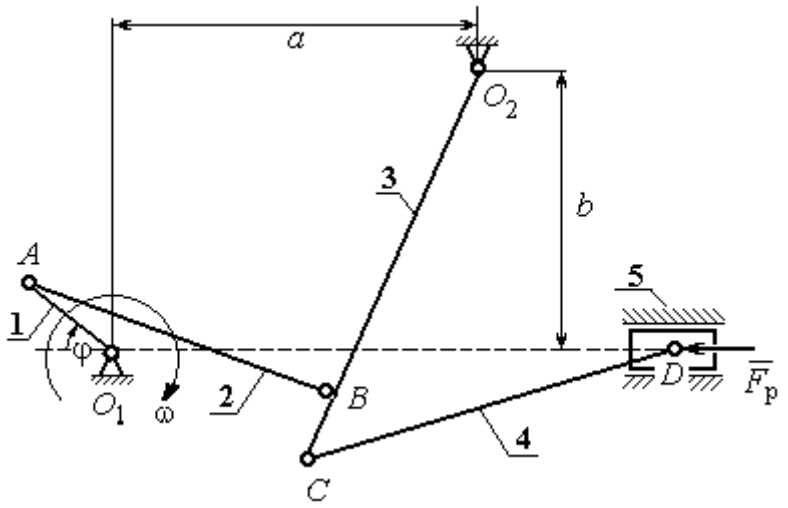
По результатам расчетов на листе формата А1 сделать чертежи плана механизма, плана скоростей, плана ускорений, схему «жесткого рычага» Н. Е. Жуковского и эскизный чертёж профиля кулачка.

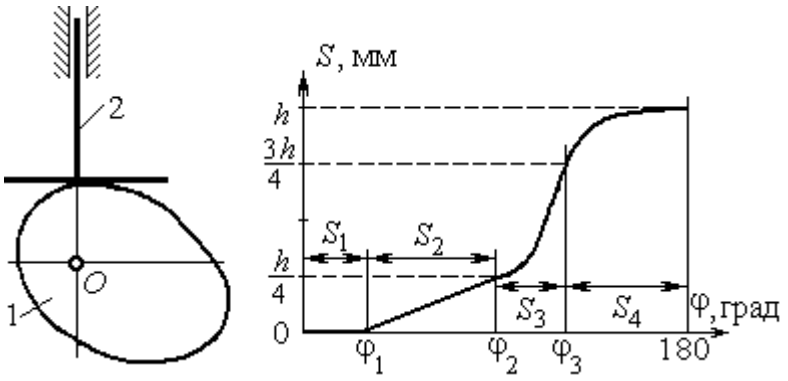
Пояснительная записка выполняется на листах формата А4.

Варианты заданий № 1 – 9, 0 приведены на рис. 2.1 – 2.10. Исходные данные для всех вариантов заданий приведены в табл. 2.1 – 2.10.

При выборе задания на курсовой проект номер варианта задания (номер схемы) соответствует последней цифре в зачётке студента. Номер варианта исходных данных выбирается из таблицы с исходными данными по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

Задание № 1. Инерционный конвейер





$S_{\max} = h$

Вид законов движения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$. Движения нет, $S_1 = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Линейный закон движения.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$. Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_2$.

4-й участок $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$. Парабола с вершиной при $\varphi = 180^\circ$

Рис. 2.1. Схема механизма инерционного конвейера и закон движения плоского центрального толкателя кулачкового механизма

Инерционный конвейер состоит из кривошипа 1 шатуна 2, коромысла 3, шатуна 4 и рештака (ползуна) 5. Центр масс кривошипа расположен на оси вращения в точке O_1, а центры масс остальных звеньев – посередине их длин. Сила сопротивления движению рештака постоянна и равна F_p. Рабочий ход слева – направо. На холостом ходу сила сопротивления составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и плоский толкатель 2. Линия движения толкателя проходит через ось вращения кулачка O. Закон пере-

мещения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^{\circ}$. График движения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

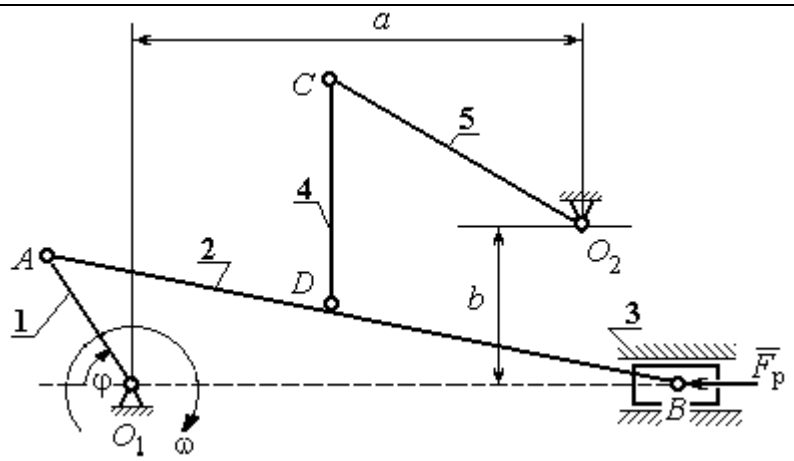
Варианты исходных данных задания № 1 приведены в табл. 2.1.

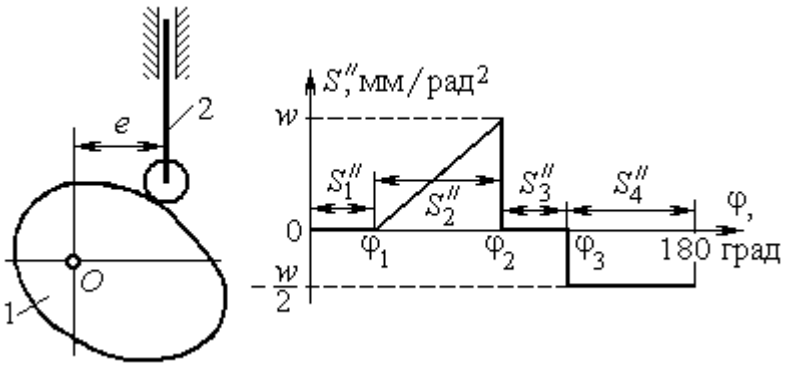
Таблица 2.1

Варианты исходных данных механизма инерционного конвейера для варианта задания № 1

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,24	0,25
	AB	0,8	0,8	0,11	0,11	0,29	0,23	0,11	0,11	0,92	1,06
	O_2B	1,0	1,0	0,12	0,12	0,25	0,25	0,12	0,12	0,84	0,87
	O_2C	1,2	1,2	0,1	0,12	0,15	0,25	0,15	0,12	0,9	0,5
	CD	1,2	1,2	0,25	0,25	0,3	0,4	0,4	0,3	1,45	0,65
	a	0,9	0,9	0,06	0,04	0,15	0,35	0,04	0,07	0,8	0,8
	b	0,7	0,7	0,04	0,06	0,05	0,11	0,06	0,02	0,6	0,6
Угол поворота кривошипа, град	φ	45	30	290	235	120	115	140	50	300	150
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	190	95	200	180	150	170	250	190	100	120
Массы звеньев механизма, кг	m_2	80	8	15	18	38	24	16	20	37	32
	m_3	100	10	18	25	23	30	28	25	22	17
	m_4	60	6	25	25	30	40	40	30	36	31
	m_5	100	10	100	70	80	90	90	60	73	62
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	0,5	0,5	0,2	0,1	0,1	0,09	0,18	0,09	0,3	0,21
	J_2	1,0	1,0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,08	0,2	4,1	3,1
	J_3	0,8	0,8	0,4	0,8	0,18	0,2	0,6	0,5	2,7	2,9
	J_4	0,6	0,6	1,2	1,0	1,03	1,4	1,4	1,05	1,6	1,1
Сила сопротивления, кН	$F_р$	10,0	2,25	3,0	2,5	1,5	1,6	3,0	1,8	4,6	3,6
Максимальный ход толкателя, мм	h	20	22	18	25	16	14	18	20	22	16
Границы фаз движения толкателя, град	φ_1	30	40	25	30	45	20	30	35	25	30
	φ_2	90	60	80	60	100	80	60	85	65	70
	φ_3	120	130	140	100	140	120	110	120	125	140

Задание № 2. Плунжерный питатель с грохотом





$S''_{\max} = w$

Вид законов аналога ускорения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$.

Ускорения нет, $S_1'' = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Линейный закон аналога ускорения.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$.

Ускорения нет, $S_3'' = 0$.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$.

Ускорение постоянно

Рис. 2.2. Схема механизма плунжерного питателя с грохотом и закон изменения аналога ускорения смещённого роликового толкателя

Плунжерный питатель с грохотом состоит из кривошипа 1, шатунов 2 и 4, сита грохота 5, плунжера 3. Центр тяжести кривошипа расположен на оси вращения O_1, центры тяжести остальных звеньев находятся в их середине. Сила сопротивления движению плунжера 3 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода (рабочий ход слева – направо). На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и роликовый толкатель 2. Линия движения толкателя отстоит от оси вращения кулачка O на расстояние e (дезаксиал). Закон изменения аналога ускорения толкателя в зависимости от

угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График изменения аналога ускорения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

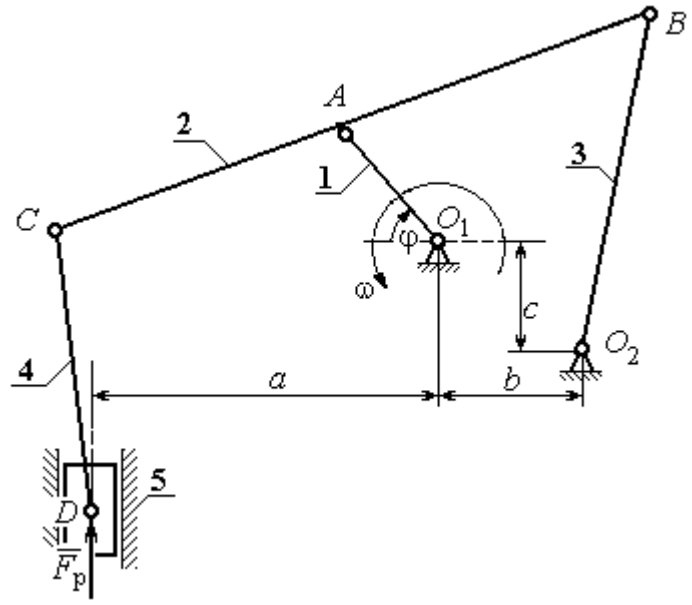
Варианты исходных данных задания № 2 приведены в табл. 2.2.

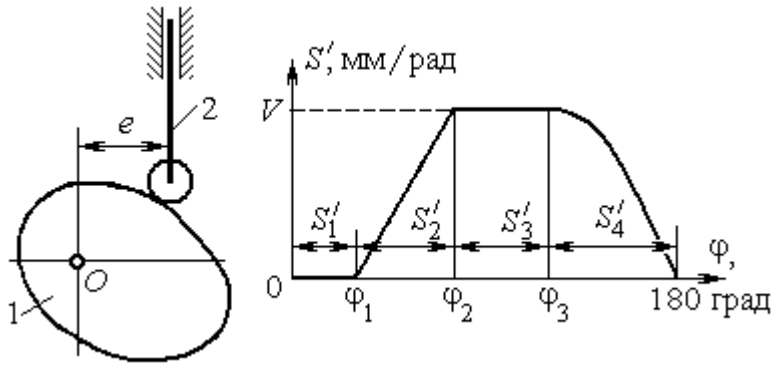
Таблица 2.2

Варианты исходных данных механизма плунжерного питателя с грохотом для варианта задания № 2

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,08	0,05	0,06	0,08	0,06	0,08	0,08	0,06	0,1	0,1
	AB	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5
	DB	0,4	0,3	0,3	0,35	0,3	0,25	0,25	0,3	0,43	0,33
	O_2C	0,4	0,27	0,19	0,3	0,24	0,25	0,22	0,24	0,31	0,21
	CD	0,12	0,09	0,2	0,2	0,2	0,13	0,14	0,2	0,16	0,16
	a	0,57	0,45	0,4	0,57	0,45	0,5	0,45	0,45	0,5	0,4
	b	0,12	0,02	0,12	0,12	0,12	0,05	0,05	0,13	0,13	0,13
Угол поворота кривошипа, град	φ	60	56	58	55	55	58	57	65	60	70
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	150	30	210	150	160	140	130	160	130	120
Массы звеньев механизма, кг	m_2	42	38	35	36	31	35	36	31	40	40
	m_3	8	12	8	10	12	8	10	12	10	12
	m_4	16	9	16	18	20	13	14	20	16	16
	m_5	40	27	35	30	24	25	22	24	31	21
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	0,08	0,09	0,08	0,1	0,07	0,07	0,08	0,07	0,1	0,1
	J_2	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,2	1,2
	J_4	0,5	0,3	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5
	J_5	1,2	0,9	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	1,0	0,6
Сила сопротивления, кН	$F_\text{Р}$	100	90	980	80	80	80	700	80	100	60
Дезаксиал, мм	e	5	4	5	6	4	5	6	3	4	5
Максимальное значение аналога ускорения толкателя, мм/рад^2	w	12	16	15	10	8	12	14	10	8	6
Границы фаз движения толкателя, град	φ_1	20	22	15	10	20	18	15	25	20	18
	φ_2	80	92	90	70	90	65	85	90	85	72
	φ_3	120	110	105	120	110	133	110	115	125	126

Задание № 3. Поршневой насос





$S'_{\max} = V$

Вид законов аналога скорости толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$.

Скорости нет, $S'_1 = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$.

Линейный закон изменения аналога скорости.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$.

Скорость постоянна, $S'_3 = V$.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$. Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_3$

Рис. 2.3. Схема механизма поршневого насоса
и закон изменения аналога скорости смещённого роликового толкателя

Механизм **поршневого насоса** состоит из кривошипа 1, шатунов 2 – 4 и ползуна (поршня) 5. Рабочий ход поршня сверху – вниз. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, звена 1 – в точке O_1, звена 5 – в точке D. Сила сопротивления движению поршня 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и роликовый толкатель 2. Линия движения толкателя отстоит от оси вращения кулачка *O* на расстояние *e* (дезаксиал). Закон изменения аналога скорости толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График аналога скорости толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

Варианты исходных данных задания № 3 приведены в табл. 2.3.

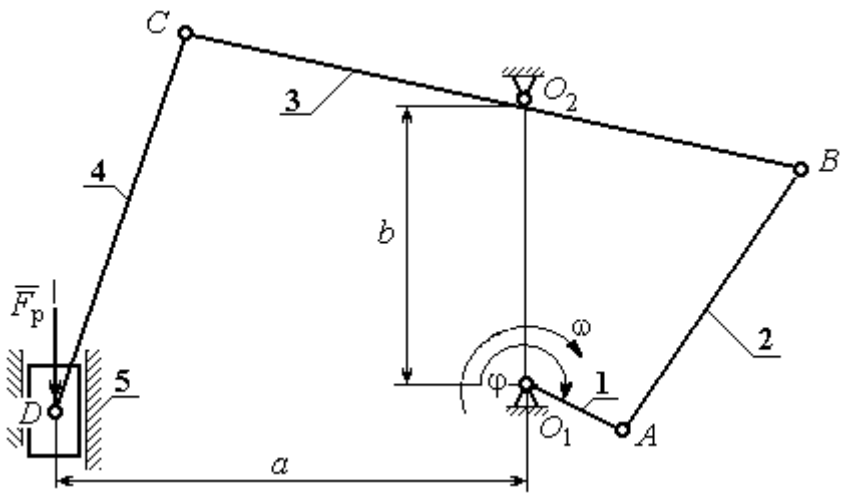
Таблица 2.3

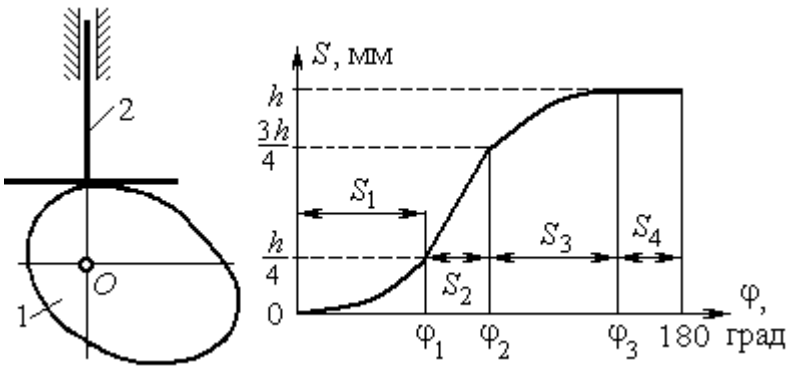
Варианты исходных данных механизма поршневого насоса для варианта задания № 3

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,16	0,13	0,16	0,18	0,11	0,18	0,13	0,12	0,18	0,1
	AB	0,56	0,5	0,52	0,6	0,6	0,56	0,47	0,45	0,56	0,42
	AC	0,38	0,35	0,4	0,4	0,3	0,42	0,35	0,3	0,42	0,3
	O_2B	0,55	0,5	0,55	0,55	0,45	0,55	0,5	0,48	0,55	0,45
	CD	0,6	0,55	0,6	0,55	0,45	0,6	0,55	0,5	0,6	0,45
	c	0,5	0,3	0,32	0,35	0,25	0,5	0,4	0,3	0,5	0,2
	a	0,5	0,45	0,45	0,3	0,3	0,5	0,28	0,4	0,5	0,35
	b	0,3	0,35	0,32	0,3	0,25	0,38	0,28	0,3	0,38	0,2
Угол поворота кривошипа, град	φ	60	56	45	60	65	65	23	65	60	63
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	140	70	130	160	80	110	90	55	110	50
Массы звеньев механизма, кг	m_2	28	28	30	30	26	30	25	25	30	26
	m_3	25	20	25	25	18	25	28	20	25	18
	m_4	28	25	28	30	20	28	36	22	25	20
	m_5	38	32	25	40	34	28	45	26	28	22
Моменты инерции звеньев относительно центров масс, кг·м^2	J_1	0,15	0,11	0,18	0,2	0,1	0,2	0,13	0,1	0,15	0,1
	J_2	0,92	0,7	0,83	1,08	0,72	0,8	0,95	0,6	0,85	0,72
	J_3	0,75	0,63	1,05	0,8	0,62	1,15	0,72	0,65	1,1	0,86
	J_4	1,15	0,93	1,2	1,05	0,95	1,15	1,1	0,9	1,15	1,0
Сила сопротивления, кН	F_p	1,2	1,4	1,5	20,4	0,8	2,2	1,4	1,7	2,2	0,8
Дезаксиал, мм	e	4	5	8	6	4	5	3	6	4	5
Максимальное значение аналога скорости толкателя, мм/рад	V	20	15	18	12	16	14	18	20	22	16
Границы фаз движения тол-	φ_1	20	18	16	22	15	12	18	16	20	18
	φ_2	85	90	75	100	95	102	98	85	95	92

кателя, рад	φ_3	110	120	90	125	105	120	118	110	115	102

Задание № 4. Глубинный насос





$S_{\max} = h$

Вид законов движения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$. Парабола с вершиной при $\varphi = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Линейный закон движения.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$. Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_3$.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$. Движения нет, $S_4 = h$

Рис. 2.4. Схема механизма глубинного насоса
и закон движения плоского центрального толкателя

Механизм **глубинного насоса** состоит из кривошипа 1, шатунов 2, 4, коромысла 3 и ползуна (поршня) 5. Рабочий ход поршня снизу – вверх. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, звена 1 – в точке O_1, звена 5 – в точке D. Сила сопротивления движению поршня 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и плоский толкатель 2. Линия движения толкателя проходит через ось вращения кулачка O. Закон изме-

нения перемещения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180$. График движения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

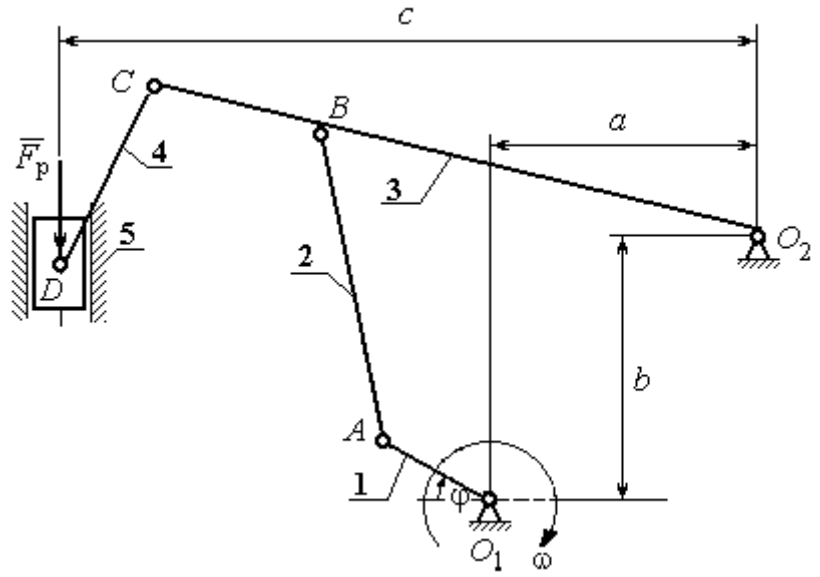
Варианты исходных данных задания № 4 приведены в табл. 2.4.

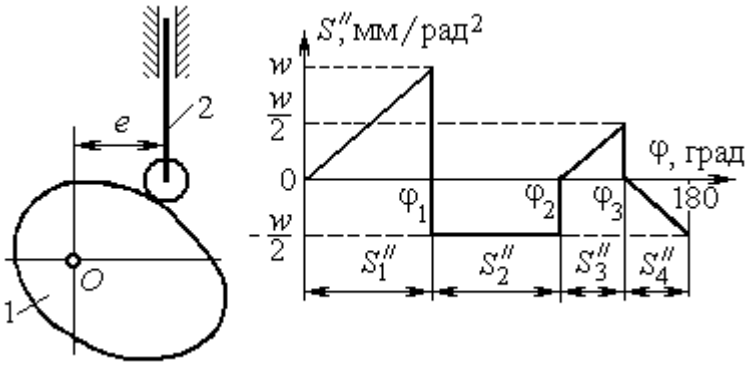
Таблица 2.4

Варианты исходных данных механизма глубинного насоса для варианта задания № 4

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,09	0,11	0,15	0,1	0,12	0,17	0,13	0,14	0,16	0,095
	AB	0,6	0,72	0,7	0,7	0,7	0,55	0,8	0,70	0,65	0,9
	O_2B	0,38	0,47	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,7	0,8
	O_2C	0,2	0,7	0,5	0,45	0,35	0,5	0,5	0,55	0,75	0,6
	CD	0,6	0,8	0,85	0,6	0,65	0,8	1,5	1,55	1,75	1,6
	a	0,45	0,43	0,5	0,36	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,65
	b	0,46	0,63	0,6	0,45	0,66	0,6	0,5	0,55	0,7	0,8
Угол поворота кривошипа, град	φ	180	210	0	165	150	253	30	45	60	120
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	140	130	180	70	150	200	100	110	160	190
Массы звеньев механизма, кг	m_2	38	24	14	22	27	20	23	26	29	30
	m_3	35	52	34	40	47	40	33	37	41	44
	m_4	33	30	36	28	34	40	43	47	49	51
	m_5	35	36	20	32	30	20	44	49	51	60
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	0,22	0,1	0,14	0,2	0,1	0,15	0,1	0,2	0,3	0,4
	J_2	1,1	0,83	0,5	1,2	0,9	0,75	0,8	0,9	0,6	0,4
	J_3	3,5	4,9	2,5	4	4,1	4,3	2,1	2,5	2,7	3,0
	J_4	2,1	2,0	2,3	1,6	2,2	2,4	3,0	3,5	3,9	4,4
Сила сопротивления, кН	$F_р$	3,0	1,26	1,44	1,68	2,17	2,16	3,0	4,8	5,1	6,1
Максимальный ход толкателя, мм	h	12	18	16	22	18	16	15	18	20	12
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	60	85	75	80	65	90	85	68	82	92
	φ_2	100	125	100	115	100	125	135	102	125	130
	φ_3	160	165	145	160	150	160	170	162	162	170

Задание № 5. Вытяжной пресс





$S''_{\max} = w$

Вид законов аналога ускорения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$. Линейный закон аналога ускорения.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Ускорение постоянно.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$. Линейный закон аналога ускорения.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$. Линейный закон аналога ускорения

Рис. 2.5. Схема механизма вытяжного пресса
и закон изменения аналога ускорения смещённого роликового толкателя

Механизм **вытяжного пресса** состоит из кривошипа 1, шатунов 2 – 4 и ползуна (поршня) 5. Рабочий ход поршня снизу – вверх. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, звена 1 – в точке O_1, звена 5 – в точке D. Сила сопротивления движению поршня 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и роликовый толкатель 2.

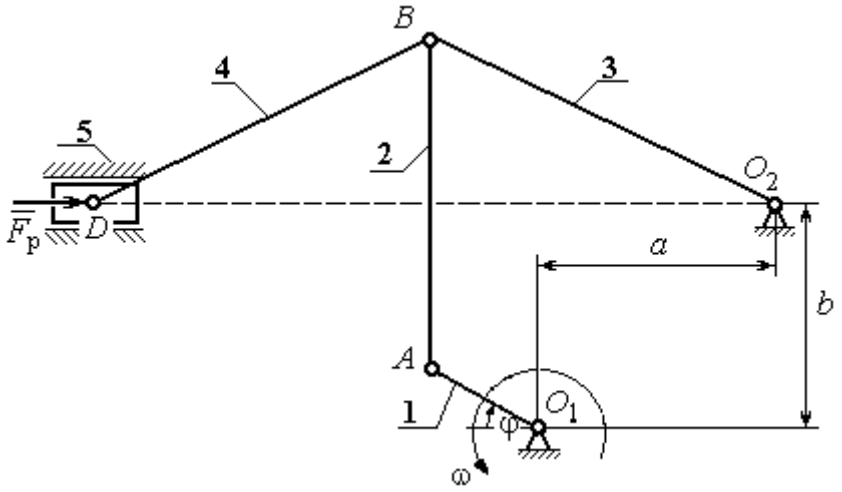
Линия движения толкателя отстоит от оси вращения кулачка O на расстояние e (дезаксиал). Закон изменения аналога ускорения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График аналога ускорения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен. Варианты исходных данных задания № 5 приведены в табл. 2.5.

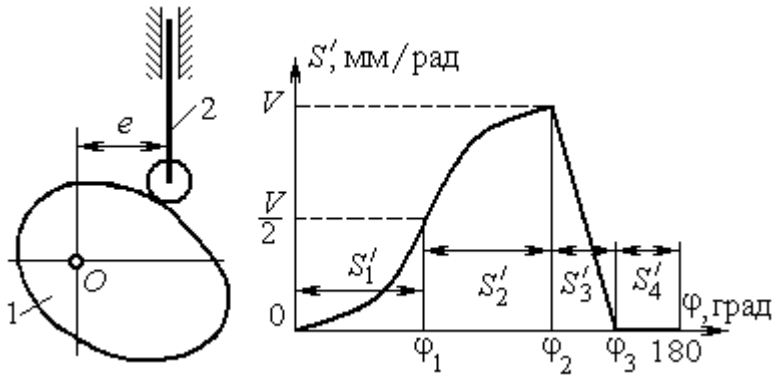
Таблица 2.5

Варианты исходных данных механизма вытяжного пресса для варианта задания № 5

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,1	0,09	0,09	0,09	0,08	0,1	0,07	0,1	0,11	0,08
	AB	0,32	0,45	0,36	0,38	0,4	0,42	0,46	0,48	0,5	0,52
	O_2B	0,3	0,6	0,5	0,42	0,51	0,6	0,62	0,46	0,45	0,5
	O_2C	0,42	0,9	0,7	0,6	0,7	0,85	0,8	0,66	0,65	0,7
	CD	0,11	0,3	0,4	0,6	0,5	0,8	0,9	0,35	0,49	0,5
	a	0,16	0,35	0,45	0,44	0,56	0,62	0,6	0,64	0,68	0,66
	b	0,29	0,3	0,4	0,41	0,46	0,5	0,51	0,55	0,6	0,6
	c	0,41	0,7	0,6	0,56	0,65	0,75	0,8	0,62	0,6	0,65
Угол поворота кривошипа, град	φ	30	60	120	150	210	240	300	330	25	45
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	40	65	50	55	60	165	70	75	285	150
Массы звеньев механизма, кг	m_2	30	7	8	9	10	12	11	14	12	11
	m_3	40	12	10	10	8	10	8	7	14	10
	m_4	15	5	6	4	7	8	9	6	4	5
	m_5	20	30	33	35	37	30	37	35	40	42
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	0,5	2,0	2,4	2,4	2,6	2,5	2,2	2,0	2,2	2,2
	J_2	0,2	0,10	0,20	0,21	0,24	0,28	0,29	0,31	0,33	0,35
	J_3	0,3	0,20	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
	J_4	0,1	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26
Сила сопротивления, кН	$F_\text{р}$	36	36	40	41	39	37	34	32	36	42
Дезаксиал, мм	e	5	6	8	4	6	8	5	6	8	6
Максимальное значение аналога ускорения толкателя, мм/рад^2	w	8	12	14	10	15	8	6	10	12	16
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	50	60	70	72	30	80	56	64	78	48
	φ_2	100	120	140	144	60	160	112	128	156	96
	φ_3	140	150	160	162	120	170	146	154	168	138

Задание № 6. Гайковырубной автомат





$S'_{\max} = V$

Вид законов аналога скорости толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$. Парабола с вершиной при $\varphi = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_2$.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$. Линейный закон изменения аналога скорости.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$.

Скорости нет, $S_4' = 0$

Рис. 2.6. Схема механизма гайковырубного автомата
и закон изменения аналога скорости смещённого роликового толкателя

Механизм **гайковырубного автомата** состоит из кривошипа 1, шатунов 2, 4, коромысла 3 и ползуна (поршня) 5. Рабочий ход поршня слева – направо. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, кривошипа 1 – в точке O_1, звена 5 – в точке D. Сила сопротивления движению поршня 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и роликовый толкатель 2. Линия движения толкателя отстоит от оси вращения кулачка *O* на расстояние *e* (дезаксиал). Закон изменения аналога скорости толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График аналога скорости толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

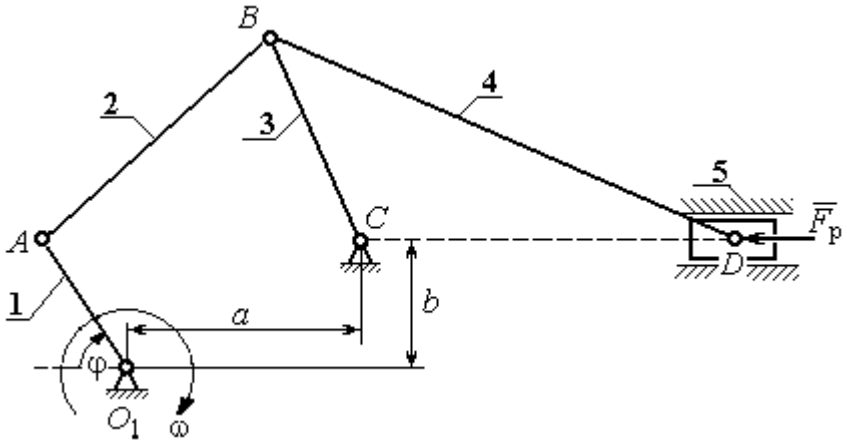
Варианты исходных данных задания № 6 приведены в табл. 2.6.

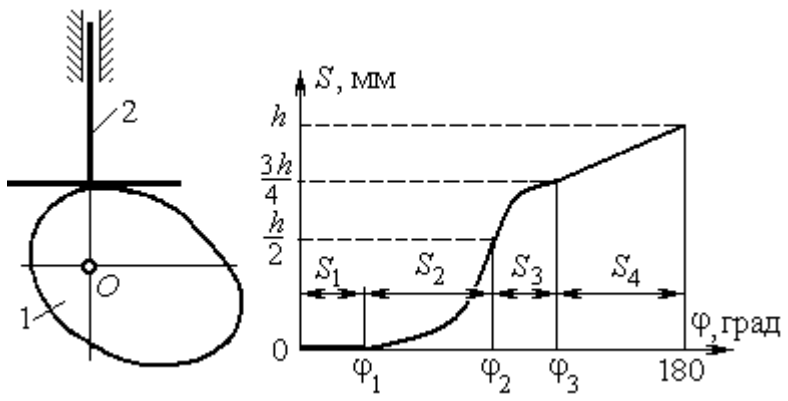
Таблица 2.6

Варианты исходных данных механизма гайковырубного автомата для варианта задания № 6

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,09	0,11	0,1	0,12	0,08	0,11	0,12	0,1	0,1	0,12
	AB	0,43	0,41	0,48	0,43	0,38	0,48	0,44	0,44	0,37	0,52
	O_2B	0,25	0,29	0,28	0,3	0,22	0,28	0,31	0,26	0,26	0,31
	BD	0,25	0,29	0,28	0,3	0,22	0,28	0,31	0,26	0,26	0,31
	a	0,24	0,27	0,27	0,29	0,21	0,27	0,3	0,25	0,25	0,29
	b	0,45	0,43	0,5	0,45	0,4	0,5	0,47	0,39	0,39	0,55
Угол поворота кривошипа, град	φ	30	45	60	120	150	210	240	300	305	25
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	100	45	50	55	60	65	70	75	80	90
Массы звеньев механизма, кг	m_2	11	10	12	10	9	12	11	11	9	13
	m_3	15	17	16	20	13	18	19	16	16	18
	m_4	15	17	16	20	13	18	19	16	16	18
	m_5	60	62	56	70	46	65	67	57	58	63
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	1,2	1,4	1,6	1,0	0,9	1,5	1,3	1,1	1,0	1,3
	J_2	0,2	0,17	0,28	0,18	0,13	0,28	0,21	0,21	0,12	0,35
	J_3	0,09	0,14	0,12	0,18	0,08	0,14	0,18	0,11	0,11	0,17
	J_4	0,09	0,14	0,12	0,18	0,08	0,14	0,18	0,11	0,11	0,17
Сила сопротивления, кН	$F_р$	60	65	70	58	55	52	53	54	60	70
Дезаксиал, мм	e	6	5	8	6	4	8	5	6	8	4
Максимальное значение аналога скорости толкателя, мм/рад	V	15	10	12	18	16	20	18	15	16	20
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	60	50	55	90	80	70	65	80	75	65
	φ_2	130	100	105	140	145	120	140	150	140	130
	φ_3	170	160	165	170	165	155	170	175	145	160

Задание № 7. Качающийся конвейер





$S_{\max} = h$

Вид законов движения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$.

Движения нет, $S_1 = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$.

Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_1$.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$.

Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_3$.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$.

Линейный закон движения

Рис. 2.7. Схема механизма качающегося конвейера
и закон движения плоского центрального толкателя

Механизм **качающегося конвейера** состоит из кривошипа 1, шатунов 2, 4, коромысла 3 и ползуна (поршня) 5. Рабочий ход поршня слева – направо. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, кривошипа 1 – в точке O_1, звена 5 – в точке D. Сила сопротивления движению поршня 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и плоский толкатель 2. Линия движения толкателя проходит через ось вращения кулачка O. Закон изме-

нения перемещения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График движения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

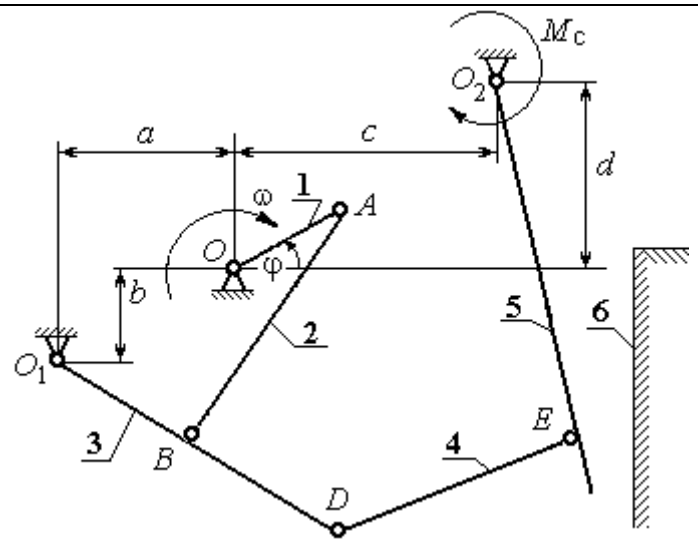
Варианты исходных данных задания № 7 приведены в табл. 2.7.

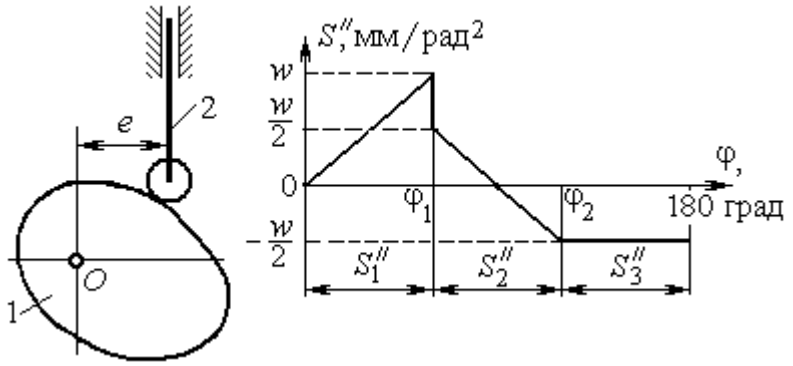
Таблица 2.7

Варианты исходных данных механизма качающегося конвейера для варианта задания № 7

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	O_1A	0,1	0,09	0,1	0,11	0,12	0,14	0,1	0,12	0,14	0,12
	AB	0,38	0,38	0,46	0,42	0,46	0,28	0,45	0,55	0,53	0,45
	BC	0,32	0,3	0,33	0,35	0,39	0,35	0,4	0,4	0,45	0,38
	BD	1,3	1,4	1,5	1,4	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6	1,5
	a	0,29	0,3	0,34	0,32	0,33	0,32	0,35	0,41	0,4	0,35
	b	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,04	0,05	0,07	0,07	0,06
Угол поворота кривошипа, град	φ	25	45	60	115	135	150	210	245	290	300
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	80	60	68	73	70	63	63	79	74	50
Массы звеньев механизма, кг	m_2	20	20	21	20	20	25	20	22	25	20
	m_3	90	80	90	100	85	100	90	95	100	90
	m_4	400	400	450	500	500	500	400	450	500	450
	m_5	900	800	900	900	950	900	950	800	900	950
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,2
	J_2	1,0	1,0	1,1	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,2
	J_3	0,4	0,4	0,6	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,5
	J_4	40	40	42	35	40	38	42	45	35	45
Сила сопротивления, кН	$F_р$	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
Максимальный ход толкателя, мм	h	15	18	12	20	22	18	16	21	18	15
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	20	25	30	22	18	25	15	25	16	18
	φ_2	65	80	90	75	95	80	65	92	85	95
	φ_3	130	120	140	110	155	140	130	142	150	130

Задание № 8. Щековая дробилка





$S''_{\max} = w$

Вид законов аналога ускорения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$. Линейный закон аналога ускорения.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Линейный закон аналога ускорения.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le 180^\circ$. Ускорение постоянно

Рис. 2.8. Схема механизма щековой дробилки
и закон изменения аналога ускорения смещённого роликового толкателя

Механизм **щековой дробилки** состоит из кривошипа 1, шатуна 2, коромысла 3, тяги 4, подвижной щеки 5 и неподвижной щеки 6. Рабочий ход подвижной щеки слева – направо. Центр масс кривошипа 1 – в точке O_1. У звеньев 2 – 5 центры масс находятся посредине их длин. Момент сил сопротивления движению подвижной щеки 5 сохраняет постоянное значение M_C на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу щеки момент сил сопротивления постоянный и составляет 10 % от номинального.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и роликовый толкатель 2. Линия движения толкателя отстоит от оси вращения кулачка O на расстояние e (дезаксиал). Закон изменения аналога ускорения толкателя в зависимости от

угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График аналога ускорения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

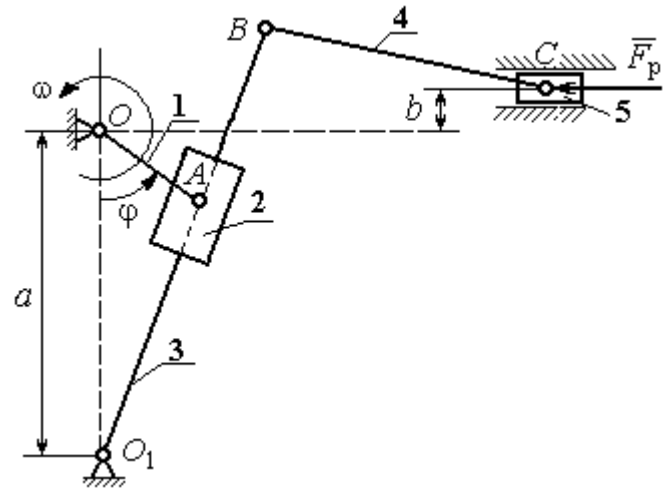
Варианты исходных данных задания № 8 приведены в табл. 2.8.

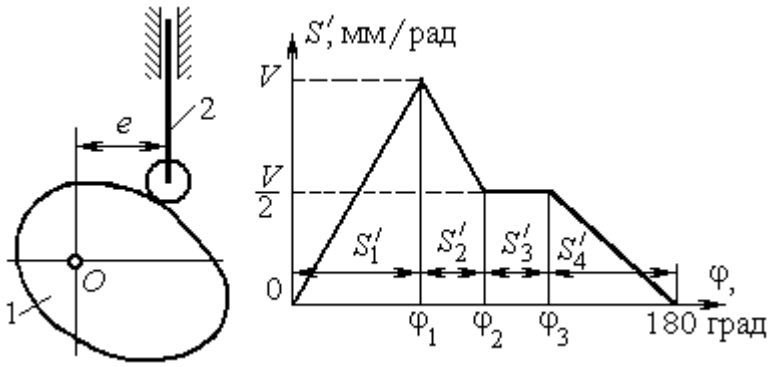
Таблица 2.8

Варианты исходных данных механизма щековой дробилки для варианта задания № 8

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	OA	0,11	0,1	0,15	0,07	0,15	0,08	0,1	0,15	0,12	0,07
	AB	0,8	0,9	0,75	0,6	0,9	0,7	0,45	0,9	0,8	0,65
	O_1B	0,45	0,5	0,6	0,3	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,3
	BD	0,2	0,15	0,2	0,3	0,1	0,15	0,25	0,15	0,2	0,2
	O_2E	0,8	0,85	1,2	0,9	1,15	1,0	0,8	1,2	1,0	0,75
	DE	0,6	0,55	0,6	0,4	0,7	0,35	0,3	0,65	0,3	0,45
	a	0,45	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3
	b	0,55	0,6	0,5	0,4	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,4
	c	0,4	0,35	0,6	0,3	0,6	0,4	0,25	0,6	0,5	0,3
	d	0,12	0,15	0,3	0,4	0	0,2	0,2	0	0,1	0,2
Угол поворота кривошипа, град	φ	20	30	45	60	115	145	215	240	295	330
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	160	190	150	250	170	200	200	140	240	240
Массы звеньев механизма, кг	m_2	55	50	45	40	48	40	35	55	50	40
	m_3	30	25	30	15	30	30	25	30	35	30
	m_4	30	27	30	20	35	18	15	33	15	22
	m_5	90	85	120	110	100	80	120	100	75	100
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	0,23	0,25	0,35	0,2	0,3	0,2	0,25	0,35	0,2	0,24
	J_2	0,8	4,0	3,4	1,6	3,9	1,9	0,7	4,5	3,2	1,7
	J_3	0,9	0,6	1,1	0,14	1,1	1,1	0,5	1,1	0,26	0,14
	J_4	0,9	0,82	1,0	0,32	1,7	0,22	0,14	1,4	0,15	0,45
	J_5	6,3	6,1	17,3	7,3	14,5	10,0	5,1	17,3	10,0	4,2
Момент сил сопротивления, кН·м	M_C	4	8	30	9	20	10	7	35	2	15
Дезаксиал, мм	e	6	5	8	6	7	8	6	5	8	7
Максимальное значение аналога ускорения толкателя, мм/рад^2	w	8	6	10	12	8	15	6	8	12	10
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	60	40	54	65	75	50	42	74	58	78
	φ_2	120	140	126	115	105	130	138	106	122	102

Задание № 9. Кулисный конвейер





$S'_{\max} = V$

Вид законов аналога скорости толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$.

Линейный закон изменения аналога скорости.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$.

Линейный закон изменения аналога скорости.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$.

Скорость постоянная.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$.

Линейный закон изменения аналога скорости

Рис.2.9. Схема механизма кулисного конвейера
и закон изменения аналога скорости смещённого роликового толкателя

Механизм **кулисного конвейера** состоит из кривошипа 1, кулисного камня 2, кулисы 3, шатуна 4 и ползуна (поршня) 5. Рабочий ход поршня слева – направо. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, кривошипа 1 – в точке *O*, звена 5 – в точке *C*. Сила сопротивления движению поршня 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и роликовый толкатель 2. Линия движения толкателя отстоит от оси вращения кулачка *O* на расстояние *e*

(дезаксиал). Закон изменения аналога скорости толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График аналога скорости толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

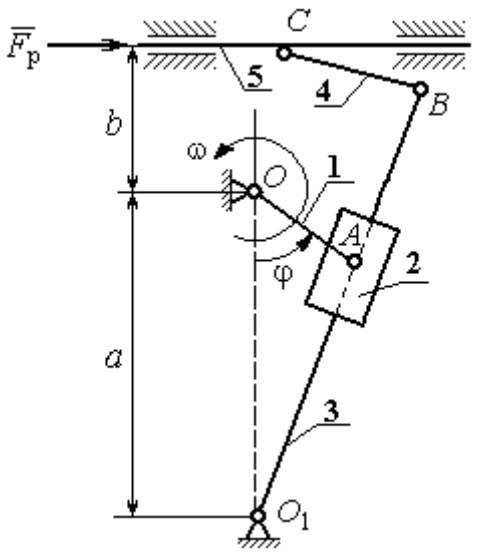
Варианты исходных данных задания № 9 приведены в табл. 2.9.

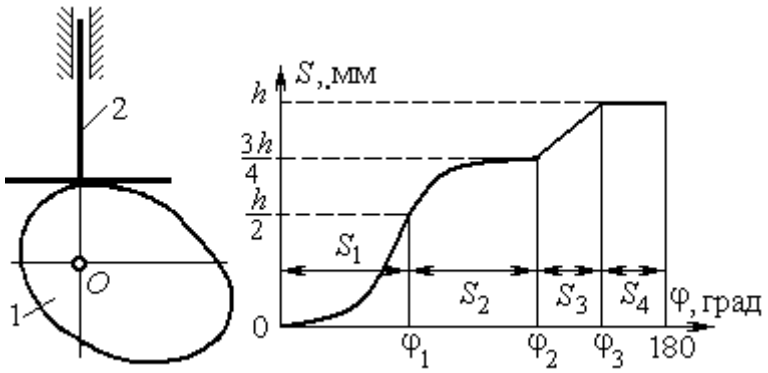
Таблица 2.9

Варианты исходных данных механизма кулисного конвейера для варианта задания № 9

Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	OA	0,17	0,08	0,1	0,12	0,09	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16
	O_1B	1,5	0,8	1,0	1,2	0,9	1,1	1,3	1,4	1,25	1,45
	BC	2,1	1,8	1,9	2,0	1,75	1,65	1,45	1,5	1,85	1,95
	a	0,9	0,6	0,8	0,9	0,6	0,6	0,7	1,0	0,95	1,1
	b	0,28	0,05	0,07	0,08	0,09	0,1	0,055	0,065	0,06	0,065
Угол поворота кривошипа, град	φ	300	20	30	45	60	110	120	150	210	240
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	190	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Массы звеньев механизма, кг	m_2	14	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	m_3	28	10	12	14	16	18	20	22	24	26
	m_4	32	14	16	18	20	22	24	26	28	30
	m_5	280	100	120	140	160	180	200	220	240	260
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	3,0	1	2	3	4	4,5	3,6	4,7	2,8	2,9
	J_2	0,65	0,6	0,4	0,3	0,5	0,7	0,8	0,35	0,45	0,55
	J_3	6,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
	J_4	1,5	2,0	2,5	3,5	4,5	5,0	3,0	4,0	6,0	6,5
Сила сопротивления, кН	$F_\text{р}$	14	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Дезаксиал, мм	e	8	10	6	12	9	7	10	8	12	6
Максимальное значение аналога скорости толкателя, мм/рад	V	15	18	12	18	20	16	15	12	18	20
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	60	55	65	75	80	85	90	75	80	95
	φ_2	100	95	110	120	125	140	130	135	145	150
	φ_3	120	105	120	130	140	145	145	150	155	160

Задание № 0. Строгальный станок





$S_{\max} = h$

Вид законов движения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$. Парабола с вершиной при $\varphi = 0$.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2$. Парабола с вершиной при $\varphi = \varphi_2$.

3-й участок: $\varphi_2 \le \varphi \le \varphi_3$. Линейный закон движения.

4-й участок: $\varphi_3 \le \varphi \le 180^\circ$. Движения нет, $S_4 = h$

Рис. 2.10. Схема механизма строгального станка
и закон движения центрального плоского толкателя

Механизм **строгального станка** состоит из кривошипа 1, кулисного камня 2, кулисы 3, шатуна 4 и резца (вместе с суппортом) 5. Рабочий ход резца справа – налево. Центры масс звеньев 2 – 4 находятся посредине их длин, кривошипа 1 – в точке *O*, резца 5 – в точке *C*. Сила сопротивления движению резцу 5 сохраняет постоянное значение F_p на протяжении всего рабочего хода. На холостом ходу сила сопротивления постоянна и составляет 10 % от номинальной.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и плоский толкатель 2. Линия движения толкателя проходит через ось вращения кулачка *O*. Закон изменения перемещения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График движения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

Варианты исходных данных задания № 0 приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

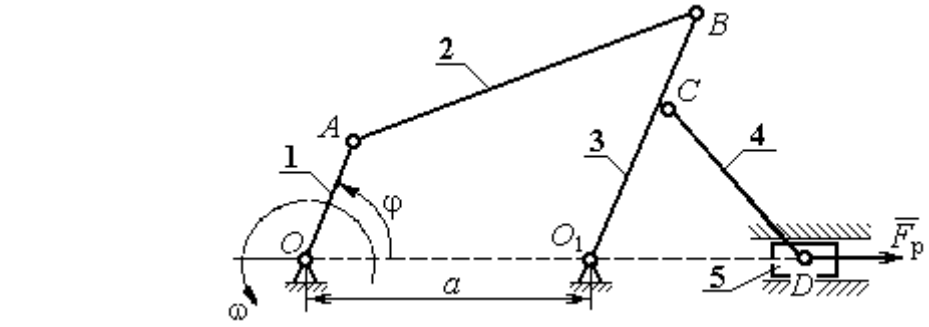
Варианты исходных данных механизма кулисного конвейера для варианта задания № 0

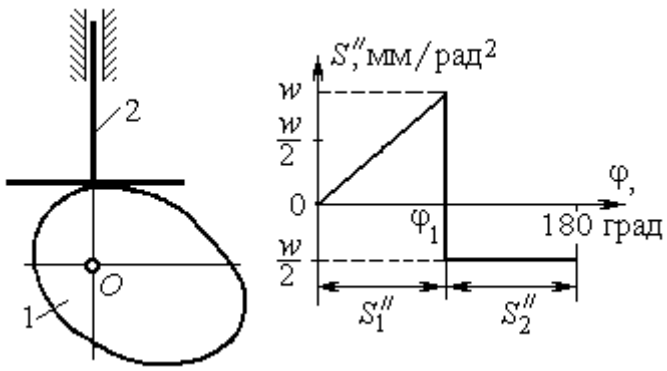
Параметры	Обозначение	Варианты исходных данных									
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Размеры звеньев механизма и характерные расстояния, м	OA	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
	O_1B	1,35	1,45	1,6	1,6	1,8	1,55	1,45	1,75	1,45	1,4
	BC	0,5	0,6	0,7	0,8	0,45	0,35	0,55	0,65	0,75	0,8
	a	0,8	0,85	0,9	0,95	1,05	0,75	0,65	0,85	1,1	1,2
	b	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,95	0,95	1,05	0,6	0,5
Угол поворота кривошипа, град	φ	20	35	60	75	120	150	210	240	295	330
Частота вращения кривошипа, об/мин	n	120	130	140	150	160	170	180	190	110	100
Массы звеньев механизма, кг	m_2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	m_3	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	m_4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	5
	m_5	25	28	30	32	35	37	40	43	45	49
Моменты инерции звеньев относит. центров масс, кг·м^2	J_1	1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3
	J_2	0,2	0,25	0,3	0,35	0,1	0,15	0,18	0,22	0,26	0,32
	J_3	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	J_4	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3
Сила сопротивления, кН	$F_р$	6	5	4	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10
Максимальный ход толкателя, мм	h	20	22	18	25	20	24	18	22	18	16
Границы фаз движения толкателя, рад	φ_1	60	65	75	70	85	80	65	90	85	65
	φ_2	130	123	140	150	135	125	130	130	135	145
	φ_3	150	150	160	165	160	140	165	170	165	170

3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Рассмотрим последовательность выполнения курсового проекта на примере условной схемы пятизвенного плоского механизма и кулачкового механизма с центральным плоским толкателем (рис. 3.1).

Пример. Пятизвенный механизм





$S''_{\max} = w$

Вид законов аналога ускорения толкателя по фазам движения кулачка

1-й участок: $0 \le \varphi \le \varphi_1$.

Линейный закон аналога ускорения.

2-й участок: $\varphi_1 \le \varphi \le 180^\circ$.

Ускорение постоянно

Рис. 3.1. Схема пятизвенного механизма
и закон изменения аналога ускорения центрального плоского толкателя

Механизм состоит из кривошипа 1, шатуна 2, коромысла 3, шатуна 4 и ползуна 5. Центр масс кривошипа расположен на оси вращения, в точке *O*, центры масс линейных звеньев – посередине их длин. Рабочий ход ползуна справа – налево. Сила сопротивления движению ползуна на протяжении рабочего хода равна F_p. На холостом ходу сила сопротивления составляет 10 % от номинального значения.

Кулачковый механизм включает кулачок 1 и плоский толкатель 2. Линия движения толкателя проходит через ось вращения кулачка *O*. Закон изме-

нения перемещения толкателя в зависимости от угла поворота кулачка приведён на фазе подъёма кулачка, $0 \le \varphi \le 180^\circ$. График движения толкателя на фазе опускания кулачка симметричен.

Данные для кинематического и динамического расчета механизма и синтеза кулачкового механизма приведены в табл. 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1

Кинематические характеристики механизма

Размеры звеньев механизма						Угол поворота кривошипа, φ, град	Частота вращения кривошипа, *n*, об/мин
a, м	*OA*, м	*AB*, м	O_1C, м	*BC*, м	*CD*, м		
0,4	0,1	0,4	0,15	0,15	0,5	90	95,5

Таблица 3.2

Параметры динамического расчёта

Массы звеньев, кг					Моменты инерции звеньев, кг·м^2				Сила полезного сопротивления, кН
m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	J_{01}	J_{S2}	$J_{O_1 3}$	J_{S4}	F_p
5	40	30	50	10	1	2	1	3	16,045

Таблица 3.3

Параметры движения толкателя

Максимальное значение аналога ускорения толкателя, мм/рад^2	Границы фаз движения толкателя, град
w	φ_1
40	90

3.1. Структурный анализ механизма

В рассматриваемом механизме 5 подвижных звеньев и 7 кинематических пар (рис. 3.2, *a*):

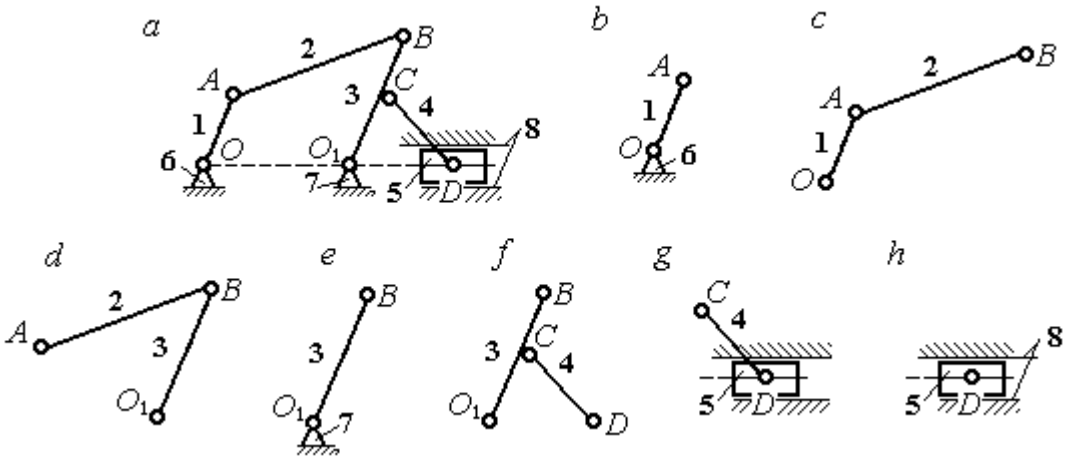


Рис. 3.2. Кинематические пары механизма:
a – схема механизма; *b* – *h* – звенья, составляющие кинематические пары

– вращательная кинематическая пара O (рис. 3.2, *b*) низшего типа 5-го класса образуется неподвижной стойкой 6 и кривошипом 1;

– вращательная кинематическая пара A (рис. 3.2, *c*) низшего типа 5-го класса образуется кривошипом 1 и шатуном 2;

– вращательная кинематическая пара B (рис. 3.2, *d*) низшего типа 5-го класса образуется шатуном 2 и коромыслом 3;

– вращательная кинематическая пара O_1 (рис. 3.2, *e*) низшего типа 5-го класса образуется коромыслом 3 и стойкой 7;

– вращательная кинематическая пара C (рис. 3.2, *f*) низшего типа 5-го класса образуется коромыслом 3 и шатуном 4;

– вращательная кинематическая пара D (рис. 3.2, *g*) низшего типа 5 класса образуется шатуном 4 и ползуном 5;

– поступательная кинематическая пара D_1 (рис. 3.2, *h*) низшего типа 5-го класса образуется ползуном 5 и направляющими 8.

Высших кинематических пар в данном механизме нет, так как соединение всех звеньев осуществляется по поверхности.

Степень подвижности плоского механизма определяется по формуле П. Л. Чебышева: $W = 3n - 2p_5$ = 3·5 – 2·7 = 1, где n = 5 – число подвижных звеньев механизма; p_5 = 7 – число кинематических пар 5-го класса. Следовательно, механизм имеет одно ведущее звено.

В рассматриваемом механизме можно выделить две группы Ассура и начальное звено (рис. 3.3):

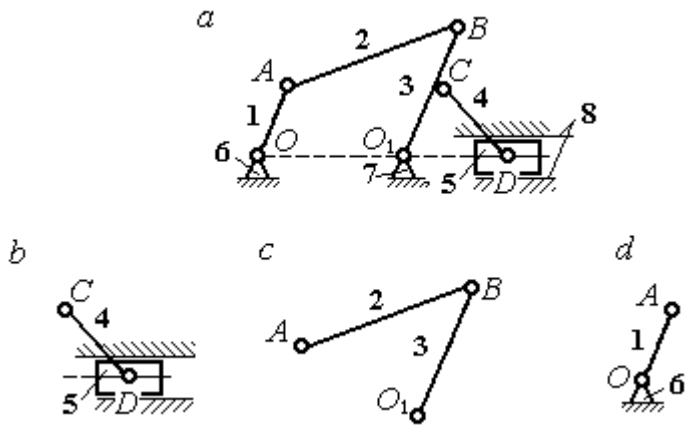


Рис. 3.3. Группы Ассура механизма:
a – схема механизма; *b*, *c* – группы Асура; *d* – начальное звено

– группа звеньев, состоящая из шатуна 4 и ползуна 5, является группой Ассура II класса, второго вида (ползун – поводок) (рис. 3.3, *b*);

– группа звеньев, состоящая из коромысла 3 и шатуна 2, является группой Ассура II класса, первого вида (двухповодковая группа) (рис. 3.3, *c*);

– кривошип 1 вместе со стойкой 6 образуют начальное звено или начальный механизм I класса (рис. 3.3, *d*).

Схема образования механизма группами Ассура:

(1) →(2,3) →(4,5).

К первому (ведущему) звену присоединяется группа Ассура, состоящая

из звеньев 2 и 3, образуя раму, имеющую ту же степень подвижности, что и исходный механизм. К группе Ассура, состоящей из звеньев 2 и 3, присоединяется группа Ассура, состоящая из звеньев 4 и 5. При этом степень подвижности образованного механизма не увеличивается.

Представленный механизм включает начальный механизм I класса и две группы Ассура II класса, в результате чего является механизмом II класса.

Результаты структурного анализа механизма приводятся в табл. 3.4 – 3.5.

Таблица 3.4

Анализ кинематических пар

Обозначение кинематической пары	O	A	B	O_1	C	D	D_1
Звенья, образующие пару	1 – 6	1 – 2	2 – 3	3 – 7	3 – 4	4 – 5	5 – 8
Наименование пары	Вращательная, низшая						Поступательная, низшая
Класс пары	5-й класс						

Таблица 3.5

Анализ групп Ассура

Группы Ассура	4 – 5	2 – 3	1
Наименование группы Ассура	Ползун–поводок	Двухповодковая	Начальное звено
Класс групп Ассура	II класс	II класс	I класс
Класс механизма	Механизм II класса		

3.2. Построение плана механизма

Построение плана механизма начинается с определения масштабного коэффициента длины. Выберем для плана механизма стандартный масштаб, например 1:4. Масштаб выбирается таким образом, чтобы длина самого большого звена механизма на чертеже не превышала 100 – 150 мм. Так, при масштабе 1:4 длина отрезка l_{CD}, изображающего на чертеже звено CD (с максимальной среди всех звеньев длиной 0,5 м), составит: $l_{CD} = \frac{0{,}5}{4} = 0{,}125$ м = 125

мм и находится в пределах допустимых границ длин. Масштабный коэффициент длины рассчитывается как отношение заданной длины звена к длине его изображения на чертеже: $k_l = \frac{0{,}5}{125} = 0{,}004 \ \frac{\text{м}}{\text{мм}}$.

Определяем длины звеньев на чертеже с учётом масштабного коэффициента:

$$l_{OA} = \frac{OA}{k_l} = \frac{0{,}1}{0{,}004} = 25 \text{ мм}, \qquad l_{CD} = \frac{CD}{k_l} = \frac{0{,}5}{0{,}004} = 125 \text{ мм},$$

$$l_{AB} = \frac{AB}{k_l} = \frac{0{,}4}{0{,}004} = 100 \text{ мм}, \qquad l_a = \frac{a}{k_l} = \frac{0{,}4}{0{,}004} = 100 \text{ мм},$$

$$l_{O_1C} = \frac{O_1C}{k_l} = \frac{0{,}15}{0{,}004} = 37{,}5 \text{ мм}, \quad l_{BC} = \frac{BC}{k_l} = \frac{0{,}15}{0{,}004} = 37{,}5 \text{ мм}.$$

Порядок построения положения механизма таков:

1. Первоначально на чертеже фиксируем неподвижные точки O и O_1. Поставим на свободном поле чертежа точку O_1, затем, отложив расстояние a, поставим точку O_2.

2. Радиусом l_{OA} проведём окружность, по которой будет перемещаться точка A, лежащая на кривошипе. Установим заданное положение кривошипа под углом $\varphi = 90°$ и получим положение точки A (начальное положение и направление отсчёта угла показано на схеме механизма).

3. Из точки A проводим дугу радиусом l_{AB}, затем из точки O_1 дугу радиусом $l_{O_1B} = l_{O_1C} + l_{CB}$. В точке пересечения ставим точку B. Прямая линия, соединяющая точки A и B, определяет положение шатуна 2.

4. Из точки C, находящейся на средине коромысла 3, проводим дугу окружности радиусом l_{DC} до пересечения её с продолжением линии OO_1. Точка пересечения D определяет положение ползуна 5.

План механизма насоса в масштабе 1: 4 показан на рис. 3.4.

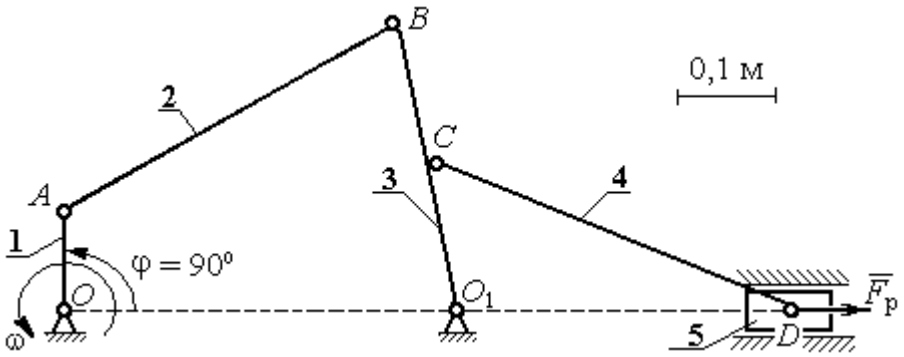


Рис. 3.4. План механизма насоса в масштабе 1:4

3.3. Построение плана скоростей механизма

Построение начинаем с определения модуля скорости точки *A* ведущего звена 1 – кривошипа.

Вычисляем угловую скорость кривошипа ω, рад/с, по заданной его частоте вращения *n*, об/мин: $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 95{,}5}{30}$ = 10 рад/с. Вычисляем модуль скорости точки *A* кривошипа: $V_A = \omega \cdot O_1A$ = 10·0,1 = 1 м/с. Длину вектора скорости $\vec{V}_A$ точки *A* на плане скоростей принимаем равной 100 мм. Вычисляем масштаб плана скоростей: $k_v = \frac{V_A}{100} = \frac{1}{100} = 0{,}01$ (мм/с)/м .

Точка *B* принадлежит как звену *AB* (шатун 2), совершающему плоскопараллельное движение, так и звену O_1B (коромысло 3), вращающемуся вокруг неподвижного центра O_1 (рис. 3.4).

Скорость точки *B* звена *AB* равна векторной сумме скорости полюса, например точки *A*, и скорости точки *B* во вращательном движении звена *AB* по отношении к полюсу. Тогда для определения скорости точки *B* имеем первое векторное равенство $\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{V}_{BA}$, где $\vec{V}_B$ – вектор скорости точки *B*; $\vec{V}_A$ – вектор скорости точки *A*, известный по величине и направлению; $\vec{V}_{BA}$ – вектор

скорости точки *B* во вращательном движении звена *AB* по отношении к полюсу *A*. Известно, что вектор скорости $\vec{V}_{BA}$ перпендикулярен линии *AB* (рис. 3.5, *a*).

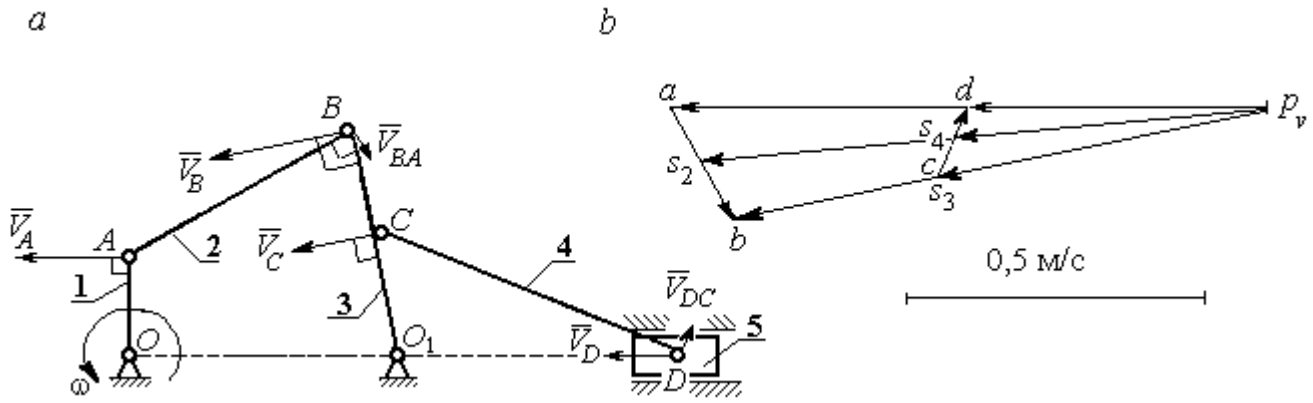


Рис. 3.5. План скоростей механизма:
a – направления векторов скоростей точек механизма; *b* – план скоростей

Проведём построение векторов на плане скоростей (рис. 3.5, *b*). Выберем в качестве полюса плана скоростей точку p_v, которую изображаем на поле чертежа в удобном для построения месте. Изобразим вектор скорости $\vec{V}_A$. На плане механизма (см. рис. 3.5, *a*) вектор $\vec{V}_A$ перпендикулярен кривошипу O_1A и направлен в сторону его вращения. На плане скоростей вектор, изображающий скорость точки *A*, направляется из точки p_v параллельно $\vec{V}_A$. Длина вектора на чертеже в соответствии с масштабным коэффициентом равна 100 мм. В конце построенного вектора поставим точку *a*. Таким образом, вектор $\vec{V}_A$ на плане скоростей изображается горизонтальным отрезком $p_v a$ (см. рис. 3.5, *b*). Далее, из точки *a* направляем вектор $\vec{V}_{BA}$ перпендикулярно линии звена *AB*. Поскольку величина вектора $\vec{V}_{BA}$ неизвестна, найти вектор $\vec{V}_B$ из первого векторного уравнения не представляется возможным.

С другой стороны, в силу того, что точка *B* принадлежит звену O_1B, вращающемуся вокруг неподвижного центра O_1, скорость точки *B* может быть найдена из второго векторного равенства: $\vec{V}_B = \vec{V}_{BO_1}$, где $\vec{V}_{BO_1}$ – вектор скорости

точки B при вращении звена BO_1 вокруг центра O_1. Вектор $\vec{V}_{BO_1}$ (и, следовательно, вектор $\vec{V}_B$) перпендикулярен линии BO_1 (см. рис. 3.5, *а*).

Построим вектор $\vec{V}_B$ в соответствии со вторым векторным уравнением. Из него следует, что направление вектора $\vec{V}_B$ совпадает направлением вектора $\vec{V}_{BO_1}$, который перпендикулярен линии звена BO_1. Проведём из полюса p_v линию, параллельную вектору $\vec{V}_B$ (перпендикулярную BO_1), до пересечения её с линией, вдоль которой направлен вектор $\vec{V}_{BA}$. Обозначим пересечение этих линий точкой b. Вектор, проведённый из полюса p_v в точку b, равен вектору скорости $\vec{V}_B$. Для определения модуля скорости точки B измерим длину отрезка $p_v b$ на плане скоростей (в мм) и умножим её на масштабный коэффициент плана скоростей. Получим: $V_B = p_v b \cdot k_v = 92 \cdot 0{,}01 = 0{,}92$ м/с.

Скорость V_{BA} точки B во вращательном движении звена AB вокруг полюса A найдём измерив длину отрезка ab на плане скоростей и умножив её на величину масштабного коэффициента: $V_{BA} = ab \cdot k_v$. Угловая скорость ω_2 звена AB определяется как отношение: $\omega_2 = \frac{V_{BA}}{BA} = \frac{ab \cdot k_v}{BA} = \frac{18 \cdot 0{,}01}{0{,}4} = 0{,}45$ рад/с. Угловая скорость ω_3 вращения коромысла BO_1 вокруг оси O_1 равна: $\omega_3 = \frac{V_B}{BO_1} = \frac{0{,}92}{0{,}3} = 3{,}06$ рад/с.

Точка C является срединой коромысла BO_1. Вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен линии BO_1 и по модулю равен: $V_C = \omega_3 \cdot CO_1 = 3{,}06 \cdot 0{,}15 = 0{,}46$ см/с.

Скорость точки C механизма направлена так же как скорость точки B, но по величине в два раза её меньше. На плане скоростей точке C механизма соответствует точка c, лежащая на средине отрезка $p_v b$, изображающего скорость точки B.

Величина и направление скорости $\vec{V}_D$ точки *D* (ползуна 5) находится с учётом плоскопараллельного движения звена *CD* на основании векторной формулы: $\vec{V}_D = \vec{V}_C + \vec{V}_{DC}$, где величина и направление вектора $\vec{V}_C$ скорости точки *C* определены на плане скоростей. Вектор $\vec{V}_{DC}$ скорости точки *D* при вращении звена *CD* вокруг полюса *C* направлен перпендикулярно звену *CD*. В соответствии с этим на плане скоростей (см. рис. 3.5, *b*) из точки *c* (конец вектора $\vec{V}_C$) проводим прямую, параллельную скорости $\vec{V}_{DC}$, (перпендикулярно линии *CD*) и, так как точка *D* (ползун 5) движется горизонтально, из полюса p_v проводим горизонтальную прямую, параллельную скорости $\vec{V}_D$. Точка *d* пересечения этих прямых на плане скоростей определяет конец вектора $\vec{V}_D$ (см. рис. 3.5, *b*). Измерим на чертеже расстояние $p_v d$ (44 мм) и, умножив его на масштабный коэффициент скоростей, получим модуль скорости точки *D*: $V_D = p_v d \cdot k_v = 44 \cdot 0{,}01 = 0{,}44$ м/с.

Угловая скорость звена 4 равна: $\omega_4 = \frac{V_{DC}}{DC}$, где скорость V_{DC} точки *D*. Измерим на чертеже расстояние *dc* (*dc* = 8 мм) и, умножив его на масштабный коэффициент скоростей получим скорость $V_{DC} = dc \cdot k_v = 8 \cdot 0{,}01 = 0{,}08$ м/с. Угловая скорость звена 4: $\omega_4 = \frac{V_{DC}}{DC} = \frac{dc \cdot k_v}{DC} = \frac{8 \cdot 0{,}01}{0{,}5} = 0{,}16$ рад/с.

Найдём скорости центров масс звеньев механизма. Полагая, что центры масс звеньев механизма расположены в средине соответствующих отрезков, отметим эти точки на плане скоростей. Так, для того, чтобы на плане скоростей найти скорость центра масс звена *AB* механизма, разделим пополам отрезок *ab*. Получим точку s_2. Скорость центра масс звена *AB* равна расстоянию $p_v s_2$, умноженному на масштабный коэффициент, $V_{S_2} = p_v s_2 \cdot k_v = 96 \cdot 0{,}01 = 0{,}96$ м/с.

Аналогично, разделив пополам отрезки $p_v b$, cd на плане скоростей, получим точки s_3, s_4, которые определяют скорости центров масс, соответствен-

но, звена 3 (коромысла) и звена 4 (шатуна). Измерив нужные расстояния, получим: $V_{S_3} = p_v s_3 \cdot k_v = 46 \cdot 0{,}01 = 0{,}46$ м/с, $V_{S_4} = p_v s_4 \cdot k_v = 44 \cdot 0{,}01 = 0{,}44$ м/с.

Результаты расчётов скоростей центров масс звеньев механизма и угловых скоростей звеньев приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Абсолютные скорости центров масс и угловые скорости звеньев

Звено	*AB*	BO_1	*CD*	Ползун
Обозначение скорости центра масс звена	V_{S2}	V_{S3}	V_{S4}	V_D
Величина скорости, м/с	0,96	0,46	0,44	0,44
Обозначение угловой скорости звена	ω_2	ω_3	ω_4	–
Величина угловой скорости, рад/с	0,45	3,06	0,16	–

3.4. Построение плана ускорений механизма

Для определения значений ускорений точек механизма и угловых ускорений его звеньев построим план ускорений.

Ведущее звено 1 – кривошип *OA* – движется с постоянной угловой скоростью. В этом случае касательное ускорение точки *A* равно нулю: $a_A^{\tau} = 0$. Полное ускорение $\vec{a}_A$ точки *A* совпадает с нормальным и направлено к оси вращения звена – точке O_1 (рис. 3.6, *a*). По величине ускорение точки *A* равно: $a_A = a_A^n = \omega_1^2 \cdot O_1A = 10^2 \cdot 0{,}1 = 10$ м/с^2.

Перед началом построения плана ускорений выберем масштабный коэффициент. Примем длину вектора ускорения точки *A* на плане ускорений равной 100 мм. В этом случае масштабный коэффициент ускорений: $k_a = \frac{a_A}{100} = \frac{10}{100} = 0{,}1$ (м/с^2)/мм.

Чертёж плана ускорений начинаем с построения ускорения точки *A*.

Из некоторой точки p_a, называемой полюсом плана ускорений и взятой на чертеже в произвольном месте (рис. 3.6, *b*), направим линию вертикально вниз параллельно направлению вектора $\vec{a}_A$ ускорения точки *A* кривоши-

па (рис. 3.6, *a*). С учётом масштабного коэффициента ускорений длина вектора ускорения точки *A* на чертеже 100 мм. В конце вектора поставим стрелку и точку *a* (см. рис. 3.6, *b*).

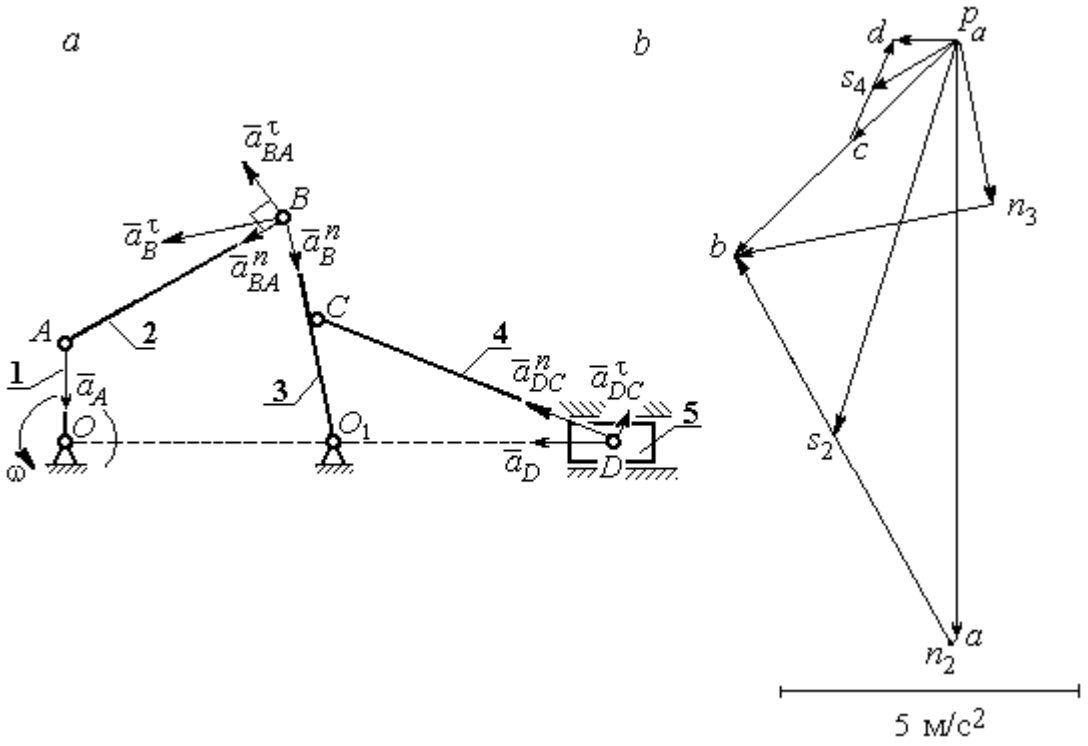


Рис. 3.6. План ускорений механизма:
a – направления векторов ускорений точек механизма; *b* – план ускорений

Ускорение точки *B* находим в соответствии с векторной формулой: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение точки *A*, выбранной за полюс; $\vec{a}^{n}_{BA}$, $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки *B* во вращательном движении шатуна *AB* относительно полюса *A*.

Правило сложения векторов в векторной формуле следующее: к концу вектора, изображающего на чертеже ускорение $\vec{a}_A$, присоединяем вектор, изображающий ускорение $\vec{a}^{n}_{BA}$, а к его концу – вектор, изображающий ускорение $\vec{a}^{\tau}_{BA}$. Тогда вектор, проведённый из начала первого вектора в конец последнего, представляет собой сумму складываемых векторов.

Проведём необходимые построения для определения ускорения точки *B*. Модуль вектора $\vec{a}_{BA}^{\,n}$ – нормальной составляющей ускорения точки *B* при вращении шатуна *AB* вокруг полюса *A* равен: $a_{BA}^{n} = \omega_2^2 \cdot AB = 0{,}45^2 \cdot 0{,}4 = 0{,}08$ м/с^2. На плане ускорений это будет отрезок длиной $\frac{a_{BA}^{n}}{k_a} = \frac{0{,}08}{0{,}1} = 0{,}8$ мм. Отложим на чертеже из точки *a* (конец вектора $\vec{a}_A$) отрезок длиной 0,8 мм вдоль линии, параллельной вектору $\vec{a}_{BA}^{\,n}$ (см. рис. 3.6, *a, b*), в сторону, куда на плане механизма направлен этот вектор. В конце отрезка поставим точку n_2. Отрезок an_2 на плане ускорений изображает нормальную составляющую $\vec{a}_{BA}^{\,n}$ ускорения точки *B* во вращательном движении шатуна *AB* относительно полюса *A*. Здесь следует заметить, что расчётная величина отрезка an_2 мала и точно показать его на чертеже невозможно. В расчётах можно считать, что вектор $\vec{a}_{BA}^{\,n}$ нормальной составляющей ускорения точки *B* и отрезок an_2 на плане ускорений равны нулю: $a_{BA}^{n} = 0$, $an_2 = 0$ и точка n_2 совпадает с точкой *a*. На рис. 3.6, *b* отрезок an_2 показан ненулевым только для того, чтобы сохранить правило последовательного построения суммы векторов.

Далее, из конца отрезка an_2 проведём линию, параллельную вектору $\vec{a}_{BA}^{\,\tau}$ (рис. 3.6, *a*), то есть перпендикулярно отрезку an_2. Однако вычислить сумму этих векторов и получить ускорение точки *B* невозможно, так как величина касательного ускорения a_{BA}^{τ} неизвестна.

Воспользуемся тем, что точка *B* принадлежит звену 3 – коромыслу BO_1, совершающему вращательное движение вокруг неподвижного центра O_1. В этом случае полное ускорение точки *B* может быть представлено как сумма его нормальной и касательной составляющих: $\vec{a}_B = \vec{a}_B^{\,n} + \vec{a}_B^{\,\tau}$. Направления векторов $\vec{a}_B^{\,n}$ и $\vec{a}_B^{\,\tau}$ показаны на рис. 3.6, *a*. Величина нормальной составляющей ускоре-

ния: $a_B^n = \omega_3^2 \cdot O_1B$ = 3,06²·0,3 = 2,84 см/с². Относительно касательной составляющей $\vec{a}_B^{\tau}$ ускорения точки *B* известно только, что она направлена перпендикулярно BO_1. Вычислим длину отрезка, изображающего на чертеже нормальную составляющую ускорения точки *B*, как отношение $\frac{a_B^n}{k_a} = \frac{2{,}84}{0{,}1}$ = 28,4 мм и на чертеже отложим его из полюса p_a параллельно вектору $\vec{a}_B^n$. В конце отрезка поставим точку n_3 (см. рис. 3.6, *b*). По правилу сложения векторов из точки n_3 (конца отрезка $p_a n_3$, изображающего ускорение $\vec{a}_B^n$) проводим линию, параллельную вектору $\vec{a}_B^{\tau}$ (касательная составляющая ускорения точки *B*). Линия, параллельную вектору $\vec{a}_B^{\tau}$ перпендикулярна отрезку $p_a n_3$. Пересечение двух перпендикуляров (к отрезку $p_a n_3$ в точке n_3 и к отрезку an_2 в точке n_2) обозначим точкой *b*. Отрезок, проведённый из полюса p_a в точку *b*, изображает на плане ускорений полное ускорение $\vec{a}_B$ точки *B* механизма. Величину ускорения точки *B* найдём, измерив на чертеже длину отрезка $p_a b$ и умножив его на масштабный коэффициент: $a_B = p_a b \cdot k_a$ = 52·0,1 = 5,2 м/с².

Отрезок $n_3 b$ изображает на чертеже касательную составляющую ускорения $\vec{a}_B^{\tau}$ точки *B* . Измеряем длину отрезка $n_3 b$ ($n_3 b$ = 43 мм), тогда угловое ускорение звена 3 равно: $\varepsilon_3 = \frac{a_B^{\tau}}{BO_1} = \frac{n_3 b \cdot k_a}{BO_1} = \frac{43 \cdot 0{,}1}{0{,}3}$ = 14,3 рад/с². Угловое ускорение звена 2 находится аналогично. На чертеже измеряем отрезок $n_2 b$, который изображает ускорение $\vec{a}_{BA}^{\tau}$ ($n_2 b$ = 74 мм). Тогда угловое ускорение звена 2: $\varepsilon_2 = \frac{a_{BA}^{\tau}}{BA} = \frac{n_2 b \cdot k_a}{BA} = \frac{74 \cdot 0{,}1}{0{,}4}$ = 18,5 рад/с².

Точка *C* принадлежит звену 3, совершающему вращательное движение вокруг неподвижного центра O_1. Так как точка *C* на плане механизма находится в средине звена BO_1, величина ускорения точки *C* равна половине ускорения

точки *B*: a_C = 2,6 м/с^2. Соответствующая ей точка *c* на плане ускорений находится на средине отрезка $p_a b$. Отрезок $p_a c$ изображает ускорение точки *C*

Ускорение точки *D* находим на основании векторной формулы: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^{\,n}_{DC} + \vec{a}^{\,\tau}_{DC}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение точки *C*, выбранной за полюс; $\vec{a}^{\,n}_{DC}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{DC}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки *D* во вращательном движении шатуна *DC* относительно полюса *C*.

Заметим сразу, что величина вектора $\vec{a}^{\,n}_{DC}$ (нормальной составляющей ускорения точки *D*) очень мала: $a^n_{DC} = \omega_4^2 \cdot DC = 0{,}16^2 \cdot 0{,}5 = 0{,}01$ м/с^2. На плане ускорений это будет отрезок, длиной $\frac{a^n_{DC}}{k_a} = \frac{0{,}01}{0{,}1} = 0{,}1$ мм, который при выбранном масштабе построить точно невозможно. Можно считать, что вектор $\vec{a}^{\,n}_{DC}$ и соответствующий ему отрезок на плане ускорений равны нулю. В результате ускорение точки *D* находим из векторной формулы: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^{\,\tau}_{DC}$.

Ускорение $\vec{a}_D$ точки *D* ползуна на плане механизма направлено вдоль линии OO_1. Это означает, что на плане ускорений ускорение точки *D* должно изображаться горизонтальным отрезком, исходящим из центра p_a.

Проведём необходимые построения. На плане ускорений (см. рис. 3.6, *b*) из точки *c* (конец вектора $\vec{a}_C$) проведём линию, параллельную вектору $\vec{a}^{\,\tau}_{DC}$, до пересечения её с горизонтальной прямой, идущей из полюса ускорений, вдоль которой направлен вектор ускорения точки *D*. Обозначим точку пересечения *d*. Отрезок прямой $p_a d$ изображает на плане ускорений ускорение точки *D*. Замеряем на чертеже длину отрезка $p_a d$ ($p_a d$ = 13 мм) и находим ускорение точки *D*: $a_D = p_a d \cdot k_a = 13 \cdot 0{,}1 = 1{,}3$ м/с^2. Замеряем на плане ускорений длину отрезка *cd*, изображающего ускорение $\vec{a}^{\,\tau}_{DC}$ (*cd* = 18 мм), и находим угловое ускорение звена 4: $\varepsilon_4 = \frac{a^\tau_{DC}}{DC} = \frac{cd \cdot k_a}{DC} = \frac{18 \cdot 0{,}1}{0{,}5} = 3{,}6$ рад/с^2.

Определим ускорения центров масс звеньев механизма.

Разделим пополам отрезок ab на плане ускорений, обозначим середину отрезка точкой s_2 и соединим с полюсом p_a. Отрезок $p_a s_2$ изображает ускорение центра масс звена 2 – шатуна *AB*. Длина отрезка $p_a s_2$ = 70 мм. Ускорение центра масс звена 2: $a_{S2} = p_a s_2 \cdot k_a$ = 70·0,1 = 7 м/с^2. Аналогично, точка s_4, лежащая на средине отрезка *cd*, изображает центр масс звена 4 шатуна *CD*. Ускорение центра масс звена 4: $a_{S4} = p_a s_4 \cdot k_a$ = 18·0,1 = 1,8 м/с^2. Ускорение центра масс звена 3 равно ускорению точки *C*: $a_{S3} = a_C$ = 2,6 м/с^2.

Все построения плана ускорений приведены на рис. 3.6.

Результаты вычислений ускорений центров масс звеньев, а также угловых ускорений звеньев механизма приводятся в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Ускорения центров масс звеньев механизма и угловые ускорения звеньев

Звено	*AB*	BO_1	*DC*	Ползун
Обозначение ускорения центра масс звена	a_{S2}	a_{S3}	a_{S4}	a_D
Величина ускорения, м/с^2	7	2,6	1,8	1,3
Обозначение углового ускорения звена	ε_2	ε_3	ε_4	–
Величина углового ускорения, рад/с^2	18,5	14,3	3,6	–

3.5. Кинетостатический расчёт механизма

Разделение механизма на группы Ассура приведено на рис. 3.3. Изобразим группу Ассура, состоящую из звеньев 5 – 4, в масштабе 1:4 и приложим в соответствующих точках действующие силы (рис. 3.7).

Силу тяжести $\vec{G}_4$ и силу инерции $\vec{F}_4^{\text{ин}}$ прикладываем в точке s_4 – центре масс стержня *CD*. При этом сила тяжести $\vec{G}_4$ направлена вертикально вниз, а сила инерции $\vec{F}_4^{\text{ин}}$ направлена параллельно линии $p_a s_4$, обозначающей на плане ускорений (см. 3.6, *b*) направление ускорения центра масс стержня, в сторону, противоположную направлению вектора ускорения $\vec{a}_{S4}$.

В точке *D* – центре масс ползуна 5 – прикладываем силу тяжести $\vec{G}_5$, силу полезного сопротивления $\vec{F}_{\text{р}}$, направленную в сторону, противоположную направлению вектора скорости ползуна, и силу инерции $\vec{F}_5^{\text{ин}}$, направленную в сторону, противоположную направлению вектора ускорения ползуна $\vec{a}_D$. Направления векторов скоростей и ускорений показаны на рис. 3.5 – 3.6. Реакцию $\vec{R}_{05}$ стойки на ползун (0 – индекс стойки, 5 – индекс ползуна) изображаем перпендикулярно неподвижным направляющим.

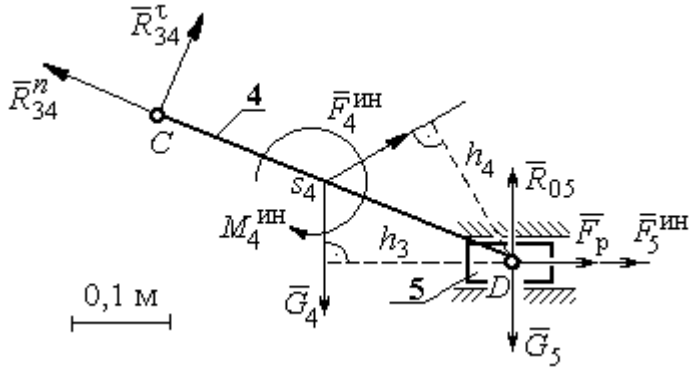


Рис. 3.7. Силы, действующие на группу Асура 5–4

Полную реакцию шарнирного соединения в точке *C* раскладываем на две составляющие: вдоль стержня *CD* – $\vec{R}_{34}^{n}$ и перпендикулярно ему – $\vec{R}_{34}^{\tau}$. Здесь первый нижний индекс в обозначении реакции означает, со стороны какого звена действует реакция, второй нижний – на какое звено.

Главный момент сил инерции, приложенный к 4 звену, обозначаем дуговой стрелкой $M_4^{\text{ин}}$, направленной в сторону, прогтивоположную угловому ускорению стержня 4 (см. рис. 3.6).

В соответствии с принципом Д’Аламбера полученная система сил находится в равновесии. Составим уравнение равновесия в виде равенства нулю суммы моментов сил относительно точки *D*.

$$-R_{34}^{\tau}\cdot CD + G_4 h_3 - F_4^{\text{ин}} h_4 - M_4^{\text{ин}} = 0\,.$$

Способ построения плеч h_3, h_4 сил $\vec{G}_4$ и $\vec{F}_4^{\text{ин}}$ показан на рис. 3.7.

Вычисляем модули сил и моментов сил инерции.

$$F_4^{\text{ин}} = m_4 a_{S4} = 50\cdot 1{,}8 = 90 \text{ Н}, \quad F_5^{\text{ин}} = m_5 a_D = 10\cdot 1{,}3 = 13 \text{ Н}.$$

$$M_4^{\text{ин}} = J_{S4}\varepsilon_4 = 3 \cdot 3{,}6 = 10{,}8 \text{ Н·м}.$$

Вычисляем плечи сил. Длина звена *CD* равна 0,5 м. При масштабе 1:4 масштабный коэффициент длины выбран равным: $k_l = 0{,}004 \ \frac{\text{м}}{\text{мм}}$ (см. рис. 3.4). На рис. 3.7 измеряем длины отрезков плеч сил (в мм) и умножаем их на масштабный коэффициент длины. Получим

$$h_3 = l_{h3}k_l = 61 \cdot 0{,}004 = 0{,}244 \text{ м}, \ h_4 = l_{h4}k_l = 48 \cdot 0{,}004 = 0{,}192 \text{ м}.$$

Из уравнения равновесия находим силу R_{34}^{τ}:

$$R_{34}^{\tau} = \frac{G_4 h_3 - F_4^{\text{ин}} h_4 - M_4^{\text{ин}}}{CD} = \frac{490 \cdot 0{,}244 - 90 \cdot 0{,}192 - 10{,}8}{0{,}5} = 183 \text{ Н}.$$

Неизвестные силы R_{34}^{n} и R_5 находим из многоугольника сил, который строится согласно векторному уравнению:

$$\vec{F}_{\text{р}} + \vec{F}_5^{\text{ин}} + \vec{G}_5 + \vec{G}_4 + \vec{F}_4^{\text{ин}} + \vec{R}_{34}^{\tau} + \vec{R}_{34}^{n} + \vec{R}_{05} = 0.$$

Для построения силового многоугольника выбираем масштабный коэффициент сил k_F таким образом, чтобы на чертеже длина максимального вектора составляла, например, 300 мм. Таким вектором здесь является сила сопротивления. Тогда $k_F = \frac{F_{\text{р}}}{300} = \frac{16045}{300} = 53{,}48$ Н/мм.

Определяем длины векторов силового многоугольника:

$$l_{F_{\text{р}}} = \frac{F_{\text{р}}}{k_F} = \frac{16045}{53{,}48} = 300 \text{ мм}, \ l_{F_5^{\text{ин}}} = \frac{F_5^{\text{ин}}}{k_F} = \frac{13}{53{,}48} \ 1{,}3 \text{ мм},$$

$$l_{G_5} = \frac{G_5}{k_F} = \frac{98}{53{,}48} = 1{,}8 \text{ мм}, \ l_{G_4} = \frac{G_4}{k_F} = \frac{490}{53{,}48} = 9{,}2 \text{ мм},$$

$$l_{F_4^{\text{ин}}} = \frac{F_4^{\text{ин}}}{k_F} = \frac{90}{53{,}48} = 1{,}7 \text{ мм}, \quad l_{R_{34}^{\tau}} = \frac{R_{34}^{\tau}}{k_F} = \frac{183}{53{,}48} = 3{,}4 \text{ мм}.$$

Построение многоугольника сил (рис. 3.8) проводим последовательно в том же порядке, в каком они расположены в векторном равенстве многоугольника сил. Направления действия сил показаны на рис. 3.8, *а*.

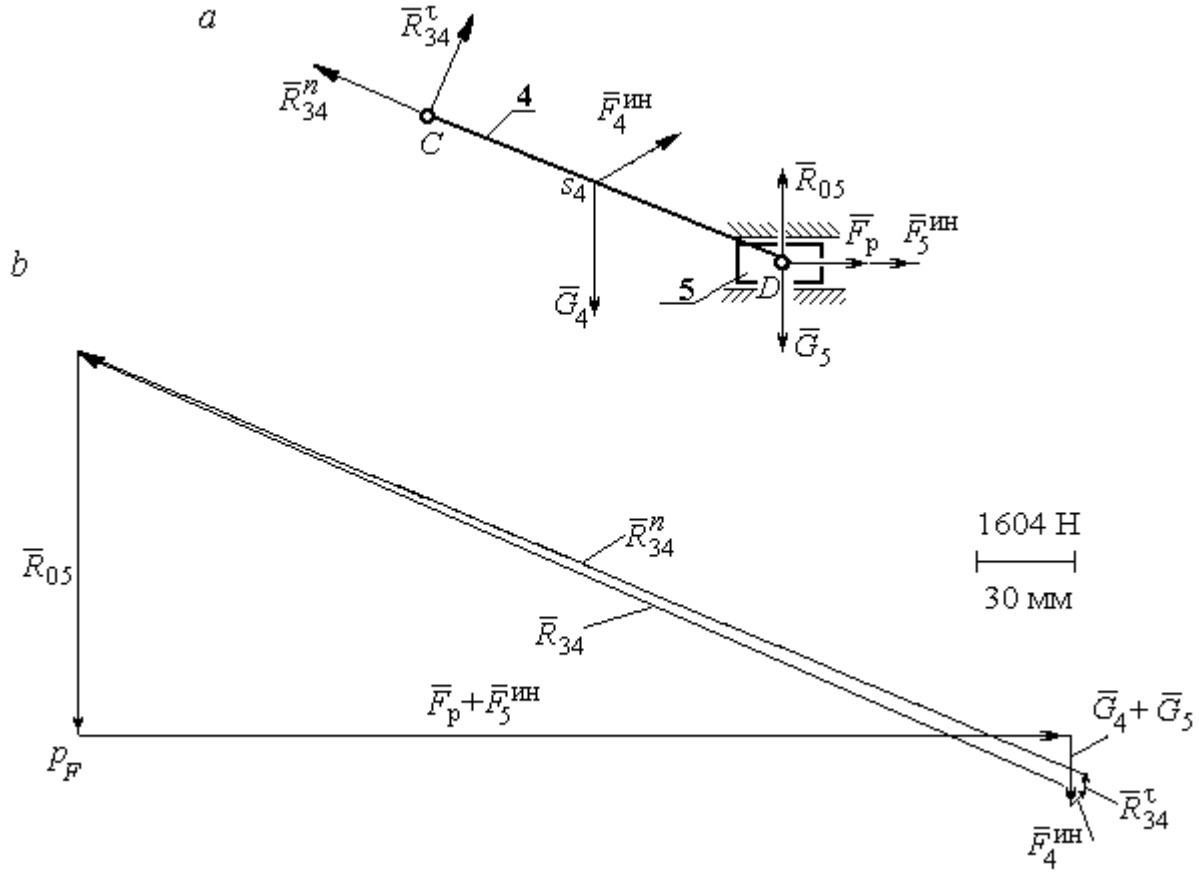


Рис. 3.8. Силовой многоугольник группы Ассура 5 – 4:
а – направления действия сил; *b* – силовой многоугольник

Из произвольной точки p_F – полюса сил – (см. рис. 3.8, *b*) строим горизонтальный вектор $\vec{F}_{\text{р}} + \vec{F}_5^{\text{ин}}$ с учётом выбранного масштаба и в сторону действия этих сил. Из конца этого вектора вертикально вниз строим вектор $\vec{G}_4 + \vec{G}_5$ и так далее последовательно строятся все вектора из векторного уравнения многоугольника сил.

Для того, чтобы завершить построение и определить неизвестные силы $\vec{R}_{34}^{\,n}$ и $\vec{R}_{05}$, поступаем следующим образом.

Из конца вектора $\vec{R}_{34}^{\,\tau}$ (см. рис. 3.8, *b*) проводим линию, параллельную линии действия силы $\vec{R}_{34}^{\,n}$ (по направлению стержня *CD*). Так как равенство нулю векторного уравнения означает, что силовой многоугольник замкнут, из полюса p_F проводим линию, параллельную линии действия реакции $\vec{R}_{05}$. Точка

пересечения этой линии с линией действия силы $\vec{R}_{34}^{n}$ является концом вектора $\vec{R}_{34}^{n}$ и началом вектора $\vec{R}_{05}$. Соединив начало вектора $\vec{R}_{34}^{\tau}$ с концом вектора $\vec{R}_{34}^{n}$, получим полную реакцию $\vec{R}_{34}$ звена 3 на звено 4 (см. рис. 3.8, *b*). Модуль силы $\vec{R}_{34}$ равен произведению длины отрезка, изображающего силу, на масштабный коэффициент силы: $R_{34} = l_{R_{34}} \cdot k_F = 327 \cdot 53{,}48 = 17487$ Н.

Изобразим вторую группу Ассура, состоящую из звеньев 3 – 2, в масштабе 1:4 (рис. 3.9). Прикладываем в точках, изображающих центры масс, силы тяжести $\vec{G}_2$, $\vec{G}_3$, силы инерции $\vec{F}_2^{\text{ин}}$, $\vec{F}_3^{\text{ин}}$ и изображаем моменты сил инерции $M_2^{\text{ин}}$, $M_3^{\text{ин}}$. Направления сил и моментов сил инерции противоположны направлениям, соответственно, векторов ускорений центров масс и угловых ускорений стержней на плане ускорений (см. рис. 3.6, *b*). Силы реакции со стороны звена 1 на звено 2 в точке *A* раскладываем на составляющие – вдоль звена 2 – $\vec{R}_{12}^{n}$ и перпендикулярно ему – $\vec{R}_{12}^{\tau}$. Аналогично раскладываем на составляющие $\vec{R}_{03}^{n}$ и $\vec{R}_{03}^{\tau}$ реакцию стойки (индекс 0) на звено 3 (индекс 3) в точке O_1.

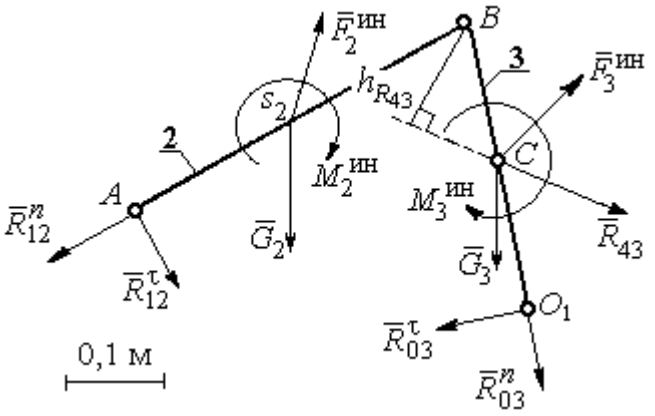


Рис. 3.9. Силы, действующие на группу Асура 3–2

Реакцию $\vec{R}_{43}$ со стороны звена 4 на звено 3 прикладываем в точке *C* и направляем в сторону, противоположную направлению реакции $\vec{R}_{34}$ (см. рис. 3.8). Вычисляем модули сил и моментов сил инерции:

$$G_2 = m_2 g = 40 \cdot 9{,}8 = 392 \text{ Н}, \quad G_3 = m_3 g = 30 \cdot 9{,}8 = 294 \text{ Н},$$

$$F_2^{\text{ин}} = m_2 a_{S2} = 40 \cdot 7 = 280 \text{ Н}, \quad F_3^{\text{ин}} = m_3 a_{S3} = 30 \cdot 2{,}6 = 78 \text{ Н},$$

$$M_2^{\text{ин}} = J_{S2} \varepsilon_2 = 2 \cdot 18{,}5 = 37 \text{ Н·м}, \quad M_3^{\text{ин}} = J_{S3} \varepsilon_3 = 1 \cdot 14{,}3 = 14{,}3 \text{ Н·м}.$$

Касательную составляющую реакции шарнира O_1 находим на основании принципа Д'Аламбера из условия равновесия звена 3. Составим условие равновесия звена 3 в виде равенства нулю суммы моментов сил и сил инерции относительно точки B.

$$-R_{03}^{\tau} \cdot O_1B + F_3^{\text{ин}} h_{F_3} + R_{43} h_{R_{43}} - G_3 h_{G_3} - M_3^{\text{ин}} = 0.$$

Вычисляем плечи сил h_{F_3}, $h_{R_{43}}$, h_{G_3} относительно центра B (на рис. 3.9 показано построение плеча $h_{R_{43}}$ силы $\vec{R}_{43}$). Для этого необходимо измерить на чертеже (в мм) длины отрезков плеч сил и умножить их на масштабный коэффициент длины $k_l = 0{,}004 \ \frac{\text{м}}{\text{мм}}$. Получим:

$$h_{F_3} = l_{F_3} \cdot k_l = 32 \cdot 0{,}004 = 0{,}13 \text{ м}, \qquad h_{R_{43}} = l_{R_{43}} \cdot k_l = 30 \cdot 0{,}004 = 0{,}12 \text{ м}.$$

$$h_{G_3} = l_{G_3} \cdot k_l = 9{,}7 \cdot 0{,}004 = 0{,}04 \text{ м}$$

Из уравнения моментов следует:

$$R_{03}^{\tau} = \frac{1}{O_1B}\left(F_3^{\text{ин}} h_{F_3} + R_{43} h_{R_{43}} - G_3 h_{G_3} - M_3^{\text{ин}}\right) =$$

$$= \frac{1}{0{,}3}\left(78 \cdot 0{,}13 + 17487 \cdot 0{,}12 - 294 \cdot 0{,}04 - 14{,}3\right) = 6940 \text{ Н}.$$

Аналогично, касательную составляющую реакции шарнира A находим из условия равновесия звена 2, записанного в виде равенства нулю суммы моментов сил относительно точки B:

$$R_{12}^{\tau} \cdot AB - F_2^{\text{ин}} h_{F_2} + G_2 h_{G_2} - M_2^{\text{ин}} = 0.$$

Отсюда

$$R_{12}^{\tau} = \frac{1}{AB}\left(F_2^{\text{ин}} h_{F_2} - G_2 h_{G_2} + M_3^{\text{ин}}\right) = \frac{1}{0{,}4}\left(280 \cdot 0{,}15 - 392 \cdot 0{,}18 + 37\right) = 21{,}1 \text{ Н}.$$

Неизвестные силы $\vec{R}_{12}^{n}$ и $\vec{R}_{03}^{n}$ находим из силового многоугольника, представляющего векторное уравнение равновесия системы сил, действующих на группу Ассура 3–2

$$\vec{G}_2 + \vec{G}_3 + \vec{R}_{43} + \vec{F}_2^{\text{ин}} + \vec{F}_3^{\text{ин}} + \vec{R}_{03}^{\tau} + \vec{R}_{03}^{n} + \vec{R}_{12}^{n} + \vec{R}_{12}^{\tau} = 0.$$

Выбираем масштабный коэффициент сил k_F. Предположим, что на чертеже длина максимального вектора, каковым здесь является сила реакции $\vec{R}_{43}$, модуль которой $R_{43} = 17487$ Н, должна быть равна 300 мм. Тогда масштабный коэффициент сил: $k_F = \dfrac{R_{43}}{300} = \dfrac{17487}{300} = 58{,}29$ Н/мм.

Определяем длины векторов сил:

$$l_{G_2} = \frac{G_2}{k_F} = \frac{392}{58{,}29} = 6{,}7 \text{ мм}, \quad l_{G_3} = \frac{G_3}{k_F} = \frac{294}{58{,}29} = 5{,}1 \text{ мм},$$

$$l_{R_{43}} = \frac{R_{43}}{k_F} = \frac{17487}{58{,}29} = 300 \text{ мм}, \quad l_{F_2^{\text{ин}}} = \frac{F_2^{\text{ин}}}{k_F} = \frac{280}{58{,}29} = 4{,}8 \text{ мм},$$

$$l_{F_3^{\text{ин}}} = \frac{F_3^{\text{ин}}}{k_F} = \frac{78}{58{,}29} = 1{,}3 \text{ мм}, \quad l_{R_{03}^{\tau}} = \frac{R_{03}^{\tau}}{k_F} = \frac{6940}{58{,}29} = 119{,}1 \text{ мм},$$

$$l_{R_{12}^{\tau}} = \frac{R_{12}^{\tau}}{k_F} = \frac{21{,}1}{58{,}29} = 0{,}4 \text{ мм}.$$

Построение многоугольника сил проводим последовательно в том же порядке, в каком они расположены в векторном равенстве многоугольника сил.

Из произвольной точки p_F – полюса сил – вертикально вниз проводим вектор $\vec{G}_2 + \vec{G}_3$ с учётом выбранного масштаба его длины (рис. 3.10, *b*). Затем из конца вектора $\vec{G}_2 + \vec{G}_3$ строим вектор $\vec{R}_{43}$, величина и направление которого получены из силового анализа группы Ассура 4–5 и показаны на рис. 3.10, *a*. Таким образом, последовательно строятся все вектора из векторного уравнения многоугольника сил.

Для того, чтобы завершить построение и определить неизвестные силы $\vec{R}_{03}^{n}$ и $\vec{R}_{12}^{n}$, поступаем следующим образом. Из конца вектора $\vec{R}_{03}^{\tau}$ проводим линию, перпендикулярную этому вектору. Это направление вектора $\vec{R}_{03}^{n}$. Вектор $\vec{R}_{12}^{n}$ следует строить перпендикулярно вектору $\vec{R}_{12}^{\tau}$ так, чтобы конец

вектора суммы $\vec{R}_{12}^{n}+\vec{R}_{12}^{\tau}$ пришёлся в точку p_F (условие замкнутости силового многоугольника).

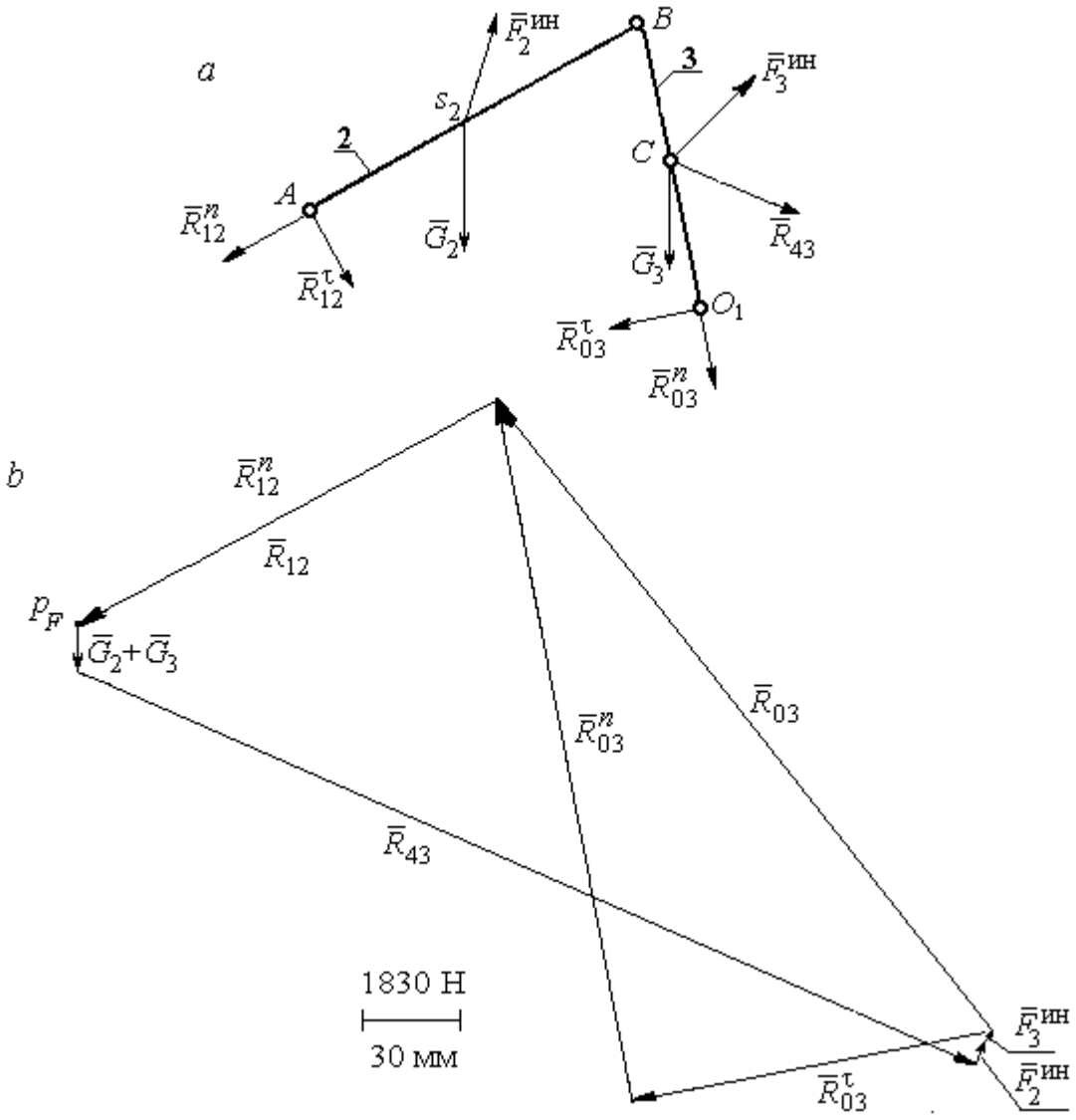


Рис. 3.10. Силовой многоугольник группы Ассура 3 – 2:
а – направления действия сил; *b* – силовой многоугольник

Заметим, что длина векора $\vec{R}_{12}^{\tau}$ настолько мала ($l_{R_{12}^{\tau}}$ = 0,4 мм), что изобразить его на чертеже силового многоугольника группы Ассура 3 – 2 не представляется возможным. Полагаем этот вектор равным нулю. Тогда из точки p_F (формально из начала вектора $\vec{R}_{12}^{\tau}$) проводится линия, параллельная

звену 2 (см. рис. 3.10, *b*). Это направление нормальной составляющей реакции $\vec{R}_{12}^{n}$. Точка пересечения двух построенных линий определяет конец вектора $\vec{R}_{03}^{n}$ и начало $\vec{R}_{12}^{n}$.

Полная реакция $\vec{R}_{03}$ стойки на звено 3 в точке O_1 на чертеже силового многоугольника представляется вектором, проведённым из начала вектора $\vec{R}_{03}^{\tau}$ в конец вектора $\vec{R}_{03}^{n}$.

Полная реакция шарнира *A* совпадает по величине и направлению с нормальной составляющей $\vec{R}_{12} = \vec{R}_{12}^{n}$.

Для того, чтобы найти величины полных реакций, измерим (в мм) на плане сил длины векторов $\vec{R}_{03}$ и $\vec{R}_{12}^{n}$ и умножим их на масштабный коэффициент сил. Получим:

$$R_{12} = R_{12}^{n} = l_{R_{12}^{n}} k_F = 132{,}5 \cdot 58{,}29 = 7723 \text{ Н}, \quad R_{03} = l_{R_{03}} k_F = 211 \cdot 58{,}29 = 12299 \text{ Н}.$$

Ведущее звено механизма в масштабе 1:4 и силы, действующие на него, показаны на рис. 3.11. Масштабный коэффициент длины такой же, как и при построении плана механизма $k_l = 0{,}004 \ \frac{\text{м}}{\text{мм}}$ (см. рис. 3.4). Сила $\vec{R}_{21}$ направлена навстречу силе $\vec{R}_{12}$ (см. рис. 3.10, *b*) и приложена в точке *A*. Предполагается, что центр масс кривошипа находится на валу, тогда сила тяжести кривошипа $\vec{G}_1$ приложена на оси вала.

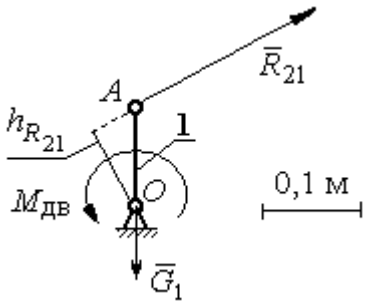


Рис. 3.11. Ведущее звено

Движущий момент $M_{\text{дв}}$ находим из уравнения равновесия ведущего звена в форме моментов относительно оси вала кривошипа: $M_{\text{дв}} - R_{21} h_{R_{21}} = 0$, где $h_{R_{21}}$ – плечо силы $\vec{R}_{21}$. Измерив (в мм) на чертеже длину отрезка, изображающего плечо силы $\vec{R}_{21}$, и умножив его на масштабный коэффициент длины, получим

плечо $h_{R_{21}} = l_{R_{21}} \cdot k_l$ = 23·0,004 = 0,093 м. Из уравнения равновесия ведущего звена находим величину движущего момента:

$$M_{\text{дв}} = R_{21} h_{R_{21}} = 7723 \cdot 0{,}093 = 718{,}2 \text{ Н·м}.$$

3.6. Определение движущего момента на валу кривошипа по методу Н. Е. Жуковского

Проверку найденного значения движущего момента проведём, рассчитав его по методу Н. Е. Жуковского.

Определим уравновешивающую силу, приведённую к точке *A* кривошипа. Вычисляем силы тяжести звеньев.

$$G_2 = m_2 g = 40 \cdot 9{,}8 = 392 \text{ Н}, \quad G_3 = m_3 g = 30 \cdot 9{,}8 = 294 \text{ Н},$$

$$G_4 = m_4 g = 50 \cdot 9{,}8 = 490 \text{ Н}, \quad G_5 = m_5 g = 10 \cdot 9{,}8 = 98 \text{ Н}.$$

Вычисляем модули сил инерции, действующих на механизм.

$$F_2^{\text{ин}} = m_2 a_{S2} = 40 \cdot 7 = 280 \text{ Н}, \quad F_3^{\text{ин}} = m_3 a_{S3} = 30 \cdot 2{,}6 = 78 \text{ Н},$$

$$F_4^{\text{ин}} = m_4 a_{S4} = 50 \cdot 1{,}8 = 90 \text{ Н}, \quad F_5^{\text{ин}} = m_5 a_D = 10 \cdot 1{,}3 = 13 \text{ Н}.$$

Вычисляем модули моментов сил инерции.

$$M_2^{\text{ин}} = J_{S2} \varepsilon_2 = 2 \cdot 18{,}5 = 37 \text{ Н·м}, \quad M_3^{\text{ин}} = J_{S3} \varepsilon_3 = 1 \cdot 14{,}3 = 14{,}3 \text{ Н·м},$$

$$M_4^{\text{ин}} = J_{S4} \varepsilon_4 = 3 \cdot 3{,}6 = 10{,}8 \text{ Н·м}.$$

Построим «жёсткий рычаг» Жуковского. Изобразим план скоростей механизма (см. рис. 3.5, *b*), повернув его на 90º. Приложим силы тяжести и силы инерции в точках, изображающих на повернутом плане скоростей, центры масс звеньев механизма. Направление сил инерции противоположно направлению ускорений центров масс, показанных на плане ускорений. Моменты сил инерции, действующие на звенья механизма, раскладываем на две антипараллельные силы, приложенные к крайним точкам звена, перпендикулярно ему:

$$F_2' = F_2'' = \frac{M_2^{\text{ин}}}{AB} = \frac{37}{0{,}4} = 92{,}5 \text{ Н}, \quad F_3' = F_3'' = \frac{M_3^{\text{ин}}}{O_1 B} = \frac{14{,}3}{0{,}3} = 48 \text{ Н},$$

$$F_4' = F_4'' = \frac{M_4^{\text{ин}}}{CD} = \frac{10{,}8}{0{,}5} = 21{,}6 \text{ Н}.$$

Заданное положение кривошипа осуществляется на рабочем ходу поршня. Сила полезного сопротивления $F_{\text{р}}$ направлена в сторону, противоположную движению поршня. Рычаг Н. Е. Жуковского приведён на рис. 3.12. На рисунке отмечены силы тяжести и силы инерции звеньев, приложенные в точках плана скоростей $s_2 - s_4$, соответствующих положению центров масс этих звеньев. Показаны пары сил инерции $(\vec{F}_2', \vec{F}_2'')$, $(\vec{F}_3', \vec{F}_3'')$, $(\vec{F}_4', \vec{F}_4'')$, образующие главные моменты сил инерции $M_2^{\text{ин}}$, $M_3^{\text{ин}}$, $M_4^{\text{ин}}$, приложенные, соответственно, к звеньям 2 – 4. Применение «рычага Жуковского» для определения приведённой силы заключается в составлении уравнения равновесия в форме равенства нулю суммы моментов заданных сил относительно полюса p_v:

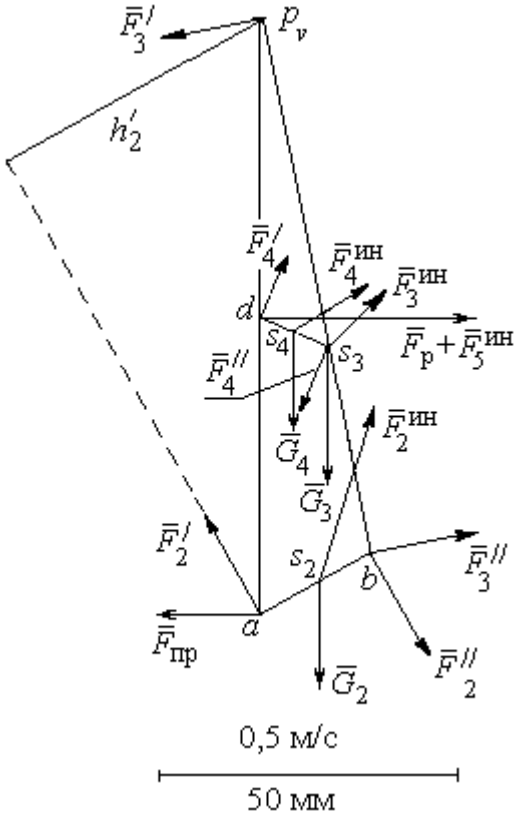


Рис. 3.12. «Жёсткий рычаг» Н. Е. Жуковского

$$-F_{\text{пр}} \cdot h_{\text{пр}} - F_2' \cdot h_2' + F_2'' \cdot h_2'' - G_2 \cdot h_{G2} + F_2^{\text{ин}} \cdot h_2 + F_3'' \cdot h_3'' - F_4' \cdot h_4' + F_4'' \cdot h_4'' -$$

$$-G_4 \cdot h_{G4} - G_3 \cdot h_{G3} + (F_{\text{р}} + F_5^{\text{ин}}) h_5 + F_4^{\text{ин}} \cdot h_4 + F_3^{\text{ин}} \cdot h_3 = 0.$$

При вычислении моментов сил плечи сил определяются графически с учётом масштабного коэффициента плана скоростей. Так плечом $h_{\text{пр}}$ силы $\vec{F}_{\text{пр}}$ относительно полюса p_v на плане рычага Жуковского является отрезок $p_v a$, равный, согласно масштабному коэффициенту, 100 мм. На рис. 3.12, в качестве примера, показан способ вычисления плеча h_2' силы $\vec{F}_2'$ – как кратчайшее рас-

стояние от полюса p_v до линии действия силы $\vec{F}_2'$. Измерив это расстояние, найдём h_2' = 52 мм. Аналогичным образом в уравнении равновесия вычисляются плечи остальных сил. В результате получим:

$$F_{\text{пр}} \cdot 100 = -92{,}5 \cdot 52 + 92{,}5 \cdot 21 - 392 \cdot 6 + 280 \cdot 31 + 48 \cdot 92 - 21{,}6 \cdot 23 + 21{,}6 \cdot 33 -$$

$$-490 \cdot 3 - 294 \cdot 7 + (16045 + 13)44 + 90 \cdot 42 + 78 \cdot 36,$$

откуда находим: $F_{\text{пр}}$ = 7177 Н·м. Величина движущего момента на валу кривошипа, находится из формулы: $M_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} \cdot O_1A$ = 7177·0,1 = 717,7 Н·м.

Погрешность расчёта движущего момента по методу «рычага Н. Е. Жуковского» по сравнению с кинетостатическим расчётом ($M_{\text{дв}}$ = 718,2 Н·м) составляет: $\delta_M = \dfrac{718{,}2 - 717{,}7}{718{,}2} 100$ % = 0,0 7 %.

3.7. Построение профиля кулачка

Построение кинематических диаграмм движения толкателя

Закон изменения аналога ускорения центрального плоского толкателя по фазам движения кулачка приведён в задании на курсовой проект (см. рис. 3.1). Построенный в масштабе, с учётом исходных данных, указанных в задании, график изменения аналога ускорения центрального плоского толкателя по фазам движения кулачка показан на рис. 3.13, *а*.

На первом участке изменение аналога ускорения происходит по линейному закону: $S_1'' = a_1\varphi + b_1$. Из графика найдём величины аналога ускорения в граничных точках первого участка (численные значения граничных точек должны быть переведены в радианы): $S_1''(0) = 0$, $S_1''(1{,}57) = 40$ мм/рад^2. Подставляя их в закон изменения аналога ускорения на первом участке, получим два алгебраических уравнения относительно неизвестных a_1, b_1:

$$0 = a_1 \cdot 0 + b_1, \quad 40 = a_1 \cdot 1{,}57 + b_1,$$

откуда находим a_1 = 25,48; b_1= 0. Таким образом, закон изменения аналога ускорения толкателя на первом участке $S_1'' = 25{,}48\varphi$. На втором участке величина аналога ускорения $S_2'' = -20$ мм/рад^2.

Для того, чтобы построить диаграмму изменения аналога скорости, проинтегрируем полученный аналог ускорения. На первом участке получим:

$$S_1' = \int S_1'' d\varphi = \int 25{,}48\varphi d\varphi = 12{,}74\varphi^2 + C_1.$$

Константа интегрирования C_1 находится из начального условия: при $\varphi = 0$ $S_1' = 0$. Отсюда следует C_1 = 0. Окончательно закон изменения аналога скорости на первом участке движения толкателя представляет собой параболу $S_1' = 12{,}74\varphi^2$ с вершиной при $\varphi = 0$.

В конце первого участка (при $\varphi = 1{,}57$) величина аналога скорости толкателя равна: $S_1'(1{,}57) = 12{,}74 \cdot 1{,}57^2$ = 31,4 мм/рад.

Аналогично проводим интегрирование аналога ускорения толкателя на втором участке: $S_2' = \int S_2'' d\varphi = -\int 20 d\varphi = -20\varphi + C_2$.

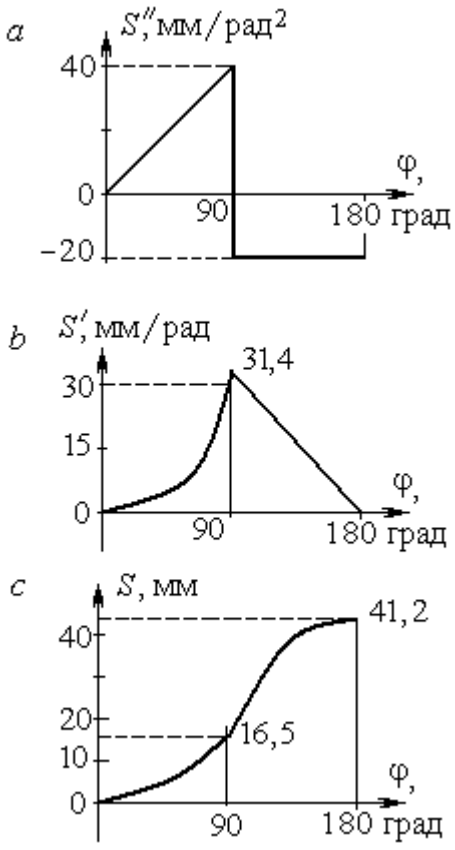


Рис. 3.13. Диаграммы движения толкателя:
a – диаграмма изменения аналога ускорения; *b* – диаграмма изменения аналога скорости; *c* – диаграмма изменения пути

Константу интегрирования C_2 найдём из краевого условия, согласно которому аналог скорости толкателя в начале второго участка равен аналогу скорости в конце первого: $S_2'(1{,}57) = S_1'(1{,}57) = 31{,}4$ мм/рад. Подставляя это условие в уравнение для аналога скорости на втором участке, получим $C_2 = 31{,}4 + 20 \cdot 1{,}57 =$ 62,8. В результате, закон изменения аналога скорости на втором участке представляется линейной функцией: $S_2' = -20\varphi + 62{,}8$. График изменения аналога скорости толкателя показан на рис. 3.13, *b*.

Для того, чтобы получить график изменения пути толкателя, необходимо проинтегрировать его скорость по участкам. Получим на первом участке: $S_1 = \int S_1' d\varphi = \int 12{,}74\varphi^2 d\varphi = 4{,}25\varphi^3 + C_3$. Используя краевое условие на начало движения толкателя: при $\varphi = 0$ $S_1 = 0$, получим $C_3 = 0$. Таким образом, на первом участке движение толкателя определяется кубической параболой: $S_1 = 4{,}25\varphi^3$. В конце первого участка при $\varphi = 1{,}57$ $S_1 = 4{,}25 \cdot 1{,}57^3 = 16{,}45$ мм,

На втором участке $S_2 = \int S_2' d\varphi = \int (-20\varphi + 62{,}8) d\varphi = -10\varphi^2 + 62{,}8\varphi + C_4$. Константу C_4 найдём из условия, что положение толкателя в конце первого участка равно его положению на начало второго: $S_2(1{,}57) = S_1(1{,}57) = 16{,}45$ мм. Подставляя это условие в уравнение движения толкателя, получим $C_4 = -57{,}4$. Окончательно на втором участке движение толкателя описывается параболой: $S_2 = -10\varphi^2 + 62{,}8\varphi - 57{,}4$. Вершина параболы, которая определяется из условия равенства нулю производной: $S_2' = -20\varphi + 62{,}8 = 0$, находится в конце второго участка при $\varphi = 3{,}14$. Значение функции в вершине (максимальный ход толкателя): $S_2 = -10 \cdot 3{,}14^2 + 62{,}8 \cdot 3{,}14 - 57{,}4 = 41{,}2$ мм. Диаграмма движения толкателя приведена на рис. 3.13, *с*. Результаты расчётов параметров движения толкателя на фазе подъёма кулачка поместим в таблицу

Таблица 3.8

Значения параметров движения толкателя на фазе подъёма

	Первый участок				Второй участок			
φ, град	0	30	60	90	90	120	150	180
φ, рад	0	0,52	1,05	1,57	1,57	2,09	2,62	3,14
S, мм	0	0,6	4,92	16,5	16,5	30,17	38,5	41,2
S', мм/рад	0	3,44	14,05	31,4	31,4	21	10,4	0
S'', мм/рад^2	0	13,25	26,75	40	–20	–20	–20	–20

Вычисление начального радиуса кулачка и построение профиля

График зависимости аналога скорости S' от перемещения толкателя S, построенный по точкам, приведён на рис. 3.14. Масштабные коэффициенты по обеим осям одинаковы.

Выбираем максимально допустимое значение угла давления $\theta_{доп}$ для кулачка с плоским толкателем $\theta_{доп} = 30^\circ$. Прямая *aa* (см. рис. 3.14), проведённая под углом $\theta_{доп} = 30^\circ$ к оси S, касается графика в точке B с координатами S_B = 12 мм и S'_B = 32 мм (измерены на графике). Начальный радиус кулачка R_0 определяется из соотношения: $\text{tg}\theta_{доп} = 0{,}58 = \dfrac{S'_B}{R_0 + S_B} = \dfrac{32}{R_0 + 12}$, откуда получим $R_0 = 43{,}2$ мм.

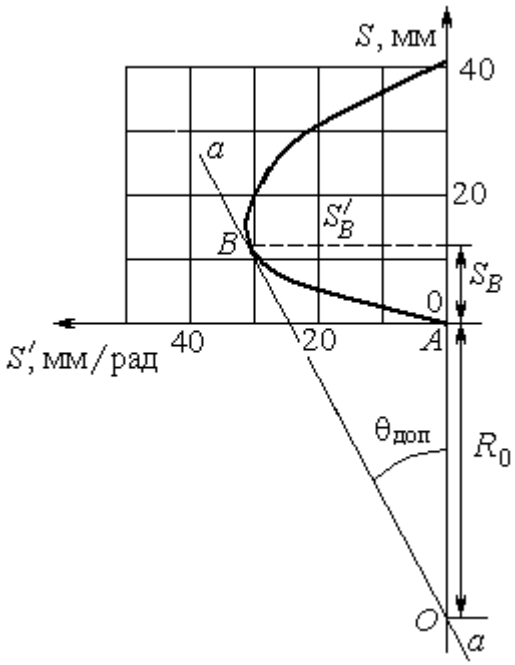


Рис. 3.14. Схема построения начального радиуса кулачка

Построение профиля кулачка производится в полярной системе координат с центром на оси вращения кулачка. Задавшись углом φ поворота толкателя, найдём полярный угол θ радиус-вектора R в точке контакта по формуле: $\theta = \varphi + \text{arctg}\dfrac{S'}{R_0 + S}$, где S' и S – аналог скорости толкателя и его перемещение при одном и том же значении угла φ поворота толкателя. Длина радиус-вектора R в точке контакта находится по формуле:

$$R = \sqrt{(R_0 + S)^2 + (S')^2}\,.$$

Результаты расчётов полярных координат θ, R точек профиля кулачка на фазе подъёма толкателя при R_0 = 43,2 мм приведены в табл. 3.9. Эскиз профиля кулачка показан на рис. 3.15. На фазе опускания толкателя профиль кулачка является симметричным.

Таблица 3.9

Расчёт полярных координат точек профиля кулачка на фазе подъёма толкателя

Параметры	Расчётные точки профиля и значения параметров в расчётных точках						
φ, град	0	30	60	90	120	150	180
φ, рад	0	0,52	1,05	1,57	2,09	2,62	3,14
S, мм	0	0,6	4,92	16,5	30,17	38,5	41,2
S', мм/рад	0	3,4	14,05	31,4	21	10,4	0
β, град	0	4,44	16,28	27,74	15,97	7,25	0
θ, град	0	34,44	76,28	117,74	135,97	157,25	180
R, мм	43,2	43,9	50,13	67,45	76,32	82,36	84,4

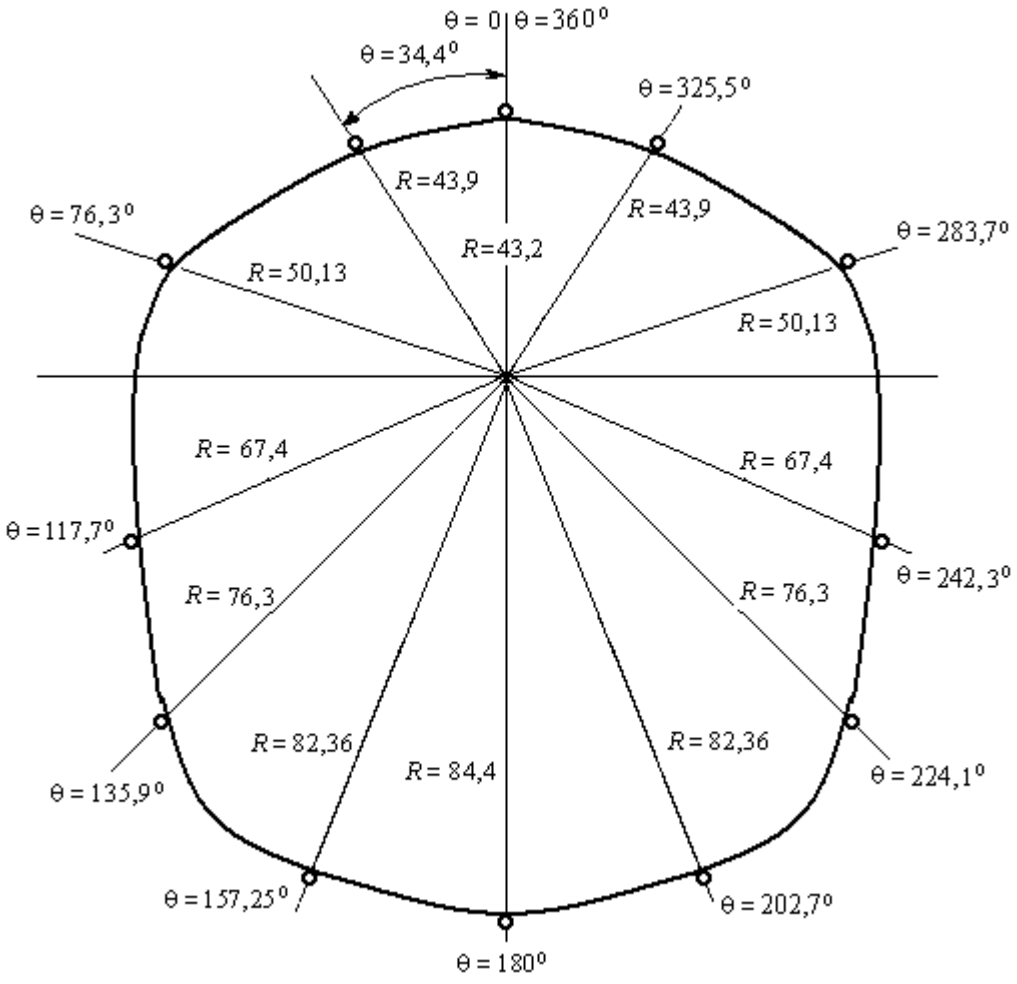


Рис. 3.15. Профиль кулачка

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев А. И., Ляпцев С. А. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин. Екатеринбург: Изд–во УГГУ, 2005.

Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин: уч. пособие для студ. техн. спец. вузов. М.: Изд. центр «Академия», 2003, 496 с.

Иванов М. Н. Детали машин. М.: Высшая школа, 2010.

Краснов М. М., Вереина Л. И. Техническая механика. М.: Academia, 2010. 288 с.

Левитский И. И. Теория механизмов и машин. М.: Высшая школа, 2007.

Мокрушин Н. В., Ляпцев С. А. Лекции по сопротивлению материалов. Екатеринбург: Изд–во УГГУ, 2012.

Олофинская В. П. Техническая механика. М.: Форум, 2009.

Смеляпин А. И. Теория механизмов и машин. М.: Инфра, 2009.

Учебное издание

Анатолий Ильич Афанасьев
Юрий Михайлович Казаков
Сергей Андреевич Ляпцев

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

*Учебно-методическое пособие
и контрольные задания на курсовой проект
«Кинематический, силовой анализ и синтез
плоского механизма» для студентов
направления бакалавриата
15.03.06 Мехатроника и робототехника*

Редактор *В. В. Баклаева*

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. Уч. изд. л. Тираж 200 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

УДК 621.01
ФГБОУ ВО «УГГУ»

В. М. Таугер, А. А. Леонтьев

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Учебное пособие

2020

УДК 621.01

Рецензент: А. П. Котельников, канд. техн. наук (доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» УрГУПС)

Печатается по решению Учебно-методического совета Уральского государственного горного университета

Таугер В. М., Леонтьев А. А.

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН: учебное пособие / В. М. Таугер, А. А. Леонтьев; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 128 с.: ил.

Изложены методы структурного анализа и синтеза, кинематического и динамического расчёта наиболее распространённых в промышленности механизмов и машин.

Учебное пособие предназначено для студентов направлений, программа которых включает дисциплину «Теория механизмов и машин».

УДК 621. 01

© Таугер В. М., Леонтьев А. А.

© Урал. гос. горный ун-т. 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение……...4
1. Основные понятия и определения ТММ……..…….5
2. Основные стадии проектирования и создания новой техники…….8
3. Структурная классификация и виды механизмов…..……..10
4. Кинематический анализ рычажных механизмов…….……19
5. Динамический анализ рычажных механизмов……..…….....28
6. Синтез рычажных механизмов…….48
7. Кулачковые механизмы…….57
8. Фрикционные и зубчатые механизмы…...……...72
9. Трение в кинематических парах……110
10. Уравновешивание масс в механизмах и машинах……...120
Библиографический список……..……..128

ВВЕДЕНИЕ

Теория механизмов и машин (ТММ) является одним из разделов механики, в котором изучается строение, кинематика и динамика механизмов и машин в связи с их анализом и синтезом.

Прикладная механика, которая в настоящее время объединяет такие дисциплины, как ТММ, сопротивление материалов, и детали машин, является одной из старейших областей знаний. Известно, например, что еще при строительстве египетских пирамид использовались простейшие механизмы (рычаги, блоки и т. д.). ТММ как наука выделилась около 200 лет тому назад. Существенный вклад в её развитие внесли такие ученые и изобретатели, как М.В. Ломоносов, И.И. Ползунов – создатель паровой машины, И.П. Кулибин – создатель часов-автоматов, механизма протеза и т. п., отец и сын Черепановы, построившие первый в России паровоз, Л. Эйлер, разработавший теорию плоского зацепления и предложивший эвольвентный профиль зубьев колес, который используется в настоящее время.

Внесли свой вклад в развитие науки академики П.Л. Чебышев, И.А. Вышнеградский, Н.П. Петров, В.П. Горячкин, М.В. Остроградский; профессора Н.Е. Жуковский – отец русской авиации, В.Л. Кирпичев, Н.И. Мерцалов, Л.А. Ассур, И.В. Мещерский, физик Д. Максвелл, а также современные ученые, такие как И.И. Артоболевский, Н.Г. Бруевич, Д.Н. Решетов и другие.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Ведущей отраслью современной техники является машиностроение, развитие которого неразрывно связано с созданием новых машин и механизмов, повышающих производительность труда и заменяющих ручной труд машинным.

В технике широко используются подвижные механические системы, подразделяемые на машины, машинные агрегаты и механизмы.

В обобщенном виде *машина* – это устройство, создаваемое человеком для использования законов природы с целью облегчения физического и умственного труда.

По функциональному назначению машины условно можно разделить на энергетические, транспортные, технологические, контрольно-управляющие, логические (ЭВМ).

Устройства, включающие ряд машин и механизмов, называются машинными агрегатами (МА). Обычно МА состоит (рис. 1) из двигателя (*D*), передаточного механизма (ПМ), рабочей машины (РМ) и, в ряде случаев, контрольно-управляющего устройства, или системы автоматического регулирования (САР).

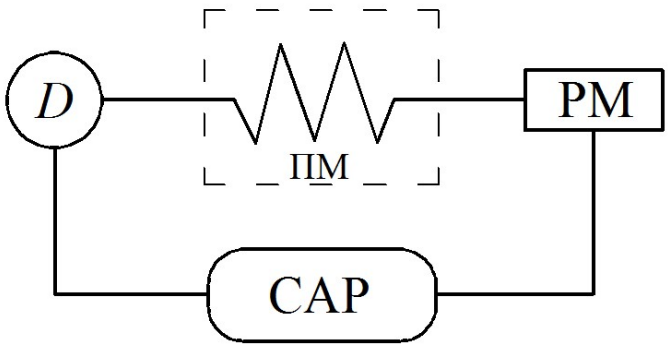


Рис. 1. Схема машинного агрегата

В состав каждой отдельной машины входит один или несколько механизмов.

Механизмом называется система материальных тел, предназначенных для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения остальных.

Состав механизмов разнообразен и включает механические, гидравлические, электрические и другие устройства.

Несмотря на разницу в назначении механизмов их строение, кинематика и динамика имеет много общего, поэтому исследование механизмов проводится на базе основных принципов современной механики.

Всякий механизм состоит из отдельных тел (деталей), соединенных между собой.

Деталь – это изделие, изготовленное из однородного материала без сборочных операций.

Детали, соединенные между собой неподвижно или с помощью упругих связей, образуют отдельное *звено*.

Выполнение звеньев из нескольких деталей обеспечивается их *соединением*. Различают соединения неразъемные (сварные, заклепочные, клеевые) и разъемные (шпоночные, шлицевые, резьбовые).

Звенья в зависимости от вида их материала могут быть твердые и гибкие (упругие).

Два звена, соединенных друг с другом подвижно, образуют *кинематическую пару*.

Неподвижное звено, состоящее из одной или нескольких деталей, называется *стойкой*.

Таким образом, каждый механизм имеет стойку и подвижные звенья, среди которых выделяют входные, выходные и промежуточные звенья.

Входным (*ведущим*) звеньям сообщается движение, преобразуемое механизмом в требуемые движения *выходных* (*ведомых*) звеньев с помощью *промежуточных* звеньев. В простых механизмах имеется одно входное и одно выходное звено.

Но в некоторых случаях имеют место механизмы с несколькими входными или выходными звеньями, например, дифференциал автомобиля.

Развитие техники осуществляется в направлении совершенствования ранее известных механизмов и путем создания принципиально новых их видов.

2. ОСНОВНЫЕ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЕ НОВОЙ ТЕХНИКИ

При проектировании новой техники возникает необходимость проведения работ, связанных с анализом и синтезом новой конструкции.

Анализ осуществляется при заданных размерах и массе звеньев, когда необходимо определить: скорости, ускорения, действующие силы, напряжения в звеньях и их деформации. В результате может быть произведен проверочный расчет на прочность, выносливость и т. д.

Синтез осуществляется при заданных скоростях, ускорениях, действующих силах, напряжениях или деформациях. При этом требуется определить необходимые размеры звеньев, их форму и массу.

При синтезе часто решается задача оптимального проектирования конструкции, когда находятся необходимые показатели работы машины при наименьших затратах труда.

Обычно основными этапами создания новой конструкции являются:

1) разработка принципиальной схемы;

2) проектирование и расчет машины и отдельных ее узлов;

3) экспериментальные исследования и доводка опытного образца.

Проектирование новой техники включает следующие основные этапы:

а) разработка технического задания, включающего основные исходные данные;

б) разработка эскизного проекта, включающего выбор схемы и компоновку основных узлов конструкции;

в) разработка технического проекта, где осуществлены основные расчеты и представлены сборочный чертеж и др. документация.

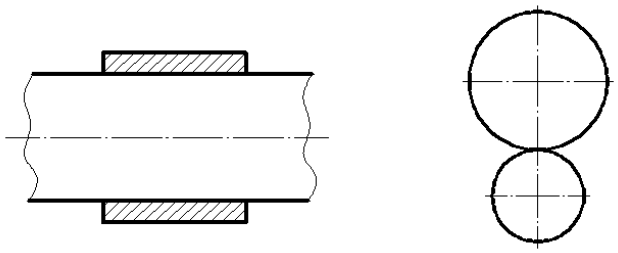
При проектировании сложных механизмов обычно стремятся выделить из общей схемы отдельные, более простые типовые механизмы, проектирование которых имеет свои закономерности. К таким широко используемым в технике механизмам относятся рычажные (стержневые),

кулачковые, фрикционные, зубчатые и т. д., причем с точки зрения строения, кинематики и динамики любой механизм можно заменить условным рычажным механизмом с последующим его анализом, поэтому структура, кинематика и динамика рычажных механизмов рассматривается наиболее подробно.

3. СТРУКТУРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И ВИДЫ МЕХАНИЗМОВ

3.1. Классификация кинематических пар

Подвижные соединения двух звеньев, называемые кинематической парой (КП), классифицируются по разным признакам. Например, по характеру соприкосновения звеньев различают низшие КП, когда контакт происходит по поверхности (рис. 2, *а*), и высшие, когда контакт звеньев осуществляется по линии или в точке (рис. 2, *б*).



а *б*

Рис. 2. Кинематические пары:
а – низшая; *б* – высшая

Преимуществом низших КП является возможность передачи значительных усилий при малом износе, а достоинством высших кп возможность воспроизводить достаточно сложные относительные движения.

Низшие КП могут быть поступательными, вращательными, плоскими и пространственными, а также классифицироваться по числу условий связи, накладываемых на звенья при формировании КП.

Любое тело в декартовой системе координат (рис. 3) имеет 6 степеней свободы, или подвижности ($W = 6$), часть из которых уничтожается в КП. При этом класс КП определяется числом S накладываемых связей, а число её степеней подвижности равно

$$W = 6 - S. \qquad (3.1)$$

На рис. 4 приведены КП различных классов.

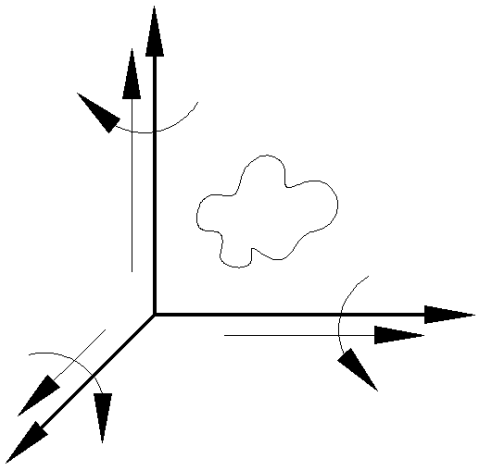


Рис. 3. Степени свободы в декартовой системе координат

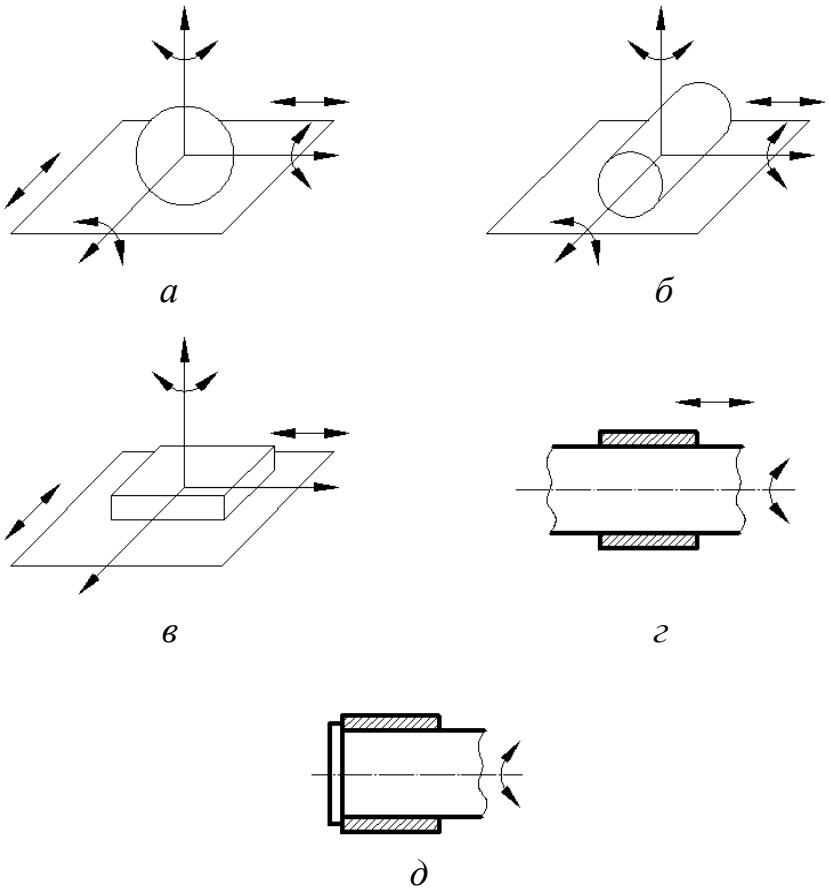


Рис. 4. Классификация КП по числу условий связи:
а – КП 1 класса, S = 5; *б* – КП 2 класса, S = 4; *в* – КП 3 класса, S = 3;
г – КП 4 класса, S = 2; *д* – КП 5 класса, S = 1

Кинематические пары и звенья механизмов изображаются упрощенно (рис. 5) при соблюдении стандарта на обозначения звеньев и КП.

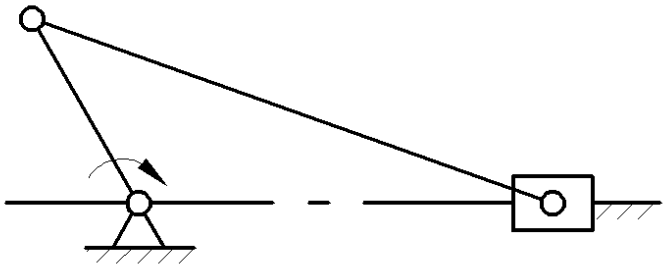


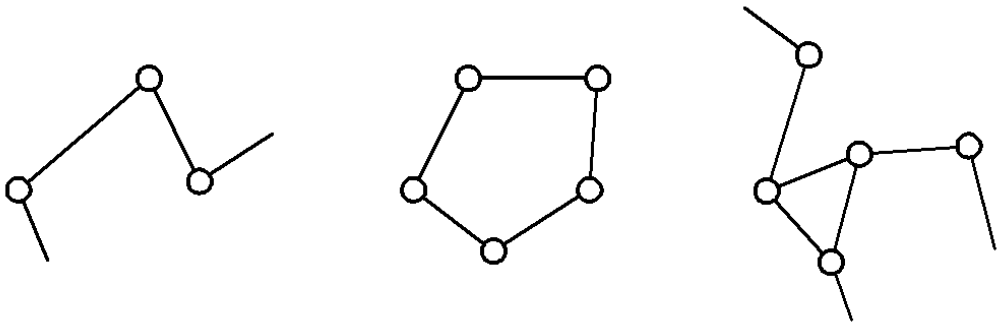
Рис. 5. Упрощенное изображение КП

3.2. Кинематические цепи и их классификация

Любой механизм представляет собой *кинематическую цепь* (КЦ) звеньев, соединенных в КП. КЦ могут быть простыми и сложными, открытыми и замкнутыми, плоскими и пространственными.

В *простой* КЦ каждое из ее звеньев входит в состав одной или двух КП, а в *сложной* КЦ имеются звенья, входящие в состав трех и более КП.

В *открытой* КЦ имеются звенья, входящие в состав одной КП, а в замкнутой цепи каждое звено входит в состав двух и более КП (рис. 6).



а *б* *в*

Рис. 6. Классификация КЦ:
а – простая открытая; *б* – простая замкнутая; *в* – сложная открытая

Если точки всех звеньев двигаются в одной или параллельных плоскостях, то КЦ называется *плоской*, в противном случае КЦ –

пространственная (точки звеньев описывают плоские кривые в непараллельных плоскостях или пространственные кривые).

3.3. Понятие о степени подвижности механизма

Если в пространственной КЦ, состоящей из n подвижных звеньев, имеются КП 1, 2,… 5 класса, число которых, соответственно, $p1$, $p2$,… $p5$, то КЦ имеет число степеней свободы, определяемое формулой А.П. Малышева:

$$W = 6n - 5p5 - 4p4 - 3p3 - 2p2 - p1. \qquad (3.2)$$

Так как любой механизм имеет одно неподвижное звено (стойку) и n подвижных звеньев, то формула (3.2) может использоваться для определения W пространственного механизма, где n – число подвижных звеньев, а W – степень подвижности механизма, показывающая, сколько нужно иметь ведущих звеньев (двигателей) для получения определенного движения остальных его звеньев.

Для плоского механизма степень подвижности определяется по формуле Чебышева:

$$W = 3n - 2p5 - p4, \qquad (3.3)$$

причём КП 5 класса существуют в виде поступательных, вращательных и винтовых пар.

Например, кривошипно-ползунный плоский механизм (рис. 7), в котором $n = 3$; $p5 = 4$; $p4 = 0$, имеет степень подвижности

$$W = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 - 0 = 1.$$

При определении W необходимо учитывать возможность наличия так называемых *пассивных* звеньев, т.е. звеньев, которые могут быть исключены без формального ущерба для кинематики анализируемого механизма (рис. 8).

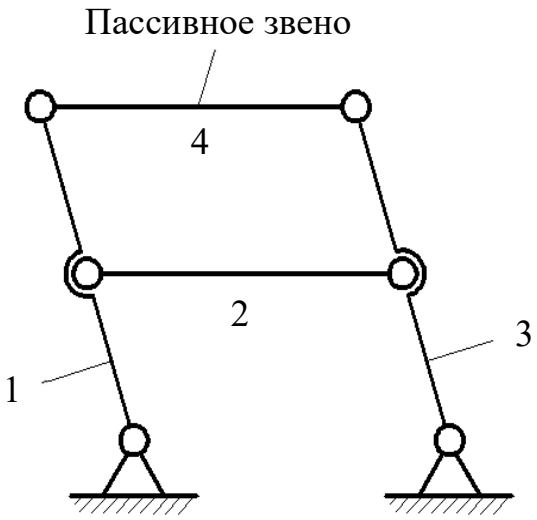
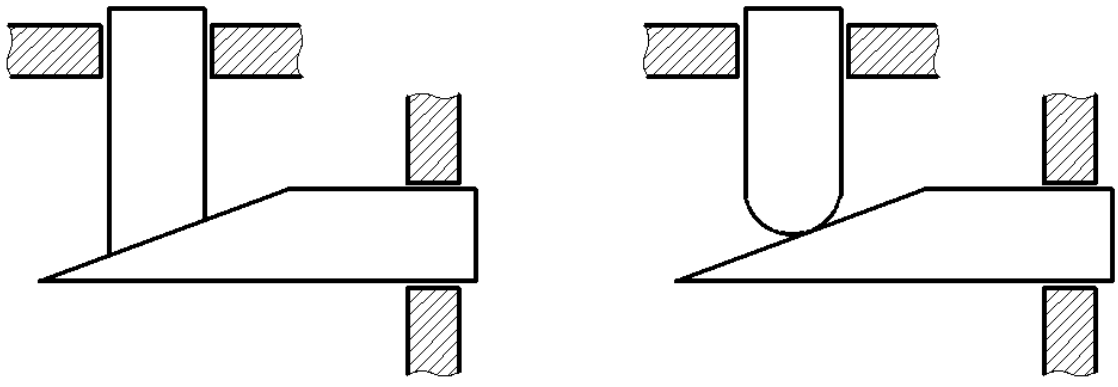


Рис. 8. Механизм с пассивным звеном

Кроме того, необходимо учитывать возможность наличия избыточных связей, которые не реализуются в реальном механизме, а их число q определяется разностью между числом связей в КП действительного и формально возможного механизмов.

На рис. 9, *а* показан действительный механизм, а на рис. 9, *б* – формально возможный механизм, имеющий функциональное назначение, аналогичное действительному механизму, но все связи в котором, в отличие от действительного механизма, реализованы.



а *б*

Рис. 9. Примеры механизмов:
а – действительный механизм; *б* – формально возможный механизм

Степень подвижности действительного механизма с учётом избыточных связей равна

$$W = 3n - 2p5 - p4 + q. \tag{3.4}$$

В общем случае пространственного механизма

$$W = 6n - ipi + q, \tag{3.5}$$

где i от 1 до 5.

3.4. Структурный анализ механизмов

Основной принцип образования рычажных механизмов был сформулирован в 1914 г. профессором Л. В. Ассуром и заключается в следующем.

Схема любого механизма может быть составлена последовательным присоединением к входным (начальным) звеньям и стойке КЦ с нулевой степенью подвижности. Такие КЦ называются структурными группами Ассура. Примеры различных групп Ассура показаны на рис. 10.

Начальное звено со стойкой образует простейший механизм 1-ого класса (рис. 11).

Путем присоединения к таким механизмам различных групп Ассура можно получить механизм любой сложности.

Группы Ассура классифицируются по числу КП, которыми они присоединяются к основному механизму. Это число определяет *порядок* группы. Кроме того, группа Ассура имеет *класс*, определяемый числом КП, образующих наиболее сложный замкнутый контур.

Состав и последовательность присоединения групп Ассура в механизме можно выразить его формулой строения. Механизм в целом классифицируется по группе наивысшего класса. Для показанного на рис. 12 механизма формула строения выглядит следующим образом:

$$1(1,6) \rightarrow 2(2,3) \rightarrow 2(4,5), \qquad (3.6)$$

и означает, что механизм 1 класса, состоящий из звена 1 и стойки 6, взаимодействует с группой 2 класса из звеньев 2 и 3, которая, в свою очередь, взаимодействует с группой 2 класса из звеньев 4 и 5.

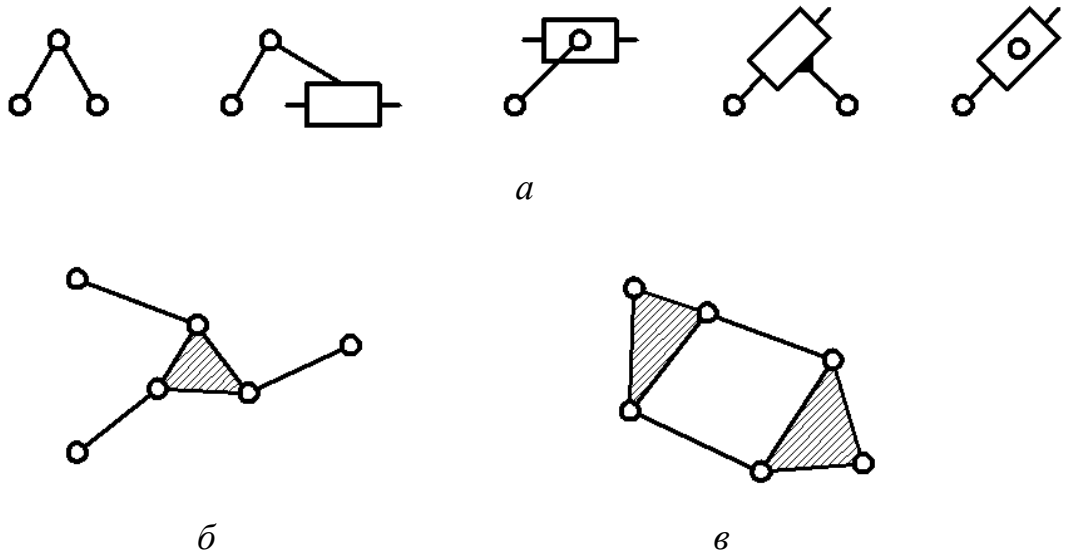


Рис. 10. Примеры групп Ассура:
а – двухповодковая группа 2 класса, 2 порядка, $W = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$;
б – трёхповодковая группа 3 класса, 3 порядка, $W = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 6 - 0 = 0$;
в – группа 4 класса, 2 порядка, $W = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 6 - 0 = 0$

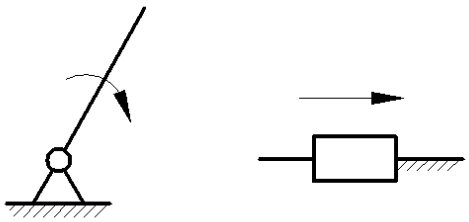


Рис. 11. Простейшие механизмы 1 класса

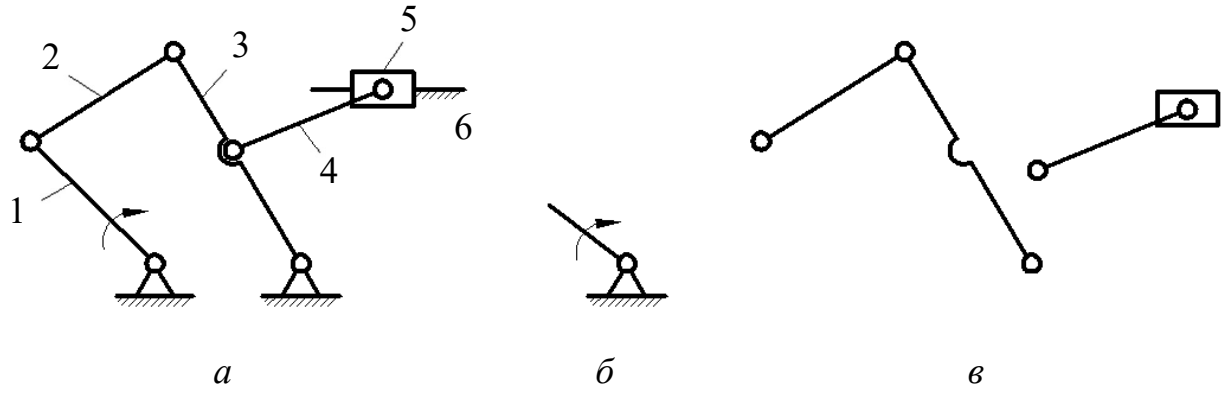


Рис. 12. Классификация механизма по группам Ассура:
а – схема полного механизма; *б* – механизм 1 класса;
в – группы Ассура 2 класса, 2 порядка

3.5. Виды механизмов и их структурные схемы

Среди всего многообразия конструкций механизмов различают: стержневые (рычажные), кулачковые, фрикционные, зубчатые механизмы, механизмы с гибкими звеньями (например, ременные передачи) и другие виды.

Менее распространенные классификации подразумевают наличие механизмов с низшими или высшими парами в плоском или пространственном исполнении и т. д.

Учитывая возможность условного превращения практически любого механизма с высшими парами в рычажный, в дальнейшем наиболее подробно рассматривается именно эти механизмы, а структурные схемы других механизмов изложены в соответствующих разделах.

Среди рычажных механизмов наиболее распространены так называемые четырехзвенные, примеры которых представлены на рис.13.

В этих механизмах встречаются однотипные звенья: *кривошип* 1 –звено, совершающее полноповоротное вращательное движение вокруг неподвижной оси; *коромысло* 3 (рис. 13, *б*) – звено, совершающее неполноповоротное вращательное движение вокруг неподвижной оси; *ползун* 3 (рис. 13, *а*) – звено, совершающее поступательное движение относительно стойки; *камень* 2 –

звено, совершающее поступательное движение относительно подвижной направляющей, называемой *кулисой* 3 (рис. 13, *в*, *г*); *шатун* 2 (рис. 13, *а*, *б*) – звено, совершающее плоскопараллельное движение.

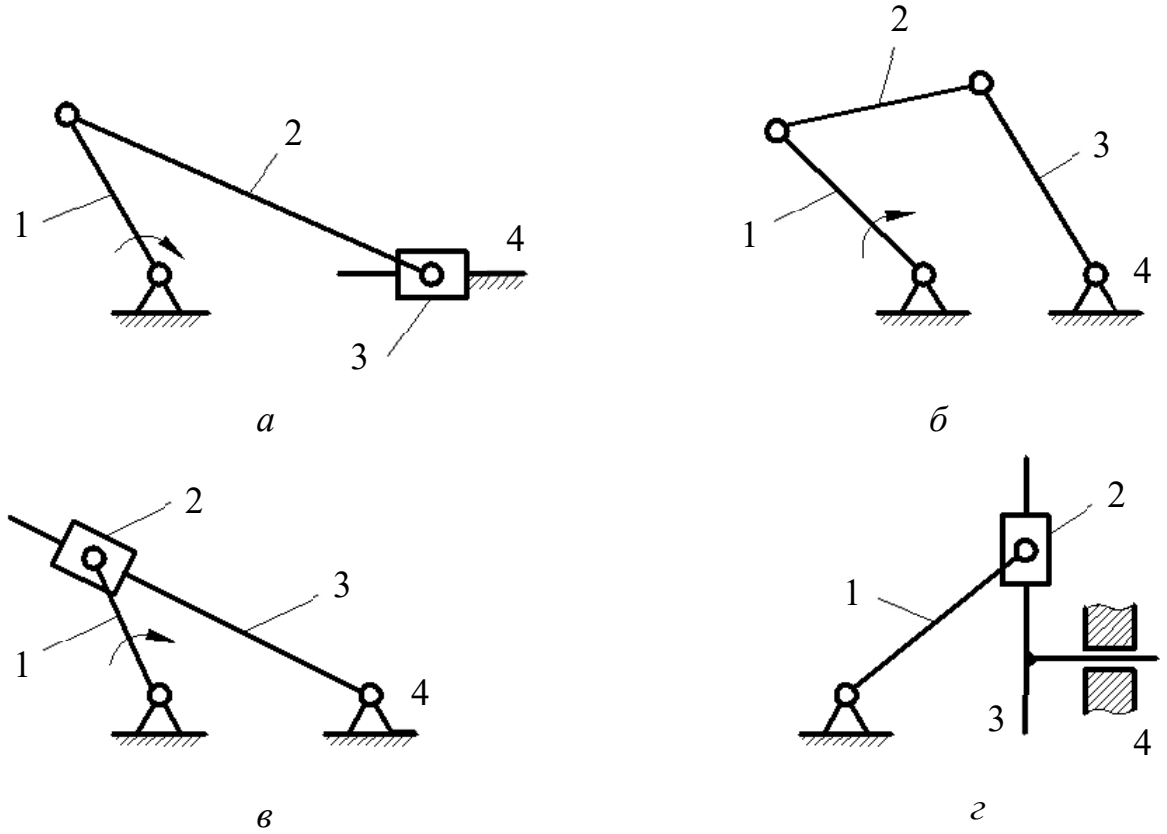


Рис. 13. Виды четырехзвенных рычажных механизмов:
а – кривошипно-ползунный механизм; *б* – четырехшарнирный механизм;
в – кулисный механизм; *г* – синусный механизм

4. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

4.1. Построение планов положения механизма

Кинематический анализ механизмов включает вопросы изучения звеньев с геометрической точки зрения, т. е. без учета действующих сил. Для этого используются графические, аналитические и экспериментальные методы исследования.

Одним из наглядных методов является графоаналитический, который включает:

а) построение планов положения механизма; б) определение скоростей и ускорений характерных точек или звеньев механизма.

При графических построениях на чертеже изображаются длины звеньев, скорости, ускорения и другие величины в определенном масштабе, характеризуемом масштабным коэффициентом μ:

$$\mu = \frac{\text{значение параметра}}{\text{длина отрезка}}. \qquad (4.1)$$

Например, вектор ***ра*** длиной 10 мм изображает скорость v = 20 м/с. Тогда

$$\mu = \frac{20}{10} = 2\,\text{м}\cdot\text{с}^{-1}/\,\text{мм}.$$

Графическое изображение взаимного расположения звеньев механизма, соответствующее заданному моменту времени, называется *планом положений* или *планом механизма*.

Планы положения строятся в определенном масштабе методом засечек в соответствии с формулой строения механизма. Линейные размеры всех звеньев должны быть заданы (рис. 14).

После построения нескольких совмещенных планов механизма при необходимости можно определить графически траектории характерных точек звеньев, имеющих сложное движение, например, центра тяжести *S* шатуна АВ.

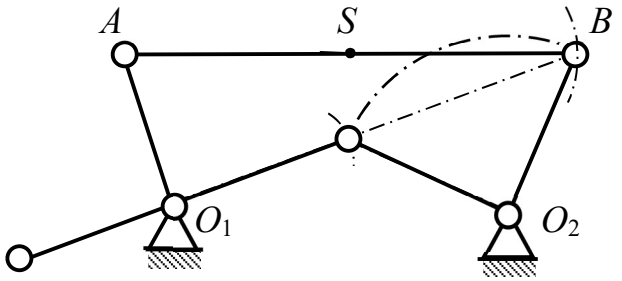


Рис. 14. План положений (план механизма)

4.2. Определение скоростей и ускорений механизма методом планов

Метод планов является одним из самых наглядных. Определению подлежат линейные скорости и ускорения точек и угловые скорости и угловые ускорения звеньев. При этом предварительно составляются векторные уравнения для скоростей и ускорений точек звеньев, совершающих сложное движение.

Пусть звено совершает плоскопараллельное движение, состоящее из переносного, т. е. поступательного со скоростью полюса и относительного вращательного вокруг полюса (рис. 15).

Принимая за полюс т. *A*, получим векторное уравнение скоростей точек:

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA}, \tag{4.2}$$

где $\overline{v}_B$ – скорость точки *B*; $\overline{v}_A$ – скорость точки *A*; $\overline{v}_{BA}$ – скорость точки *B* относительно точки *A*.

Относительная скорость по модулю равна

$$v_{BA} = \omega l_{AB}, \tag{4.3}$$

где ω – угловая скорость звена; l_{AB} – длина звена (длина отрезка *AB*).

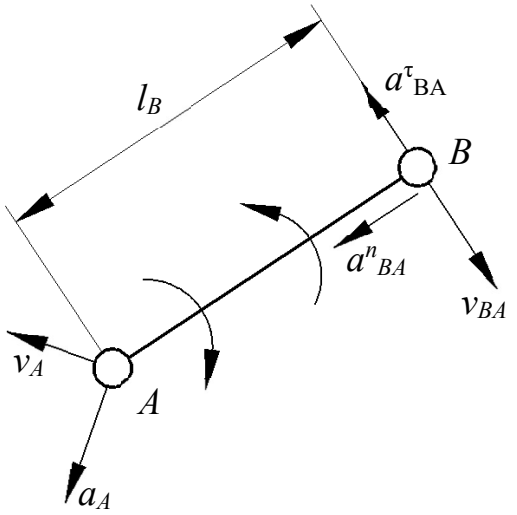


Рис. 15. Векторы скоростей и ускорений для механизма (пример 1)

Векторное уравнение ускорений точек выглядит следующим образом:

$$\overline{a}_B = \overline{a}_A + \overline{a}_{BA}, \qquad (4.4)$$

где $\overline{a}_B$ – ускорение точки B; $\overline{a}_A$ – ускорение точки A; $\overline{a}_{BA}$ – ускорение точки B относительно точки A.

Относительное ускорение равно

$$\overline{a}_{BA} = \overline{a}^{n}_{BA} + \overline{a}^{\tau}_{BA}, \qquad (4.5)$$

где $\overline{a}^{n}_{BA}, \overline{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения $\overline{a}_{BA}$ соответственно.

Нормальное и касательное составляющие по модулю равны

$$a^{n}_{BA} = \omega^2 l_{AB}; \qquad (4.6)$$

$$a^{\tau}_{BA} = \varepsilon l_{AB}, \qquad (4.7)$$

где ε – угловое ускорение звена.

Пусть звено 1 совершает сложное движение, состоящее из переносного вращательного вместе со звеном 2 и относительного поступательного вдоль звена 2 (рис. 16). Точку на звене 1 обозначим B_1, а точку на звене 2, лежащую под точкой B_1, обозначим B_2. Тогда для скорости $\overline{v}_{B1}$ справедливо векторное уравнение

$$\overline{v}_{B1} = \overline{v}_{B2} + \overline{v}_{B1B2}, \qquad (4.8)$$

где $\overline{v}_{B2}$ – окружная скорость точки B_2 (т. е. переносная скорость); $\overline{v}_{B1B2}$ – скорость точки B_1 относительно точки B_2.

Величина переносной скорости

$$v_{B2} = \omega l_{AB}. \qquad (4.9)$$

Векторное уравнение для ускорения точки B_1:

$$\overline{a}_{B1} = \overline{a}_{B2} + \overline{a}^{t}_{B1B2} + \overline{a}^{k}_{B1B2}, \qquad (4.10)$$

где $\overline{a}_{B2}$ – ускорение точки B_2; $\overline{a}^{t}_{B1B2}$ – ускорение точки B_1 относительно точки B_2; $\overline{a}^{k}_{B1B2}$ – ускорение Кориолиса, которое равно

$$a^{k}_{B1B2} = 2v_{B1B2}\omega \qquad (4.11)$$

и совпадает с направлением вектора $\overline{v}_{B1B2}$, повернутого на 90° в сторону переносного вращения.

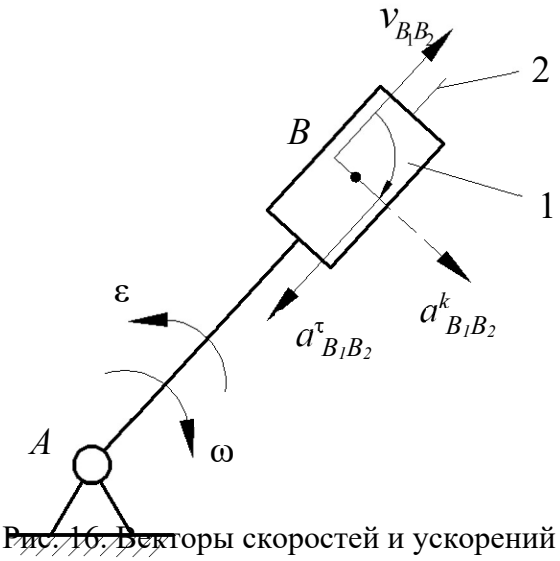


Рис. 16. Векторы скоростей и ускорений для механизма (пример 2)

Решение векторных уравнений осуществляется графически путем построения так называемых *планов скоростей и ускорений*, на которых абсолютные скорости и ускорения откладываются от одной точки, называемой полюсом, в определенном масштабе.

Пример расчета кривошипно-ползунного механизма рассмотрен на рис. 17, где план положений показан на рис. 17, *а*, план скоростей – на рис. 17, *б* и план ускорений – на рис. 17, *в*.

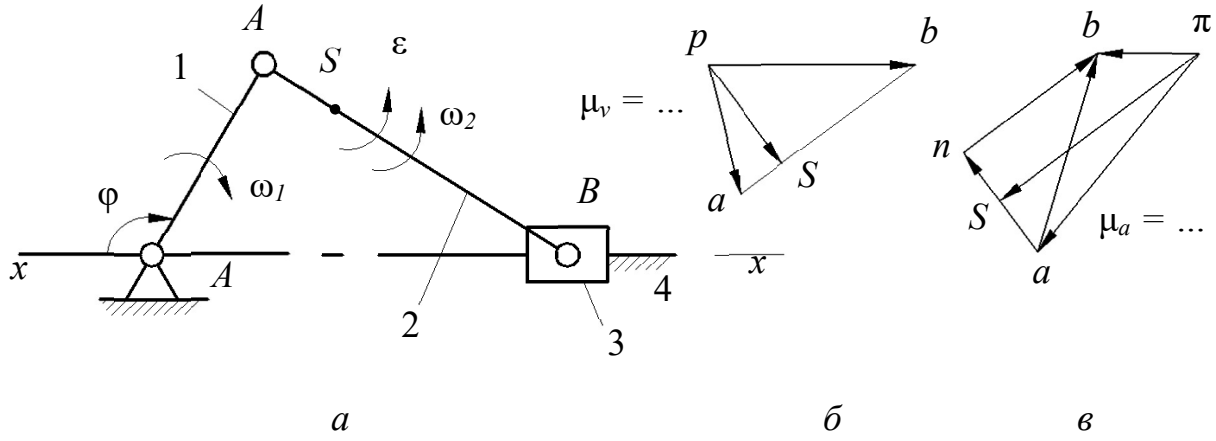


Рис. 17. Пример расчета кривошипно-ползунного механизма:
а – план положений; *б* – план скоростей; *в* – план ускорений

Векторное уравнение для скорости точки B записывается в виде:

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA}, \tag{4.12}$$

где $v_A = \omega_1 l_{OA}; v_{BA} \perp AB; v_B \parallel x - x.$

План скоростей строится в масштабе

$$\mu_v = \frac{v_A}{pa}, \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{мм}}, \tag{4.13}$$

где pa – отрезок произвольной длины.

На плане скоростей вектор $\overline{v}_B$ отображается отрезком pb, а вектор $\overline{v}_{BA}$ – отрезком ab, поэтому $pb \parallel x - x$; $ab \perp AB$.

Величины скоростей определяются по формулам:

$$\begin{aligned} v_{BA} &= \mu_v \cdot ab; \\ v_B &= \mu_v \cdot pb; \\ \omega_2 &= \frac{v_{BA}}{l_{AB}}. \end{aligned} \tag{4.14}$$

Векторное уравнение для ускорения точки B при $\omega_1 = const$ записываются в виде:

$$\overline{a}_B = \overline{a}_A + \overline{a}^n_{BA} + \overline{a}^\tau_{BA}, \tag{4.15}$$

где $a_A = \omega_1^2 l_{OA}; a^n_{BA} = \omega_2^2 AB; a_A \parallel AB; a^\tau_{BA} \perp AB; a_B \parallel x - x.$

Все ускорения представлены на рис. 17 в выбранном масштабе μ_a, равном

$$\mu_a = \frac{a_A}{\pi a}, \frac{\text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{мм}}, \tag{4.16}$$

где πa – отрезок произвольной длины.

При определении скоростей и ускорений промежуточных точек звеньев, например, точки S, можно использовать так называемую теорему подобия, согласно которой точки на плане положений звеньев и соответственные точки на планах скоростей и ускорений образуют подобные фигуры или пропорциональные отрезки. Рассмотрим доказательство данной теоремы.

На рис. 18 показано звено ABC и планы скоростей и ускорений для точек этого звена:

– отрезок *ca* на плане скоростей соответствует $v_{CA} \perp CA$;

– отрезок *ab* на плане скоростей соответствует $v_{AB} \perp AB$;

– отрезок *bc* на плане скоростей соответствует $v_{BC} \perp BC$;

т. е. треугольник *abc* подобен треугольнику *ABC*.

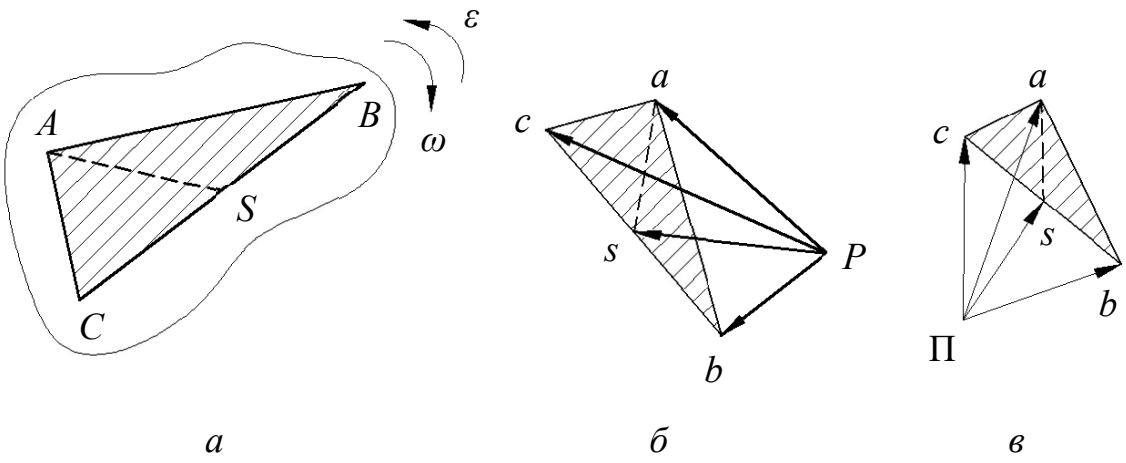


Рис. 18. Теорема подобия

Ускорения относительного (вращательного) движения равны:

$$\begin{aligned} a_{CA} &= l_{CA}\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}; \\ a_{AB} &= l_{AB}\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}; \\ a_{BC} &= l_{BC}\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \end{aligned} \qquad (4.17)$$

т. е. $a_{CA}/l_{CA} = a_{AB}/l_{AB} = a_{BC}/l_{BC}$, или $ca/CA = ab/AB = bc/BC$.

Следовательно, $\triangle abc \sim \triangle ABC$.

Аналогично выполняется построение фигур для любой промежуточной точки, например, точки S (рис. 18, *а*, *б*).

4.3. Исследование рычажных механизмов методом кинематических диаграмм

Кинематической диаграммой называется графическая зависимость какого-либо параметра движения звена от времени или от перемещения входного звена, представленные в определенной системе координат.

Если известна одна кинематическая диаграмма, то можно получить остальные зависимости путем графического дифференцирования или интегрирования.

На рис. 19, *а*, *б* показана последовательность построения кинематической диаграммы перемещения ползуна кривошипно-ползунного механизма от угла поворота кривошипа $S(\varphi)$ и от времени $S(t)$, а также элементы графического дифференцирования с получением диаграммы скоростей $v(t)$ методом хорд.

Если диаграмма $v(t)$ первична, то процесс, обратный интегрированию, обеспечит получение диаграммы $S(t)$ и называется *графическим интегрированием*.

Следует отметить, что графические методы часто приводят к искажениям результатов из-за неточности графических построений, поэтому необходимо контролировать расположение характерных точек, соответствующих экстремумам на диаграммах.

4.4. Кинематическое исследование рычажных механизмов аналитическим методом

Аналитические методы исследования позволяют проводить анализ с заданной степенью точности. Кроме того, создание математических моделей механизмов позволяет решать задачи их оптимального синтеза при использовании ЭВМ.

Рассмотрим пример кинематического исследования синусного механизма (механизм двойного ползуна), где кривошип 1 вращается с угловой скоростью ω и угловым ускорением ε (рис. 20).

Тогда скорость и ускорение точки A равны:

$$\begin{aligned} v_A &= \omega l_{OA}; \\ a_A &= l_{OA}\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \end{aligned} \qquad (4.18)$$

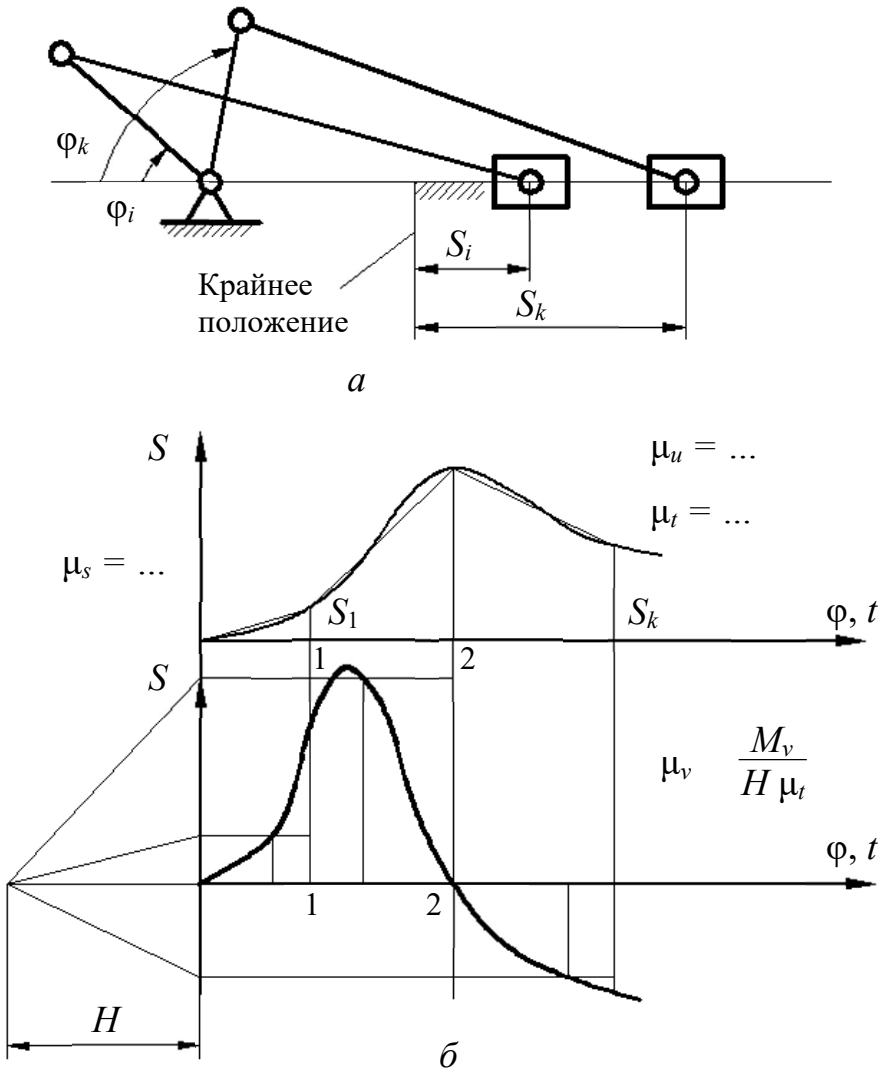


Рис. 19. Последовательность построения кинематической диаграммы перемещения ползуна кривошипно-ползунного механизма:
а – план механизма; *б* – кинематическая диаграмма перемещения ползуна

Рассмотрим пример кинематического исследования синусного механизма (механизм двойного ползуна), где кривошип 1 вращается с угловой скоростью ω и угловым ускорением ε (рис. 20).

Тогда скорость и ускорение точки *A* равны:

$$v_A = \omega l_{OA};$$
$$a_A = l_{OA}\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \qquad (4.18)$$

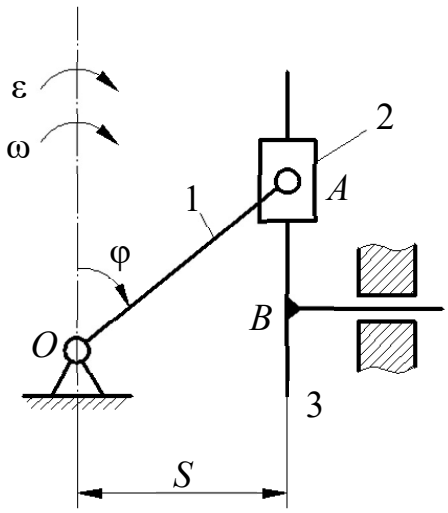


Рис. 20. Синусный механизм

Все точки звеньев 1 и 2 описывают окружности, а точки звена 3 движутся поступательно, причём их перемещения, скорости и ускорения равны:

$$S_B = l_{OA} \sin \varphi = l_{OA} \sin \omega t; \qquad (4.19)$$

$$v_B = \frac{dS_B}{dt} = \frac{dS_B}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi} = l_{OA} \omega \cos \varphi; \qquad (4.20)$$

$$a_B = \frac{d^2 S_B}{dt^2} = l_{OA} (\varepsilon \cos \varphi - \omega^2 \sin \varphi). \qquad (4.21)$$

В случае равномерного вращения кривошипа при $\varepsilon = 0$

$$a_B = -l_{OA} \omega^2 \sin \varphi. \qquad (4.22)$$

При исследовании многих механизмов получаются достаточно громоздкие формулы, что не является препятствием при использовании ЭВМ.

В исследовании пространственных механизмов используются элементы векторной алгебры и векторного анализа. Положения, скорости и ускорения точек механизма выражаются в векторной форме, при необходимости вычисляются проекции на оси и плоскости. Примеры таких исследований изложены в учебной литературе.

5. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

5.1. Классификация действующих сил

Среди сил, действующих на механизм, различают:

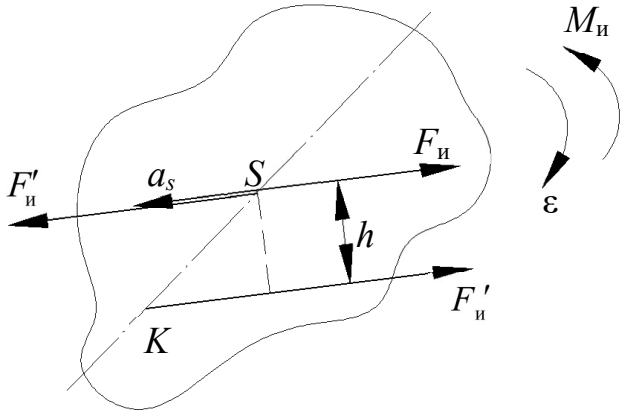
а) движущие силы $F_д$ или моменты $M_д$, ускоряющие движение входных (начальных) звеньев и совершающие положительную работу (например, силы давления газа на поршень в двигателе внутреннего сгорания, силы веса при опускании груза и т. д.);

б) силы сопротивления $F_с$ или моменты $M_с$, замедляющие движение входных звеньев и совершающие отрицательную работу. Они могут быть силами полезного сопротивления, дающими производственный эффект, и силами вредного сопротивления, не дающими такого эффекта (к первому типу относятся, например, силы тяжести при подъеме груза, а ко второму типу – силы трения);

в) силы реакции в кинематических парах F_{ij}, возникающие в опорах звеньев и являющиеся внутренними силами для механизма в целом и внешними для каждого отдельного звена;

г) силы инерции $F_и$ или моменты сил инерции $M_и$, возникающие при неравномерном движении звеньев механизма и могут быть как движущими, так и силами сопротивления (в зависимости от их направления относительно направления движения звеньев).

Фактически силы инерции действуют на тело, вызывающее ускорение другого тела. Однако условное приложения сил инерции к ускоряемому телу позволяет рассматривать его в равновесии. Этот способ называется **принципом Даламбера** и позволяет задачу динамики свести к статическому расчету.



Силы инерции относятся к категории распределенных по объёму или так называемых массовых сил, которые, как и другие аналогичные силы, могут быть приведены к главному вектору и главному моменту (рис. 21).

Рис. 21. Пояснение принципа Даламбера

На рис. 21 сила и момент сил инерции равны:

$$\begin{aligned} F_и &= -m\,a_s; \\ M_и &= -J_s\,\varepsilon, \end{aligned} \qquad (5.1)$$

где m, J_S – масса и момент инерции звена относительно оси, проходящей через центр масс; a_S – ускорение центра масс; ε – угловое ускорение звена; знаки минус показывают, что направления $F_и$ и $M_и$ противоположны соответствующим ускорениям.

Сила $F_и$ и момент $M_и$, могут быть заменены одной силой $F'_и = F_и$, линия действия которой проходит через так называемый центр качаний (точка K на рис. 21) на оси звена и отстоит от линии действия $F_и$ на расстоянии $h = \dfrac{M_и}{F_и}$ при замене $M_и$ парой сил: $M_и = F'_и h$.

5.2. Приведение сил и масс в механизме

Для исследования закона движения механизма его удобно заменить одним условным звеном – звеном приведения, имеющим закон движения аналогичного звена реального механизма.

Для этого все внешние силы, действующие на звенья, заменяются одной

приведенной силой $F_{\text{пр}}$, мощность $P_{\text{пр}}$ которой равна сумме мощностей заменяемых сил F_i:

$$P_{\text{пр}} = \Sigma P_i = \Sigma F_i v_i \cos(F_i \hat{} v_i) = F_{\text{пр}} v \cos(F_{\text{пр}} \hat{} v),$$

(5.2)

или приведённым моментом $M_{\Sigma}^{\text{пр}}$, мощность $P_{\Sigma}^{\text{пр}}$ которого равна сумме мощностей заменяемых моментов сил M_i:

$$P_{\text{пр}} = \Sigma P_i = \Sigma M_i \omega_i = M_{\text{пр}} \omega. \qquad (5.3)$$

В формулах (5.2), (5.3) v_i – скорость точки приложения i-ой силы; v – скорость точки приложения приведённой силы на звене приведения; ω_i – угловая скорость i-го звена; ω – угловая скорость звена приведения.

Приведённую силу или приведённый момент удобно записывать в виде суммы составляющих, например:

$$M_{\text{пр}} = \Sigma M_{Fi\ \text{пр}} + \Sigma M_{Mi\ \text{пр}}, \qquad (5.4)$$

где $\Sigma M_{Fi\ \text{пр}}, \Sigma M_{Mi\ \text{пр}}$ – составляющие приведённого момента, обусловленные действием сил и моментов соответственно.

В кривошипно-ползунном механизме (рис. 22):

$$M_{\text{пр}} = M_{F\text{пр}} + M_{G\text{пр}}, \qquad (5.5)$$

где

$$M_{F\text{пр}} = \frac{F v_B}{\omega_1} = F l_{OA} \frac{pb}{pa};$$
$$M_{M\text{пр}} = \frac{G v_S}{\omega_1} \cos(G \hat{} v_S) = G l_{OA} \frac{ps}{pa} \cos(G \hat{} v_S), \qquad (5.6)$$

где pa, pb, ps –вектора, взятые с плана скоростей (рис.22).

Как видно из формул, величина $F_{\text{пр}}$ ($M_{\text{пр}}$) зависит лишь от соотношения скоростей, а не от их абсолютной величины, что позволяет для приведения сил использовать планы скоростей без учета их масштабов.

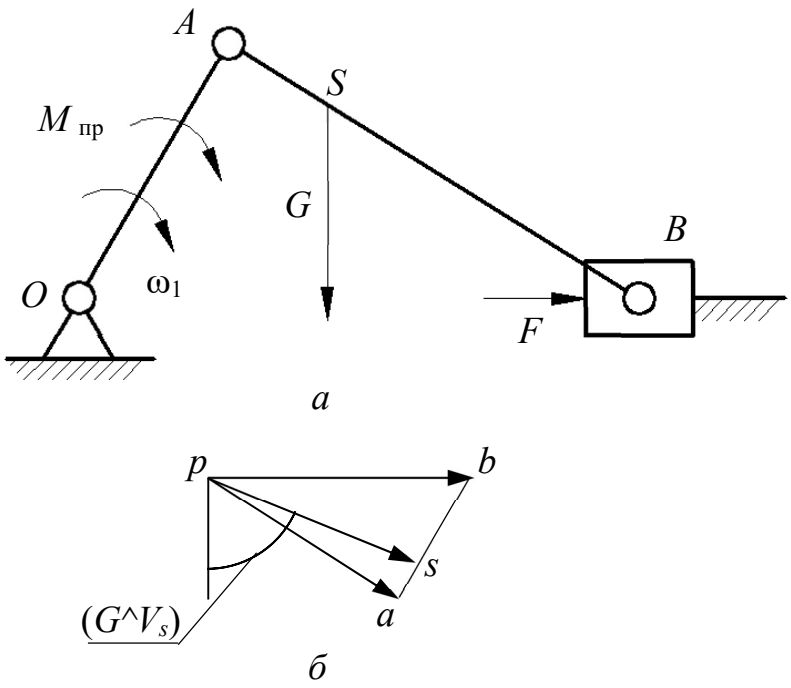


Рис. 22. Пример кривошипно-ползунного механизма:
а – схема; *б* – план скоростей

Каждое *i*-ое звено механизма обладает массой m_i и моментом инерции J_i относительно оси, проходящей через центр масс звена, при этом кинетическая энергия *i*-го звена плоского механизма равна:

$$E_i = \frac{m_i v_i^2}{2} + \frac{J_i \omega_i^2}{2}. \qquad (5.7)$$

Массы и моменты инерции всех звеньев механизма можно условно заменить некоторой массой $m_{\text{пр}}$, сосредоточенной в произвольно выбранной точке *A* звена приведения (рис. 23, *а*), или некоторым моментом инерции $J_{\text{пр}}$, приписанным звену приведения (рис. 23, *б*).

Замена должна производится из условия равенства кинетических энергий:

$$E_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}} v_A^2}{2} + \frac{J_{\text{пр}} \omega^2}{2}, \qquad (5.8)$$

где $E_{\text{пр}}$ – приведённая кинетическая энергия.

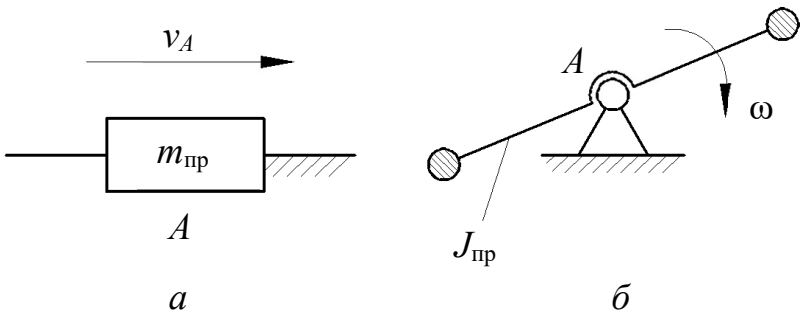


Рис. 23. Массы и моменты инерции звеньев приведения:
а – звено приведения – ползун; *б* – звено приведения - кривошип

Приведённые масса при поступательном движении звена приведения определяется по формуле

$$m_{пр} = \sum \left[m_i \left(\frac{v_i}{v_A} \right)^2 + J_i \left(\frac{\omega_i}{v_A} \right)^2 \right], \tag{5.9}$$

а при вращательном движении звена приведения – по формуле

$$J_{пр} = \sum \left[m_i \left(\frac{v_i}{\omega} \right)^2 + J_i \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 \right]. \tag{5.10}$$

Приведённые масса и момент инерции являются функциями положения звена приведения, т.е. их величина может меняться при изменении положения звена в процессе его движения.

5.3. Уравнение движения машины

Работу машины можно разбить на три периода (рис. 24):

1) период пуска (разгона) $t_п$;

2) период установившегося движения $t_у$;

3) период остановки (выбега) $t_о$.

Аналитическая зависимость между действующими на звенья силами и кинематическими параметрами движения называется уравнением движения.

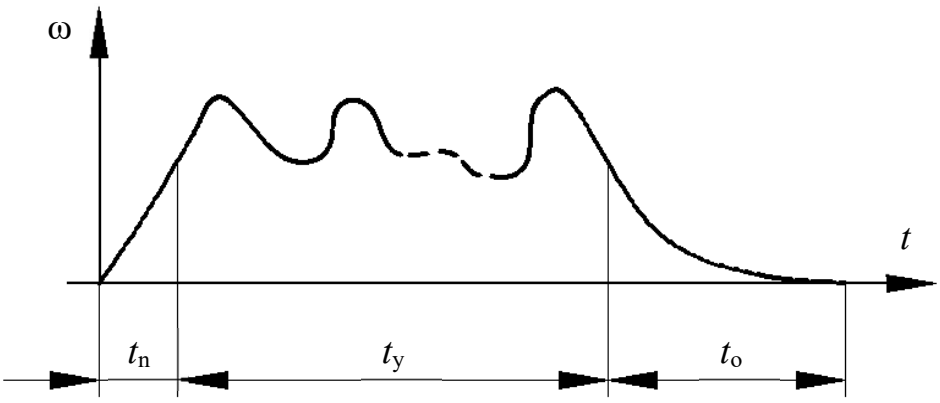


Рис. 24. Периоды работы машины

Это уравнение в общем случае имеет вид

$$\Delta E = E - E_0 = A_д - A_с, \qquad (5.11)$$

где ΔE – изменение кинетической энергии за рассматриваемый промежуток времени; E и E_0 – величина кинетической энергии в конце и начале промежутка; $A_д$, $A_с$ – работа движущих сил и сил сопротивления.

В период пуска (разгона) $A_д > A_с$, т. е. происходит ускорение движения звеньев, движение является неустановившимся.

В период установившегося движения $A_д = A_с$, т. е. скорости звеньев в конечный и начальный моменты периода равны, и вся работа движущихся сил расходуется на преодоление сопротивлений.

В период остановки (выбега) $A_д < A_с$, движение продолжается некоторое время за счет накопленной кинетической энергии, поглощаемой силами сопротивления движению.

Уравнение движения может быть выражено в интегральной и дифференциальной форме, а для упрощения его решения исследование машины заменяют исследованием звена приведения, в котором изменение кинетической энергии равно

$$\Delta E_{пр} = A_д^{пр} - A_с^{пр}, \qquad (5.12)$$

где суммарная работа действующих на звено приведения сил может быть выражена:

а) в интегральной форме:

$$A_{\text{д}}^{\text{пр}} - A_{\text{с}}^{\text{пр}} = \int F_{\text{пр}} ds \tag{5.13}$$

или

$$A_{\text{д}}^{\text{пр}} - A_{\text{с}}^{\text{пр}} = \int M_{\text{пр}} d\varphi, \tag{5.14}$$

где ds – элементарное перемещение точки приведения; $d\varphi$ – элементарный угол поворота звена приведения;

б) в дифференциальной форме:

$$d\Delta E_{\text{пр}} = d(A_{\text{д}}^{\text{пр}} - A_{\text{с}}^{\text{пр}}) = F_{\text{пр}} ds \tag{5.15}$$

или

$$d\Delta E_{\text{пр}} = d(A_{\text{д}}^{\text{пр}} - A_{\text{с}}^{\text{пр}}) = M_{\text{пр}} d\varphi. \tag{5.16}$$

Таким образом, уравнение движения машины приводится к тому или иному конкретному виду и решается графическим и графоаналитическим методами, а учитываемые силы и моменты сил, приведенные массы и моменты инерции могут быть как постоянными, так и переменными величинами, зависящими от того или иного фактора.

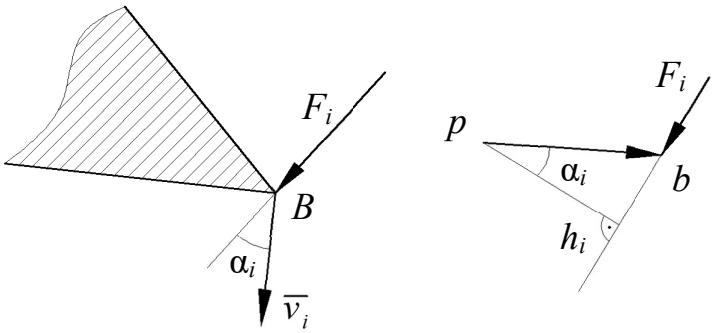
5.4. Понятие об уравновешивающей силе. Теорема Жуковского о жестком рычаге

Одним из способов определения приведенной силы $F_{\text{пр}}$ является способ, предложенный Н. Е. Жуковским. Уравнение, из которого может быть найдена $F_{\text{пр}}$, основано на равенстве мощностей (формула (5.2)).

Рассмотрим какое-либо звено механизма, в точке B которого приложена сила F_i под углом α_i к вектору скорости v_i этой точки (рис.25, *а*).

Мощность силы F_i равна

$$P_i = F_i v_i \cos\alpha_i. \tag{5.17}$$



а *б*

Рис. 25. Теорема Жуковского о жестком рычаге:
а – звено механизма; *б* – план скоростей

Если вектор скорости точки *B* (план скоростей) повернуть на 90° и силу F_i приложить к концу вектора (к точке *b*), сохранив ее направление, то момент этой силы относительно полюса p будет равен (рис. 25, *б*)

$$M_i = F_i h_i = F_i v_i \cos\alpha_i = P_i, \tag{5.18}$$

т.е. равен мощности силы F_i. Таким образом, F_i можно найти, повернув на 90° план скоростей и приложив к нему все внешние силы, включая силы инерции, в соответствующих точках и сохраняя их направления. Тогда из уравнения моментов такого рычага

$$F_{\text{пр}} h_{\text{пр}} = \Sigma F_i h_i \tag{5.19}$$

получим:

$$F_{\text{пр}} = \sum \frac{F_i h_i}{h_{\text{пр}}}, \tag{5.20}$$

где h_i и $h_{\text{пр}}$ – кратчайшие расстояния от полюса плана скоростей до линий действия *i*-ой и приведенной сил.

Повернутый на 90° план скоростей с приложенными к нему силами называется жестким рычагом Жуковского.

Величина $F_{\text{пр}}$ или $M_{\text{пр}}$ зависит от положения механизма, поэтому можно построить диаграмму, например, $F_{\text{пр}}(\varphi)$, являющуюся функцией положения звена приведения. Для этого необходимо последовательно определить

значения $F_{пр}$ методом рычага Жуковского для целого ряда положений механизма в пределах цикла ($F_{1пр}$, $F_{2пр}$, …) и отложить их на диаграмме (рис. 26).

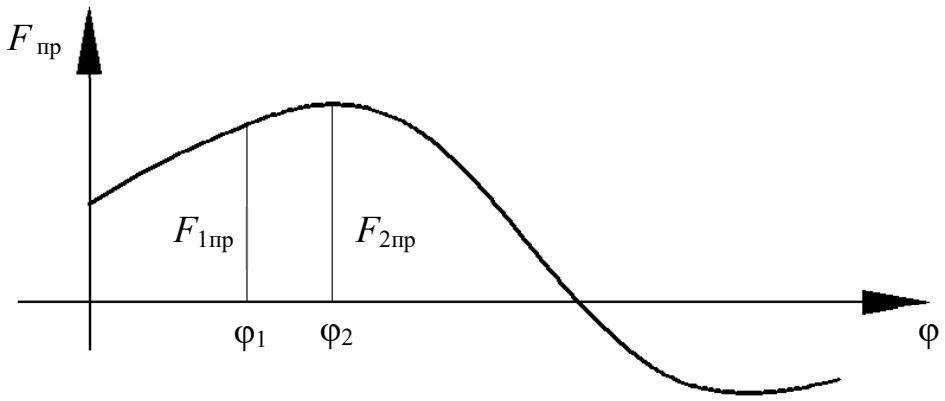


Рис. 26. Диаграмма приведенной силы

Приведенная сила $F_{пр}$ или момент $M_{пр}$ характеризуют реакцию механизма на движение его входного звена по определенному закону, задаваемому двигателем. Сила или момент, равные по величине приведенной силе или моменту, но противоположные им по направлению, называется уравновешивающей силой $F_у$ или уравновешивающим моментом $M_у$. Эти сила или момент развиваются двигателем и обеспечивают заданное движение входного звена.

Если к рычагу Жуковского приложить все внешние силы, включая силы инерции, а также $F_у$, то его можно рассматривать в равновесии, из условия которого

$$F_у h_у + \Sigma F_i h_i = 0 \qquad (5.21)$$

можно определить неизвестную $F_у$, а также найти мощность двигателя $P_{дв}$, требуемую для получения заданного движения входного звена в заданном положении:

$$P_{дв} = F_у v_A \cos(F_у \hat{} v_A) = M_у \omega. \qquad (5.22)$$

5.5. Графоаналитический метод решения уравнения движения машины

Данный метод позволяет не только наглядно иллюстрировать связь между динамическими и кинематическими параметрами движения, но и решать практические задачи синтеза, например, задачу уменьшения неравномерности вращения звеньев.

В качестве примера рассмотрим построение так называемой диаграммы энергомасс. Эта диаграмма строится на основе графиков $J_{\text{пр}}(\varphi)$ и

$$\Delta E_{\text{пр}}(\varphi) = E_{\text{пр}}(\varphi) - E_{0\text{пр}}, \tag{5.23}$$

где $E_{\text{пр}0}$ – энергия звена приведения в начале цикла.

График $\Delta E_{\text{пр}}(\varphi)$ может быть получен путем графического интегрирования графика $M_{\text{пр}}(\varphi)$.

На рис. 27 показана последовательность построения диаграммы энергомасс в координатах $\Delta E_{\text{пр}}(J_{\text{пр}})$, которая при установившемся движении является замкнутой кривой и строится на базе диаграмм $\Delta E_{\text{пр}}(\varphi)$ и $J_{\text{пр}}(\varphi)$ путем исключения параметра φ (угла поворота звена приведения).

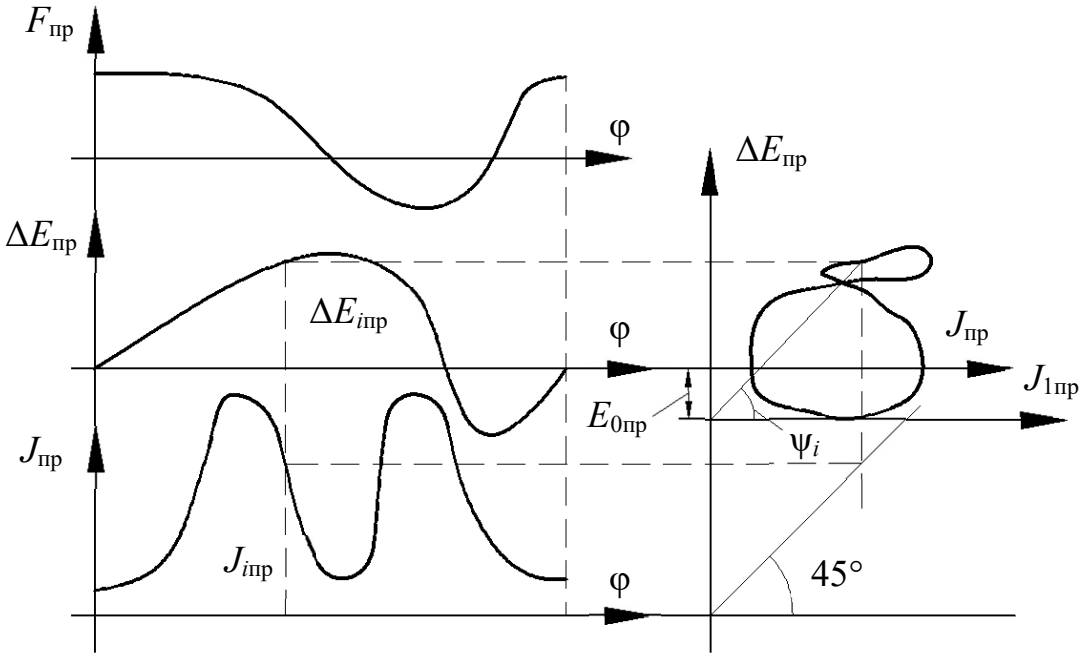


Рис. 27. Диаграмма энергомасс

Если известна угловая скорость вращения ω_0 звена приведения в начале цикла, то можно определить начальную кинетическую энергию:

$$E_{0\text{пр}} = \frac{J_{0\text{пр}}\omega_0^2}{2}. \tag{5.24}$$

Тогда диаграмму энергомасс можно рассматривать в координатах $\Delta E_{\text{пр}}(J_{1\text{пр}})$, где ось $J_{1\text{пр}}$ отстоит от первоначальной оси $J_{\text{пр}}$ на величину $E_{0\text{пр}}$ (рис. 27).

Так как

$$E_{\text{пр}} = \frac{J_{\text{пр}}\omega^2}{2}, \tag{5.25}$$

то

$$\omega^2 = \frac{2E_{\text{пр}}}{J_{\text{пр}}} = 2\frac{\mu_E}{\mu_J}\operatorname{tg}\psi, \tag{5.26}$$

где μ_E и μ_J – масштабные коэффициенты, используемые для построения диаграмм.

Таким образом, диаграмма энергомасс позволяет при установившемся движении определить угловую скорость ω звена приведения в любой момент времени, т. е.

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{2\frac{\mu_E}{\mu_J}\operatorname{tg}\psi}, \\ \operatorname{tg}\psi &= \frac{\mu_J\omega^2}{2\mu_E}. \end{aligned} \tag{5.27}$$

5.6. Неравномерное движение машин. Маховики

Одним из режимов движения машины при совершении полезной работы является режим равномерного или установившегося движения.

При равномерном движении угловая скорость ω вала двигателя постоянна, а при установившемся движении она периодически изменяется

(рис. 28), причём степень неравномерности можно оценить коэффициентом неравномерности δ:

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_c}, \tag{5.28}$$

где ω_c – средняя угловая скорость за цикл:

$$\omega_c = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2}. \tag{5.29}$$

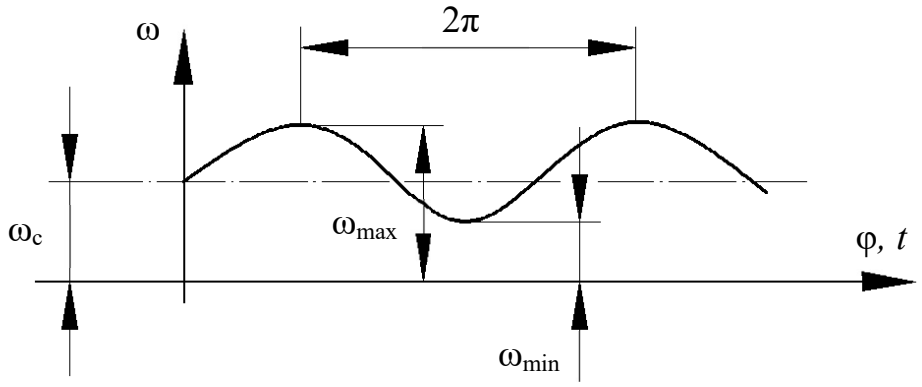


Рис. 28. Изменение угловой скорости ведущего звена

Неравномерность вредно сказывается на работе машин, т. к. вызывает дополнительные инерционные нагрузки, которые могут привести к поломке.

Практикой установлены значения δ, которые допустимы в различных условиях эксплуатации. Регулировать величину δ можно путем изменения величины момента инерции звена приведения, т. е. на быстро вращающийся вал закрепляется дополнительная масса, называемая маховиком.

При конструировании маховика стремятся к получению необходимого момента инерции маховика $J_м$ с наименьшим весом G и заданным диаметром D. Для этой цели маховик изготавливается в виде тяжелого обода, соединенного со втулкой тонким диском с отверстием или спицами (рис. 29). Приближенно $J_м$ можно определить по формуле:

$$J_м = G\frac{D^2 + d^2}{8g}, \tag{5.30}$$

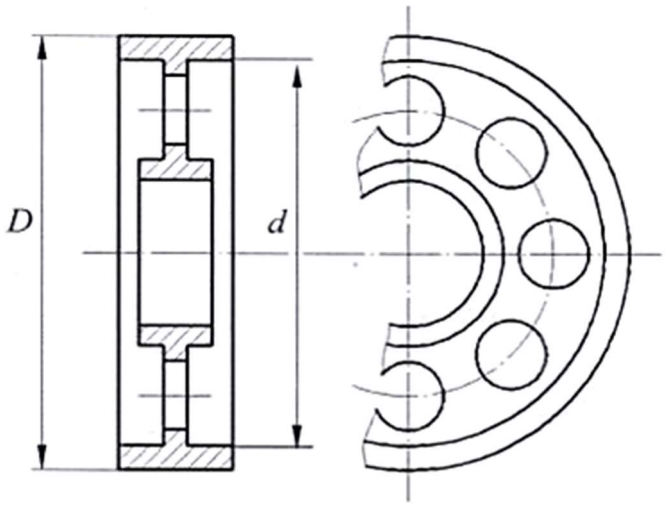


Рис. 29. Конструкция маховика

где D, d – диаметры обода маховика; g – ускорение свободного падения.

5.7. Подбор момента инерции $J_м$ маховика по заданному коэффициенту неравномерности δ

Обычно требуется определить параметры маховика при заданных значениях ω_c и δ. Существуют различные методы определения $J_м$, наиболее точным из которых является метод Ф. Виттенбауэра, в соответствии с которым предварительно строится диаграмма энергомасс $\Delta E_{пр}(J_{пр})$.

Согласно этой диаграмме (рис. 30):

$$\omega^2_{max(min)} = 2\frac{\mu_E}{\mu_J}\operatorname{tg}\psi_{max(min)};$$

$$\operatorname{tg}\psi_{max(min)} = \frac{\omega^2_{max(min)}\mu_J}{2\mu_E}. \qquad (5.31)$$

С другой стороны, из уравнений (5.28), (5.29):

$$\omega_{max(min)} = \omega_c\left(1 \pm \frac{\delta}{2}\right). \qquad (5.32)$$

Таким образом, найдя ψ_{max}, ψ_{min} и проведя касательные к диаграмме энергомасс под этими углами к горизонтали (рис. 30), получим в точке их

пересечения начало новой системы координат с осями $E_{пр}$ и $J_{1пр}$, отстоящими от принятых ранее осей на искомую величину $J_м$ и $E_{0пр}$.

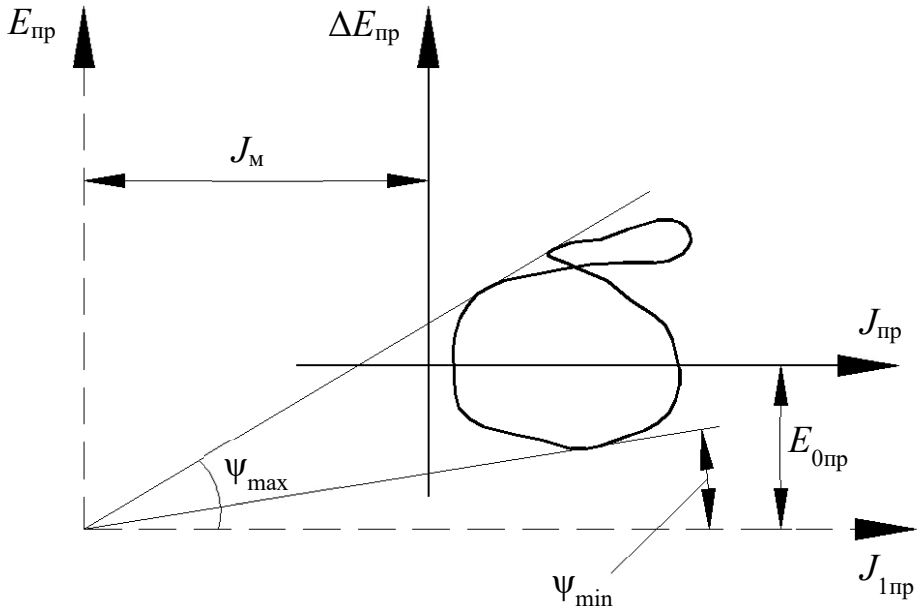


Рис. 30. Определение момента инерции маховика
по диаграмме Виттенбауэра

В целом последовательность определения $J_м$ включает следующие операции:

1) строится диаграмма $M_{пр}(\varphi)$ для установившегося движения;

2) строится диаграмма $\Delta E_{пр}(\varphi)$ путем графического интегрирования диаграммы $M_{пр}(\varphi)$;

3) строится график $J_{пр}(\varphi)$ и диаграмма энергомасс путем исключения параметра φ из графиков $\Delta E_{пр}(\varphi)$ и $J_{пр}(\varphi)$;

4) определяются углы ψ_{max}, ψ_{min}, после чего находится $J_м$ в новых координатах $E_{пр}$ и $J_{1пр}$ диаграммы $E_{пр}(J_{1пр})$.

5.8. Регулирование непериодических колебаний скорости движения машин

В процессе выполнения работы приходится регулировать скорость рабочего органа машины. Например, в стационарных двигателях необходимо

поддерживать скорость рабочего органа постоянной, а в двигателях транспортных машин эта скорость должна изменяться в широких пределах.

Из уравнения движения машины следует, что изменения скорости рабочего органа можно достигнуть за счет изменения разности работ движущих сил и сил сопротивления ($A_д - A_с$). Устройства, обеспечивающие изменения работы сил сопротивления применяются в виде тормозов, например, в транспортных машинах, которые снабжаются также и приспособлениями для одновременного разобщения двигателя с исполнительным механизмом.

Другим способом регулирования является изменение работы движущих сил путем воздействия на орган, подающий энергию к входному звену (поршню у двигателя внутреннего сгорания, лопаткам турбины и т. д.).

Регулирование может осуществляться либо человеком-оператором, либо автоматически – с помощью устройств, называемых регуляторами.

Одним из них является центробежный регулятор (рис. 31), приводимый во вращение валом двигателя *B*. Ползун *A* соединяется с органом, подводящим рабочее тело (пар, топливо и т. д.). Регулятор за счёт изменения сил инерции $F_и$, действующих на шары *C*, автоматически поддерживает угловую скорость вала двигателя постоянной, т. к. ее увеличение приводит к уменьшению подачи рабочего тела и наоборот.

5.9. Силовой расчет рычажных механизмов

Зная активные силы, действующие на звенья механизма и силы инерции этих звеньев, можно произвести его кинетостатический расчет, т.е. определить реакции в кинематических парах и уравновешивающую силу (момент) на входном звене, причем эта сила (момент) является движущей при совпадении ее направления с направлением движения входного звена или силой

(моментом) сопротивления, если ее направление противоположно этому движению.

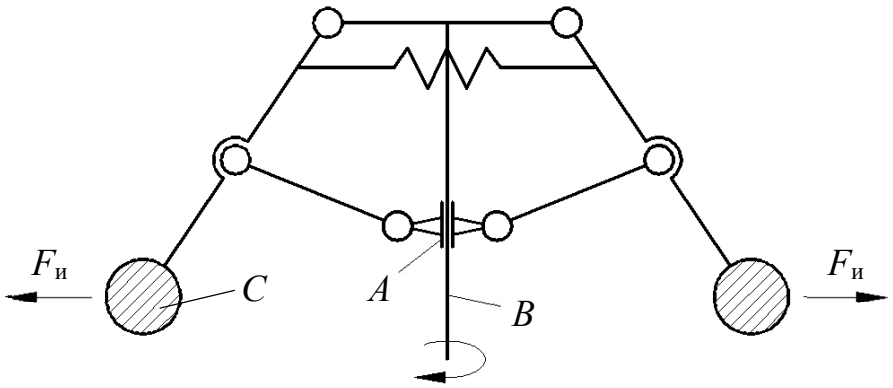


Рис. 31. Центробежный регулятор

При кинетостатическом расчете реакции в кинематических парах определяются путем статического расчета, который базируется на результатах кинематического анализа, включая ускорения, необходимые для определения сил (моментов) инерции.

При силовом расчете используется принцип Даламбера, позволяющий решение задачи динамики свести к статическому расчету (метод кинетостатики). Согласно этому принципу, приведение ускоренно движущейся системы в равновесие обеспечивается условным приложением к этой системе сил инерции. При этом неизвестные силы определяются из уравнений статики.

Силы взаимодействия между звеньями (реакции) можно считать направленными по нормали к контактирующим поверхностям, если расчет ведется без учета сил трения (рис. 32). Принято следующее обозначение реакций: R_{12} – реакция со стороны звена 1 на звено 2; R_{21} – реакция со стороны звена 2 на звено 1.

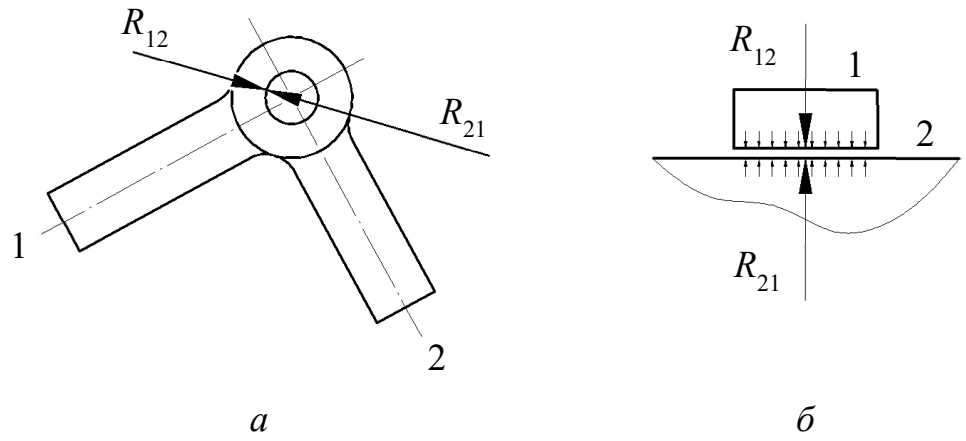


Рис. 32. Реакции в кинематических парах:
а – вращательной; *б* – поступательной

При графоаналитическом решении используется метод плана сил.

Механизм расчленяется на структурные группы Ассура и начальные звенья. Расчет ведется, начиная с последней структурной группы и заканчивается расчетом входного звена.

При расчете структурных групп к ним прикладываются все действующие силы, включая силы инерции и реакции отброшенных связей. Каждая из неизвестных реакций, при необходимости, может быть разложена на две составляющих по выбранным направлениям, например, вдоль оси звена (нормальная R^n) и перпендикулярно оси (тангенциальная R^τ). При равенстве числа уравнений статики числу неизвестных реакций их можно определить аналитически и графически, построив многоугольник (план) сил. Неизвестные определятся из условия замкнутости векторной суммы сил.

Рассмотрим примеры.

Пример 1. Двухповодковая группа с вращательными парами (рис. 33).

Составляющая R_{i1}^τ определяется из уравнения моментов для звена 1 относительно точки B: $\Sigma M_{B1} = 0$ (рис.33, *а*).

Составляющая R_{j2}^τ определяется из уравнения моментов для звена 2 относительно точки B: $\Sigma M_{B2} = 0$ (рис.33, *а*).

При отрицательных значениях реакций необходимо изменить их направления на противоположные.

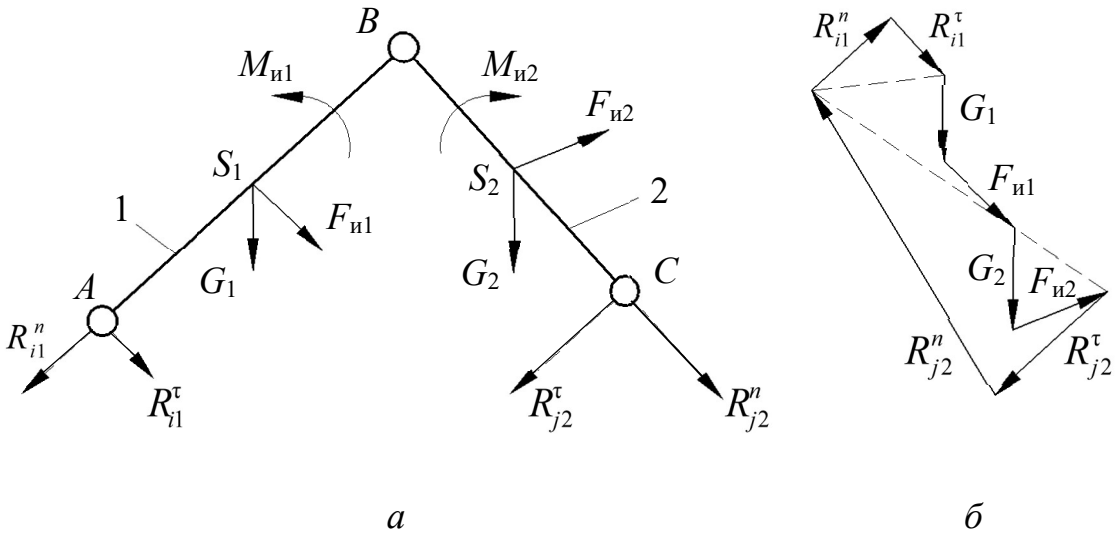


Рис. 33. Двухповодковая группа с вращательными парами:
а – план группы; *б* – план сил

Составляющие R_{i1}^n, R_{j2}^n определяются из плана сил (рис. 33, *б*), полученного на основе векторного уравнения $\Sigma\overline{F}_k = 0$, где $\overline{F}_k$ – силы, действующие на структурную группу, включая найденные составляющие реакций.

Пример 2. Двухповодковая группа шатун-ползун (рис. 34).

Реакция R_{j2} определяется из уравнения моментов $\Sigma M_A = 0$.

Реакция R_{i1} определяется непосредственно из плана сил (рис. 34, *б*) на основе векторного уравнения $\Sigma\overline{F}_k = 0$. Вычислять для этого составляющую R_{i1}^τ нет необходимости.

Пример 3. Двухповодковая группа кулиса-камень (рис. 35) при $G_2 \approx 0$.

Реакция R_{j2} определяется из уравнения моментов $\Sigma M_A = 0$.

Реакция R_{i1} определяется непосредственно из плана сил (рис. 34, *б*) на основе векторного уравнения $\Sigma\overline{F}_k = 0$ по аналогии с примером 2.

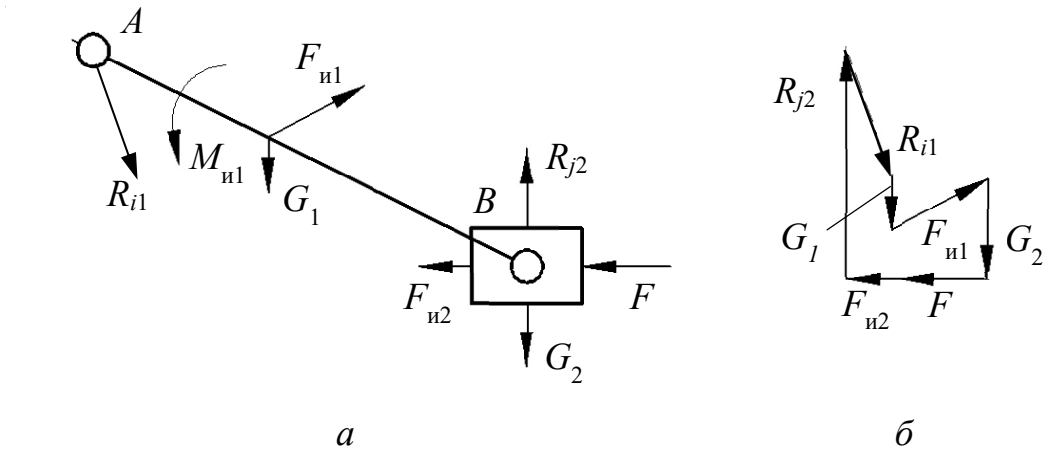


Рис. 34. Двухповодковая группа шатун-ползун:
а – план группы; *б* – план сил

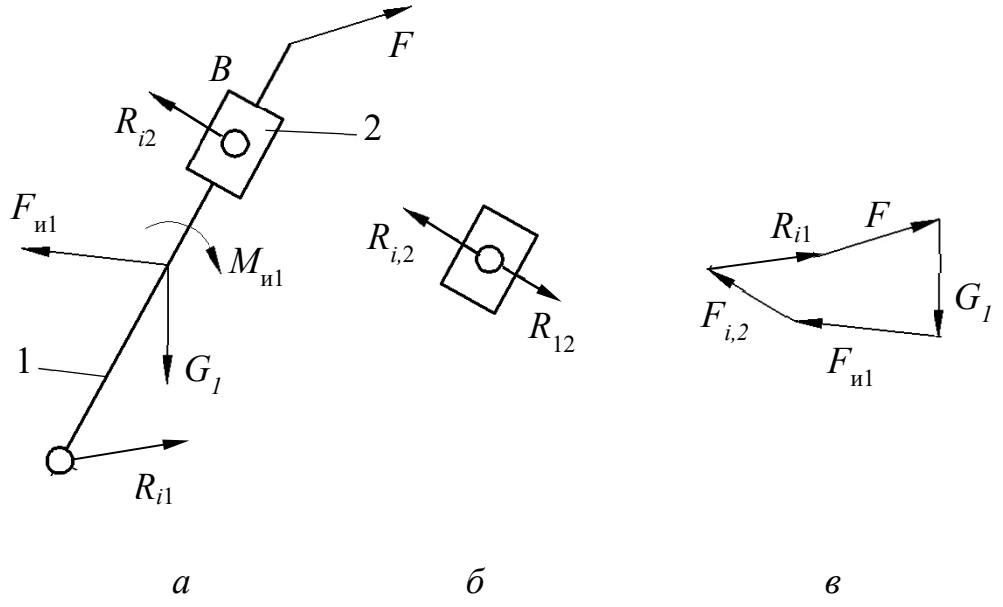
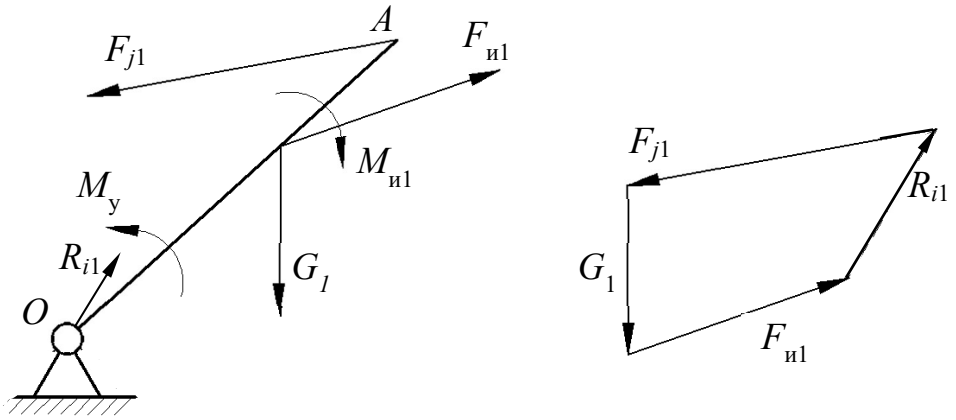


Рис. 35. Двухповодковая группа кулиса-камень:
а – план группы; *б* – силы на звене *B*; *в* – план сил

Особенность расчета данной группы Ассура состоит в возможности некоторого упрощения вычислений в случае, когда весом камня 2 можно пренебречь. Тогда реакция R_{12} равна по модулю и противоположна реакции R_{j2} (рис. 35, *б*).

4. Входное звено – кривошип (рис. 36).

Уравновешивающий момент $M_{\text{у}}$ определяется из уравнения моментов $\Sigma M_O = 0$.



а *б*

Рис. 36. Входное звено – кривошип:
а – план звена; *б* – план сил

Реакция R_{i1} определяется непосредственно из плана сил (рис. 36, *б*) на основе векторного уравнения $\Sigma \overline{F}_k = 0$ по аналогии с примером 2.

6. СИНТЕЗ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

6.1. Постановка задачи, виды и способы синтеза

Задачи синтеза рычажных механизмов в общем случае являются сложными задачами оптимального проектирования, включающими этапы структурного, кинематического и динамического расчёта. Поэтому для упрощения решения рассматриваются частные задачи, в которых учитываются лишь некоторые (основные) условия проектирования.

В зависимости от исходных данных различают следующие виды синтеза:

– геометрический, когда заданы отдельные положения звеньев или траектории отдельных точек;

– кинематический, когда заданы некоторые скорости, ускорения или их соотношения;

– динамический, когда заданы действующие силы или наложены некоторые ограничения на динамические параметры.

К способам синтеза относятся:

а) опытный, когда экспериментальным путём подбираются размеры звеньев для реализации заданной траектории;

б) графический;

в) аналитический.

Возможны различные комбинации видов и способов синтеза, перечисленных выше.

6.2. Решение задач оптимального синтеза стержневых механизмов

При постановке задачи оптимального синтеза следует различать входные и выходные параметры.

Входные – это изначально заданные параметры (размеры звеньев, скорости, ускорения или их соотношения).

Выходные –это параметры, определяемые в результате решения задачи.

При синтезе необходимо учитывать ряд требований кинематического, конструктивного, технологического характера и т. д., среди которых одно, как правило, является главным, а остальные – второстепенными (дополнительными).

Если главное требование записать математически в виде функции $Z = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – выходные параметры, то такая функция называется *функцией цели* (целевой), при этом дополнительные условия, выраженные в виде $a_i \le g_i(x_1, x_2, ..., x_n) \le b_i$, называются ограничениями.

Задачей оптимального синтеза является обеспечение экстремального значения Z при соблюдении всех ограничений.

Например, выразив вес механизма в виде функции Z его параметров (длин звеньев), можно решать задачу минимизации Z при соблюдении условий его существования. К таким условиям относятся условия проворачивания кривошипа в шарнирном четырёхзвеннике, условие соблюдения заданного угла давления и ряд других.

При малом числе выходных параметров решение задачи оптимизации может быть получено в аналитической форме. В противном случае используются численные методы направленного, случайного или комбинированного поиска оптимальных решений.

6.3. Условия проворачиваемости кривошипа в шарнирном четырёхзвеннике

При проектировании (синтезе) механизма с ведущим звеном – кривошипом одним из учитываемых условий является проворачиваемость кривошипа. Данное условие иначе называется условием существования кривошипа.

Выполнение условия существования кривошипа обеспечивается определённым соотношением длин звеньев. Например, для того чтобы звено AB четырёхзвенника (рис. 37) могло стать кривошипом, оно должно последовательно пройти через два крайних положения.

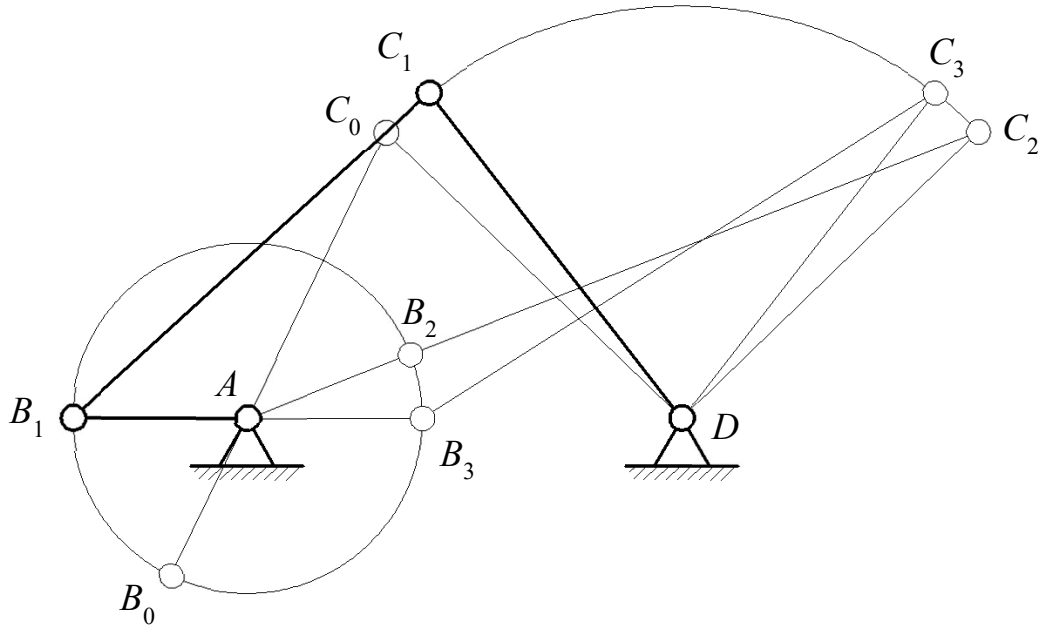


Рис. 37. Выполнение условия существования кривошипа

Используя три положения механизма, получим следующие условия для положений 1, 2, 3, предварительно обозначив длины звеньев $l_{AB} = a$; $l_{BC} = b$; $l_{CD} = c$; $l_{AD} = d$:

а) $a + d < b + c$ – положение 1;

б) $a + b < d + c$ – положение 2;

в) $c < b + d - a$ или $a + c < b + d$ – положение 3;

то есть сумма длин кривошипа и любого другого звена меньше суммы остальных звеньев.

Сложим попарно полученные неравенства и получим: $a < c$; $a < d$; $a < b$, то есть кривошип является самым коротким звеном.

А если данные условия не выполняются, то механизм будет либо двухкривошипным, либо двухкоромысловым. Эти условия используются при геометрическом синтезе.

6.4. Учёт углов давления в стержневых механизмах

Углы давления во многом определяют условия работы механизма. Угол давления (например, угол α на рис. 38) измеряется между вектором силы и вектором скорости в точке её приложения и влияет на трение и износ в кинематических парах.

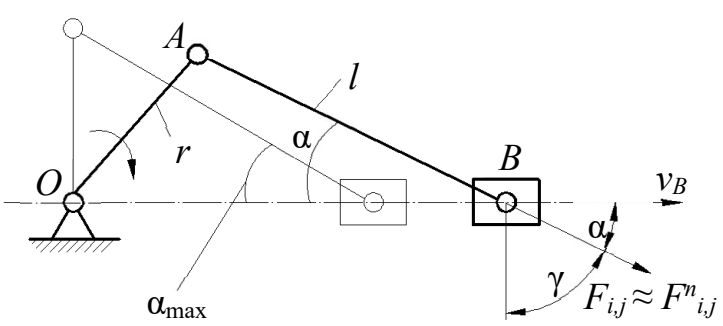


Рис. 38. Углы давления в стрежневом механизме

Поэтому максимальные значения углов давления при синтезе механизмов ограничивают допустимыми значениями [α] для исключения возможности заклинивания и предотвращения снижения КПД. Для упрощения расчётов, связанных с определением углов давления, обычно пренебрегают тангенциальными составляющими реакций, что позволяет находить наихудшие положения с точки зрения риска заклинивания и назначать длины звеньев l_{min}, обеспечивающие приемлемые условия работы при заданном [α], т. е. при выполнении условия $\alpha_{max} \leq [\alpha]$.

Углы $\gamma = 90° - \alpha$ называются углами передачи и ограничиваются при проектировании величиной γ_{min}.

6.5. Синтез четырёхзвенника по трём заданным положениям шатуна

Так как точки B и C шарнирного четырёхзвенника описывают дуги окружностей (рис. 39), то, проведя перпендикуляры через середины хорд, соединяющих концы шатуна в трёх положениях, получим центры вращения звеньев *AB* и *CD* (точки *A* и *D*). Вид синтеза – геометрический; способ синтеза – графический.

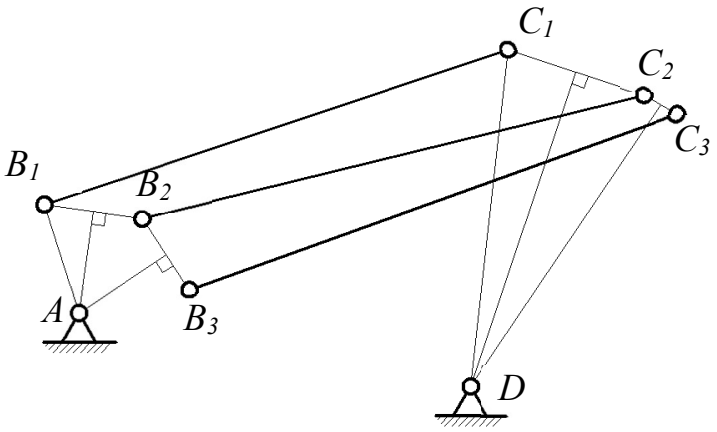


Рис. 39. Синтез четырёхзвенника

6.6. Синтез кривошипно-кулисного механизма по заданному коэффициенту изменения скорости хода

Схема кривошипно-кулисного механизма показана на рис. 40.

Одной из кинематических характеристик стержневого механизма может служить коэффициент изменения скорости хода k_v, представляющий собой отношение средней скорости холостого хода $v_{\text{х.х}}$ к средней скорости рабочего хода $v_{\text{р.х}}$.

При равномерном движении кривошипа коэффициент k_v равен

$$k_v = \frac{v_{\text{х.х}}}{v_{\text{р.х}}} = \frac{s}{t_{\text{х.х}}} \cdot \frac{t_{\text{р.х}}}{s} = \frac{180° + \theta}{\omega} \cdot \frac{\omega}{180° - \theta} = \frac{180° + \theta}{180° - \theta}, \qquad (6.1)$$

где s – ход ползуна; $t_{\text{р.х}}$ и $t_{\text{х.х}}$ – время рабочего и холостого хода; ω – угловая скорость кривошипа; θ – угол размаха кулисы.

При заданном V k можно определить или наоборот. Используя дополнительные конструктивные соображения, можно определить размеры всех звеньев механизма.

Вид синтеза – кинематический; способ – графоаналитический.

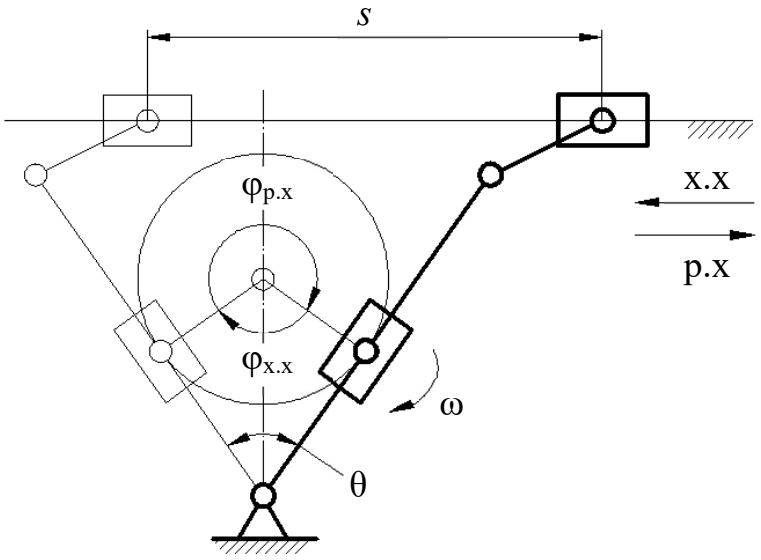


Рис. 40. Синтез кривошипно-кулисного механизма

6.7. Синтез кривошипно-ползунного механизма по некоторым заданным размерам

Кривошипно-ползунный механизм характеризуется пятью параметрами: a, φ_1, φ_2, $r = l_{OA}$, $l = l_{AB}$ (рис. 41), при этом можно записать два аналитических выражения, связывающие эти параметры:

$$\begin{aligned} \sin\varphi_1 &= \frac{a}{l+r}; \\ \sin\varphi_2 &= \frac{a}{l-r}. \end{aligned} \tag{6.2}$$

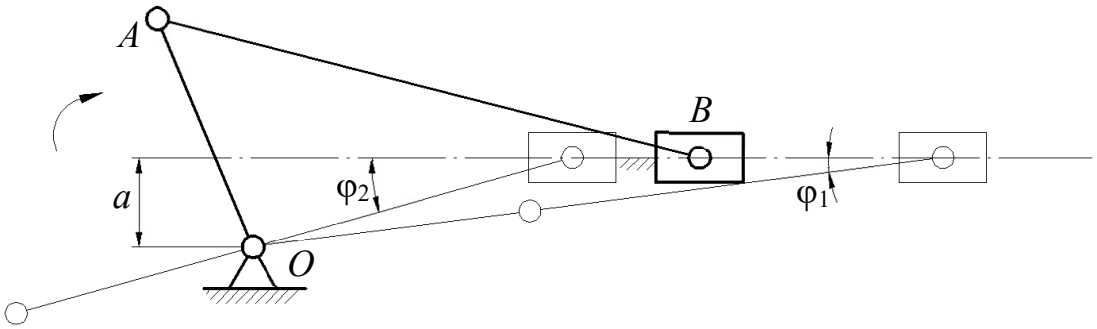


Рис. 41. Синтез кривошипно-ползунного механизма

Таким образом, задавая три параметра из пяти, можно определить два оставшихся из указанных выражений. Например, задав величины: a, φ_1 и φ_2, можно определить r и l.

Вид синтеза – геометрический; способ – аналитический.

6.8. Понятие о синтезе механизма по заданному закону движения выходного звена

Пусть задан закон движения ведомого звена (угла поворота коромысла обозначен ψ) в зависимости от угла поворота кривошипа φ, например, в четырёхшарнирном механизме (рис. 42).

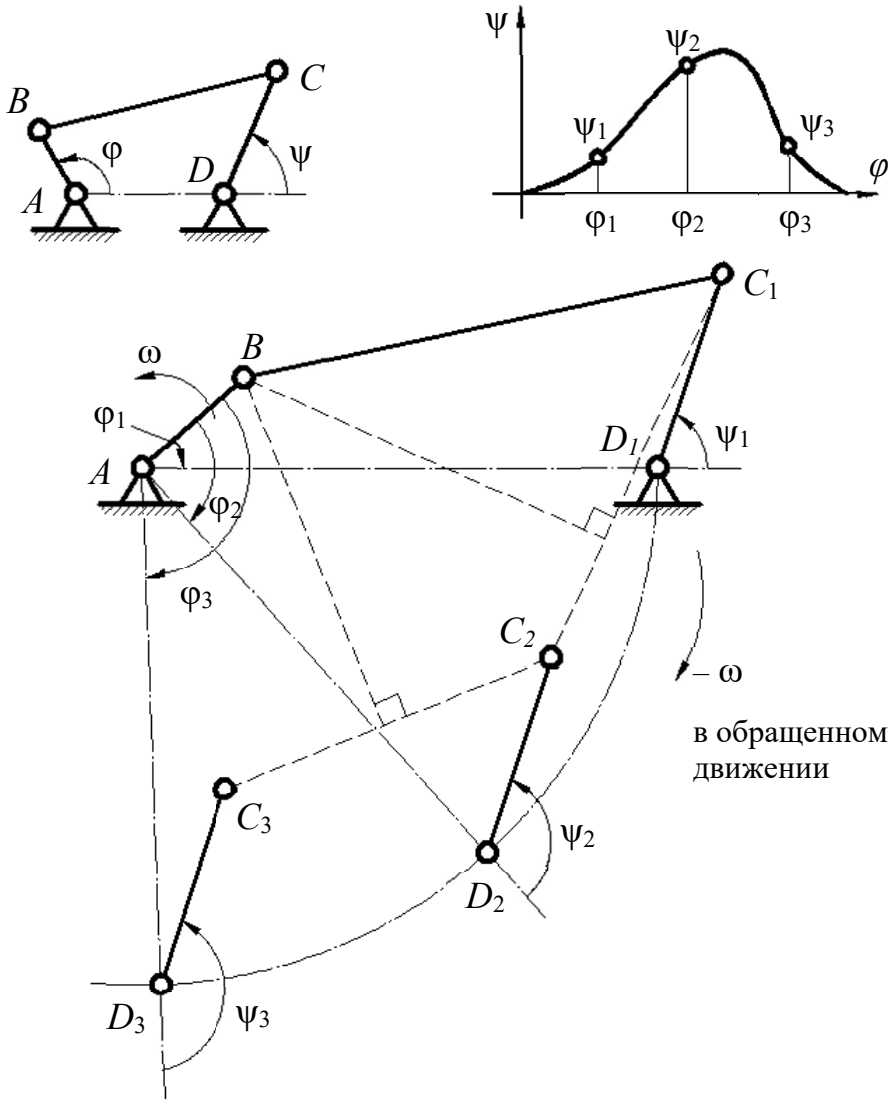


Рис. 42. Синтез механизма по заданному закону движения выходного звена

Приближенный синтез включает разбивку всего интервала по оси графика $\psi(\varphi)$ по оси абсцисс φ на участки, соответствующие трём произвольным значениям φ_1, φ_2, φ_3. Используется метод обращения движения, когда механизму условно задаётся движение, обратное кривошипу. Если заданы длина коромысла и межцентровое расстояние, то по трём положениям в обращённом движении можно найти размеры шатуна и кривошипа согласно рис. 42, где точку *B* находят как центр вращения точки *C* в обращённом движении.

Существует постановка задачи, когда отыскивается оптимальный закон движения с точки зрения различных параметров: скорости, ускорения, работы динамических сил и т. д.

6.9. Понятие о синтезе механизма по заданной траектории

Часто требуется спроектировать механизм с заданной траекторией движения ведомого звена. Например, четырёхшарнирный механизм стрелы портального крана позволяет перемещать груз горизонтально при вращении стрелы в вертикальной плоскости (рис. 43).

Синтез таких механизмов осуществляется графическими и аналитическими методами с использованием теории функций с наибольшим приближением к заданной траектории. В этой области имеются работы Чебышева, который первым предложил решение задачи для лямбдообразного прямила Чебышева, положенного в основу конструкции стрелы портального крана.

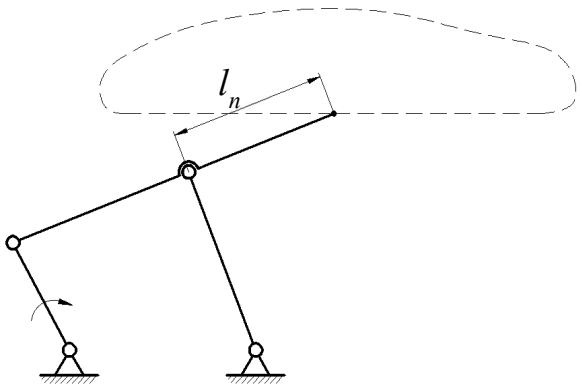


Рис. 43. Синтез механизма по заданной траектории

Искомыми параметрами являются длины звеньев, включая и l_n.

6.10. Общий порядок проектирования рычажного механизма

Процесс проектирования рычажного механизма включает следующие основные этапы:

1) производится синтез кинематической схемы (определяются длины звеньев по заданным условиям;

2) принимается упрощённый закон движения входного звена, определяются скорости и ускорения звеньев, производится приближённый силовой расчёт (определяются реакции в кинематических парах);

3) по найденным усилиям подбираются сечения звеньев и определяются их массы;

4) производится приведение сил и масс, подбор маховика и определение истинного закона движения звена приведения;

5) при найденном законе движения звена приведения находятся уточнённые значения скоростей и ускорений, определяются более точные величины реакций и производится проверка прочности и жёсткости звеньев. Размеры сечений и массы звеньев последовательно уточняются.

Иногда используют более простую последовательность, в которой расчёт ведётся при заданных длинах и массах звеньев, а также при упрощённом законе движения входного звена.

7. КУЛАЧКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ

7.1. Классификация кулачковых механизмов

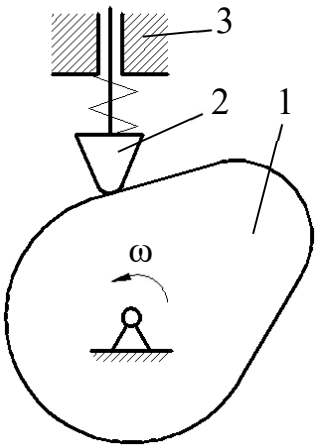


Рис. 44. Кулачковый механизм

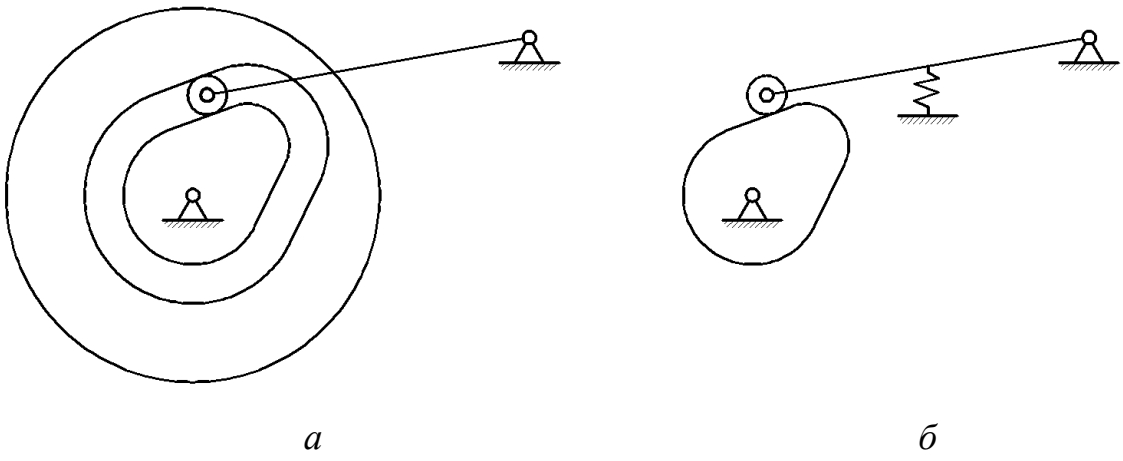
Кулачковые механизмы содержат хотя бы одну высшую кинематическую пару и состоят из кулачка 1, толкателя 2 и стойки 3 (рис. 44).

Степень подвижности такого механизма равна:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 2 - 1 = 1. \qquad (7.1)$$

Основными достоинствами кулачковых механизмов является возможность получения заранее заданного закона движения толкателя с помощью кулачка. К недостаткам следует отнести большое удельное давление в точке контакта кулачка с толкателем, а также сложность изготовления профиля кулачка.

Постоянный контакт толкателя с кулачком обеспечивается с помощью кинематического (рис. 45, *а*) или силового замыкания (рис. 45, *б*).



а *б*

Рис. 45. Классификация кулачковых механизмов по типу контакта толкателя с кулачком: *а* – с кинематическим замыканием; *б* – с силовым замыканием

В зависимости от характера движения кулачка и толкателя возможно преобразование вращательного или поступательного движения кулачка во вращательное или поступательное движение толкателя (рис. 46). На рис. 46, *а* показан механизм с преобразованием поступательного движения в поступательное (плоский с тарельчатым толкателем); на рис. 46, *б* – с преобразованием вращательного движения в поступательное (плоский внеосный с плоским толкателем); на рис. 46, *в* – с преобразованием вращательного движения в поступательное (пространственный с роликовым толкателем).

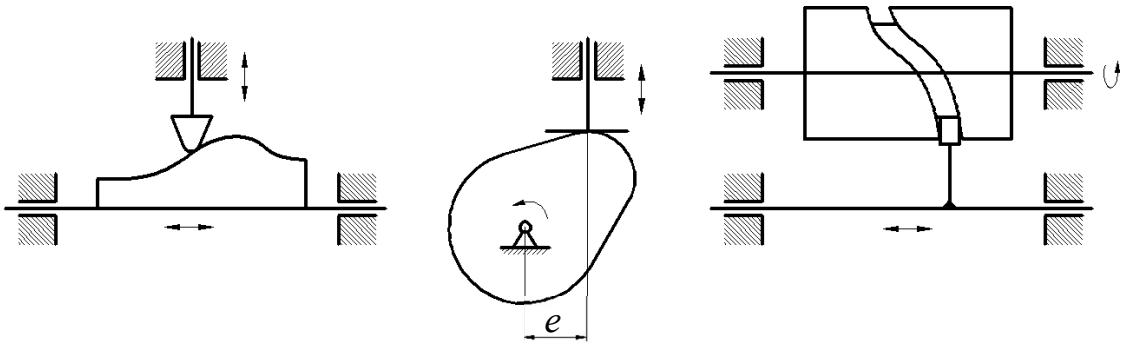


Рис. 46. Классификация кулачковых механизмов

Кулачковые механизмы могут быть плоскими (рис. 46, *а*, *б*) и пространственными (рис. 46, *в*), осевыми ($e = 0$) и внеосными ($e \neq 0$), с плоским, тарельчатым или роликовым толкателем. Назначение ролика – уменьшение трения и износа в контакте толкателя с кулачком.

Кулачковые механизмы, как правило, используются в машинах автоматического или полуавтоматического действия и обеспечивают функции «жёсткого» управления выполняемого процесса.

7.2. Кинематический анализ кулачковых механизмов

Основной задачей кинематического анализа является определение перемещений, скоростей и ускорений толкателя при заданных схеме механизма и профиле кулачка. Решение этой задачи может быть осуществлено аналитическими и графическими методами, первый из которых более точен, но сложен, а второй – менее точен, но более прост.

Рассмотрим графический метод на примере осевого механизма с роликовым толкателем. Анализ начинается с построения планов механизма. При этом используется метод обращения движения, когда всему механизму условно задают вращение с угловой скоростью (– ω), обратной скорости кулачка (рис. 47). Тогда толкатель в обращённом движении будет двигаться вокруг неподвижного кулачка, а центр ролика опишет кривую, отстоящую от профиля кулачка на расстояние радиуса *r* ролика и называемую *эквидистантой*. Построение профиля кулачка называется *профилированием.*

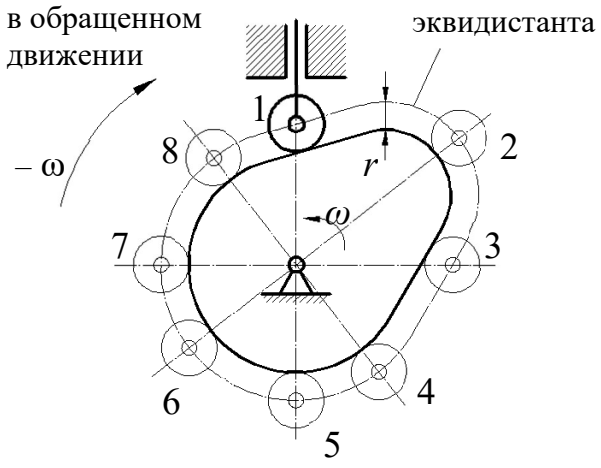


Рис. 47. Профилирование кулачка

Путь *s* любой точки толкателя при повороте кулачка на угол φ будет равен разности радиусов-векторов, соединяющих центр кулачка и соответствующие положения центра ролика.

На основе планов механизма можно построить диаграмму перемещений толкателя в координатах (*s*; φ) или (*s*; *t*), после чего определяются скорости *v*

(рис. 48) (аналоги скорости $\frac{ds}{d\varphi}$) и ускорения a (аналоги ускорения $\frac{d^2s}{d\varphi^2}$) путём графического дифференцирования графиков $s(\varphi)$, $s(t)$, $v(t)$, $\frac{ds}{d\varphi}(\varphi)$.

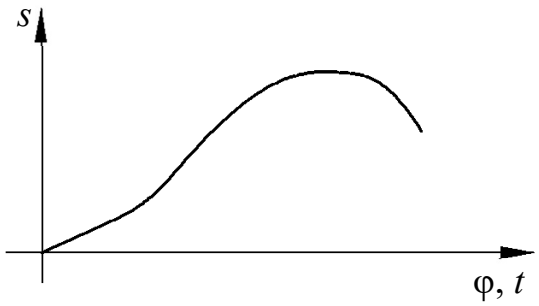


Рис. 48. Диаграмма перемещений толкателя

Движение толкателя имеет реверсивный характер за весь кинематический цикл, при этом наблюдаются четыре фазы движения толкателя (см. рис. 54), соответствующие четырём фазовым углам поворота кулачка: $\varphi_у$ – угол удаления (подъёма) толкателя; $\varphi_д$ – угол дальнего выстоя; $\varphi_в$ – угол возврата (опускания); $\varphi_б$ – угол ближнего выстоя.

С целью непосредственного определения скоростей и ускорений толкателя осуществляют условную замену высшей пары на низшую. Замена осуществляется так, что движение заменяемого механизма в момент замены соответствует движению заменяющего.

В общем случае мгновенный заменяющий механизм представляет шарнирный четырёхзвенник с подвижными шарнирами A и B, расположенными в центрах кривизны, контактирующих в точке P профилей (рис. 49).

В частных случаях возможны различные варианты замены (рис. 50), при этом можно производить кинематический анализ кулачкового механизма как обычного стержневого.

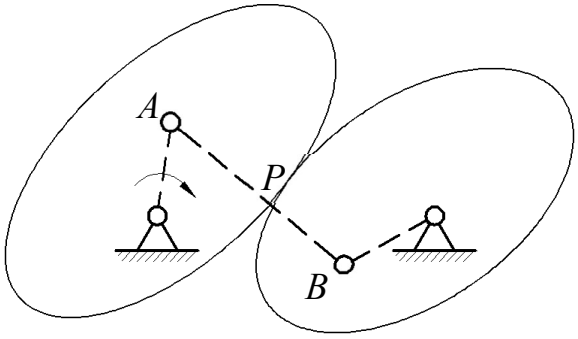


Рис. 49. Мгновенный заменяющий механизм

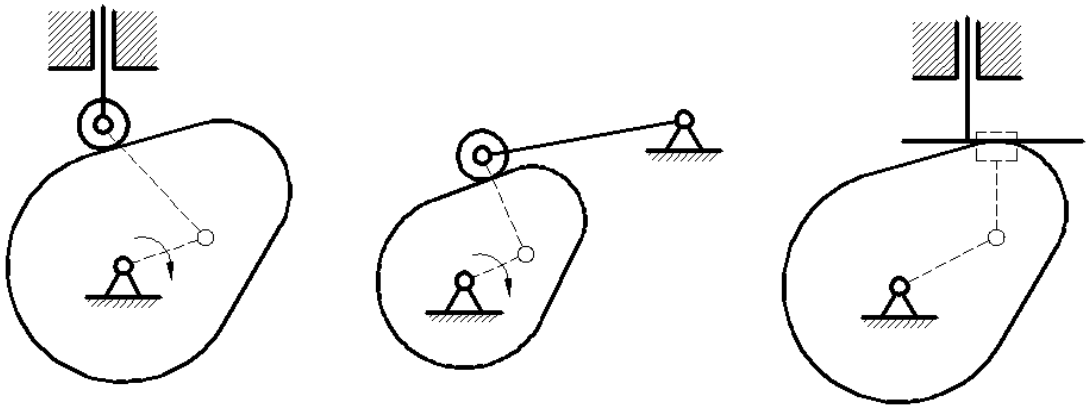


Рис. 50. Различные варианты замены кулачкового механизма

7.3. Некоторые вопросы динамического анализа кулачковых механизмов

Условия нормальной работы звеньев кулачкового механизма в существенной степени зависит от угла давления α между направлением усилия *F*, действующего на толкатель со стороны кулачка, и направлением скорости толкателя (рис. 51, *а*).

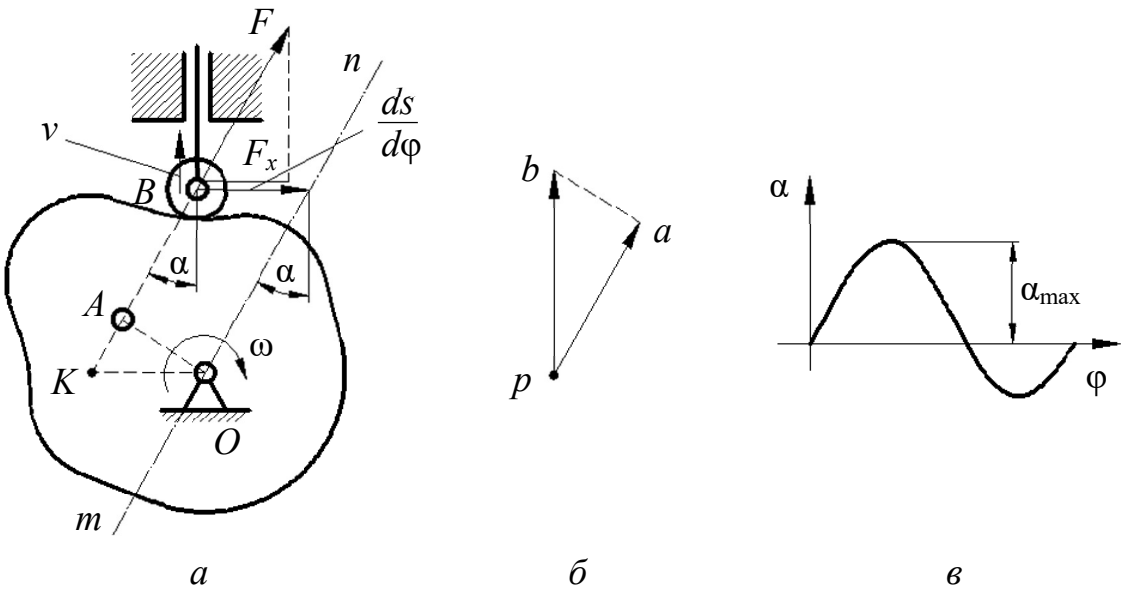
Угол давления – переменная величина, с увеличением которой возрастает опасность заклинивания механизма, т. к. увеличивается составляющая F_x, вызывающая трение в кинематических парах.

Обычно величину α_{max} ограничивают подбором размеров кулачка при условии, что

$$\alpha_{max} \le \begin{cases} 30° - \text{для механизмов с поступательным движением толкателя;} \\ 45° - \text{для механизмов с коромысловым толкателем.} \end{cases}$$

Рассмотрим задачу определения текущего угла α для любого положения механизма (рис. 51).

Построим заменяющий кривошипно-ползунный механизм *OAB*, где точка *A* совпадает с центром кривизны кулачка в точке его контакта с роликом (рис. 51, *а*).



а *б* *в*

Рис. 51. Динамический анализ кулачковых механизмов:
а – план положений; *б* – план скоростей заменяющего механизма; *в* – диаграмма изменения угла α

На рис. 51, *б* приведён план скоростей заменяющего механизма, где $\triangle pab \sim \triangle OAK$ (треугольники с взаимно перпендикулярными сторонами), поэтому

$$\frac{l_{OK}}{l_{OA}} = \frac{pb}{pa} = \frac{v_B}{v_A} = \frac{ds}{dt\omega l_{OA}} = \frac{ds}{dt} \cdot \frac{dt}{d\varphi l_{OA}}, \tag{7.2}$$

откуда

$$l_{OK} = \frac{ds}{d\varphi}. \tag{7.3}$$

Таким образом, отложив вектор $\frac{ds}{d\varphi}$ от точки *B* в направлении вектора скорости *v* толкателя, повёрнутого на 90° в сторону вращения кулачка, и проведя линию *mn* через точку *O* и конец вектора $\frac{ds}{d\varphi}$, получим угол α.

Можно решить обратную задачу, находя положение центра O вращения кулачка при заданных значениях α и $\frac{ds_1}{d\varphi}, \frac{ds_2}{d\varphi}$ для двух положений толкателя (рис. 52).

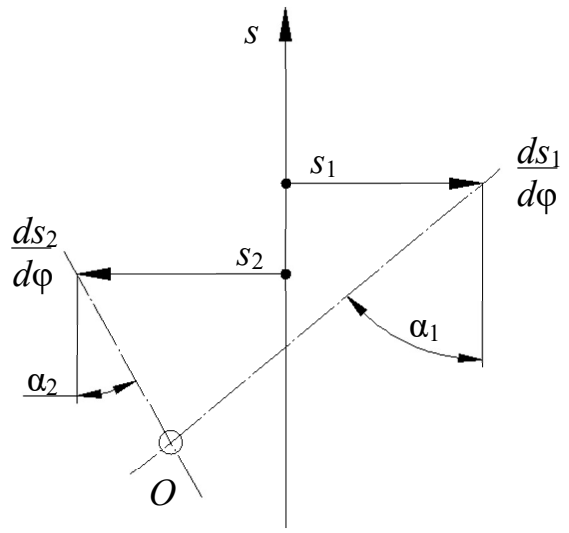


Рис. 52. Решение обратной задачи (нахождение положения центра вращения)

Из рис. 52 видно, что чем больших значений достигают углы давления α, тем меньшие габариты имеет механизм, но риск заклинивания при этом увеличивается.

7.4. Синтез кулачковых механизмов

7.4.1. Выбор закона движения толкателя

При проектировании кулачковых механизмов используются различные методы синтеза.

Если известен минимальный радиус (r_{min}) кулачка и закон его движения, то построение профиля – задача кинематического синтеза. Если r_{min} должен определяться с условием отсутствия заклинивания, то построение профиля – задача динамического синтеза.

Вопрос о выборе закона движения толкателя отпадает в случае, если он полностью определяется той операцией, которую толкатель осуществляет, т. е. является исходно заданным. Однако во многих случаях заданы лишь частичные перемещения, скорости или ускорения толкателя и необходимо подобрать какой-либо закон движения на недостающих участках.

Например, может быть задано максимальное и минимальное перемещение толкателя по двум участкам t_2 и t_4 (рис. 53) в виде графика $s(t)$, показанного основной линией. На остальных участках t_1 и t_3 закон движения следует выбрать.

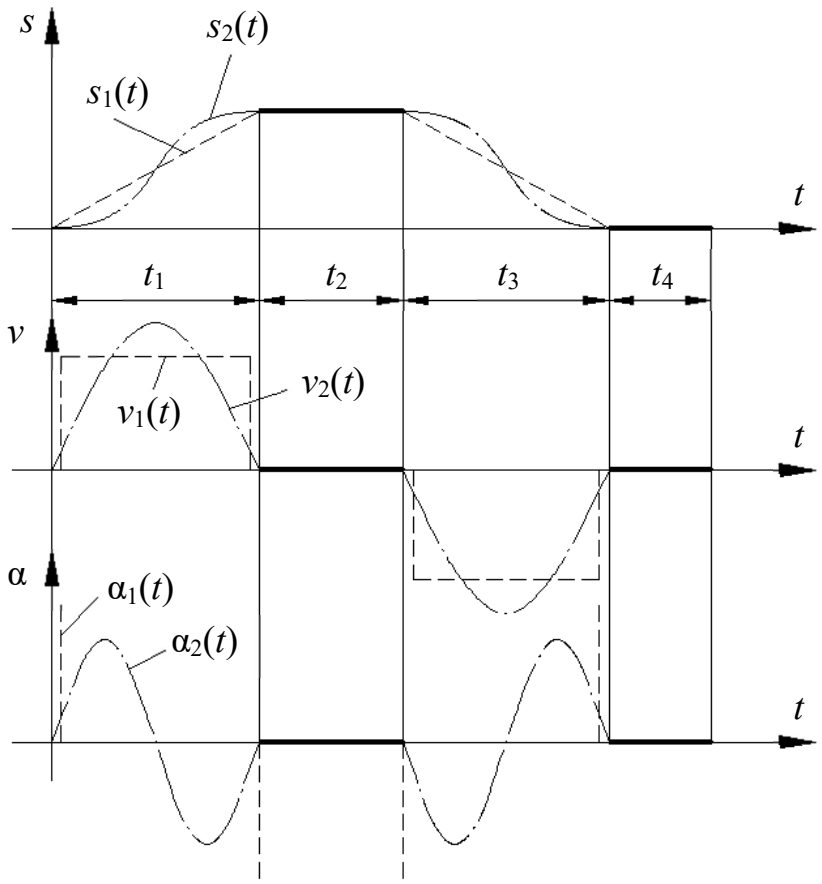


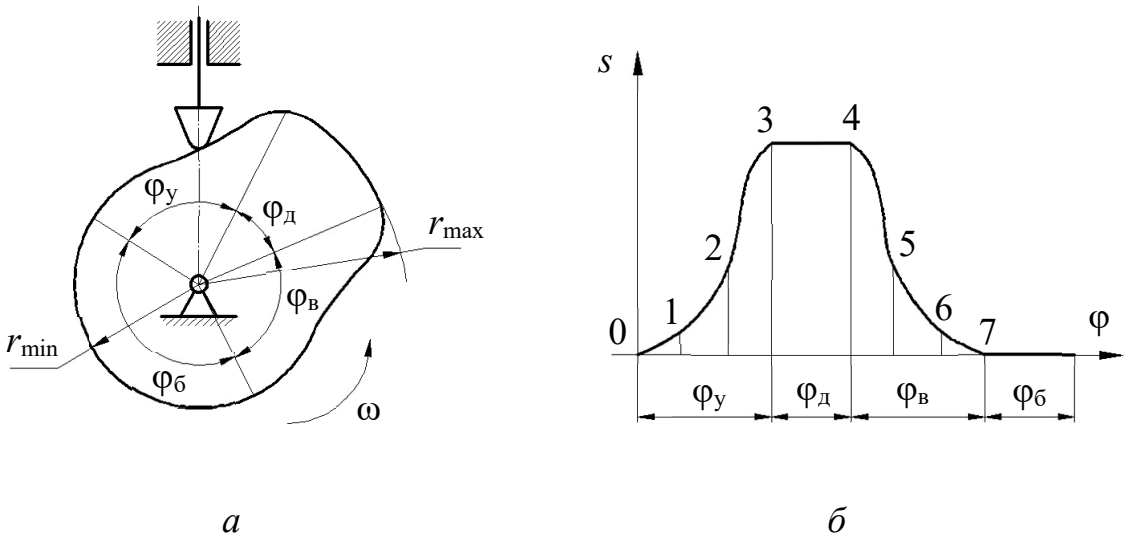
Рис. 53. Выбор закона движения толкателя

Из всех возможных законов движения необходимо выбирать оптимальный с точки зрения условий работы механизма. Одним из таких законов является синусоидальный закон $s_2(t)$, обеспечивающий плавную безударную работу механизма без резких изменений скорости и без больших значений ускорений, как, например, при выборе закона $s_1(t)$, где ускорения, а следовательно, силы инерции достигают больших величин, способных вызвать износ и поломку.

7.4.2. Профилирование кулачка

Рассмотрим графический метод получения профиля кулачка как задачу кинематического синтеза. В этом случае заданы схема кулачкового механизма, закон движения толкателя и r_{min} кулачка. Профилирование осуществляется на основе закона движения толкателя. В качестве примера рассмотрим профилирование кулачка в осевом механизме с поступательно движущимся толкателем.

Схема механизма, диаграмма движения толкателя и r_{min} кулачка даны (рис. 54).



а *б*

Рис. 54. Профилирование кулачка:
а – схема механизма; *б* – диаграмма движения толкателя

В начале размечаются основные размеры механизма в масштабе μ_l, а также фазовые углы, причём углы $\varphi_у$ и $\varphi_в$ делятся на ряд равных частей в соответствии с диаграммой (рис. 54, *б*). Строятся начальное, а затем ряд последующих положений толкателя в обращённом движении (рис. 55, *а*), и полученные точки соединяются плавной кривой.

В случае построения профиля кулачка для механизма с роликовым толкателем сначала строится эквидистанта (центровой профиль) как и в

предыдущем случае, а затем и сам рабочий профиль кулачка, отстоящий от эквидистанты на величину радиуса ролика $r_{рол}$ (рис. 55, *б*).

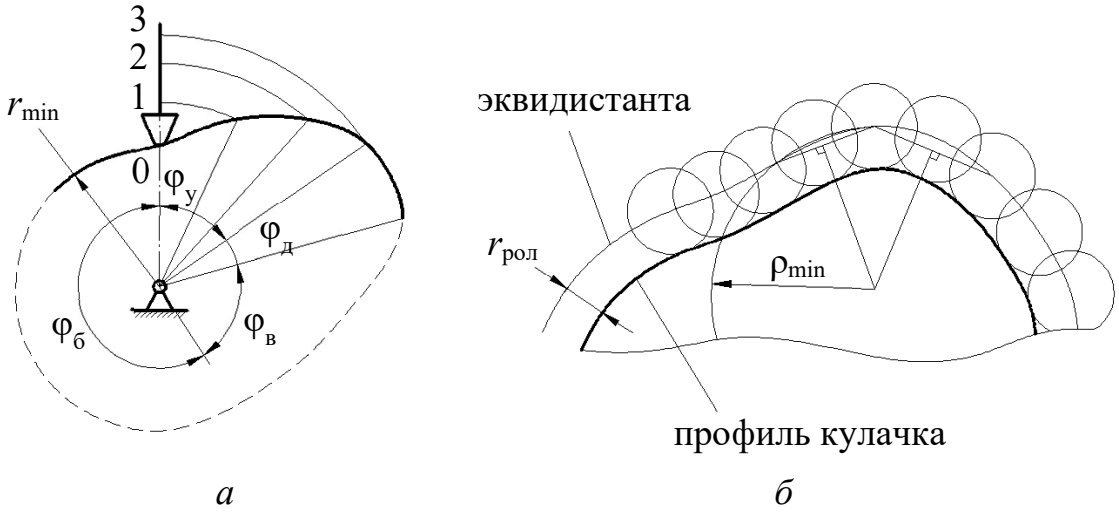


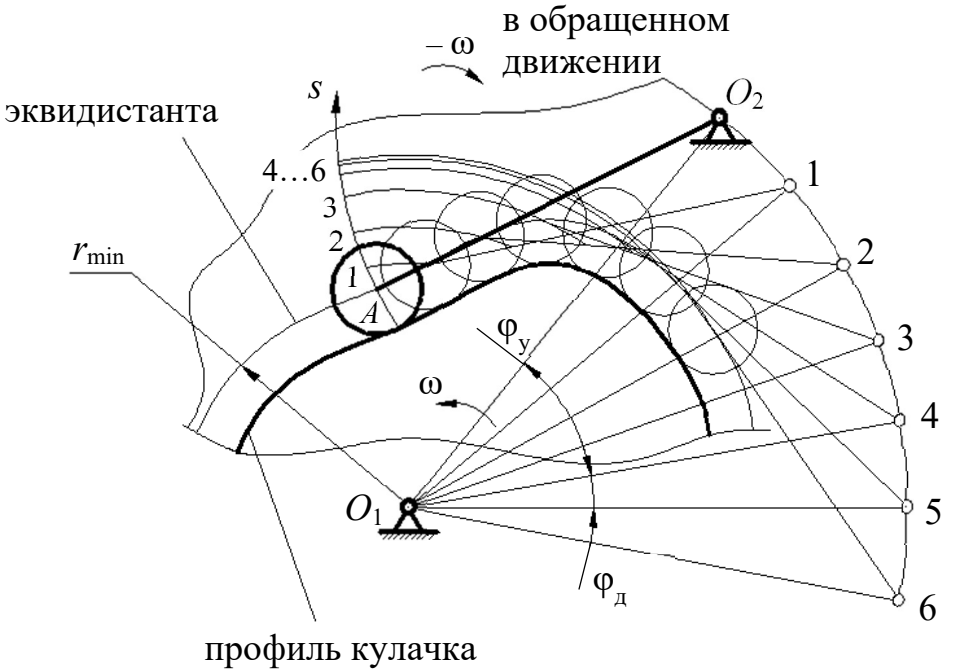
Рис. 55. Построение профиля кулачка:
а – ряд положений толкателя в обращенном движении; *б* – построение профиля кулачка для механизма с роликовым толкателем

Величина $r_{рол}$ выбирается из соотношения:

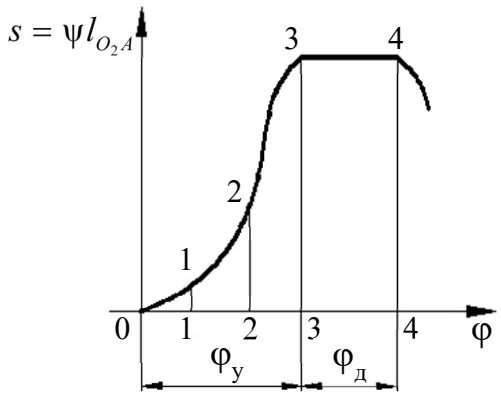
$$r_{рол} \le \min \begin{cases} 0{,}4 r_{min}; \\ 0{,}8 \rho_{min}, \end{cases} \qquad (7.4)$$

где ρ_{min} – минимальный радиус центрового профиля кулачка, который можно определить графически по трём точкам в месте наибольшей кривизны эквидистанты (рис. 55, *б*).

Профилирование кулачка механизма с коромысловым толкателем состоит из аналогичных операций, т. е. после разметки межцентровых расстояний строится ряд положений коромысла в обращённом движении (рис. 56, *а*) в соответствии с заданной диаграммой $s(\varphi)$, часть которой показана на рис. 56, *б*.



а



б

Рис. 56. Профилирование кулачка механизма с коромысловым толкателем:
а – ряд положений коромысла в обращенном движении; *б* – диаграмма движения коромысла

7.4.3. Динамический синтез кулачкового механизма

Задача динамического синтеза заключается в нахождении центра вращения кулачка при условии минимизации размеров механизма, когда заданы закон движения толкателя и предельно допустимый угол давления $\alpha_{доп}$. В конечном итоге задача состоит в определении r_{min} кулачка, после чего может быть выполнен кинематический синтез (профилирование).

Рассмотрим пример определения $r_{\min}$ кулачка для механизма с поступательно движущимся толкателем, когда заданы диаграммы перемещений $s(\varphi)$ и аналогов скоростей $\frac{ds}{d\varphi}(\varphi)$, которые должны быть вычерчены в едином масштабе $\mu_s = \mu_{\frac{ds}{d\varphi}} = \ldots$

Путём исключения параметра φ вычерчивается совмещённая диаграмма $s\left(\frac{ds}{d\varphi}\right)$, как показано на рис. 57.

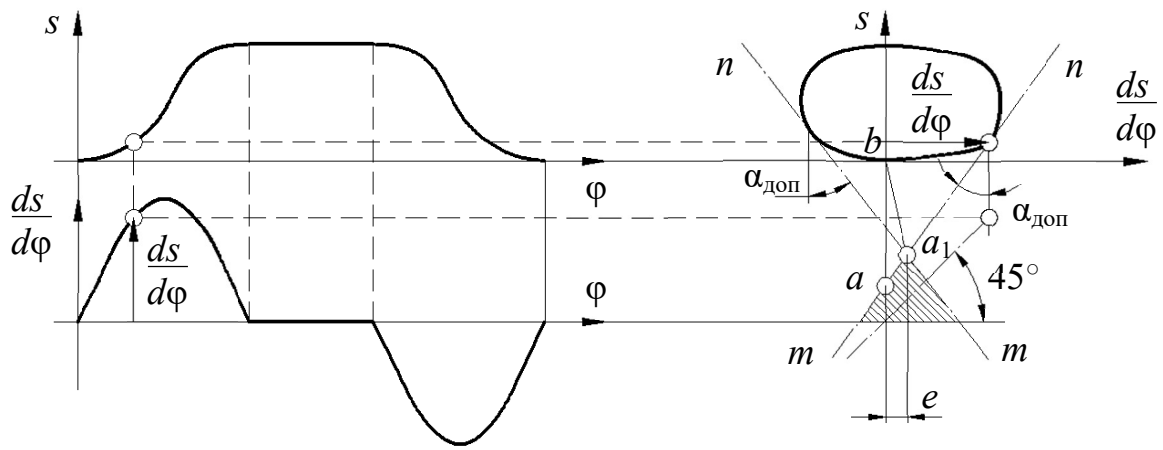


Рис. 57. Совмещенная диаграмма движения

Проведя касательные *mn* к диаграмме $s\left(\frac{ds}{d\varphi}\right)$ под углами $\varphi_{доп}$, как показано на рис. 57, получим точку a_1 на их пересечении. Тогда отрезок a_1b будет соответствовать в масштабе μ_s величине

$$r_{\min} = \mu_s \cdot (a_1 b) \tag{7.5}$$

для внеосного механизма со смещением оси толкателя $e \neq 0$ относительно центра вращения кулачка. Так как центр кулачка можно располагать в любой точке заштрихованной области, то при $e = 0$ получим

$$r = \mu_s \cdot (ab), \tag{7.6}$$

когда центр кулачка совпадает с осью толкателя.

Таким образом, габариты механизма уменьшаются при $e \neq 0$, т. к. центр кулачка приближается к точке b, а предельный угол давления $\varphi_{доп}$ остаётся неизменным.

Обычно при силовом замыкании такие построения делаются только для фазы удаления, т. к. на фазе возврата толкатель является ведущим звеном и заклинивания не происходит.

Для механизма с коромысловым толкателем построение совмещённой диаграммы $s\left(\frac{ds}{d\varphi}\right)$ производится в пределах заданного максимального угла размаха коромысла ψ_{max}. Причём отрезки, равные $\frac{ds}{d\varphi}$ откладываются в масштабе μ_l от траектории точки A коромысла по его оси в сторону вектора $\frac{ds}{d\varphi}$, повёрнутого на 90° в направлении вращения кулачка (рис. 58).

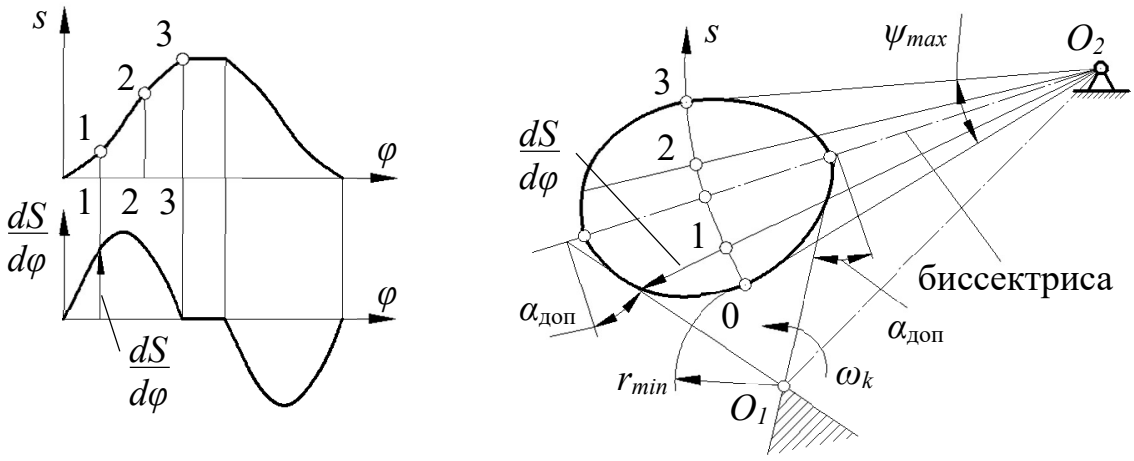


Рис. 58. Построение совмещенной диаграммы движения для механизма с коромысловым толкателем

Точки, полученные для нескольких положений коромысла, соединяют плавной кривой и строят допускаемую зону размещения центра вращения кулачка, которую приближённо можно получить, проведя касательные к диаграмме $s\left(\frac{ds}{d\varphi}\right)$ под углами $\alpha_{доп}$, образованными биссектрисой угла ψ_{max} и

перпендикулярами к ней (рис. 58, *б*). Выбранное положение центра O_1 в допускаемой (заштрихованной) зоне определяет величину $r_{\min}$ и межцентровое расстояние O_1O_2 между кулачком и коромыслом.

7.4.4. Аналитический способ синтеза кулачковых механизмов

При аналитическом методе синтеза вместо диаграмм в графической форме используются аналитические зависимости $s(\varphi)$, $\frac{ds}{d\varphi}(\varphi)$ и т. д. Например, для осевого кулачкового механизма с поступательно движущимся толкателем профиль кулачка может быть представлен аналитической зависимостью вида

$$r = r_{\min} + s(\varphi). \qquad (7.7)$$

При заданном $r_{\min}$ и известной зависимости S(φ) можно получить профиль кулачка с любой заданной степенью точности.

7.4.5. Понятие о проектировании пространственных кулачковых механизмов

Распространённым методом синтеза пространственных механизмов является условная их замена плоским кулачковым механизмом. Тогда задача сводится к синтезу плоского механизма. Например, задача проектирования механизма с поступательно движущимся толкателем и вращающимся кулачком сводится при заданном законе $s(\varphi)$ к построению развёртки цилиндра, на которой по данным диаграммы строится теоретический и действительный профиль кулачка (рис. 59).

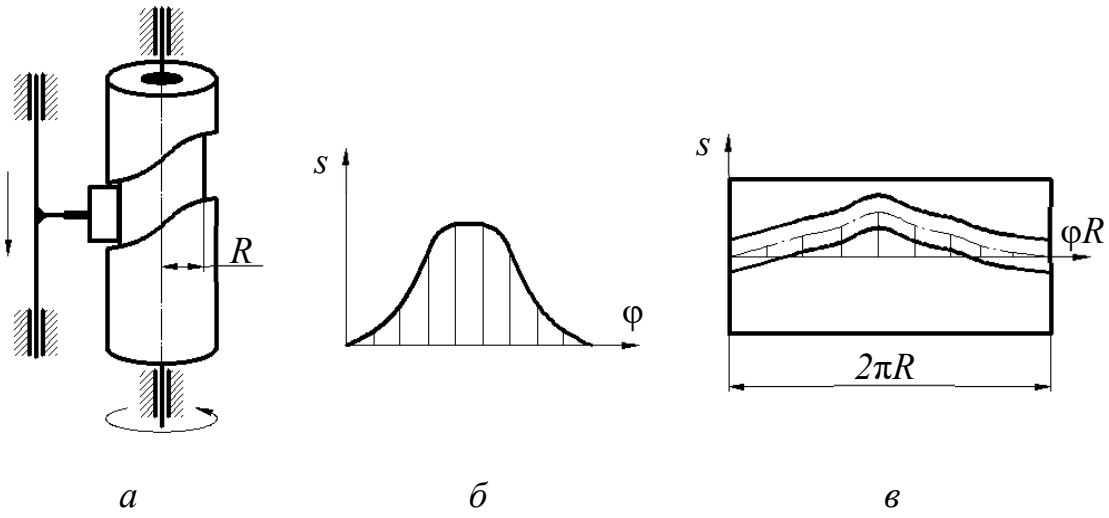


Рис. 59. Проектирование пространственного кулачкового механизма:
а – план механизма; *б* – диаграмма движения толкателя; *в* – развертка цилиндра

8. ФРИКЦИОННЫЕ И ЗУБЧАТЫЕ МЕХАНИЗМЫ

8.1. Общие сведения о передачах вращения

Фрикционные и зубчатые механизмы предназначены для передачи вращательного движения с одного вала на другой с помощью деталей типа диска в основном цилиндрической формы. При этом, как правило, меняется величина угловой скорости и передаваемого момента, а также их направление. Вал, от которого передаётся движение, называется ведущим, а вал, которому передаётся движение – ведомым.

Оси валов могут быть параллельными, пересекаться или скрещиваться под различными углами. В первом случае механизм является плоским, в остальных случаях механизмы пространственные.

Если в механизме имеются только ведущие и ведомые валы и отсутствуют промежуточные вращающиеся звенья, то механизм называется *передачей.* Передача вращения может осуществляться:

1) путём непосредственного соприкосновения двух дисков, жёстко связанных с ведущим и ведомым валами (фрикционная, червячная, зубчатая);

2) посредством промежуточных гибких тел, сцепляющихся с дисками, которые жёстко связаны с ведущим и ведомым валами (ременная, цепная, волновая).

Отношения угловых скоростей вращения обоих валов передачи называется *передаточным отношением* (*i*), которое характеризует процесс преобразования движения количественно.

Отношения угловой скорости ведущего вала к угловой скорости ведомого называется *передаточным числом* (*u*), которое определяет направление передачи энергии.

Величина *i* и *u* может меняться или оставаться постоянным за время одного оборота ведущего вала.

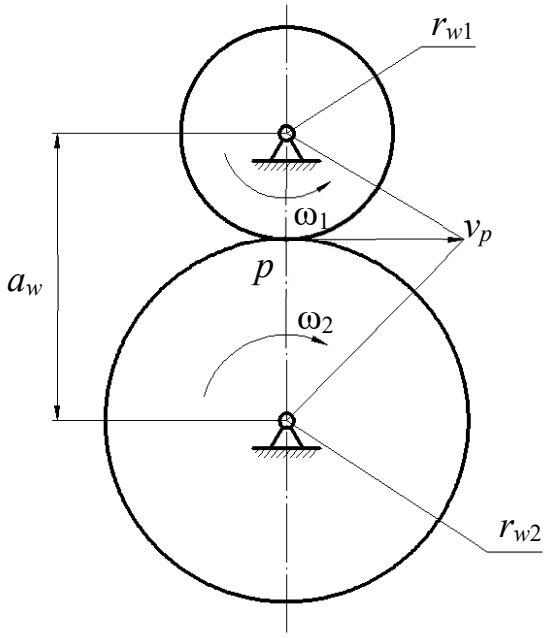


Рис. 60. Схема передачи вращения

Любую передачу можно схематично представить в виде двух начальных поверхностей, контактирующих между собой, а плоскую передачу – в виде двух начальных окружностей с радиусами r_{w1} и r_{w2}, перекатывающихся друг по другу без скольжения и контактирующих в полюсе p (рис. 60).

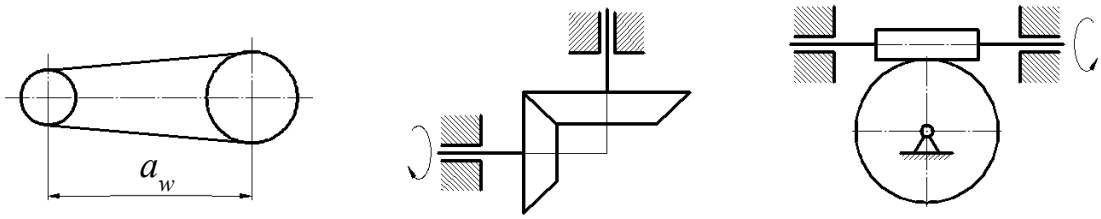
Тогда

$$v_p = r_{w1}\omega_1 = r_{w2}\omega_2, \qquad (8.1)$$

откуда следует выражение для передаточного отношения

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{w2}}{r_{w1}}. \qquad (8.2)$$

Аналогично можно изобразить ременную или цепную передачи, а также пространственные передачи (рис. 61).



а *б* *в*

Рис. 61. Схематические обозначения различных типов передач:
а – ременная или цепная передача; *б* – коническая зубчатая передача;
в – червячная передача

8.2. Фрикционные передачи

Одной из наиболее простых и во многих случаях достаточно надёжной является фрикционная передача, состоящая в простейшем случае из двух колёс (роликов), закреплённых на ведущем и ведомом валах. Для передачи движения без скольжения необходимо приложить к одному из роликов силу Q, достаточную для возникновения трения в месте контакта (рис. 62), при этом касательная сила их сцепления равна по величине передаваемого окружному усилию.

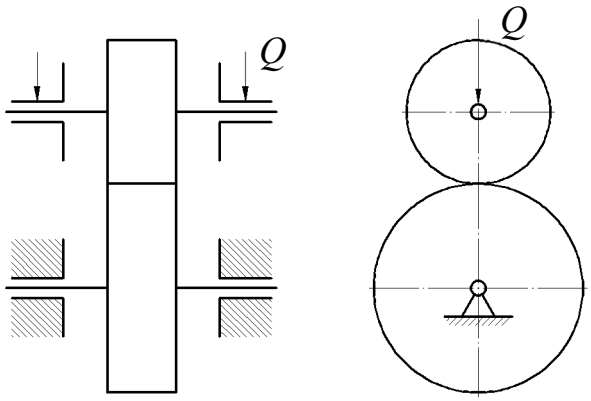
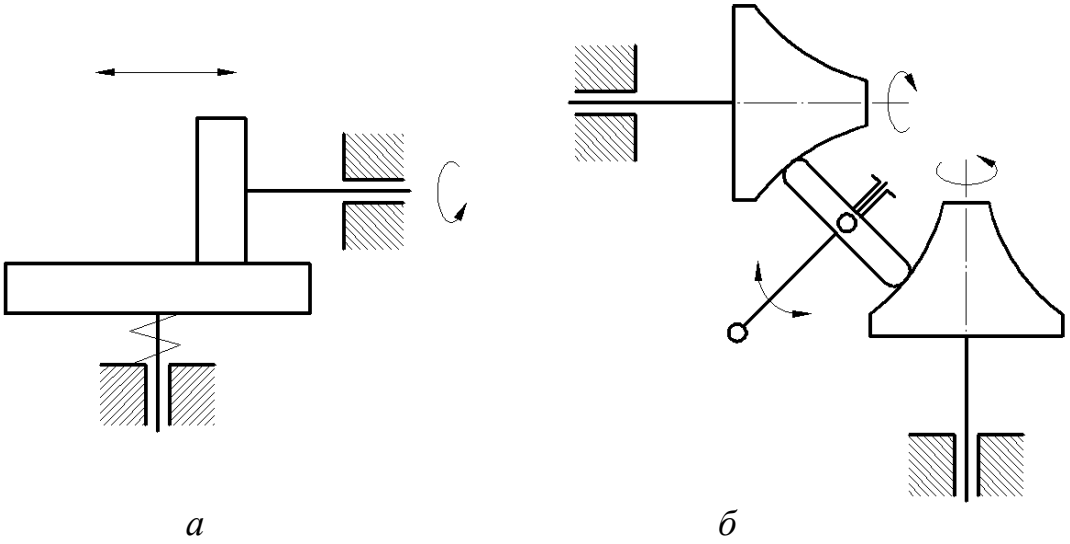


Рис. 62. Фрикционная передача

Фрикционные передачи могут быть с постоянным и переменным передаточным отношением. Передачи с переменным передаточным отношением называются *вариаторами* (рис. 64).



а *б*

Рис. 63. Вариаторы: *а* – лобовой; *б* – торовый

Достоинствами фрикционных передач являются: плавность и бесшумность в работе, простота конструкции, невозможность поломки при резком изменении крутящего момента на одном из валов благодаря возможности проскальзывания роликов, возможность бесступенчатого регулирования скоростей.

Недостатками являются: необходимость прижимного устройства, непостоянство передаточного отношения, невозможность передачи значительных крутящих моментов.

В связи с указанными недостатками фрикционные передачи не получили такого широкого распространения как зубчатые.

8.3. Зубчатые передачи. Виды и классификация

Зубчатые передачи осуществляют передачу вращательного движения с одного вала на другой с помощью цилиндрических, конических, червячных колёс, имеющих специально профилированные зубья, при этом зубчатые колёса могут иметь прямые, косые, спиральные, шевронные зубья и т.д. (рис. 64).

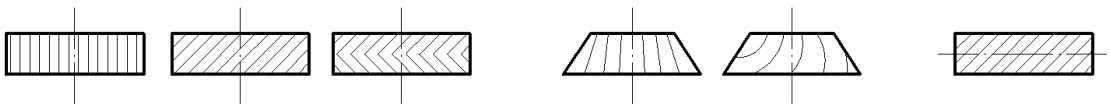


Рис. 64. Виды зубчатых колес:
а – цилиндрические колеса; *б* – конические колеса; *в* – червяк

При использовании колёс с непрямыми зубьями повышается плавность и бесшумность работы и увеличивается нагрузочная способность передачи.

В зубчатых передачах с пересекающимися осями в качестве начальных поверхностей используются усечённые конусы, вершины которых пересекаются в одной точке (рис. 65, *а*), а в передачах с перекрещивающимися

осями теоретическими начальными поверхностями являются гиперболоиды вращения (рис. 65, *б*). Такие передачи называются *гиперболоидными*.

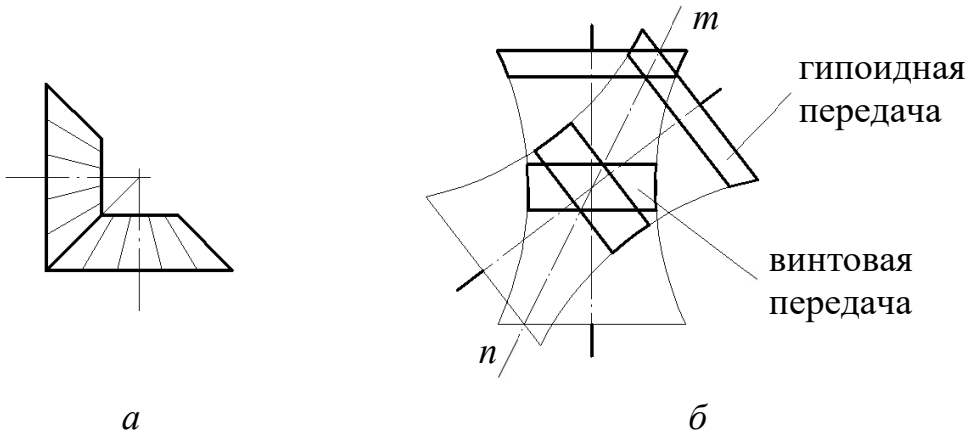


Рис. 65. Начальные плоскости зубчатых передач: *а* – зубчатая передача с пересекающимися осями; *б* – зубчатая передача с перекрещивающимися осями

При использовании колёс с непрямыми зубьями повышается плавность и бесшумность работы и увеличивается нагрузочная способность передачи.

В зубчатых передачах с пересекающимися осями в качестве начальных поверхностей используются усечённые конусы, вершины которых пересекаются в одной точке (рис. 65, *а*), а в передачах с перекрещивающимися осями теоретическими начальными поверхностями являются гиперболоиды вращения (рис. 65, *б*). Такие передачи называются *гиперболоидными*.

Контакт зубьев колёс в таких передачах происходит по прямолинейным образующим *mn*. В машиностроительной практике ограничиваются отдельными короткими частями гиперболоидов. Например, используя среднюю часть гиперболоидов, получают винтовую зубчатую передачу, а если использовать усечённые конусы, близкие по профилю к гиперболоидам в их широкой части, то получим так называемую *гипоидную передачу* (рис. 65, *б*).

Частным случаем винтовой передачи является червячная передача, в которой малое колесо называется *червяком*, а большое – *червячным колесом* (рис. 66).

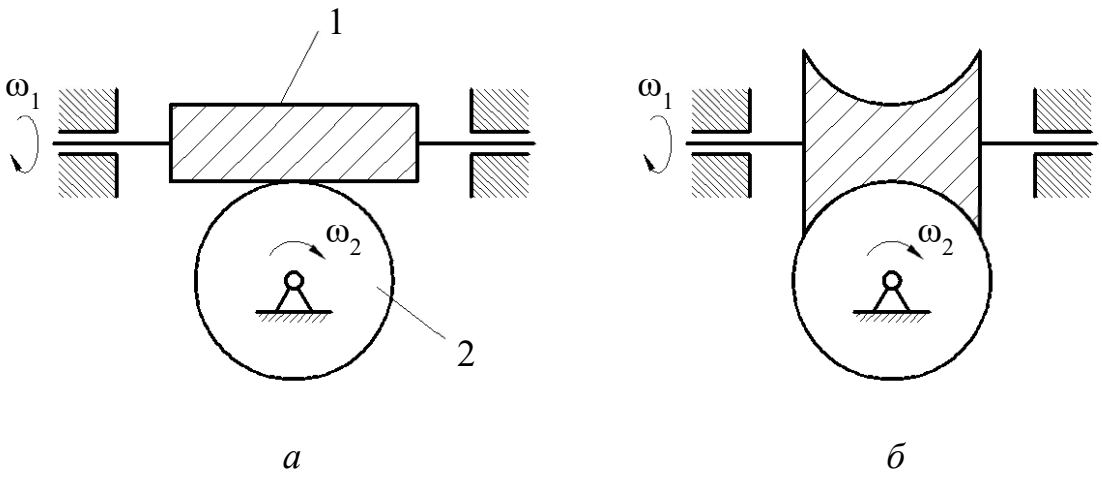


Рис. 66. Червячная передача:
а – передача с цилиндрическим червяком; *б* – передача с тороидным (глобоидным) червяком

Червячные передачи могут быть с одно и многозаходными червяками, при этом число заходов червяка равно числу его зубьев.

Червячные передачи позволяют обеспечить большое передаточное отношение при сравнительно малых габаритах вследствие малого числа z_1 зубьев (заходов) на червяке (обычно z_1 = 1; 2; 4). Однако коэффициент КПД передачи ниже, чем у цилиндрической.

Широко употребляются следующие значения передаточных отношений для зубчатой пары: 1…6 – для цилиндрических передач; 1…4 – для конических передач; 10…40 – для червячных передач.

По форме профиля зуба различают передачи *эвольвентные, циклоидные, цевочные*, а также *передачи с зацеплением Новикова*.

Наибольшее распространение получили эвольвентные передачи с профилем, предложенным Л. Эйлером в 1754 г. Преимуществом этого профиля является простота изготовления, достаточно высокая нагрузочная способность, малая чувствительность к неточностям межцентрового расстояния. Однако эвольвентный профиль удовлетворяет не всем требованиям, предъявляемым к современным зубчатым передачам. Так, например, в мощных передачах внешнего зацепления, где контактируют

выпуклые зубья с малыми радиусами кривизны профилей, происходит их быстрое разрушение из-за недостаточной контактной прочности. Одним из путей повышения контактной прочности является использование внутреннего зацепления, в котором профиль зуба одного из колёс вогнутый.

Другой путь – применение передач с зацеплением Новикова, где выпуклые профили зубьев одного из колёс, очерченные по дуге окружности, контактируют с вогнутыми профилями другого колеса. При этом нагрузочная способность передачи повышается в два – три раза по сравнению с эвольвентной, а также уменьшаются потери на трение.

Одной из интересных и перспективных передач является так называемая волновая передача (рис. 67), состоящая из жёсткого 1 и гибкого 2 зубчатых колёс, а также генератора волн 3 с роликами 4. При вращении генератора 3, благодаря разнице чисел зубьев жёсткого и гибкого колёс, приводится во вращение колесо 2, причём передаточное отношение может быть очень большим (i = 40...400). Изобретатель волновой передачи У. Массер (США, 1959 г.) указывал на возможность использования треугольного профиля зубьев.

К зубчатым передачам относятся передачи с некруглыми, секторными

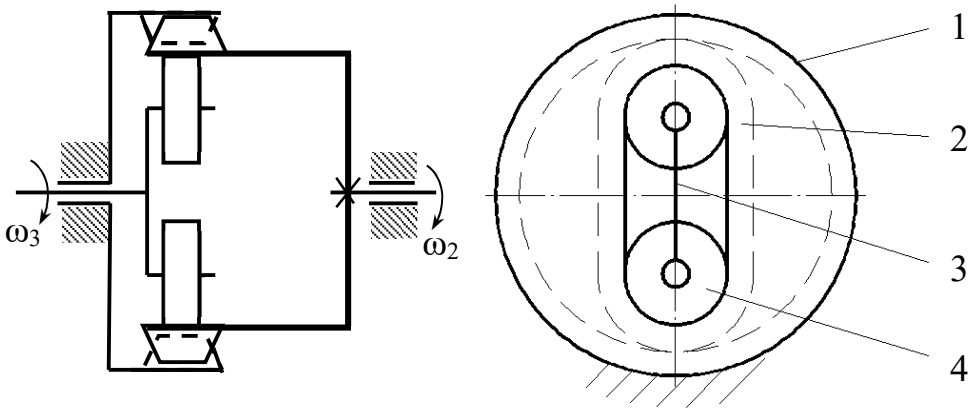


Рис. 67. Волновая передача

колёсами, колёсами, имеющими зубья на части обода и т. д.

Обычно в зубчатых передачах меньшее колесо называется *шестерней*.

Выбор той или иной передачи зависит от традиционной области её применения и конкретных функциональных особенностей механизма, в котором эта передача будет использована.

8.4. Основная теорема зацепления (теорема Виллиса)

Для постоянства передаточного отношения при зацеплении двух профилей зубьев необходимо, чтобы радиусы начальных окружностей зубчатых колёс, перекатывающихся друг по другу без скольжения, оставались неизменными. Если рассмотреть обращённое движение начальных окружностей (рис. 68, *а*), когда всей системе задана угловая скорость ($-\omega_2$), то второе колесо будет условно неподвижным и точка *p* является мгновенным центром относительного вращения колёс. Эта точка, называемая *полюсом зацепления*, где контактируют начальные окружности, делит межцентровое расстояние на отрезки, обратно пропорциональные угловым скоростям, т. к. при $r_w = const$

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{w1}}{r_{w2}} = const. \qquad (8.1)$$

Рассмотрим обращённое движение профилей зубьев зубчатых колёс (рис. 68).

Точка контакта зубьев (точка *k*), принадлежащая первому колесу, вращается вокруг точки *p*, которая будет мгновенным центром скоростей. Скорость $v_k \perp pk$ и совпадает с общей касательной к профилям в точке *k* при условии постоянства этого контакта. В противном случае постоянного контакта не будет, так как появится составляющая v_k'', и профили разомкнутся (рис. 69). Так как рассматривается произвольное положение зубьев, то можно сформулировать теорему.

Нормаль *n – n* к касающимся профилям зубьев, проведённая через точку их касания, делит межцентровое расстояние на части, обратно пропорциональные угловым скоростям.

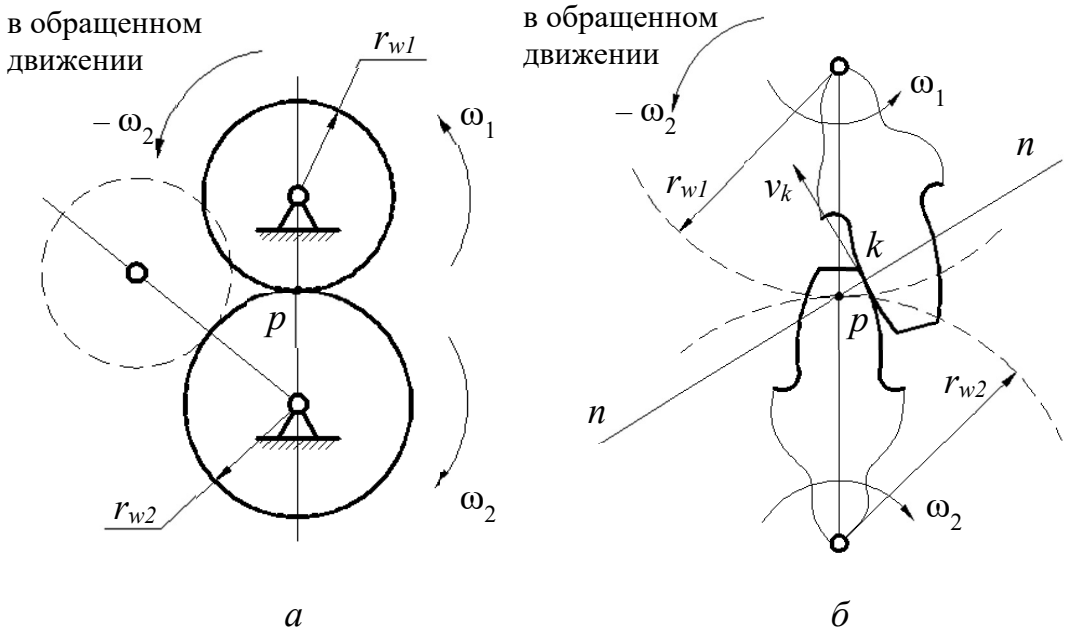


Рис. 68. Обращенное движение зубчатых колес:
а – обращенное движение зубчатых колес; *б* – обращенное движение профилей зубьев

Эта теорема, сформулированная Р. Виллисом в 1841 г., определяет основной закон зацепления профилей, которые не могут быть произвольными, а должны быть специально подобраны.

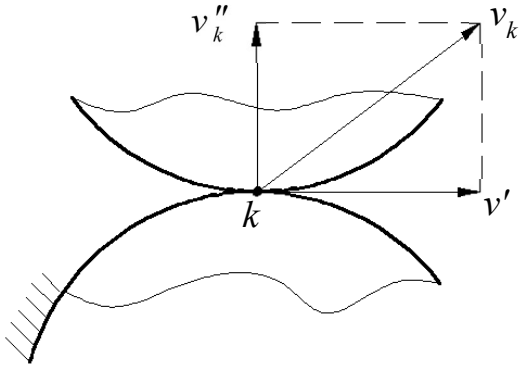


Рис. 69. Размыкание контакта в точке *k*

8.5. Эвольвента и её свойства

Наибольшее применение получили эвольвентные зубчатые передачи с профилем зубьев, очерченным по эвольвенте (рис. 70).

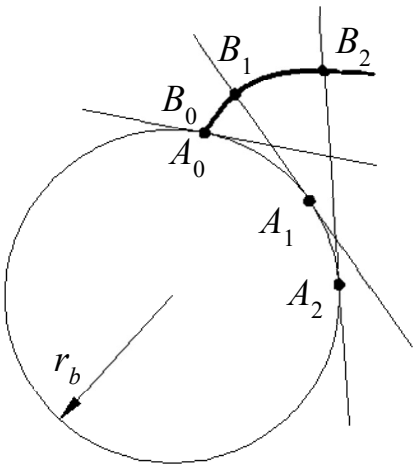


Рис. 70. Эвольвента круга

Эвольвентой круга называется траектория точки, лежащей на прямой, которая перекатывается без скольжения по окружности радиуса r_b, называемой *основной*.

Эвольвента имеет следующие свойства:

1) начинается с основной окружности;

2) нормаль к эвольвенте является касательной к основной окружности;

3) радиус кривизны эвольвенты в каждой её точке лежит на нормали к эвольвенте в этой точке.

Основная окружность представляет собой геометрическое место центров кривизны эвольвенты и является её *эволютой*.

8.6. Геометрия эвольвентного зацепления

В процессе зацепления зубья касаются друг друга различными точками профиля (рис. 71). Так как эти точки лежат на нормали к профилям, которая одновременно является касательной к обеим основным окружностям, то совокупность точек касания (линия *ab*) совпадает с общей для обеих основных окружностей касательной *n – n*.

Эта линия называется *теоретической линией зацепления*, а линия *ab* длиной g_α является её активной частью, где располагаются все точки контакта зубьев. Угол α_w, измеряемый между нормалью *n – n* к профилям в полюсе зацепления *p* и общей касательной к обеим начальным окружностям, называется *углом зацепления*. Таким образом:

$$\begin{aligned} r_{b1} &= r_{w1}\cos\alpha_w; \\ r_{b2} &= r_{w2}\cos\alpha_w. \end{aligned} \qquad (8.2)$$

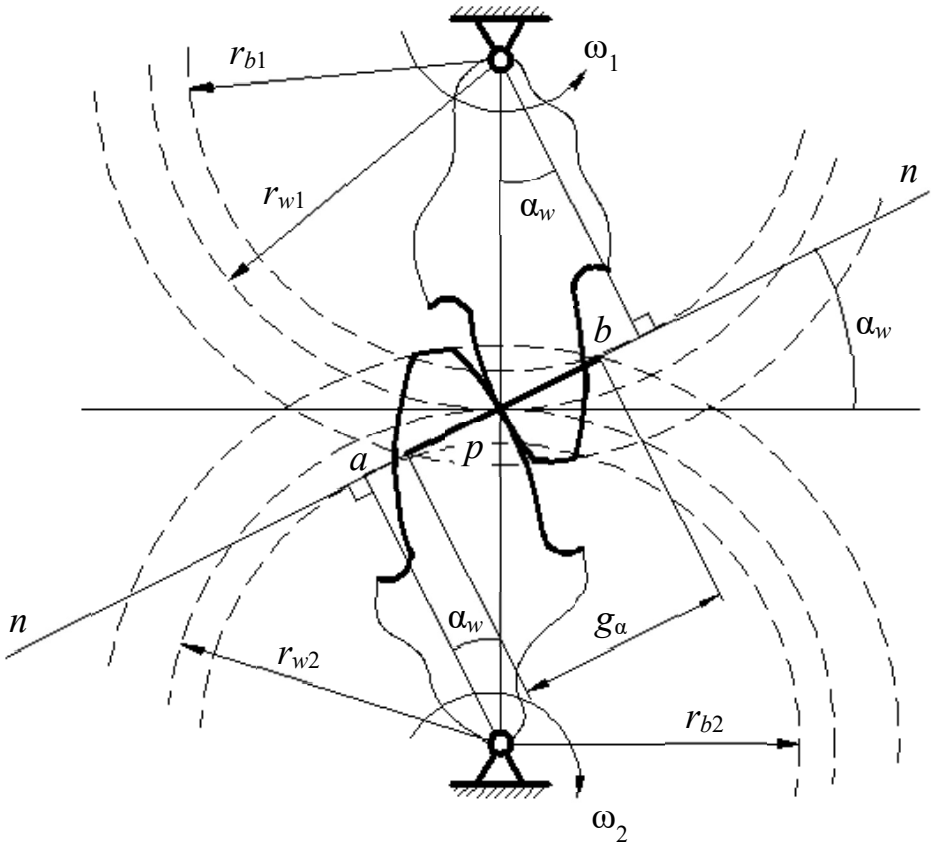


Рис. 71. Геометрия эвольвентного зацепления

8.7. Качественные показатели зацепления

Одним из качественных показателей зубчатой передачи является коэффициент перекрытия ε_α, равный

$$\varepsilon_\alpha = \frac{g_\alpha}{p_b}, \tag{8.3}$$

где p_b – шаг по основной окружности (расстояние между сходственными точками двух соседних зубьев, замеренное по дуге основной окружности).

Коэффициент ε_α показывает, сколько пар зубьев в среднем одновременно находится в зацеплении. Для прямозубой передачи обычно $1 < \varepsilon_\alpha < 2$. Чем больше ε_α, тем более плавно и бесшумно работает передача.

Другим качественным показателем является коэффициент скольжения, который учитывает влияние геометрии передачи и её кинематики на

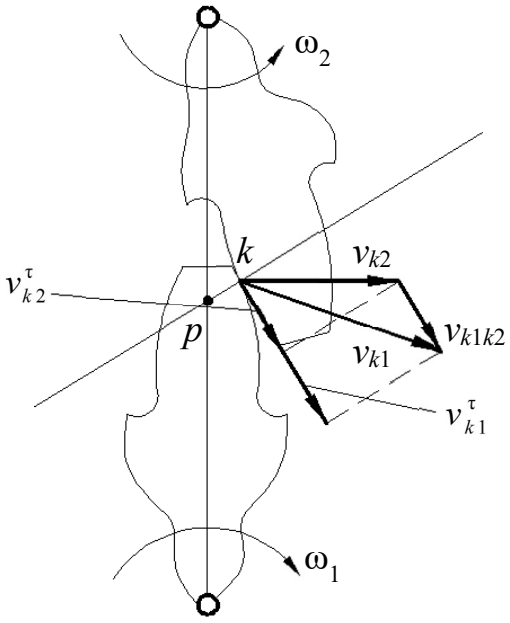


Рис. 72. План скоростей в зубчатом зацеплении

скольжение и износ профилей, скользящих друг по другу (рис. 72), что видно из плана скоростей.

На плане:

v_{k1} – скорость точки k первого профиля;

v^{τ}_{k1} – проекция этой скорости на касательную к контактирующим профилям;

v_{k2}, v^{τ}_{k2} – то же для колеса 2.

Скорость скольжения колес 1 и 2 относительно друг друга равна:

$$v_{c.k} = v_{k1k2} = v^{\tau}_{k1} - v^{\tau}_{k2}. \qquad (8.4)$$

Коэффициенты скольжения колёс 1 и 2 равны:

$$\lambda_1 = \frac{v_{c.k}}{v^{\tau}_{k1}}; \qquad \lambda_2 = \frac{v_{c.k}}{v^{\tau}_{k2}}. \qquad (8.5)$$

Эти коэффициенты равны нулю в полюсе (точка p) и увеличиваются с удалением от него по линии зацепления.

Таким образом, чем длиннее линия зацепления, (и чем больше коэффициент перекрытия ε_α), тем больше скольжение и износ профилей зубьев.

8.8. Основные параметры зубчатых колёс

Основными параметрами зубчатого колеса являются (рис. 73):

z – число зубьев;

r_a (d_a) – радиус (диаметр) окружности выступов;

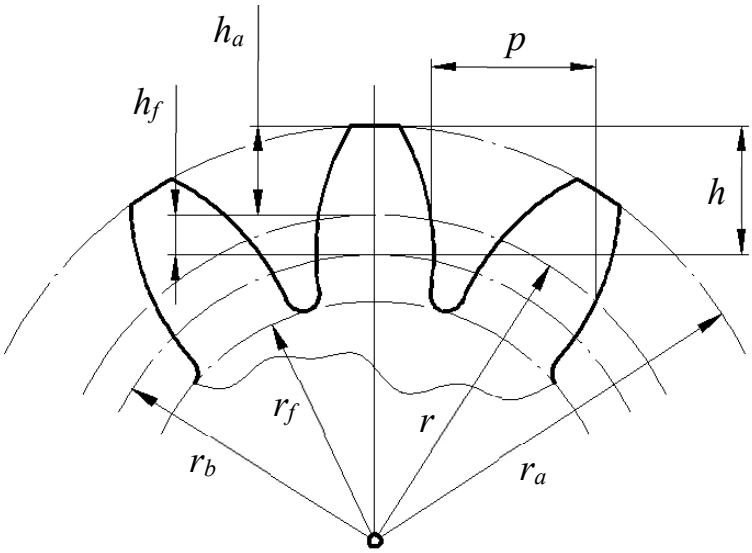


Рис. 73. Основные геометрические параметры зубчатого колеса

r_f (d_f) – радиус (диаметр) окружности впадин;

r_b (d_b) – радиус (диаметр) основной окружности;

r (d) – радиус (диаметр) делительной окружности, т. е. окружности, которая является начальной в станочном зацеплении колеса с режущим инструментом;

p – шаг зубьев по делительной окружности;

m – модуль зацепления, определяемый следующим образом:

$$d = zm = \frac{zp}{\pi},$$
$$m = \frac{p}{\pi}; \tag{8.6}$$

h –высота зуба, равная

$$h = h_a + h_f, \tag{8.7}$$

где $h_a = m$ – высота головки зуба;

$h_f = 1{,}25\ m$ – высота ножки зуба;

Величина m стандартизирована и выражена в миллиметрах, а делительная окружность является окружностью стандартного модуля.

Обычно используется угол зацепления α =20°.

8.9. Методы нарезания зубчатых колёс

Существует два принципиально различных метода нарезания: метод копирования и метод обкатки.

В методе копирования впадина зубчатого колеса фрезеруется на универсальном фрезерном станке фасонными дисковыми или пальцевыми фрезами, профиль которых соответствует профилю впадины (рис. 74). Затем заготовку поворачивают на угол 360° / *z* и выполняют следующую впадину. При этом используется делительная головка, а также имеются наборы фрез для нарезания колёс с различным модулем и различным числом зубьев. Метод имеет низкую производительность и применяется в мелкосерийном и единичном производстве.

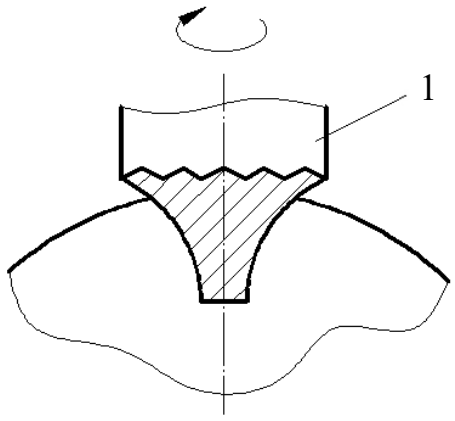


Рис. 74. Метод копирования:
1 – пальцевая модульная фреза

Метод обкатки (другое название – метод огибания) может производиться с помощью инструментальной рейки (гребёнки) на зубострогальном станке; долбяком на зубодолбёжном станке или червячной фрезой на зубофрезерном станке. Этот метод высокопроизводителен и применяется в массовом и крупносерийном производстве. Одним и тем же инструментом можно нарезать колёса с различным числом зубьев. Нарезание с помощью инструментальной рейки имитирует реечное зацепление (рис. 75, *а*), где профиль зуба образуется как огибающая последовательных положений профиля инструмента, угол исходного контура которого α=20º (рис. 75, *б*). Зацепление между режущим инструментом и нарезаемым колесом называется *станочным*. В станочном зацеплении начальная окружность всегда совпадает с делительной.

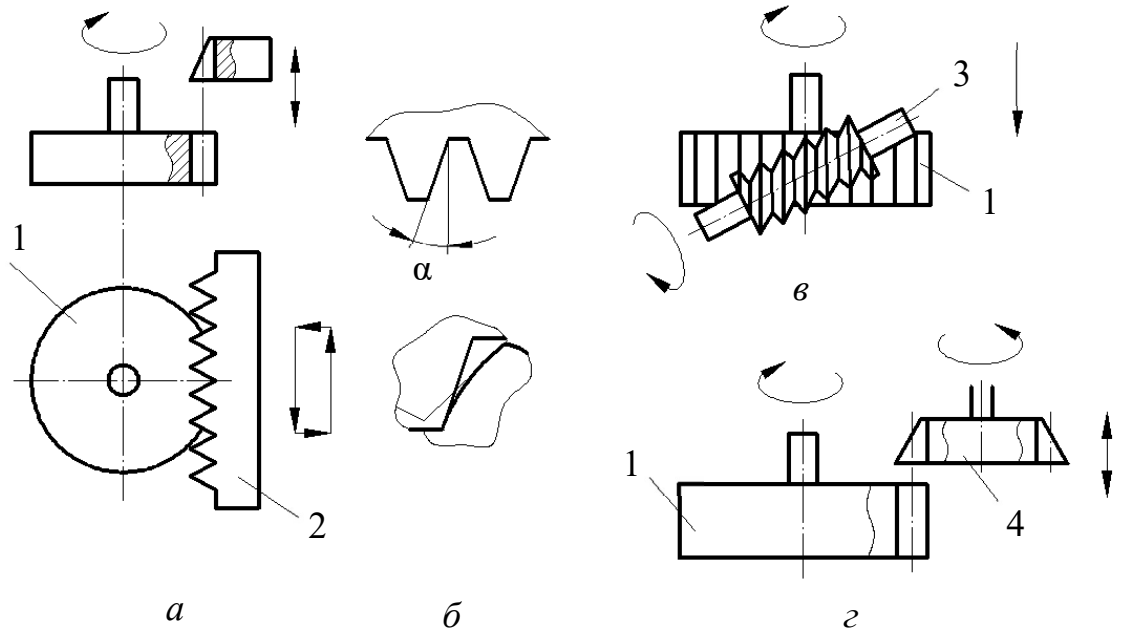


Рис. 75. Метод обкатки:
а) – нарезание с помощью инструментальной рейки; б) – формирование профиля зуба;
в) – нарезание с помощью червячной фрезы; г) – нарезание долбяком;
1 – заготовка; 2 – рейка; 3 – фреза; 4 – долбяк

Самым производительным из рассмотренных методов является зубофрезерование с помощью червячных фрез, которые находятся в зацеплении с заготовкой по аналогии с червячной передачей (рис. 75, *в*).

При нарезании долбяком осуществляется его возвратно поступательное движение при одновременном вращении. Фактически при этом осуществляется зацепление заготовки с инструментальным зубчатым колесом – долбяком (рис. 75, *г*). Этот метод чаще всего используется при нарезании внутренних зубчатых венцов.

Все рассмотренные методы используются для нарезания цилиндрических колёс как с прямыми, так и с косыми зубьями.

8.10. Корригирование зубчатых колёс

При нарезании колёс режущий инструмент можно располагать ближе к заготовке или дальше от неё. Положение инструмента определяется расстоянием между делительной окружностью колеса и так называемой модульной прямой рейки, проходящей через середину высоты зуба режущего инструмента (рис. 76).

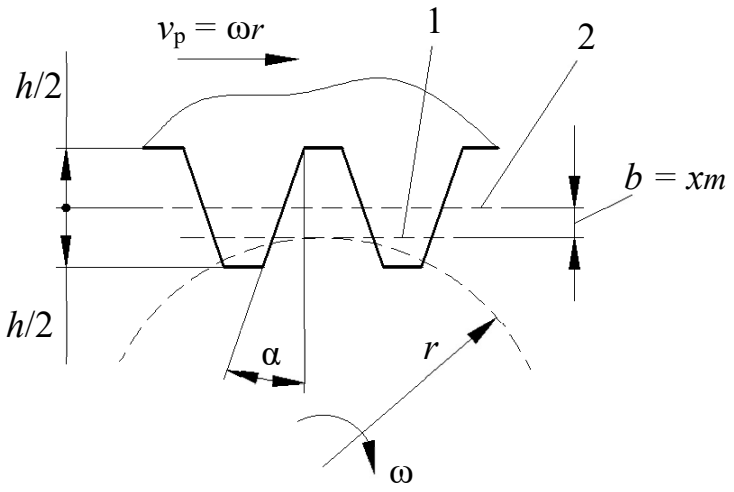


Рис. 76. Корригирование зубчатых колес:
1 – модульная прямая рейка; 2 – начальная прямая рейка;
$v_р$ – скорость рейки

В зависимости от положения рейки по делительной окружности может перекатываться без скольжения либо модульная прямая рейки, либо начальная прямая, отстоящая от модульной прямой на величину смещения b, которое называется *сдвигом* или *коррекцией*, а коэффициент x, равный

$$x = \frac{b}{m}, \tag{8.8}$$

называется *коэффициентом смещения инструмента*. Если инструмент смещён от нарезаемого колеса, то x считается положительным (положительная коррекция), а если к центру колеса, то x считается отрицательным (отрицательная коррекция). При $x = 0$ нарезаемое колесо называется

нормальным (нулевым). Толщина зуба и ширина впадины такого колеса по делительной окружности равны между собой.

При положительной коррекции увеличивается прочность зуба, но уменьшается длина линии зацепления, а следовательно, и коэффициент перекрытия ε_α. При отрицательной коррекции – обратный эффект, т. е. увеличивается плавность и бесшумность работы передачи, но прочность зуба уменьшается.

Зацепление двух зубчатых колёс характеризуется суммарным коэффициентом коррекции $x_\Sigma = x_1 + x_2$, причём возможны три случая:

1) $x_\Sigma = 0$ при $x_1 = x_2 = 0$, когда в зацеплении находятся два нулевых зубчатых колеса (нулевое зацепление);

2) $x_\Sigma = 0$ при $x_1 = -x_2$, когда в зацеплении находятся два корригированных зубчатых колеса, коэффициенты коррекции которых равны по величине и противоположны по знаку (равносмещённое зацепление с высотной коррекцией);

3) $x_\Sigma \neq 0$, когда в зацеплении находятся два корригированных колеса, имеющих:

а) $x_\Sigma > 0$ – положительное неравносмещённое зацепление с угловой коррекцией;

б) $x_\Sigma < 0$ – отрицательное неравносмещённое зацепление с угловой коррекцией.

В первых двух случаях ($x_\Sigma = 0$) делительные окружности совпадают с начальными, угол зацепления α_w равен углу исходного контура рейки α и межосевое расстояние равно

$$a_w = \frac{m(z_1 + z_2)}{2}, \tag{8.9}$$

в отличие от неравносмещённого зацепления, где делительные и начальные окружности не совпадают, $\alpha_w \neq \alpha$, а межосевое расстояние и диаметры начальных окружностей равны

$$a_w = \frac{m(z_1 + z_2)}{2} \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w};$$

$$d_{w1} = mz_1 \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}; \qquad (8.10)$$

$$d_{w2} = mz_2 \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha_w}.$$

8.11. Наименьшее число зубьев зубчатых колёс. Подрезание и заострение зубьев

При нарезании нулевых колёс с малым числом зубьев может возникнуть явление врезания головок зубьев режущего инструмента в ножки зубьев колеса. Это явление называется *подрезанием зуба*. При этом уменьшается его прочность и увеличивается износ рабочей части зуба (рис. 77).

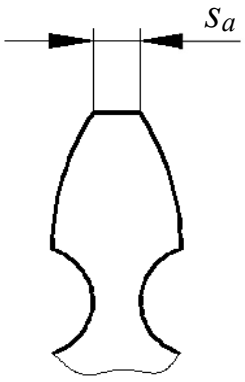


Рис. 77. Подрезание зуба

Согласно свойствам эвольвентного зацепления точки контакта зубьев эвольвентного профиля совпадают с линией *np*, начиная с точки *n* (рис. 78), т. е. высота прямолинейной части головки зуба режущего инструмента (рейки), равная *m*, должна быть меньше отрезка *pf*, иначе часть головки зуба рейки будет контактировать с заготовкой (нарезать её) не по эвольвенте.

Так как $m \le pf$, а размер *pf* равен

$$pf = r\sin^2\alpha = \frac{mz}{2}\sin^2\alpha, \qquad (8.11)$$

то

$$z \ge \frac{2}{\sin^2\alpha}. \qquad (8.12)$$

Подстановка в выражение (8.12) стандартного $\alpha = 20°$ даёт условие отсутствия подреза в виде $z \ge z_{\min} = 17$.

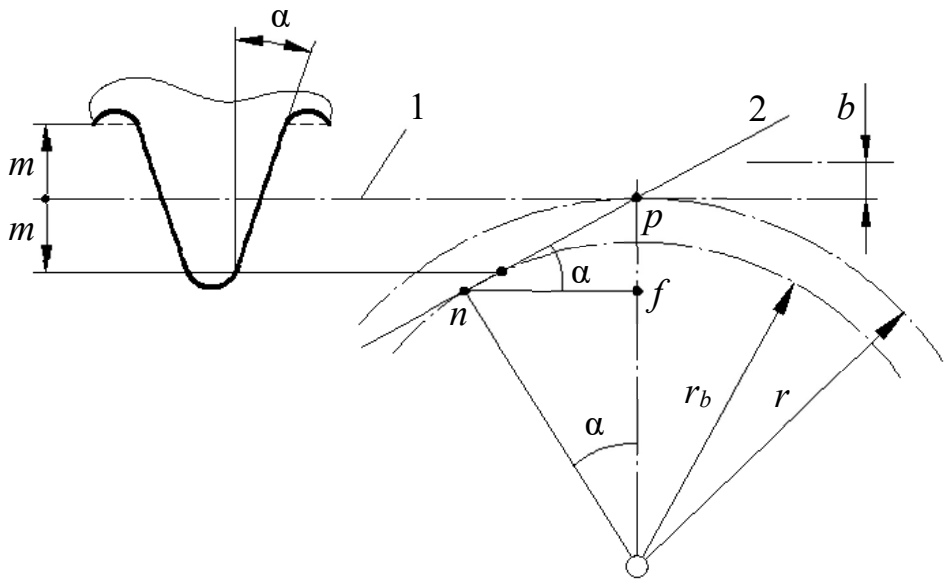


Рис. 78. Условие контакта рейки с заготовкой:
1 – модульная прямая; 2 – линия зацепления

Для исключения подреза при $z < z_{\min}$ необходимо сместить инструмент от центра заготовки (положительная коррекция) так, чтобы

$$m - b \le \frac{mz}{2}\sin^2 \alpha, \tag{8.12}$$

откуда

$$b = mx \ge m - \frac{mz}{2}\sin^2 \alpha. \tag{8.13}$$

С учётом того, что

$$\sin^2 \alpha = \frac{2}{z_{\min}}, \tag{8.14}$$

из формулы (8.13) после преобразований получим нижний предел коэффициента коррекции по условию отсутствия подреза.

$$x_{\min} = \frac{z_{\min} - z}{z_{\min}}. \tag{8.15}$$

Если увеличивать коэффициент x, то толщина зуба s_a у вершины (рис. 77) будет уменьшаться и при некотором $x_{\max}$ наступит заострение зуба ($s_a = 0$). Опасность заострения наиболее велика у колёс с малым числом зубьев ($z < 15$).

Для предотвращения разрушения заострённого зуба коэффициент смещения x назначают с расчётом, чтобы $s_a \geq 0{,}2m$.

8.12. Выбор расчётных коэффициентов смещения для передач внешнего зацепления

При назначении коэффициентов смещения x_1 и x_2 для любой передачи должны выполняться три условия:

1) отсутствие подрезания;

2) отсутствие заострения;

3) непрерывность зацепления.

Первое условие выполняется при $x_i \geq x_{\min i}$ ($x_{\min i}$ определяются из условия отсутствия подреза). Второе и третье условия выполняются при ограничении верхних пределов x_i величинами $x_{\max i}$ с учётом возможности заострения зубьев и уменьшения коэффициента перекрытия ε_α до величины $\varepsilon_\alpha < 1$. Для этого при выборе x_i необходимо чтобы $x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i}$, где $x_{\max i}$ для каждого из колёс берётся наименьшим из значений, учитывающих заострение зуба и снижения ε_α до величины $\varepsilon_\alpha < 1$.

Внутри указанных диапазонов x назначаются так, чтобы по возможности улучшить качественные показатели передачи (прочность, износостойкость, плавность хода).

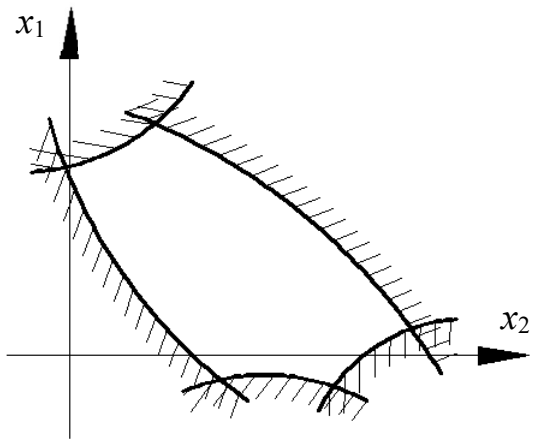


Рис. 79. Блокирующий контур

Для передачи можно построить область допустимых значений коэффициентов смещения в координатах x_1 и x_2, которая называется *блокирующим контуром*. Допустимые значения x_1 и x_2 расположены внутри контура (рис. 79).

Для каждой передачи можно построить свой контур. Такие

блокирующие контуры для различных передач имеются в справочной литературе.

8.13. Цилиндрические колёса с косыми зубьями и их особенности

Образование косозубого колеса можно представить, если взять цилиндрическое прямозубое колесо и сообщить ему крутильную деформацию. При этом угол скручивания, образованный осью колеса и винтовой линией, является углом наклона винтовой линии β.

Цилиндрические колёса с косыми зубьями применяются при передаче вращения между параллельными и перекрещивающимися осями. В передаче с параллельными осями углы β обоих колёс равны по величине и противоположны по направлению при внешнем зацеплении и одинаковы по направлению при внутреннем зацеплении. Угол β (рис. 80, *а*) называется *углом наклона зубьев по делительному цилиндру радиуса r*. С другими соосными цилиндрами, начальным (r_w) и основным (r_b) винтовая поверхность зуба образует, соответственно, углы β_w β_b. Шаг винтовой линии равен

$$p = 2\pi r \operatorname{ctg}\beta = 2\pi r_w \operatorname{ctg}\beta_w = 2\pi r_b \operatorname{ctg}\beta_b. \qquad (8.16)$$

В косозубом колесе различают торцовый m_t, нормальный m_n и осевой m_x модули, причём стандартное значение имеет нормальный модуль m_n, соответствующий размерам зуба, замеренным по нормали $n - n$ к его оси (рис. 80, *б*), что объясняется установкой режущего инструмента. Аналогично различают торцовый p_t, нормальный p_n и осевой p_x шаг. Значения модуля и шага определяются формулами:

$$\begin{aligned} m_t &= \frac{m_n}{\cos\beta} = \frac{m_x}{\operatorname{ctg}\beta}; \\ p_t &= \frac{p_n}{\cos\beta} = \frac{p_x}{\operatorname{ctg}\beta}. \end{aligned} \qquad (8.17)$$

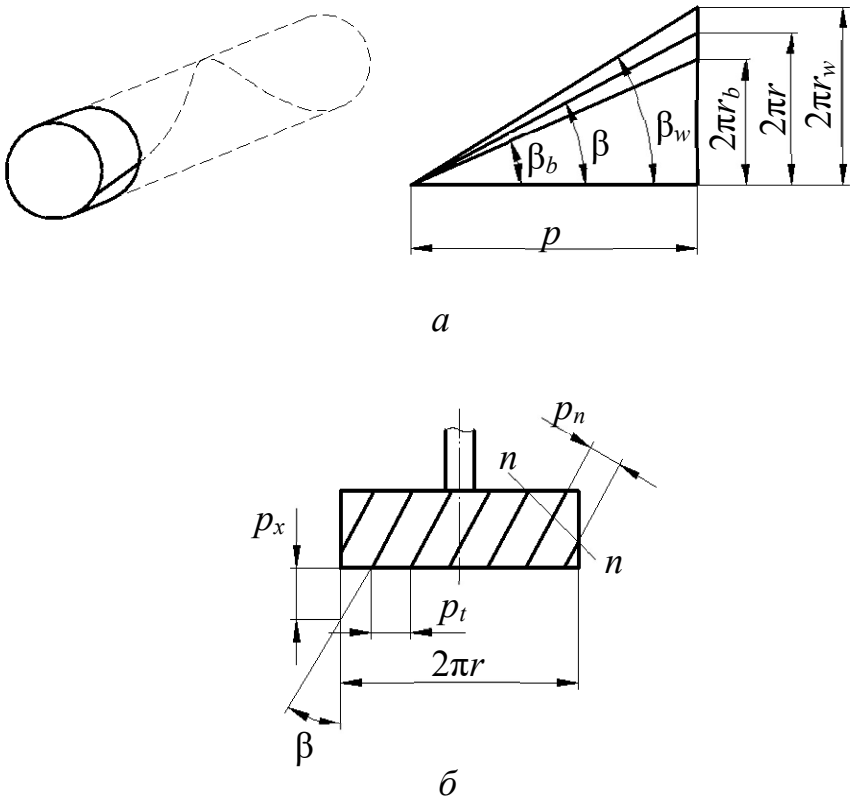


Рис. 80. Особенности цилиндрических колес с косыми зубьями:
а – углы наклона зубьев; *б* – шаги косых зубьев

Большим достоинством зацеплений с косыми зубьями является возможность получения малогабаритных передач. Так, если для прямозубого колеса $z_{\min} = 17$, то для косозубого

$$z_{\min} = 17\cos^3\beta. \qquad (8.18)$$

В экспериментальных конструкциях $z_{\min}$ доводят до трёх и менее зубьев. Кроме того, увеличивается коэффициент перекрытия, доходя до 10 и выше, что также повышает нагрузочную способность и позволяет уменьшить габариты передачи. *Недостатком* косозубой передачи является возникновение дополнительных осевых усилий, нагружающих подшипники.

Этот недостаток устраняется в шевронных передачах.

8.14. Конические зубчатые передачи

Конические передачи являются передачами с пересекающимися осями вращения звеньев. Применяются, главным образом, передачи с углом между осями δ = 90° (ортогональные). Основные параметры аналогичны параметрам цилиндрических колёс (рис. 81), причём делительной окружностью внешнего окружного модуля m_e является внешняя делительная окружность конического колеса диаметром d_e.

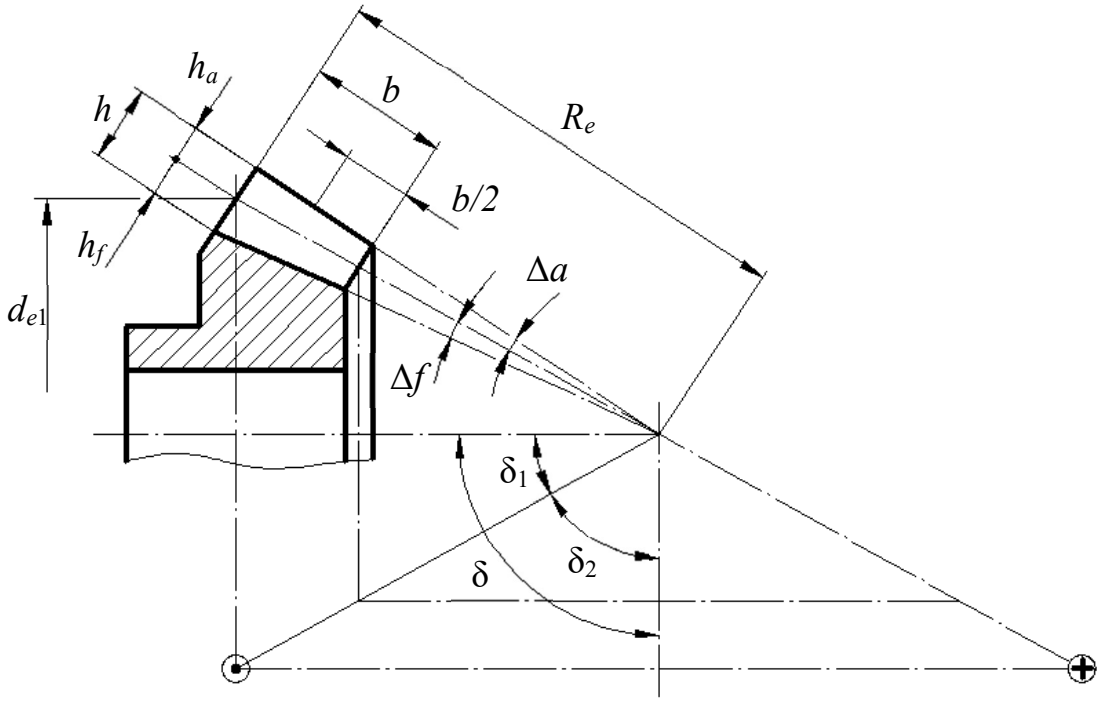


Рис. 81. Основные геометрические параметры конического зубчатого колеса

Через модуль выражаются все остальные размеры. Для расчёта зубьев на изгиб используется величина среднего модуля m_m, замеренного в середине ширины b зубчатого венца. Передаточное отношение равно

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\sin\delta_2}{\sin\delta_1}, \qquad (8.19)$$

где δ_1, δ_2 – углы делительных конусов колёс 1 и 2 соответственно.

В конических передачах $i(u)$ не имеет знака, а для определения направления вращения изображают векторы абсолютных скоростей точек на начальных конусах в виде кружка с точкой (на зрителя) и крестиком (от зрителя), как показано на рис. 81.

Важным параметром является внешнее конусное расстояние R_e, равное

$$R_e = \frac{d_{e1}}{2\sin\delta_1}. \tag{8.20}$$

8.15. Червячные передачи

Червячные передачи являются передачами со скрещивающимися осями. Угол между осями в плане обычно равен 90°. Принцип их действия аналогичен передаче винт-гайка.

Червяки подразделяются по числу заходов (винтовых линий) на одно- и многозаходные. Число заходов z_1 есть число винтовых линий (витков), по которым расположены зубья. Расстояние между двумя соседними витками называется *шагом p*, а размер h, равный

$$h = z_1 p, \tag{8.21}$$

называется *ходом* винтовой линии.

Угол подъёма винтовой линии γ определяется по формуле

$$\gamma = \operatorname{arctg}\frac{h}{\pi d_1}, \tag{8.22}$$

где d_1 – диаметр делительной окружности червяка (рис. 82, *а*).

За основной параметр червячного зацепления принимается осевой модуль червяка m_s (принято обозначать его m), равный торцевому модулю червячного колеса. Значения m стандартизованы. Кроме того, стандартным параметром является относительный диаметр червяка q

$$q = \frac{m}{d_1}. \tag{8.23}$$

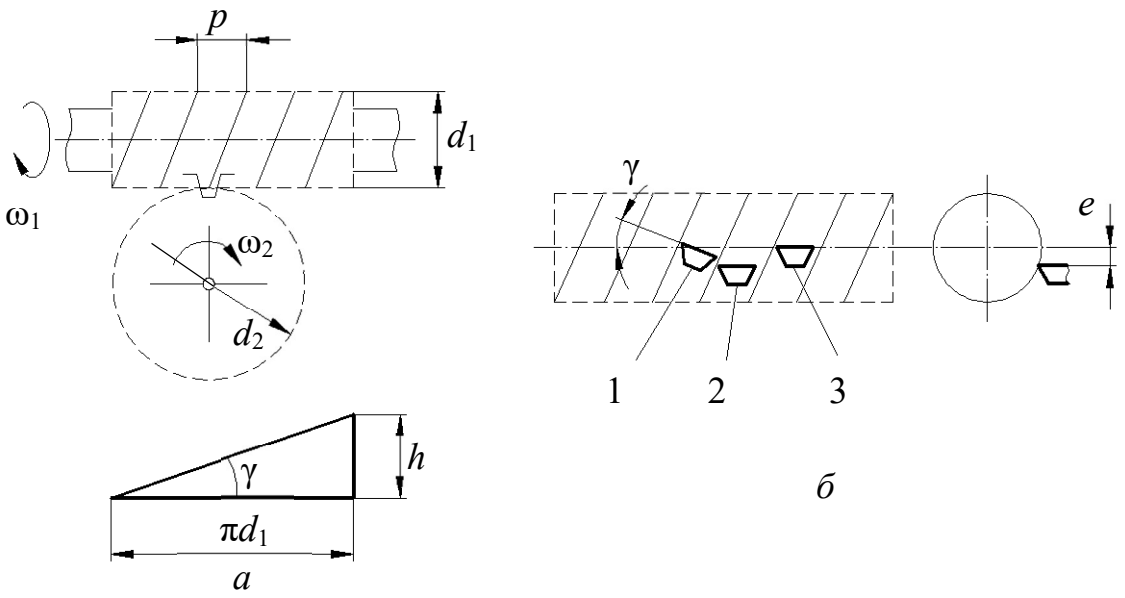


Рис. 82. Геометрические параметры червяка

По форме боковой поверхности резьбы различают конволютный, эвольвентный и архимедов червяки, образуемые при расположении резца трапециевидной формы, как указано на рис. 82, *б*, с режущей кромкой под углом γ наклона винтовой линии (положение 1) или при γ = 0 и смещении $e \neq 0$ (положение 2), а также при $e = 0$ (положение 3). Наименования червяков соответствуют наименованиям кривых, по которым очерчены зубья червяка в сечении, перпендикулярном его оси.

8.16. Кинематический анализ и классификация зубчатых механизмов

8.16.1. Механизмы с неподвижными осями

В практике машиностроения чаще возникает необходимость понижения, реже повышения скорости при передаче движения от входного звена к выходному.

Механизмы для передачи вращения, в которых происходит понижение

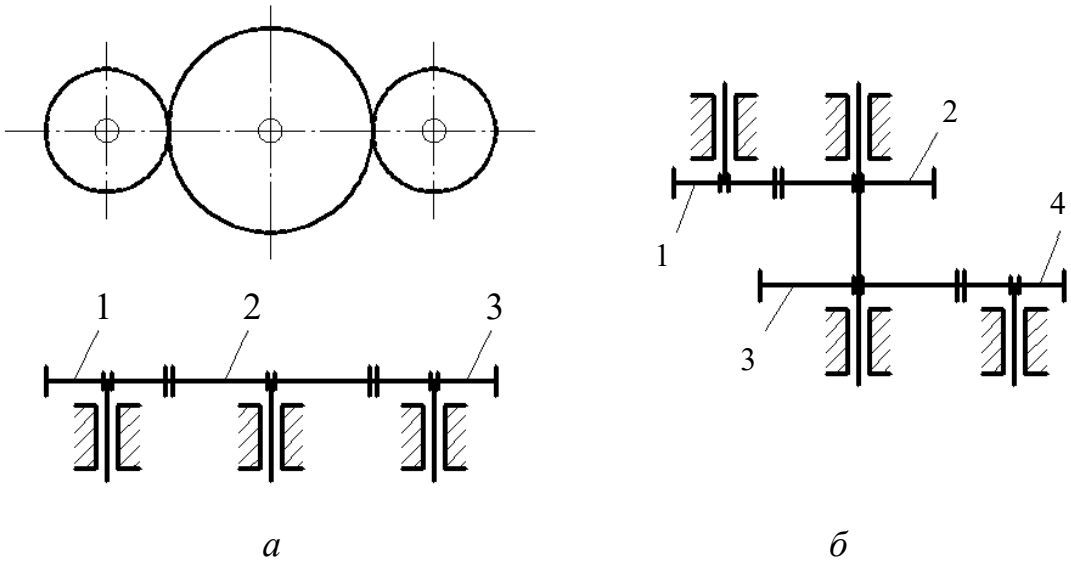
скорости вращения, называются *редукторами*, а механизмы, повышающие эту скорость, называются *мультипликаторами*.

По кинематическому признаку различают:

– механизмы с неподвижными геометрическими осями всех колёс (рядовые);

– механизмы с подвижными геометрическими осями некоторых колёс (эпициклические), которые обладают одной степенью свободы (планетарные) или двумя и более (дифференциальные).

Кроме того, различают одно- и многоступенчатые механизмы. Многоступенчатые состоят из одной или двух и более пар колёс, соединённых последовательно (рис. 83, *а*), параллельно (рис. 83, *б*), или смешанно.



а *б*

Рис. 83. Многоступенчатые механизмы:
а – последовательное соединение; *б* – параллельное соединение

При проектировании механизмов для передачи вращения с заданным значением передаточных отношений и крутящего момента стремятся обеспечить высокий коэффициент полезного действия (кпд), минимальные габариты и вес.

Передаточное отношение одноступенчатого зубчатого редуктора (при отсутствии скольжения) равно

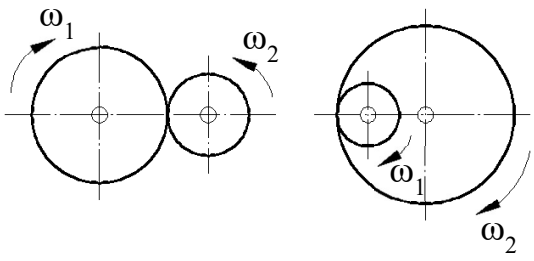
$$u = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \pm\frac{d_{w2}}{d_{w1}} = \pm\frac{z_2}{z_1}. \qquad (8.24)$$

Для зубчатых понижающих передач принято использовать понятие *передаточное число u*.

Передаточное отношение считается положительным, если оба колеса зубчатой пары вращаются в одну сторону, и отрицательным, если в разные стороны. Обычно положительное передаточное отношение имеет зубчатая передача с внутренним зацеплением (рис. 84, *б*), а отрицательное – с внешним зацеплением (рис. 84, *а*).

В случае многоступенчатого механизма с параллельным соединением колёс (рис. 81, *б*) получим

$$u_{14} = \frac{\omega_1}{\omega_4} = \frac{\omega_1}{\omega_2}\cdot\frac{\omega_3}{\omega_4} = u_{12}\cdot u_{34}. \qquad (8.25)$$



а *б*

Рис. 84. Направление угловых скоростей: *а* – внешнее зацепление; *б* – внутреннее зацепление

При последовательном соединении колёс (рис. 83, *а*)

$$u_{13} = \frac{\omega_1}{\omega_3} = \frac{\omega_1}{\omega_2}\cdot\frac{\omega_2}{\omega_3}. \qquad (8.26)$$

Таким образом, в общем виде передаточное отношение многоступенчатого механизма равно произведению частных передаточных отношений отдельных ступеней:

$$i_{1k} = i_{12}\cdot i_{23}\cdot\ldots\cdot i_{(k-1)k}, \qquad (8.27)$$

причём промежуточные колёса в механизме с последовательным соединением не влияют на величину передаточного отношения, а служат лишь для изменения направления вращения. Эти промежуточные колёса называются *паразитными*.

Для кинематического анализа механизмов можно использовать графоаналитический метод, наглядно иллюстрирующий характер

распределения линейных скоростей звеньев механизма. Метод основан на использовании линейной зависимости скорости v от радиуса, т. е. $v = \omega r$.

При построении картины, иллюстрирующей характер распределения линейных скоростей, сначала откладываются в выбранном масштабе μ_v известные вектора линейных скоростей точек, закон движения которых задан (рис. 85).

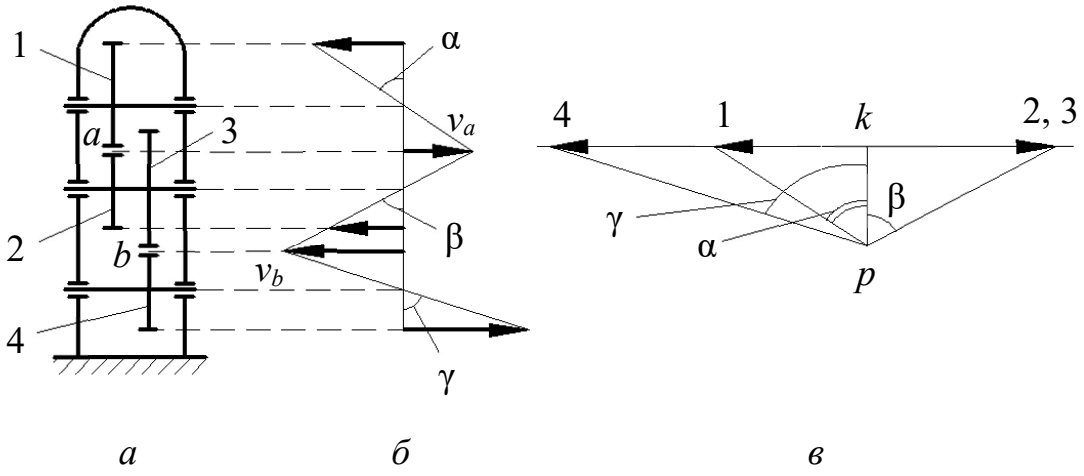


Рис. 85. Планы скоростей:
а – схема редуктора (μ_l); *б* – план линейных скоростей (μ_v);
в – план угловых скоростей (μ_ω), частот вращения (μ_n)

Затем, проводя отрезки через концы векторов известных скоростей, получим план линейных скоростей.

Для определения угловых скоростей (частот вращения) всех звеньев удобно использовать план угловых скоростей (частот вращения), где отрезки $k1$, $k2$, ... соответствуют угловым скоростям (частотам вращения) колёс 1, 2, … При этом схема редуктора вычерчивается в масштабе μ_l, а поскольку отрезки $k1$, $k2$, ... пропорциональны tgα , tgβ ,..., то

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{v}{r} = \omega. \qquad (8.28)$$

Выбор полюсного расстояния pk может быть произвольным.

8.16.2. Эпициклические механизмы

Простейший эпициклический механизм (редуктор Джемса) состоит из центральных колёс 1 и 3 (рис. 86), сателлитного колеса (сателлита) 2 и водила *H*. Если одно из центральных колёс, например, колесо 3 остановить с помощью тормоза Т, то эпициклический механизм превращается в планетарный, где при вращении колеса 1 сателлит 2 обегает неподвижное колесо 3, вращая водило *H* с угловой скоростью ω_H. Степень подвижности такого редуктора равна единице.

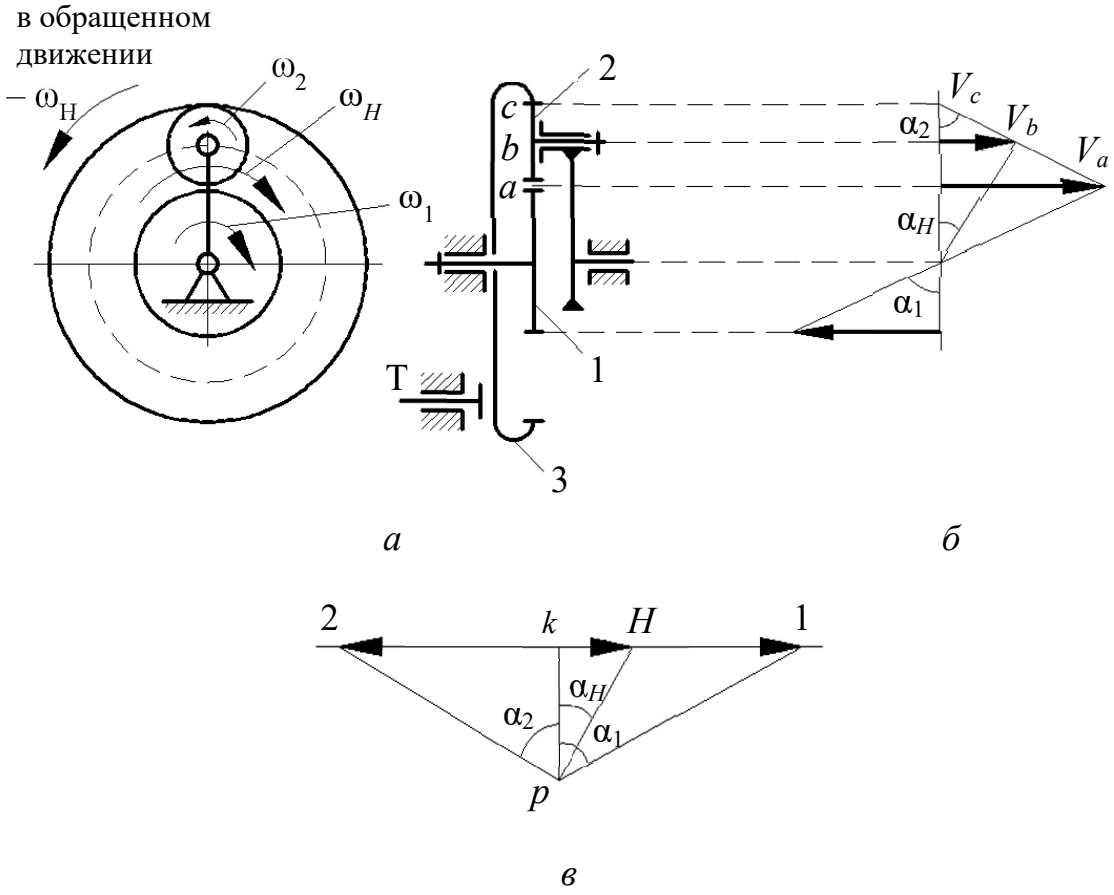


Рис. 86. Эпициклический механизм (редуктор Джемса):
а – схема механизма; *б* – картина скоростей; *в* – план угловых скоростей (частот вращения)

Для планетарного механизма можно построить картину скоростей и план угловых скоростей (частот вращения), используя рассмотренные выше

приёмы. План угловых скоростей можно использовать для приближённого определения передаточного числа планетарного механизма, которое равно

$$i_{1H} = \frac{k1}{kH}. \tag{8.29}$$

Аналитически передаточное число определяется с использованием метода обращения движения, когда механизму в целом сообщается вращение с угловой скоростью, обратной скорости водила (– ω_H). При этом относительное движение звеньев не изменится, а водило H в обращённом движении будет оставаться неподвижным, и планетарный редуктор превращается в рядовой (с неподвижными осями). Если обозначить угловые скорости звеньев в обращённом движении с индексом в круглых скобках, указывающим неподвижное звено, то

$$i_{13}^{(H)} = \frac{\omega_1^{(H)}}{\omega_3^{(H)}} = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_3 - \omega_H}, \tag{8.30}$$

а поскольку в планетарном механизме $\omega_3 = 0$, то выражение (8.30) принимает вид

$$i_{13}^{(H)} = \frac{\omega_1^{(H)}}{\omega_3^{(H)}} = -\frac{\omega_1}{\omega_H} + 1 = -i_{1H} + 1. \tag{8.31}$$

С другой стороны, через соотношение чисел зубьев,

$$i_{13}^{(H)} = -\frac{z_3}{z_1}, \tag{8.32}$$

поэтому

$$i_{1H} = 1 - i_{13}^{(H)} = 1 + \frac{z_3}{z_1}. \tag{8.33}$$

Если в эпициклическом механизме (рис. 86) оба центральных колеса совершают вращение, то степень подвижности такого механизма будет равна двум, и он превращается в дифференциальный. Такие механизмы служат:

1) для привода одного рабочего органа от двух или более двигателей (т. е. для сложения движения нескольких ведущих звеньев);

2) для разложения движения одного вала на два и более независимых движений ведомых валов.

Выражение (8.30) называется *формулой Виллиса*, оно позволяет получить любую неизвестную угловую скорость в эпициклическом механизме при заданных остальных скоростях.

Одним из распространённых типов дифференциальных механизмов являются так называемые замкнутые, в которых благодаря дополнительной зубчатой передаче связаны оба центральных колеса (рис. 87).

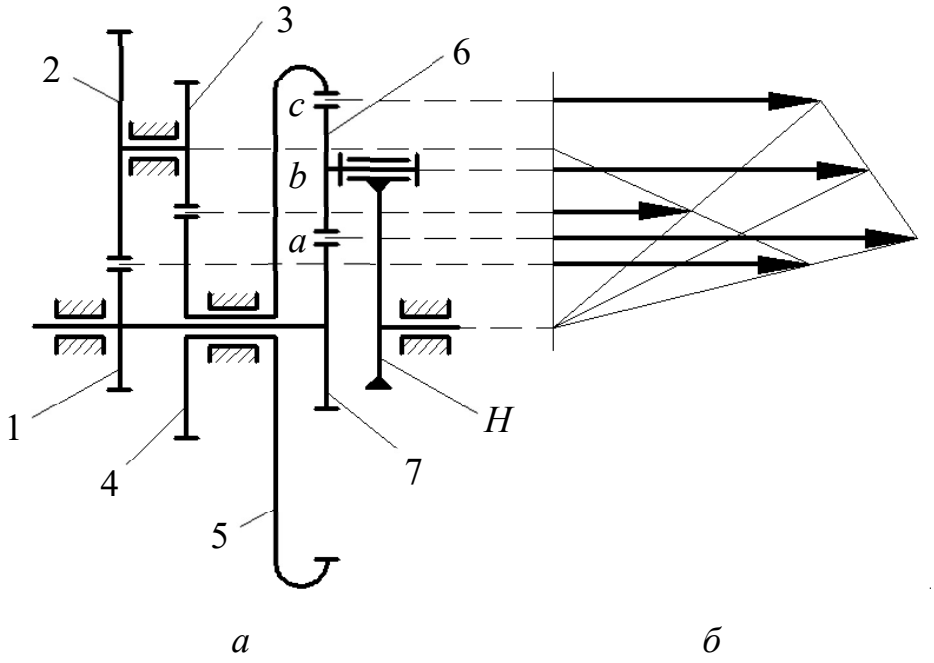


Рис. 87. Замкнутый дифференциальный механизм:
а – схема механизма; *б* – план скоростей

Это позволяет использовать один двигатель для привода механизма. Для определения передаточного отношения используем формулу Виллиса.

Так как

$$i_{75}^{(H)} = -\frac{z_5}{z_7}, \tag{8.34}$$

то

$$-\frac{z_5}{z_7}=\frac{i_{1H}-1}{\frac{\omega_5}{\omega_H}-1}, \tag{8.35}$$

где

$$\frac{\omega_5}{\omega_H}=\frac{\omega_5}{\omega_1}\cdot\frac{\omega_1}{\omega_H}=\left(-\frac{z_3}{z_4}\right)\cdot\left(-\frac{z_1}{z_2}\right)i_{1H}. \tag{8.36}$$

После подстановки выражения (8.36) в (8.35) и преобразований получается:

$$\left(1-i_{1H}\frac{z_3z_1}{z_4z_2}\right)\frac{z_5}{z_7}=i_{1H}-1. \tag{8.37}$$

Выразив из уравнения (8.37) передаточное отношение i_{1H}, получим:

$$i_{1H}=\frac{1+\frac{z_5}{z_7}}{1+\frac{z_1z_2z_5}{z_2z_4z_7}}. \tag{8.38}$$

8.16.3. Эпициклические механизмы с коническими колёсами

Примером дифференциального механизма с коническими колёсами является дифференциал автомобиля (рис. 88).

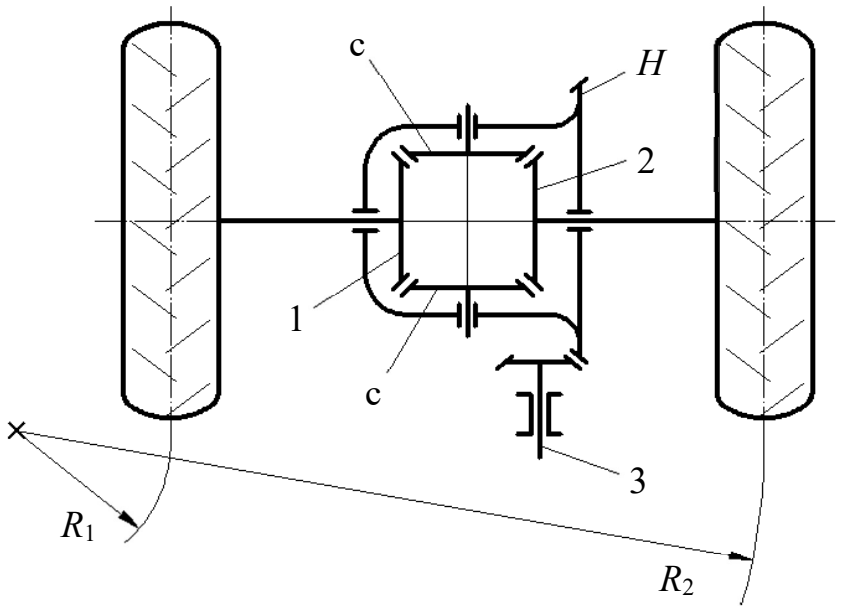


Рис. 88. Дифференциал автомобиля:
1, 2 – конические зубчатые колеса; с – сателлит; *H* – водило; 3 – карданный вал

Согласно формуле Виллиса

$$-\frac{z_2}{z_1}=\frac{\omega_1-\omega_H}{\omega_2-\omega_H}. \qquad (8.39)$$

Числа зубьев $z_2 = z_1$, поэтому

$$\omega_H=\frac{\omega_1+\omega_2}{2}, \qquad (8.40)$$

т.е. при постоянной скорости вращения карданного вала и скорости автомобиля в целом полуоси могут вращаться с различными или с одинаковыми скоростями. Например, на повороте скорости вращения полуосей пропорциональны радиусам поворота R_1 и R_2, а при ровной прямой дороге скорость полуосей одинакова и равна $\omega_1 = \omega_2 = \omega_H$.

8.17. Некоторые вопросы синтеза зубчатых механизмов

8.17.1. Синтез эпициклических механизмов с цилиндрическими колёсами. Условия синтеза

Комплексные задачи синтеза зубчатых механизмов настолько сложны, что в полной постановке с учётом факторов кинематики и динамики они не решены до настоящего времени. Известны решения частных задач как геометрического, так и динамического синтеза зубчатых механизмов, причём эти решения часто носят характер рекомендаций по выбору параметров. Например, выбор передаточных отношений каждой ступени в многоступенчатом зубчатом механизме с общим передаточным отношением, определяемым по формуле (8. 27), рекомендуется осуществлять так, чтобы $i_{12} > i_{23} > ... > i_{(k-1)k}$. Это связано с возрастанием нагрузки по мере уменьшения угловой скорости. Выполнение указанного условия позволяет более равномерно распределить нагрузку между зубчатыми парами.

При заданных передаточных отношениях и известном числе зубьев колёс задача синтеза сводится к определению их параметров. Сначала должен быть выбран материал колёс с учётом назначения передачи, условий работы и

других факторов, затем определяется модуль передачи, позволяющий обеспечить изгибную и контактную прочность зубьев, а затем – все геометрические параметры зубчатых колёс.

Известны решения частных задач подбора чисел зубьев сложных зубчатых механизмов с учётом различных условий, например, геометрического характера.

При проектировании планетарного редуктора с заданным передаточным отношением возникает задача определения чисел зубьев при соблюдении следующих условий:

1) кинематическое условие;

2) условие соосности;

3) условие соседства;

4) условие сборки;

5) условие правильного зацепления.

Физический и математический смысл этих условий разберём на конкретной схеме планетарного механизма с нулевыми эвольвентными цилиндрическими колёсами (рис. 89).

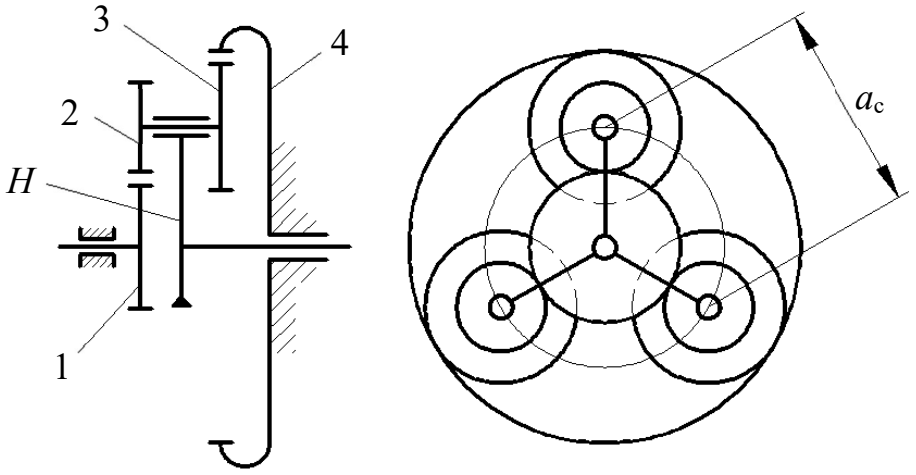


Рис. 89. Планетарный механизм с нулевыми эвольвентными цилиндрическими колесами:
1 – солнечная шестерня; 2, 3 – сателлиты; 4 – неподвижное колесо; *H* – водило

Кинематическое условие обеспечивает заданное передаточное отношение и для данного механизма имеет следующий вид:

$$i_{14}^{(H)} = -\frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_4 - \omega_H}, \tag{8.41}$$

откуда при $\omega_4 = 0$ получим:

$$i_{1H} = \frac{\omega_1}{\omega_H} = 1 + \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3}. \tag{8.42}$$

Обычно допускается отклонение передаточного отношения в пределах 5% от заданного.

Условие соосности требует, чтобы оси колёс 1 и 4, в данном случае, совпадали для обеспечения зацепления сателлитов с центральными колёсами. Для этого необходимо, чтобы выполнялись следующие соотношения радиусов делительных окружностей и (при равных модулях зубьев всех колёс) чисел зубьев:

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 &= r_4 - r_3; \\ z_1 + z_2 &= z_4 - z_3. \end{aligned} \tag{8.43}$$

Условие соседства включает требование совместного размещения нескольких сателлитов по общей окружности так, чтобы они не задевали друг друга своими зубьями. Необходимость выполнения этого условия возникает при числе сателлитов $k > 2$ (увеличение числа сателлитов уменьшает нагрузку на зубья). В этом случае необходимо, чтобы выполнялось неравенство $a_c > 2r_a^c$, где r_a^c - радиус окружности вершин наибольшего сателлита). Так как

$$\begin{aligned} a_{\text{c}} &= 2(r_1 + r_2)\sin\frac{2\pi}{2k} = m(z_1 + z_2)\sin\frac{\pi}{k}; \\ z_a^{\text{c}} &= z_a + h_a m = m\left(\frac{z_{\text{c}}}{2} + 1\right), \end{aligned} \tag{8.44}$$

то

$$\sin\frac{\pi}{k} > \frac{z_{\text{c}} + 2}{z_1 + z_2}, \tag{8.45}$$

где z_{c} – число зубьев наибольшего сателлита (2 или 3).

Условие сборки учитывает необходимость одновременного зацепления

всех сателлитов с центральными колёсами, т.е. установив первый сателлит и повернув водило на угол $\frac{2\pi}{k}$ рад, необходимо в то же самое место установить следующий сателлит. Это может быть осуществлено, если зубья колёс второго блока сателлитов окажутся точно против впадин зубьев центральных колёс. Иначе сборку осуществить невозможно. Для формирования условия примем, что оба колеса всех k блоков сателлитов имеют одинаковую ориентацию зубьев друг относительно друга. После установки первого сателлита на ось водило должно быть повёрнуто на угол $\frac{2\pi}{k}$, при этом колесо 1 необходимо повернуть на угол

$$\varphi_1 = i_{1H}\frac{2\pi}{k}. \tag{8.46}$$

С другой стороны, угол φ_1 поворота колеса 1 должен быть кратным его угловому шагу зубьев $\frac{2\pi}{z_1}$, в противном случае при повороте на угол φ_1 положение зубьев колеса 1 изменится и второй сателлит вставить будет невозможно. Таким образом,

$$\varphi_1 = q\frac{2\pi}{z_1}, \tag{8.47}$$

где q –целое число).

Таким образом,

$$\begin{gathered} q\frac{2\pi}{z_1} = i_{1H}\frac{2\pi}{k}; \\ q = i_{1H}\frac{z_1}{k}. \end{gathered} \tag{8.48}$$

Условие правильного зацепления включает условие отсутствия подреза у колёс с внешним зубчатым венцом и условие отсутствия заедания (интерференции) во внутреннем зацеплении. Эти условия имеют вид:

$$z_i \geq z_{\min}, \tag{8.49}$$

где $z_{\min}$ = 17 для колёс с внешним зацеплением; $z_{\min}$ = 85 для колёс с внутренним зацеплением без смещения исходного контура; $z_{\min}$ = 20 – то же со смещением исходного контура.

8.17.2. Методы синтеза эпициклических механизмов

Задача подбора чисел зубьев колёс для эпициклического механизма в общей постановке является оптимизационной ввиду множества возможных решений. Её можно считать типичной задачей дискретного нелинейного программирования, если за критерий оптимальности принять габариты или вес механизма, а ограничениями на целочисленные параметры z_1, z_2,… будут условия (8.43), (8.45), (8.48), (8.49).

Такую задачу можно решать различными методами, например, численными методами направленного перебора, когда варьируются z_1, z_2,… с целью минимизации габаритов или веса при соблюдении ограничений. Такая задача может быть решена с помощью ЭВМ.

Применяются упрощённые методы, позволяющие найти одно из конструктивно допустимых решений. Один из таких методов – метод сомножителей.

Представим числа зубьев в виде нескольких сомножителей:

$$\begin{aligned} z_1 &= \alpha \cdot A \cdot t; \\ z_2 &= \alpha \cdot B \cdot t; \\ z_3 &= \beta \cdot C \cdot t; \\ z_4 &= \beta \cdot D \cdot t. \end{aligned} \tag{8.50}$$

Из условия (8.45)

$$\alpha(A + B) = \beta(D - C)\,. \tag{8.51}$$

Это уравнение превращается в тождество при:

$$\begin{aligned} \alpha &= D - C; \\ \beta &= A + B. \end{aligned} \tag{8.52}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} z_1 &= A \cdot t \cdot (D - C); \\ z_2 &= B \cdot t \cdot (D - C); \\ z_3 &= C \cdot t \cdot (A + B); \\ z_4 &= D \cdot t \cdot (A + B). \end{aligned} \tag{8.53}$$

Подставив эти выражения в условие (8.43), получим:

$$\frac{B}{A} \cdot \frac{D}{C} = i_{1H} - 1. \tag{8.54}$$

Таким образом, величину $(i_{1H} - 1)$ можно представить в виде нескольких сомножителей (A, B, C, D). Далее определяются значения t, обеспечивающие выполнение условий сборки и правильного зацепления и выбирается одно из этих значений. Например, из условия сборки (8.48)

$$q = t \frac{A(D - C)}{k} i_{1H} \tag{8.55}$$

выбираются значения t, обеспечивающие целочисленность q. После этого можно определить числа зубьев.

9. ТРЕНИЕ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАХ

9.1. Виды трения

Когда одно тело соприкасается с другим, то независимо от их физического состояния (твёрдое, жидкое, газообразное) возникает явление, называемое *трением*. В зависимости от характера относительного движения тел различают *трение скольжения* и *трение качения*. Сила, препятствующая относительному движению контактирующих тел, называется *силой трения*. Вектор этой силы лежит в плоскости, касательной к поверхности тел в зоне их контакта.

Сила трения скольжения уменьшается, если соприкасающиеся тела смазаны специальными смазочными материалами, причём, если материал – жидкость, полностью разделяющая контактирующие поверхности, то трение называется *жидкостным*. При совершенном отсутствии смазки имеет место *сухое трение*.

Если смазывающая жидкость не полностью разделяет трущиеся поверхности, то трение называется *полужидкостным* или *полусухим* в зависимости от того, какой из двух видов трения преобладает.

Применяемые смазки делятся на несколько видов: *твёрдые*, *жидкие*, *газовые*; при этом смазка может быть: *гидро-* или *газостатической*, когда она поступает под давлением в зазор между трущимися телами, а также *гидро-* или *газодинамической*, когда она разделяет трущиеся поверхности в результате давления, возникающего в слое жидкости при относительном движении тел.

Сцепление и трение широко используется в современной технике. Благодаря сцеплению движутся различные транспортные средства. Принцип действия фрикционной, ременной и других передач основан на использовании трения. Распространение получила также сварка трением.

Вместе с тем трение отрицательно сказывается там, где оно вызывает потери энергии.

9.2. Трение скольжения в поступательных парах

Сила трения на поверхности соприкосновения двух звеньев направлена в сторону, противоположную скорости относительного движения и приближённо может быть определена по формуле Кулона

$$F_{\text{тр}} = F_n f, \tag{9.1}$$

где F_n – сила реакции, нормальная к поверхности контакта; f – коэффициент трения скольжения (величина, постоянная в определённом диапазоне скоростей и удельных давлений).

Коэффициент трения зависит от многих факторов (чистоты поверхности, наличия и качества смазки, материала тел и др.) и определяется экспериментально.

Сила трения покоя (сила сцепления), т.е. сила, которую надо преодолеть, чтобы тело привести в движение, обычно больше силы трения скольжения, поэтому различают коэффициент сцепления f_0 и коэффициент трения скольжения f.

Сила трения возникает как результат действия внешних сил F, поэтому она является реактивной силой, в результате действия которой суммарная реакция F_Σ отклоняется на угол ρ от нормали к трущимся поверхностям (рис. 90, *а*).

При этом

$$f = \frac{F_{\text{тр}}}{F_n} = \operatorname{tg}\rho. \tag{9.2}$$

Угол ρ называется *углом трения скольжения*.

Если построить конус с углом при вершине 2ρ (рис. 90, *б*), то получим *конус трения*. Движение возможно при $F_t \geq F_{\text{тр}}$, или при

$$\begin{gathered} F_n \operatorname{tg}\lambda \geq F_n \operatorname{tg}\rho; \\ \lambda \geq \rho, \end{gathered} \tag{9.3}$$

где λ – угол между линиями действия сил F и F_n (рис. 90, *а*).

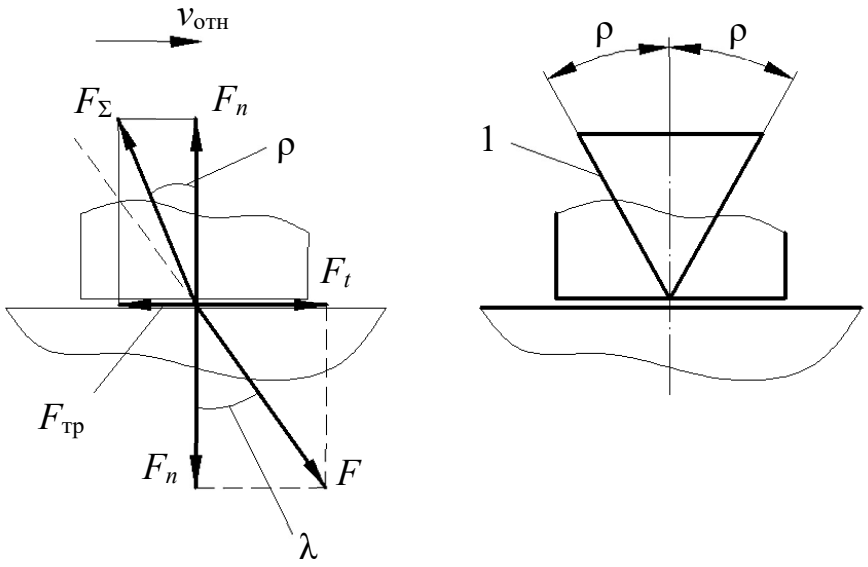


Рис. 90. Трение скольжения в поступательных парах:
а – силы в точке контакта; *б* – конус трения (позиция 1)

Если λ = ρ, то движение происходит с постоянной скоростью: $v_{отн} = const$.

Мощность, затрачиваемая на трение скольжения, равна:

$$P_{тр} = F_{тр} v_{отн} = F_n f (v_1 \pm v_2), \tag{9.4}$$

где v_1, v_2 – скорости тела и опорной поверхности соответственно; знак «+» – при противоположно направленном движении; знак «–» – при однонаправленном движении.

9.3. Трение скольжения во вращательных парах

Вращательные кинематические пары, образуемые цапфами валов и их опорами, широко распространены в машиностроении. *Цапфами* называются части валов и осей, посредством которых они опираются на подшипники. Трение цапф в подшипниках удобно оценивать величиной момента сил трения скольжения относительно оси вращения (рис. 91):

$$M_{тр} = F_{тр} r = F_n f r = F_\Sigma r_{тр}, \tag{9.5}$$

где F_Σ – полная реакция; $r_{тр}$ – радиус круга трения, равный:

$$r_{тр} = r\sin\rho \approx r\mathrm{tg}\rho \approx fr. \tag{9.6}$$

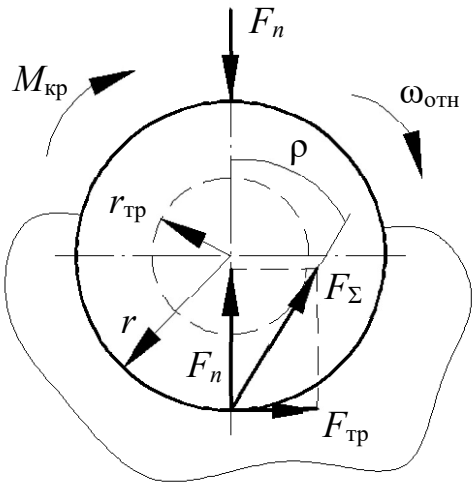


Рис. 91. Трение скольжения во вращательной паре

Мощность, затрачиваемая на трение, равна:

$$P_{тр} = M_{тр}\omega_{отн} = M_{тр}(\omega_1 \pm \omega_2), \tag{9.7}$$

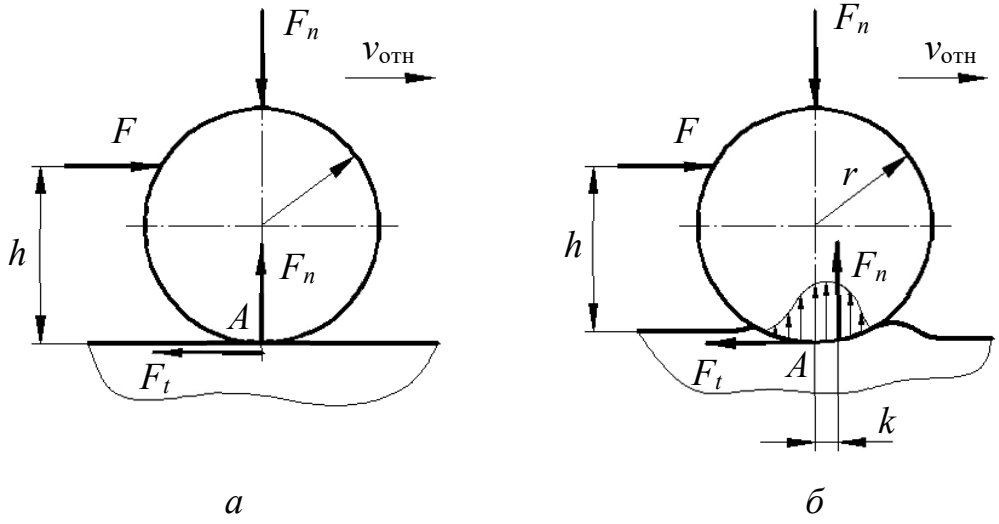
где ω_1, ω_2 – угловые скорости цапфы и опорной поверхности соответственно; знак плюс – при противоположно направленном вращении; знак минус – при однонаправленном вращении.

9.4. Трение качения

В случаях идеально твёрдых тел, одно из которых катится по поверхности другого, соприкосновение их происходит по линии или в точке и сопротивление качению отсутствует, так как линии действия сил F_n совпадают (рис. 92, *а*) и сумма моментов относительно точки A равна

$$\Sigma M_A = Fh. \tag{9.8}$$

В действительности соприкосновение происходит не по линии, а по поверхности вследствие деформаций (рис. 92, *б*) и сумма моментов ΣM_A равна:



а *б*

Рис. 92. Трение качения:
а – идеально твердые тела; *б* – реальные тела

$$\Sigma M_A = Fh - F_n k, \tag{9.9}$$

где h, k – плечи сил F и F_n.

При $v_{отн} = const$ и $F_t = F$ получим

$$Fh - F_n k = 0;$$

$$k = h\frac{F}{F_n}. \tag{9.10}$$

Плечо k называется *коэффициентом трения качения* и измеряется в единицах длины. Часто используется величина

$$f_к = \frac{k}{r}, \tag{9.11}$$

называемая *приведённым коэффициентом трения качения*. При этом сила трения качения $F_{тр}^{к}$ по аналогии с силой трения скольжения может быть представлена в виде

$$F_{тр}^{к} = F_n f_к = F_n \frac{k}{r} = \frac{M_{тр}}{r}. \tag{9.12}$$

Мощность, затрачиваемая на трение, равна:

$$P_{тр} = F_{тр}^{к} v_{отн}, \tag{9.13}$$

где $v_{отн}$ – скорость центра катка.

Для подшипников качения затраты мощности на преодоление трения равны

$$P_{тр} = M_{тр}\omega_{отн} = F_n f_к(\omega_1 \pm \omega_2)\frac{d}{2}, \qquad (9.14)$$

где d – диаметр внутреннего кольца подшипника.

Принимается $f_к$ = 0,003 для шарикоподшипников; $f_к$ = 0,005 для роликоподшипников.

9.5. Особенности учёта сил трения при силовом расчёте рычажных механизмов

Для учёта сил трения в кинематических парах рычажных механизмов при определении $F_{ур}$ или $M_{ур}$ используется метод приведения сил трения, позволяющий определять уточнённые значения $F^*_{ур}(M^*_{ур})$ без повторного силового расчёта с учётом трения по формуле:

$$M^*_{ур} = M_{ур} + M^{тр}_{пр}, \qquad (9.15)$$

где $M_{ур}$ – уравновешивающий момент, вычисленный без учёта трения; $M^{тр}_{пр}$ – момент трения, приведённый к вращающемуся с угловой скоростью $\omega_в$ входному звену, и равный

$$M^{тр}_{пр} = \frac{\Sigma P^{тр}_i}{\omega_в}, \qquad (9.16)$$

где $\Sigma P^{тр}_i$ – суммарная мощность сил трения в кинематических парах.

Для определения реакций в кинематических парах с учётом трения обычно используется метод последовательных приближений, когда по найденным без учёта трения реакциям определяются силы и моменты трения в кинематических парах. Затем эти силы прикладываются как внешние и производится перерасчёт реакций в установленном порядке. Обычно достаточно одного перерасчёта (итерации).

9.6. Коэффициент полезного действия (КПД) машины

Энергия, потребляемая машиной, расходуется на преодоление полезных и вредных сопротивлений. Полезные –это сопротивления, для преодоления которых машина предназначается. Вредные –это сопротивления, преодоление которых не даёт производственного эффекта.

Механическим КПД (η) называется отношение полезной работы $A_{пл}$ или мощности $P_{пл}$ к затраченной $A_{зт}(P_{зт})$. Потери механической энергии в разного рода устройствах состоят главным образом из потерь на трение:

$$\eta = \frac{A_{пл}}{A_{зт}} = \frac{P_{пл}}{P_{зт}} = \frac{A_{зт} - A_{тр}}{A_{зт}} = \frac{P_{зт} - P_{тр}}{P_{зт}} = 1 - \xi_{п}, \qquad (9.17)$$

где $\xi_{п} = \frac{A_{тр}}{A_{зт}} = \frac{P_{тр}}{P_{зт}}$ – коэффициент потерь.

При холостом ходе машины $\eta = 0$, но могут быть случаи когда $\eta < 0$, что означает невозможность совершать движение из-за явления, называемого *самоторможением*. Например, червячный редуктор не может совершать вращение со стороны червячного колеса.

Рассмотрим машину как совокупность n элементов, соединённых различным образом между собой.

1. Элементы соединены последовательно и КПД каждого из них η_i известен (рис. 93, *а*). Тогда

$$\begin{aligned} A_2 &= A_1\eta_1; \\ A_3 &= A_2\eta_2 = A_2\eta_1\eta_2; \\ &\vdots \\ A_{n+1} &= A_1\eta_1\eta_2...\eta_n, \end{aligned} \qquad (9.18)$$

т. е. общий КПД всей цепи равен

$$\eta_{\Sigma} = \frac{A_{n+1}}{A_1} = \eta_1\eta_2...\eta_n = \prod_{i=1}^{n}\eta_i. \qquad (9.19)$$

Поэтому следует стремиться к созданию простых конструкций с малым числом элементов.

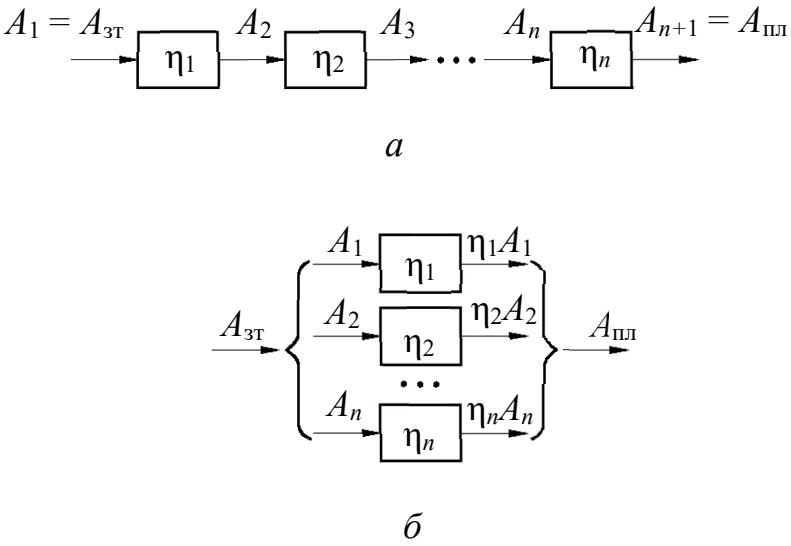


Рис. 93. Машина как совокупность элементов:
а – элементы соединены последовательно; *б* – элементы соединены параллельно

2. Элементы соединены параллельно (рис. 93, *б*). Тогда

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\eta_1 A_1 + \eta_2 A_2 + \ldots + \eta_n A_n}{A_1 + A_2 + \ldots + A_n} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \eta_i, \qquad (9.20)$$

где $\alpha_i = \dfrac{A_i}{A_{зт}}$ – коэффициент распределения энергии.

При $\eta_1 = \eta_2 = \ldots = \eta_n$ получим $\eta_{\Sigma} = \eta_i$, следовательно, низкое качество отдельных элементов меньше влияет на общий КПД машины, чем при последовательном соединении.

Сложные механизмы могут образовывать разветвлённую систему, состоящую из последовательного и параллельного соединённых более простых механизмов, где КПД определяется согласно указанным выше правилам.

Так как любой механизм представляет собой кинематическую цепь с последовательно и параллельно соединёнными в кинематических парах

звеньями, то общий КПД механизма вычисляется аналогично при известных КПД кинематических пар.

Например, необходимо определить η_Σ механизма с низшими парами, изображённого на рис. 94.

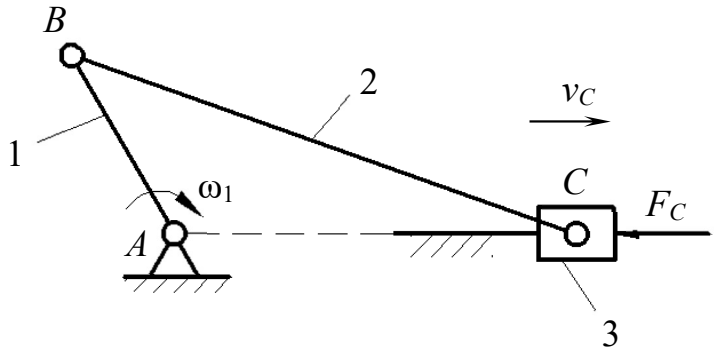


Рис. 94. Схема рычажного механизма

Мощность сил полезного сопротивления

$$P_{\text{пл}} = F_C v_C, \tag{9.21}$$

где v_C – скорость точки C; F_C – сила полезного сопротивления.

Затраченная мощность

$$P_{\text{зт}} = P_{\text{пл}} + \sum_{i=1}^{4} P_i^{\text{тр}}. \tag{9.22}$$

В формуле (9.22) мощность, затраченная на трение в кинематических парах, равна:

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{4} P_i^{\text{тр}} = P_A^{\text{тр}} + P_B^{\text{тр}} + P_C^{\text{тр}} + P_{30}^{\text{тр}};\\
&P_A^{\text{тр}} = F_{01} f_A \frac{d_A}{2}\omega_1;\\
&P_B^{\text{тр}} = F_{12} f_B \frac{d_B}{2}(\omega_1 \pm \omega_2);\\
&P_C^{\text{тр}} = F_{23} f_C \frac{d_C}{2}\omega_2;\\
&P_{30}^{\text{тр}} = F_{30} f_{30} v_C,
\end{aligned} \tag{9.23}$$

где $P_A^{\text{тр}}, P_B^{\text{тр}}, P_C^{\text{тр}}$ – затраты мощности на трение в шарнирах; $P_{30}^{\text{тр}}$ – затраты мощности на трение в поступательной паре; f_A, f_B, f_C – коэффициенты трения в шарнирах; f_{30} – коэффициент трения в поступательной паре; d_A, d_B, d_C – диаметры шарниров; ω_1, ω_2 – угловые скорости звеньев.

Мгновенный КПД, который является функцией положения звена 1, равен

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\text{пл}}}{P_{\text{зт}}}. \qquad (9.24)$$

10. УРАВНОВЕШИВАНИЕ МАСС В МЕХАНИЗМАХ

10.1. Действие сил на фундамент. Условия уравновешивания

В общем случае в кинематических парах механизмов и машин возникают динамические усилия, переменные по величине и направлению. Через стойку они передаются на фундамент, вызывая дополнительные напряжения в отдельных звеньях, вибрацию и ухудшение условий работы. Чтобы этого избежать, необходимо рационально подобрать и расположить массы звеньев с условием полного или частичного гашения динамических усилий. Эта задача решается при уравновешивании.

Основными динамическими составляющими при работе любого механизма являются силы инерции, которые, как правило, переменны по величине и направлению. Это характерно и для случаев, когда входное звено вращается с постоянной угловой скоростью $\omega_1 = const$ (см. рис. 94). Все силы и моменты сил инерции можно привести к главному вектору $\overline{F}_{и\Sigma}$ и моменту $\overline{M}_{и\Sigma}$ относительно выбранной точки (точки приведения):

$$\begin{aligned} \overline{F}_{и\Sigma} &= \Sigma \overline{F}_{иi}; \\ \overline{M}_{и\Sigma} &= \Sigma \overline{M}_{иi} + \Sigma \overline{F_{иi} h_{F_{иi}}}, \end{aligned} \qquad (10.1)$$

где $\overline{F}_{иi}, \overline{M}_{иi}$ – сила инерции и момент сил инерции i-го звена; $h_{F_{иi}}$ – плечо силы инерции относительно точки приведения.

Полностью уравновешенным считается механизм, в котором $F_{и\Sigma} = 0$ и $M_{и\Sigma} = 0$, т. е. сила давления стойки на фундамент остаётся постоянной при движении звеньев.

Из теоретической механики известно, что

$$\overline{F}_{и\Sigma} = -m_{\Sigma} \overline{a}_s, \qquad (10.2)$$

где m_{Σ} – масса всех подвижных звеньев; a_s – ускорение центра масс системы.

Следовательно, для выполнения условия $F_{и\Sigma} = 0$ необходимо, чтобы ускорение $a_s = 0$.

Это равносильно требованию постоянства положения центра масс механизма относительно стойки. Такое уравновешивание называется *статическим* или *уравновешиванием первого рода*. В этом случае используется метод заменяющих (сосредоточенных) масс, обладающих массой, центром масс и моментом инерции J_S заменяемого твёрдого тела (звена) с распределённой массой. Если поместить начало системы координат в центр масс системы, то условия эквивалентности заменяемой и заменяющих масс запишутся так:

$$\begin{aligned} &\Sigma m_i = m_\Sigma; \\ &\Sigma m_i x_i = 0; \\ &\Sigma m_i y_i = 0; \\ &\Sigma m_i (x_i^2 + y_i^2) = J_S, \end{aligned} \qquad (10.3)$$

где m_i – масса i-го звена; x_i, y_i – координаты центра тяжести i-го звена.

Таким образом, в общем случае плоского звена необходимы четыре заменяющих массы. В частных случаях число заменяющих масс может быть сведено к двум. Например, для звена AB (рис. 95) можно ограничиться частичной заменой его массы m двумя массами m_1 и m_2, учитывая условия:

$$\begin{aligned} &m_1 + m_2 = m; \\ &m_1 l_1 - m_2 l_2 = 0. \end{aligned} \qquad (10.4)$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} m_1 &= m\frac{l_2}{l}; \\ m_2 &= m\frac{l_1}{l}. \end{aligned} \qquad (10.5)$$

Для полного уравновешивания механизма необходимо выполнение обоих условий: $F_{и\Sigma} = 0$; $M_{и\Sigma} = 0$, причём выполнение условия $M_{и\Sigma} = 0$ решается

при моментном (динамическом) уравновешивании, которое называется *уравновешиванием второго рода*.

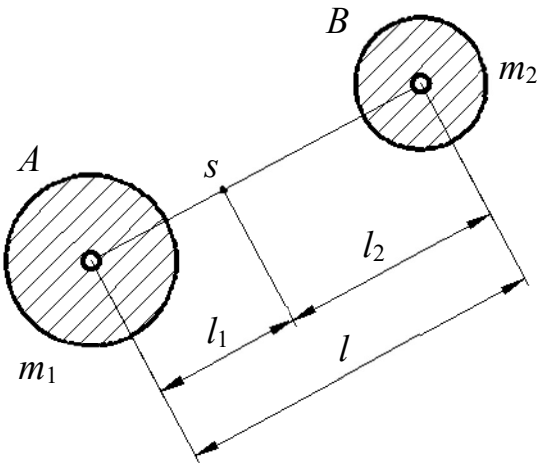
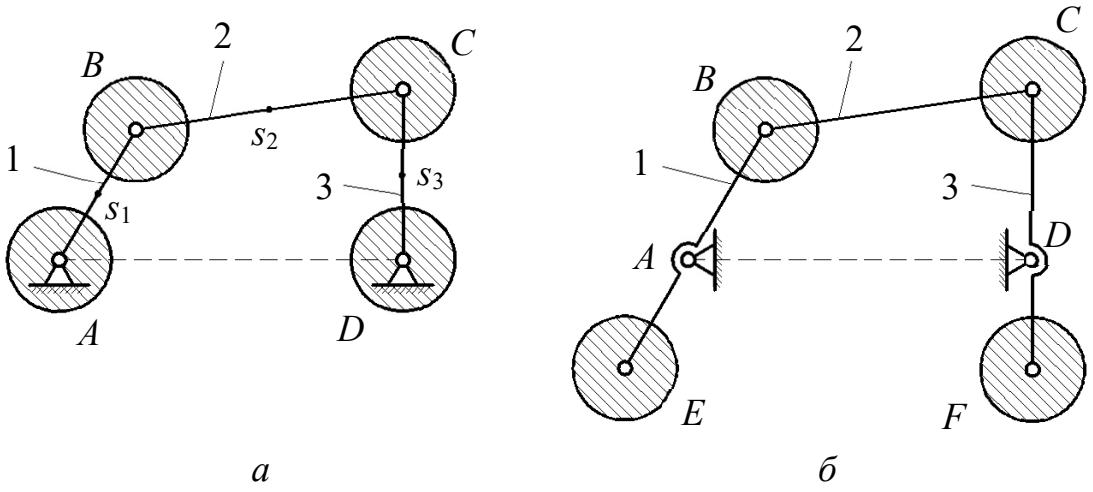


Рис. 95. Звено *AB*

10.2. Уравновешивание с помощью противовесов на звеньях механизма

Рассмотрим последовательность статического уравновешивания на примере четырёхшарнирного механизма (рис. 96, *а*). Заменяем массы звеньев 1, 2, 3 сосредоточенными массами в точках *A*, *B*, *C*, *D*, причём в силу неподвижности точек *A* и *D*, массы, сосредоточенные в этих точках, можно не учитывать.



а *б*

Рис. 96. Статическое уравновешивание механизма:
а – схема механизма; *б* – статически уравновешенный механизм

Приведённые массы в точках B и C равны:

$$m_B = m_{B_1} + m_{B_2} = m_1 \frac{l_{AS_1}}{l_{AB}} + m_2 \frac{l_{CS_2}}{l_{BC}};$$
$$m_C = m_{C_2} + m_{C_3} = m_2 \frac{l_{BS_2}}{l_{BC}} + m_3 \frac{l_{DS_3}}{l_{CD}}. \qquad (10.6)$$

Так как заменяющие массы m_B и m_C совершают вращательное движение, то для уравновешивания сил инерции необходимы противовесы с массами m_E и m_F, определяемыми из следующих условий (рис. 96, *б*):

$$m_E l_{AE} = m_B l_{AB};$$
$$m_F l_{DF} = m_C l_{DC}, \qquad (10.7)$$

где, задавая длины противовесов, можно получить их массы и наоборот.

Рассмотрим моментное уравновешивание на примере четырёхшарнирного механизма. Его приближённое моментное уравновешивание можно осуществить после статического уравновешивания, введя в схему механизма два одинаковых дополнительных противовеса m_M (рис. 97), соединённых с зубчатыми колёсами *a* и *b*. Колесо *a* жёстко связано с кривошипом 1 и вращается с угловой скоростью ω_1, а равное ему колесо *b* вращается с той же угловой скоростью ω_1, но угловые координаты противовесов отличаются на 180°, поэтому момент пары сил инерции от противовесов m_M равен

$$M_{иM} = F_{иM} h_M. \qquad (10.8)$$

Подбирая положение точки E, можно обеспечить направление $M_{иM}$, противоположное направлению $M_{и\Sigma}$, а массу противовесов m_M определяют из условия $M_{и\Sigma} = M_{иM}$.

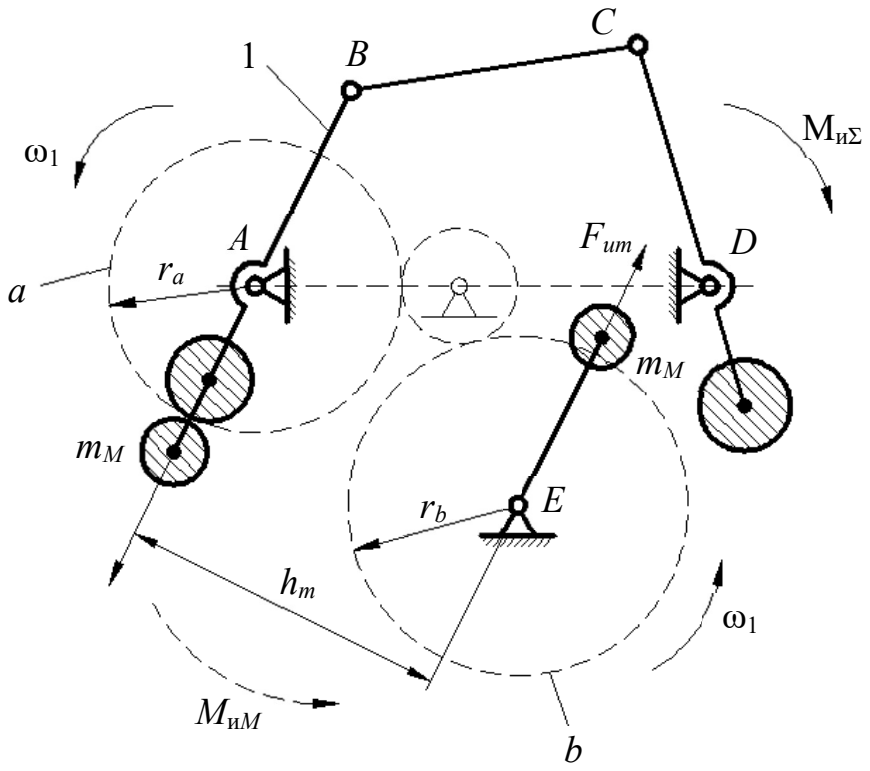


Рис. 97. Моментное уравновешивание механизма

10.3. Уравновешивание вращающихся масс (роторов)

Ротором в теории балансировки называется любое вращающееся тело. В связи с появлением быстроходных машин возникла проблема уравновешивания быстровращающихся деталей. Так, например, скорость некоторых турбин, валов гироскопов, суперцентрифуг достигает 50 тысяч об/мин, и малейшее смещение центра масс с геометрической оси вращения вызывает появление больших сил инерции, т. е. вибрационных явлений в машине и фундаменте.

Различают статическое уравновешивание (статическая балансировка) вращающихся роторов и динамическое. Статическая балансировка достигается тем, что центр тяжести вращающейся детали переводят в неподвижную точку. Такое уравновешивание применяется для плоских деталей, длина которых мала по сравнению с диаметром. Если такую деталь заменить сосредоточенной массой m, вращающейся относительно

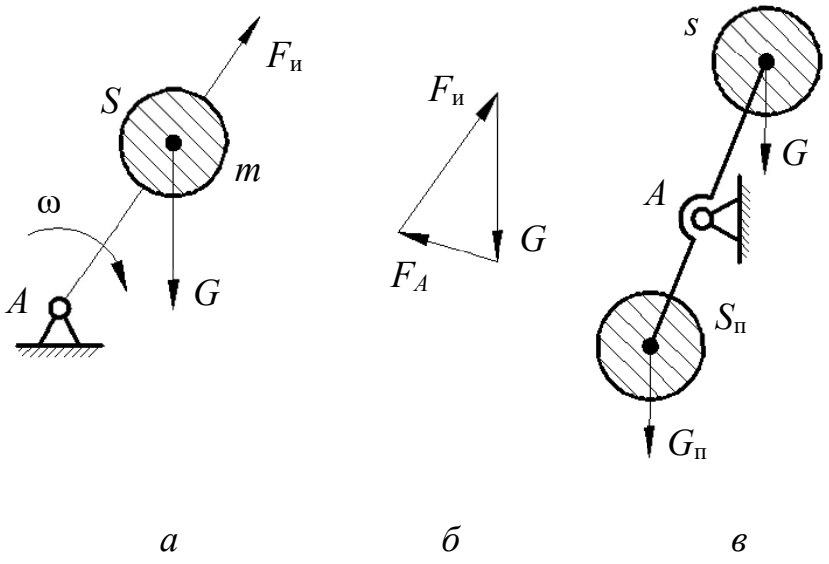
неподвижного центра вращения (рис. 98, *а*), то можно записать уравнение динамики:

$$\bar{G} + \bar{F}_A + \bar{F}_{\text{и}} = 0, \tag{10.9}$$

где G – вес; F_A –реакция в опоре; $F_{\text{и}}$ –сила инерции, равная

$$F_{\text{и}} = ma_S^n = \frac{G}{g}\omega^2\rho = d\frac{\omega^2}{g}, \tag{10.10}$$

где $\rho = AS$ – радиус окружности вращения массы m; $d = G\rho$ – дисбаланс, который характеризует неуравновешенность и направлен так же, как сила инерции $F_{\text{и}}$.



а *б* *в*

Рис. 100. Уравновешивание вращающихся масс

План сил в данном положении (рис. 98, *б*) показывает, что F_A – сила переменная по направлению и создаёт динамические нагрузки и вибрацию. Если $d = 0$, то $\bar{G} + \bar{F}_A = 0$, и динамические нагрузки отсутствуют. Для этого необходимо уравновесить дисбаланс установкой массы противовеса с противоположной стороны (рис. 98, *в*). Тогда дисбалансы будут уравновешены, и вес противовеса $G_{\text{п}}$ определится из условия

$$G\rho = G_{\text{п}}\rho_{\text{п}}, \tag{10.11}$$

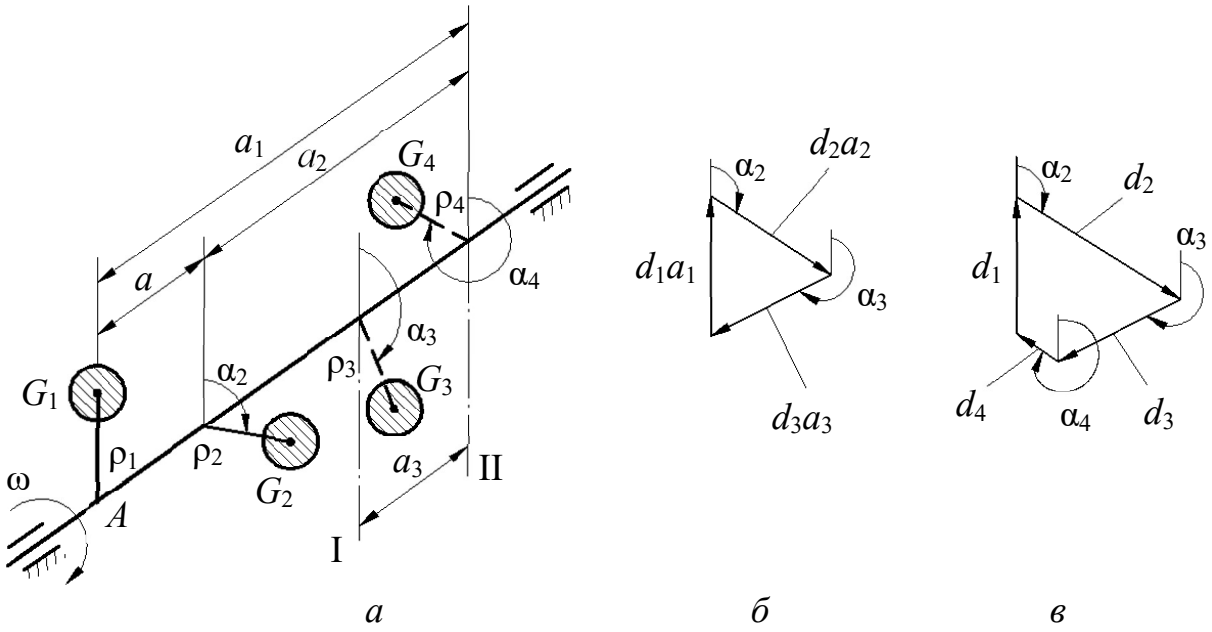
где $\rho_{\text{п}} = AS_{\text{п}}$ – радиус окружности вращения противовеса.

Рассмотрим уравновешивание неплоской детали, которую можно представить, например, в виде двух грузов G_1 и G_2 (рис. 99, *а*), с углом α_2 между радиусами ρ_1 и ρ_2. В этом случае возникают реакции, вызванные неуравновешенностью как сил, так и моментов от сил инерции. При этом момент от сил инерции относительно точки *A* равен

$$M_{и2} = F_{и2}a \tag{10.12}$$

и характеризуется дисбалансом

$$d_2a = G_2\rho_2a. \tag{10.13}$$



а *б* *в*

Рис. 99. Уравновешивание неплоской детали

В этом случае динамические нагрузки на опоры возникают даже если проведена статическая балансировка, когда центр тяжести грузов 1 и 2 совпадает с центром вращения. Уравновешивание моментов от сил инерции вращающихся деталей будет обеспечена динамической балансировкой.

Полное уравновешивание системы можно осуществить двумя дополнительными грузами G_3 и G_4, установленными в разных плоскостях I и II, называемых *плоскостями исправления*, под углами α_3 и α_4. При этом должны выполняться условия:

$$\Sigma \overline{F}_{ui} = 0, \text{ или } \overline{d}_1 + \overline{d}_2 + \overline{d}_3 + \overline{d}_4 = 0;$$
$$\Sigma \overline{M}_{ui} = 0, \text{ или } \overline{d}_1 a_1 + \overline{d}_2 a_2 + \overline{d}_3 a_3 + \overline{d}_4 a_4 = 0. \quad (10.14)$$

Совместное решение уравнений (10.14), например, графическим путём (рис. 99, *б*, *в*) позволяет найти вес и положение противовесов G_3 и G_4.

Балансировка вращающихся масс осуществляется на специальных балансировочных станках, при этом исключается неуравновешенность, вызванная неточностью изготовления детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: учебник для вузов. – М.: Наука, 1988.

2. Артоболевский И. И. Сборник задач по теории механизмов и машин: для машин. спец. вузов. – М.: Наука, 1975.

3. Левитская О. Н., Левитский Н. И. Курс теории механизмов и машин: учеб. пособие для механ .спец. вузов. – М.: Наука, 1990.

4. Прикладная механика: учеб. пособие и контрольные задания на курсовой проект «Кинематический, силовой анализ и синтез плоского механизма» для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Горные машины и оборудование» очного и заочного обучения. / А. И. Афанасьев, Ю. М. Казаков, С. А. Ляпцев и др. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019.

Учебное издание

Виталий Михайлович ТАУГЕР, Александр Анатольевич ЛЕОНТЬЕВ

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Учебное пособие

Редактор изд-ва
Компьютерная вёрстка авторов
Дизайн обложки

Подписано в печать
Бумага офсетная. Гарнитура *Times New Roman*. Формат $60\times84\,{}^{1}\!/_{16}$.
Печать на ризографе. Печ. л. 8,0. Уч. изд. л. 6,0
Тираж 100 экз. Заказ

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский гос. горный ун-т
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Б1.О.19_ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 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

ВВЕДЕНИЕ

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 online, 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 практико-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 практико-ориентированного 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»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе _____ В. В. Зубов

Методические указания к лабораторным работам

Б1.О.19 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Направление
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль
Мехатроника и робототехника промышленных производств

форма обучения: очная

Автор: Куриченко А.А., к.ф.-м.н.

Одобрена на заседании кафедры

Физики
(название кафедры)

Зав. кафедрой _____
(подпись)

Зайцев Д.В.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 20 от 26.09.2024
(Дата)

Рассмотрена методической комиссией факультета

Горно-механического
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)

Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.08
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы

Целью работы является изучение законов магнетизма, ознакомление с одним из методов определения характеристик магнитного поля Земли и измерение с помощью прибора (*тангенс–гальванометра*) горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Краткая теория

Земля обладает собственным магнитным полем и в любой точке окружающего ее пространства обнаруживается действие магнитных сил. Вблизи северного географического полюса Земли располагается южный магнитный полюс ***S***, а вблизи южного географического – северный магнитный ***N***. У магнитных полюсов линии индукции поля направлены практически вертикально, а на магнитном экваторе – горизонтально. В настоящее время природа земного магнитного поля до конца не выяснена, существует ряд гипотез, объясняющих существование магнитного поля Земли. Одна из них объясняет магнетизм Земли электрическими токами, циркулирующими на больших глубинах по поверхности ее жидкого ядра. Другие связывают магнетизм Земли с наличием в земной коре магнитных пород.

Магнитное поле Земли в любой произвольной точке может быть обнаружено с помощью магнитной стрелки, подвешенной на нити, закрепленной в центре тяжести стрелки. При отсутствии других магнитных полей, стрелка устанавливается по касательной к силовой линии магнитного поля Земли под некоторым углом к поверхности Земли. При этом стрелка показывает направление вектора магнитной индукции в данной точке. Угол, который образует магнитная стрелка с горизонтальной поверхностью, называется ***углом наклонения***. Составляющая вектора магнитной индукции в горизонтальной плоскости называется горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $\boldsymbol{B_Г}$. Вертикальная плоскость, проходящая через вектор индукции, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол между плоскостями магнитного и географического меридианов называется ***углом склонения***.

Угол наклонения, угол склонения и горизонтальная составляющая являются общепринятыми характеристиками магнитного поля Земли, поскольку позволяют определить величину и направление вектора индукции земного магнитного поля в каждой точке ее поверхности.

Зависимость характеристик магнитного поля Земли от географических координат пункта наблюдения изучается при магнитной разведке с целью поиска полезных ископаемых. Поиск базируется на том, что в суммарное магнитное поле в месте наблюдения, кроме основного магнитного поля, обусловленного процессами в ядре и мантии Земли, вносят вклад магнитные поля, определяемые магнитными свойствами пород, входящих в состав земной коры.

Для определения параметров земного магнетизма в геофизической практике применяют различного рода магнитометры.

Для грубого определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли может быть использован прибор, называемый ***тангенс–гальванометром***. Он представляет собой большое вертикальное кольцо из немагнитного материала (дерево, медь, алюминий), на которое намотано несколько десятков витков медной проволоки. В центре кольца горизонтально закреплен компас, стрелка которого может поворачиваться только в горизонтальной плоскости. При отсутствии тока в кольце, стрелка устанавливается в плоскости магнитного меридиана в направлении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $\boldsymbol{B_Г}$ в точке наблюдения. Поворотом кольца вокруг вертикальной оси можно расположить его плоскость вдоль оси магнитной стрелки компаса, то есть совместить плоскость кольца с плоскостью магнитного меридиана.

При пропускании тока по виткам кольца тангенс–гальванометра, в соответствии с законом Био–Савара–Лапласа, возникает магнитное поле, вектор индукции которого $\boldsymbol{B_K}$ направлен перпендикулярно плоскости кольца и, следовательно, вектору индукции магнитного поля Земли $\boldsymbol{B_Г}$ (рис.1).

Величина индукции магнитного поля кольца в его центре в соответствии с законом Био–Савара–Лапласа равна

$$B_к = \mu\mu_0 \frac{IN}{2r}, \qquad (2.08.1)$$

где I – сила тока в обмотке кольца; r – радиус кольца; μ – относительная магнитная проницаемость воздуха, которую можно считать равной единице; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная

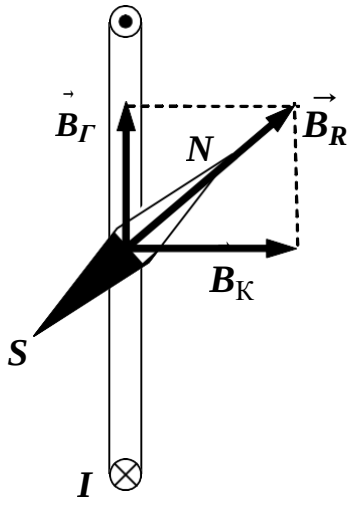


Рис. 1. Тангенс – гальванометр

При пропускании тока через кольцо стрелка отклоняется от плоскости кольца и устанавливается в направлении вектора индукции суммарного магнитного поля. Тогда

$$B_Г = \frac{B_к}{\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (2.08.2)$$

где α – угол отклонения стрелки от плоскости кольца.

С учетом формулы (2.08.1), получаем:

$$B_Г = \frac{\mu\mu_0 IN}{2r \operatorname{tg}\alpha}. \qquad (2.08.3)$$

Если в данной точке Земли известно значение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $B_Г$, то, измерив угол α, можно определить силу тока в витках. Таким образом, тангенс–гальванометр позволяет измерять силу тока, что отражено в его названии.

Из формулы (2.08.3) выражаем силу тока I:

$$I = \frac{2rB}{\mu\mu_0 N} \cdot \operatorname{tg}\alpha = C \operatorname{tg}\alpha. \qquad (2.08.4)$$

Величина C называется постоянной тангенс–гальванометра и численно равна силе тока в витках, вызывающей отклонение на 45°. Для определения горизонтальной составляющей земного магнитного поля по формуле (2.08.3) необходимо знать силу тока I, но непосредственные измерения силы тока можно не проводить, заменив их измерением других величин.

От источника тока с известной электродвижущей силой E пропускают по виткам прибора два различных тока I_1 и I_2 при

разных сопротивлениях цепи и получают разные углы отклонения магнитной стрелки α_1 и α_2:

$$I_1 = C \operatorname{tg}\alpha_1 \qquad I_2 = C \operatorname{tg}\alpha_2. \tag{2.08.5}$$

С другой стороны, по закону Ома можно записать:

$$I_1 = \frac{E}{R_0 + R_{M1}}, \qquad I_2 = \frac{E}{R_0 + R_{M2}}, \tag{2.08.6}$$

где R_{M1} и R_{M2} – известные сопротивления, устанавливаемые на магазине сопротивлений,

R_0 – общая сумма неизвестных сопротивлений в цепи тангенс–гальванометра: сопротивления витков обмотки тангенс–гальванометра, соединительных проводов и внутреннего сопротивления источника тока.

Из уравнений (2.08.5) и (2.08.6) можно получить:

$$\frac{R_0 + R_{M1}}{R_0 + R_{M2}} = \frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2}. \tag{2.08.7}$$

Решая уравнение (2.08.7) относительно R_0 и подставляя его в уравнение (2.08.6), выражают силу тока I_1 (или I_2) через тангенсы углов α_1 **и** α_2 им сопротивления R_{M1} и R_{M2}. Полученное выражение для I_1 (или I_2) в свою очередь подставляют в формулы (2.08.3) и (2.08.4) и получают для величин B и C окончательные формулы:

$$B_Г = \frac{\mu\mu_0 N E (\operatorname{tg}\alpha_2 - \operatorname{tg}\alpha_1)}{2r(R_{M1} - R_{M2}) \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha_2}; \tag{2.08.8}$$

$$C = \frac{E (\operatorname{tg}\alpha_2 - \operatorname{tg}\alpha_1)}{(R_{M1} - R_{M2}) \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{2r\overline{B}}{\mu\mu_0 N}. \tag{2.08.9}$$

Выполнение работы

Необходимые приборы лабораторный стенд, тангенс-гальванометр с компасом NS, магазин сопротивлений **МС**, вольтметр.

В лабораторном стенде собрана схема с источником тока E, переключателем направления тока S_1, резистором R_I = 1 Ом для измерения силы тока, протекающего в цепи, гнёзд для подключения тангенс – гальванометра.

Рабочая схема опыта показана на рис. 2 и на панели стенда.

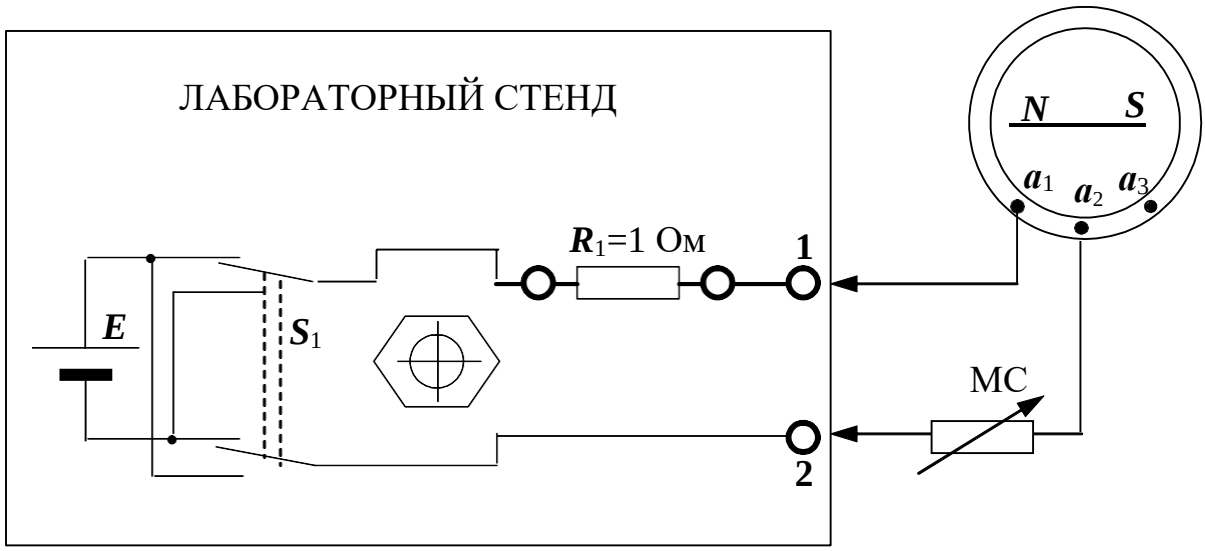


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Включите лабораторный стенд и дайте прогреться ему 2 – 3 минуты.

2. Не подключая к стенду, установите плоскость кольца тангенс–гальванометра вдоль направления магнитной стрелки (в плоскости магнитного меридиана).

3. Сохраняя ориентацию тангенс – гальванометра, соедините клемму a_1 с гнездом **1** стенда (см. рис. 2). Одну из крайних клемм магазина сопротивлений подключите к клемме a_2 тангенс–гальванометра, другую крайнюю клемму магазина сопротивлений – к гнезду **2** стенда. Число витков N тангенс–гальванометра при таком включении (клеммы a_1, a_2) равно **100**.

4. Переключателями магазина сопротивлений $\times$**10** и $\times$**100** подберите такое сопротивление R_1, чтобы отклонение стрелки было в пределах 25° – 30°.

Произведите отсчеты углов отклонения обоих концов стрелки α_1' и α_1'' (рис. 3, а). **ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ НА ТО, ЧТО ВСЕ УГЛЫ – ОСТРЫЕ!** Результаты запишите в табл. 8.1.

5. Переключателем S_1 измените направление тока в витках прибора и снова произведите отсчеты углов α_1''' и α_1'''' (рис. 3, а). Произведите отсчет сопротивления R_1 по магазину сопротивлений.

Найдите средние значения α_1 угла отклонения.

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1' + \alpha_1' + \alpha_1' + \alpha_1''}{4} \qquad (2.08.10)$$

Таким образом, исключается погрешность, возникающая за счет возможного несовпадения оси стрелки с центром круга делений, и погрешность за счет неточной установки плоскости кольца тангенс–гальванометра в плоскости магнитного меридиана.

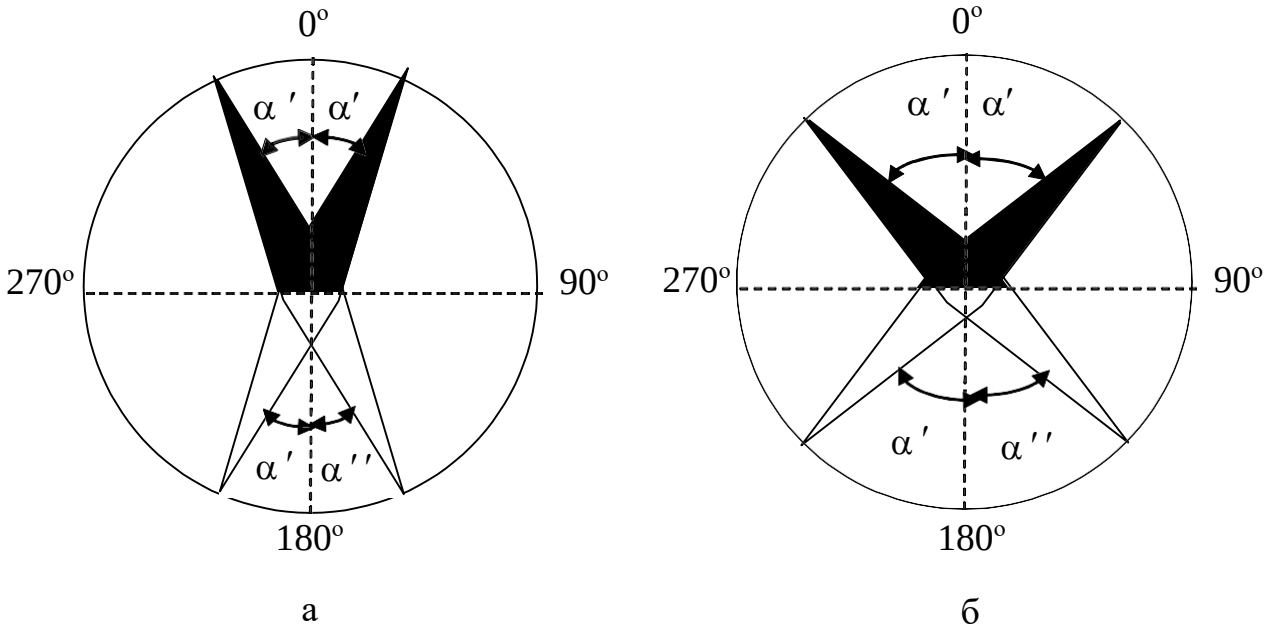
6. Подберите другое сопротивление $\boldsymbol{R_2}$ магазина сопротивлений, для которого отклонение стрелки будет в пределах $40^o - 50^o$ и снова произведите отсчеты углов отклонения стрелки α_2', α_2'', α_2''' и α_2'''' для прямого и обратного направлений тока. Определите среднее значение угла отклонения α_2 (рис. 3, б).

7. Переключите тангенс–гальванометр на $\boldsymbol{N = 200}$ витков (контакт магазина сопротивлений переключите с клеммы $\boldsymbol{a_2}$ на $\boldsymbol{a_3}$).

8. Повторите п. п. 4 – 6. Результаты запишите в табл. 8.1.

9. Измерьте цифровым вольтметром ЭДС источника питания $\boldsymbol{E}$, подключив цифровой вольтметр к гнездам 1 и 2 на стенде (рис. 2).

10. Пользуясь формулой (2.08.8), по средним значениям углов отклонения стрелки α_1 и α_2 вычислите два значения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $\boldsymbol{B_Г}$ (для $\boldsymbol{N = 100}$ витков и $\boldsymbol{N = 200}$ витков).



а б

Рис. 3. Ориентация стрелки компаса при включении тангенс – гальванометра

Таблица 8.1

Результаты измерений

Число витков N	R, Ом	Отклонение концов магнитной стрелки				средние значения угла отклонения стрелки α
		для прямого направления тока		для обратного направления тока		
		северный α'	южный α''	северный α'''	южный α''''	
100	R_{M1} =					α_1 =
100	R_{M2} =					α_2 =
200	R_{M1} =					α_1 =
200	R_{M2} =					α_2 =
E =				r = 0,2 м		

Вычислите среднее значение $\overline{B}$, среднюю абсолютную погрешность $\Delta\overline{B}$.

Результат измерения B запишите в виде:

$$B = \overline{B} \pm \Delta\overline{B}. \qquad (2.08.11)$$

По среднему значению $\overline{B}$ по формуле (2.08.9) вычислите два значения постоянной тангенс–гальванометра C для N = **100** витков и N = **200** витков.

Значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли можно также рассчитать непосредственно по формуле (2.08.3), если определить силу тока в витках тангенс–гальванометра. Для этого требуется подключить цифровой вольтметр к резистору R_1. Согласно закону Ома, сила тока будет численно равна напряжению на резисторе R_1 = 1 Ом (рис. 2).

Определив, таким образом, горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли, сравните ее значение со значением, полученным в (2.08.11).

Учитывая связь между индукцией и напряженностью магнитного поля

$$\boldsymbol{B} = \mu\mu_0 \boldsymbol{H}\,, \qquad (2.08.12)$$

рассчитайте величину напряженности по формуле

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu\mu_0}\,. \qquad (2.08.13)$$

Сравните полученное значение с известным значением для г. Екатеринбурга $\boldsymbol{H}$ = 12 А/м.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких единицах измеряется индукция магнитного поля?
2. Назовите три основных характеристики магнитного поля Земли.
3. Запашите формулу для индукции магнитного поля кругового тока.
4. Расскажите порядок выполнения работы.
5. Каков физический смысл постоянной тангенс – гальванометра?
6. Для какой цели измерение углов отклонения магнитной стрелки производится по обоим ее концам?
7. С какой целью измерения производятся при двух направлениях тока в катушке тангенс–гальванометра?
8. С какой целью измерения углов отклонения магнитной стрелки производятся при двух значениях силы тока?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т 2. М.: Наука, 1982. 176 – 180 с.

Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. Т. 2. М.: Высшая школа, 1977. 376 с.

Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1974. 336 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.09
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы

Целью данной работы является изучение движения элементарных частиц в электрическом и магнитном полях, экспериментальное определение удельного заряда электрона с помощью магнетрона.

Краткая теория

Электрон является носителем элементарного отрицательного заряда e ($e = -1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл). Отношение его заряда к массе e/m называется ***удельным зарядом электрона***. Удельный заряд может быть экспериментально определён различными методами. Все они основаны на поведении электрона в электрическом и магнитном полях.

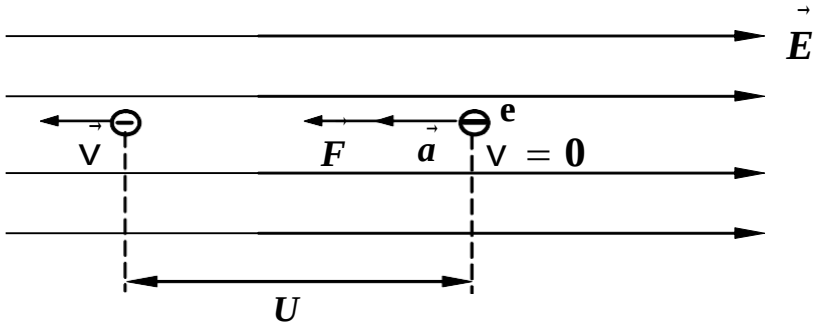


Рис. 4. Движение электрона в однородном электрическом поле

В электрическом поле напряжённостью E (рис .4) на электрон действует сила

$$F = e \cdot E, \qquad (2.9.1)$$

которая сообщает электрону ускорение a и направлена против поля.

Под действием этой силы электрон, пройдя расстояние между точками с разностью потенциалов U, приобретает кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \qquad (2.9.2)$$

Движение электрона в однородном магнитном поле происходит под действием силы Лоренца

$$F = e \cdot [\vec{v} \times B], \qquad (2.9.3)$$

где v – вектор скорости электрона; B – вектор индукции

магнитного поля; e – заряд электрона.

Сила Лоренца F перпендикулярна как скорости электрона, так и направлению магнитного поля. Она не меняет модуля скорости и кинетической энергии частицы.

Модуль силы Лоренца

$$F = e \cdot v \cdot B \sin \alpha, \qquad (2.9.4)$$

где α – угол между векторами v и B.

Сила Лоренца сообщает электрону нормальное (центростремительное) ускорение и вызывает движение его по окружности радиуса R, если угол α составляет 90^o (рис. 5). Таким образом, по второму закону Ньютона:

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m v^2}{R}, \qquad (2.9.5)$$

откуда радиус окружности

$$R = \frac{v}{(e/m) \cdot B}. \qquad (2.9.6)$$

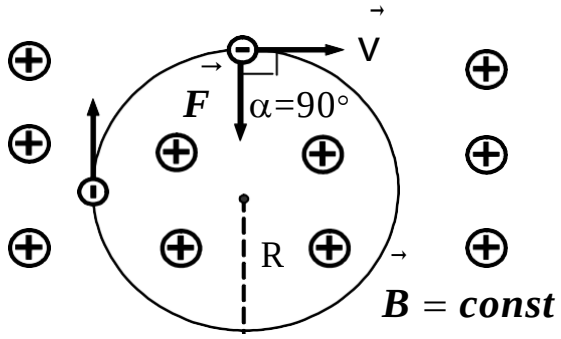


Рис. 5. Движение электрона в однородном магнитном поле

Из формулы (2.9.6) видно, что радиус окружности зависит от удельного заряда e/m. Этот факт и положен в основу метода определения удельного заряда с помощью магнетрона.

Магнетрон представляет собой высоковакуумную электронную трубку, имеющую прямую металлическую нить (катод), расположенную по оси цилиндрического анода.

Для нашей работы магнетрон с успехом можно заменить обычной электронной лампой с цилиндрическим анодом, на оси которого расположен катод (рис. 6, а). Лампа помещается внутри длинного соленоида, при помощи которого параллельно оси создаётся магнитное поле напряжённостью B.

Катод нагревается электрическим током и испускает электроны, которые под действием электрического поля движутся к

аноду. Когда магнитное поле отсутствует, электроны движутся по радиусам цилиндрического анода (рис. 6 б, линия 1).

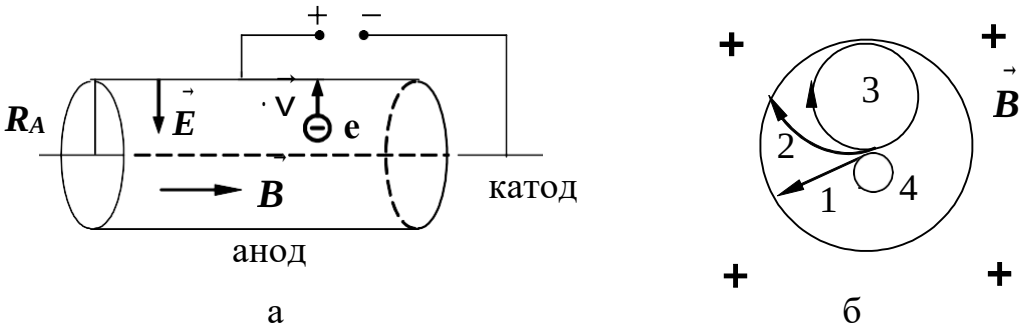


Рис. 6. Схема магнетрона

Если включить магнитное поле, траектория движения искривляется, и тем больше, чем сильнее поле (рис. 6, б, линия 2). Все электроны достигают анода, и величина анодного тока в цепи практически не изменяется до определённого момента, когда при дальнейшем увеличении магнитного поля радиус траектории всё больше уменьшается и при некотором критическом значении $B_{кр}$, электроны, не достигнув анода, вернутся обратно к катоду (рис. 6, б, линия 3).

При выполнении условия $B > B_{кр}$ электроны уже не будут попадать на анод, и ток станет равен нулю (рис. 6, б, линия 4).

На рис. 7 приведен график зависимости анодного тока I_A от индукции магнитного поля B при некотором анодном напряжении U_A (сбросовая характеристика магнетрона).

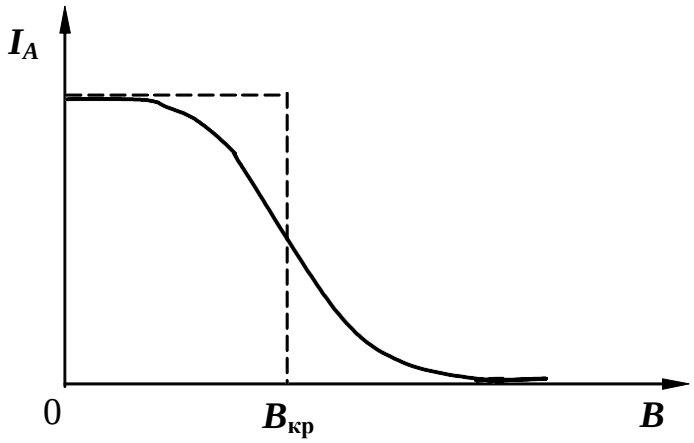


Рис. 7. Сбросовая характеристика магнетрона

Если бы все электроны, вылетающие из катода, имели одну и ту же скорость, анодный ток I_A спадал бы до нуля точно при критическом значении $B_{кр}$ индукции магнитного поля (рис. 7, штриховая линия). Однако скорости вылетевших электронов разные, поэтому уменьшение тока происходит на довольно протяжённом участке вблизи $B_{кр}$ (рис. 7, сплошная линия).

Критическое значение индукции магнитного поля является

некоторой функцией анодного напряжения U_A. Эту зависимость легко установить, если предположить, что скорость электрона при его движении в магнетроне остаётся постоянной по модулю. При $B = B_{кр}$, радиус окружности, по которой движется электрон, равен $R_A/2$, где R_A – радиус анода. Подставляя его в уравнение (2.9.6), получим:

$$\frac{R_A}{2} = \frac{v}{(e/m)\cdot B}. \qquad (2.9.7)$$

Решая совместно уравнения (2.9.2) и (2.9.7), получим формулу для расчёта удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\cdot U_A}{R_A^{\,2}\cdot B_{кр}^{\,2}}, \qquad (2.9.8)$$

где U_A — разность потенциалов между катодом и анодом.

Индукция магнитного поля в соленоиде может быть рассчитана по закону Био - Савара - Лапласа или по теореме о циркуляции индукции магнитного поля по замкнутому контуру

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{\ell} \cdot I_{сол}, \qquad (2.9.9)$$

где ℓ – длина соленоида; N – число витков соленоида; $I_{сол}$ — сила тока, протекающего через соленоид (сила намагничивающего тока); $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Критическому значению индукции магнитного поля $B_{кр}$ соответствует критическое значение силы тока $I_{кр}$. Учитывая это и подставляя (2.9.7) в (2.9.8), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8\cdot U_A\cdot \ell^2}{R_A^{\,2}\cdot \mu_0^{\,2}\cdot N^2\cdot I_{кр}^{\,2}}. \qquad (2.9.10)$$

При выводе (2.9.10) предполагалось, что электрическое и магнитное поля действуют на электрон по очереди, сначала он в электрическом поле разгоняется до скорости v, а затем с этой постоянной скоростью движется в магнитном поле.

В рассматриваемом случае электрон движется в скрещенных магнитном и электрическом полях и одновременно испытывает действие сил со стороны обоих полей. Вследствие этого, скорость электрона не постоянна (она возрастает по мере приближения к аноду), а траектория его движения отличается от круговой. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что формула (2.9.10) не точна. Тем не менее, как следует из результатов точного анализа

рассматриваемой задачи, эта формула в целом удовлетворительно описывает физику процессов и с точностью до коэффициента пропорциональности является правильной.

Окончательная расчётная формула имеет вид:

$$\frac{e}{m} = A \cdot \frac{8 \cdot U_A \cdot \square^2}{R_A{}^2 \cdot \mu_0{}^2 \cdot N^2 \cdot I_{кр}{}^2}, \qquad (2.9.11)$$

где $\square = 0{,}1$ *м*; $N = 1000$ витков; $R_A = 5$ мм; A – коэффициент, учитывающий отличие реальной траектории движения электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях от окружности. Для нашей экспериментальной установки $A=1{,}3$.

Тщательные измерения удельного заряда и известное из опытов Милликена (1909 г.) значение величины заряда электрона позволили определить его массу и установить зависимость массы от скорости.

В принципе теми же методами определяются массы атомов и молекул. Соответствующие приборы для определения масс атомов и молекул (точнее, их ионов) носят название масс-спектрографов. Для примера можно рассмотреть принципиальное устройство одного из масс-спектрографов (рис. 8).

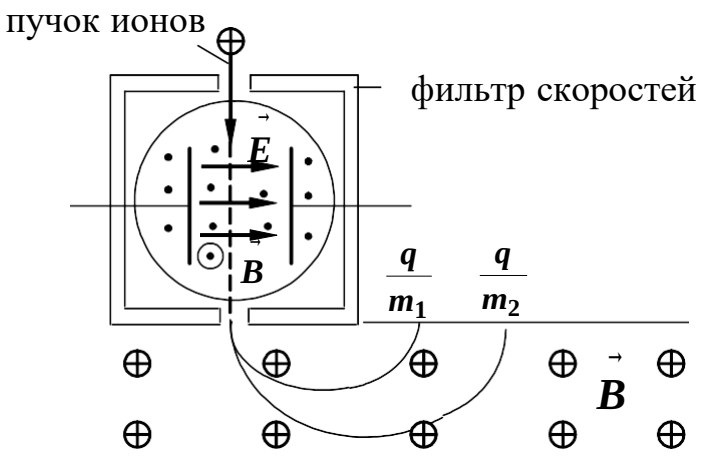


Рис. 8. Принципиальная схема масс-спектрографа

Сначала пучок ионов проходит через фильтр скоростей, в котором на движущиеся ионы одновременно действуют взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля. Направления полей выбираются так, чтобы силы, действующие на ионы с их стороны, были противоположны по направлению. Через щель фильтра, противоположную входной, выходят только те ионы, на

которые действуют равные по величине силы $\boldsymbol{F_E}$ и $\boldsymbol{F_B}$.

$$\boldsymbol{q \cdot E = q \cdot v \cdot B.} \qquad (2.9.12)$$

Следовательно, из фильтра вылетают ионы одинаковых скоростей

$$v = \frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{B}}. \qquad (2.9.13)$$

При выходе из фильтра частицы попадают в магнитное поле, перпендикулярное их скорости. Траектория их движения — окружность, радиус которой зависит от удельного заряда частицы

$$\boldsymbol{R} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{q}} \cdot \frac{v}{\boldsymbol{B}} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{q}} \cdot \frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{B^2}}. \qquad (2.9.14)$$

Попадая на фотопластинку, ионы оставляют след, расстояние которого от выходной щели фильтра зависит от удельного заряда ионов.

По найденным значениям $\boldsymbol{q/m}$ можно определить массы ионов.

В наши дни точность определения масс ионов с помощью масс-спектрографов достигают 6 —8 значащих цифр (правда, не в граммах, а по отношению к массе эталонного атома).

Масс-спектрографические методы позволяют проводить количественный анализ нефти, состоящий из молекул различных углеводородов, трудно различимых обычными химическими способами. При большой мощности ионного пучка этот метод позволяет разделять изотопы в заметных количествах.

Масс-спектрографический метод часто применяют для определения изотопного состава исследуемого вещества. В частности, он был применён при исследовании лунного грунта. Близость изотопного состава земных и лунных пород свидетельствует об одновозрастности и единстве происхождения земного и лунного вещества. По-видимому, это следует распространить и на другие космические тела солнечной системы. Исследования вещества метеоритов не противоречат такому обобщению.

Масс-спектрографы нашли широкое применение в различных областях физики, химии, техники. Они используются для определения содержания примесей в газах, для анализа состава и процентного содержания различных смесей углеводородов и т. д.

Выполнение работы

Необходимые приборы: лабораторный стенд, внутри которого

смонтированы все элементы схемы; цифровой вольтметр (или осциллограф).

На рис. 9 приведена схема экспериментальной установки, которая технически реализована на лабораторном стенде с возможностью самостоятельно вручную и с управлением от внешних источников изменять параметры эксперимента.

Экспериментальная установка состоит из трёх цепей.

Цепь намагничивающей катушки состоит из соленоида, создающего однородное магнитное поле при подключении к нему источника постоянного тока $\mathcal{E}_3$, регулятора тока с внутренним и внешним управлением (коммутация осуществляется тумблером S_1) и низкоомного резистора $R_5 = 1$ Ом, предназначенного для контроля силы тока $I_{сол}$ в соленоиде по величине напряжения на этом сопротивлении.

Анодная цепь состоит из электронной лампы *Л*, источника постоянного тока $\mathcal{E}_1$, делителя напряжения на резисторах R_2, R_3, R_4 и последовательно включенного резистора R_1 = 1кОм, предназначенного для контроля силы тока в анодной цепи I_A, по величине напряжения на этом резисторе.

Цепь накала включает в себя нитевидный катод *К* лампы *Л*, источник тока $\mathcal{E}_2$ и тумблер S_2 , отключающий его.

Порядок выполнения работы

1. Замкните цепь накала тумблером S_2 (на стенде на линии “катод” загорается светодиод) и дайте лампе прогреться 3 – 5 минут. Тумблер S_1 поставьте в положение **“ручное управление регулятора тока”**.

2. Чтобы определить **намагничивающий ток $I_{сол}$** , необходимо замкнуть клеммы 9-10, вольтметр подключить к резистору R_5 **=1 Ом** (клеммы 11-12). Снимите значения $I_{сол}$ при положениях переключателя S_3 от **0** до **9** (при этом ток получается в амперах).

3. Соберите анодную цепь, подав на анод максимально возможное напряжение U_1 (соедините перемычкой клеммы 4-5).

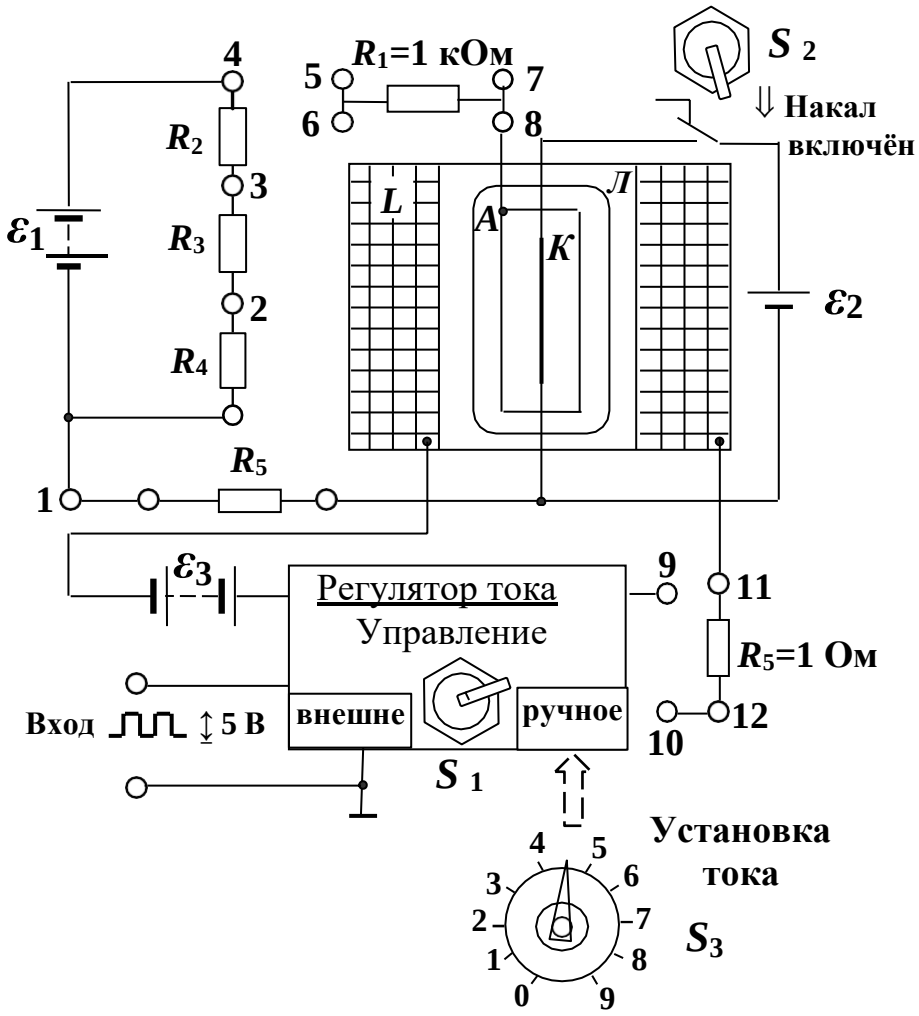


Рис. 9. Схема экспериментальной установки

4. **Анодный ток I_A**, определяют по величине падения напряжения на резисторе R_1**=1 кОм** (для чего вольтметр подключают к клеммам 6-8), при этом ток получается в мА. Первое измерение анодного тока производят при отсутствии намагничивающего тока $I_{сол}$ **= 0,0**, т. е. цепь соленоида (клеммы 9-10) разомкнута, что соответствует прочерку (“–”) в первой строке S_3 табл. 9.1.

5. Затем замыкают цепь намагничивающей катушки, соединив перемычкой клеммы 9-10. Ток соленоида устанавливают дискретно с помощью переключателя S_3 от 0-го до 9-го положения, записывая значения I_A в табл. 9.1.

6. Опыт повторите при других значениях анодного напряжения: U_2 (соединены клеммы 5-3) и U_3 (соединены клеммы 5-2).

7. Значения анодных напряжений U_1, U_2, U_3 измерить вольтметром (клеммы 1-6), при этом переключатель **“ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЙ”** вольтметра переключить в положение **100**. Напряжения U_1, U_2, U_3 подавать на анод с помощью перемычки, как в пунктах 3, 6. Результаты занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Результаты измерений

№	Намагничивающий ток	Анодное напряжение, В		
		U_1=	U_2 =	U_3 =
S_3	$I_{сол}$, А	Анодный ток I_A, мА		
—	0,0			
0				
1				
2				
...				
8				
9				

8. На основании экспериментальных значений постройте сбросовые характеристики (рис. 7). Учитывая, что $B \sim I_{сол}$, а в расчётную формулу необходимо подставить найденное из опыта значение $I_{кр}$, удобно построить график зависимости анодного тока не от индукции поля B, а от силы намагничивающего тока $I_A = f(I_{сол})$.

По графикам найдите три значения критического тока $I_{кр}$, которые соответствуют максимальной крутизне зависимостей $I_A = f(I_{сол})$. Эти значения подставьте в формулу (2.9.11), вычислите три значения удельного заряда электрона, найдите среднее значение и среднюю абсолютную погрешность измерений.

Окончательный результат запишите в виде:

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m}\right)_{ср} \pm \Delta\left(\frac{e}{m}\right)_{ср} . \qquad (2.9.15)$$

Сравните полученный результат с табличным значением и

сделайте выводы.

Снятие сбросовой кривой по точкам (т. е. дискретно изменяя условия эксперимента) можно производить и с помощью осциллографа, включенного в режим изображения функциональных зависимостей между двумя сигналами (фигур Лиссажу). Для этого на осциллографе **С1 – 83** необходимо установить переключатели режима работы усилителей и канала синхронизации в положение ***«X-Y»***, а входы усилителей в режим измерения постоянных значений напряжений (переключатели режимов работы входов усилителей обоих каналов в положение **«~»**, т. е. «открытый вход»). В таком режиме работы осциллографа цена деления шкалы электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) по оси ***X*** определяется положением аттенюатора (переключателя) первого канала, а по оси ***Y*** —второго канала. Первый канал подключается к резистору $\boldsymbol{R_5}$, напряжение на котором пропорционально модулю индукции магнитного поля в соленоиде, а второй канал к резистору $\boldsymbol{R_1}$, напряжение на котором пропорционально силе тока в анодной цепи лампы.

Аналогичные измерения проводят ещё для двух значений анодных напряжений, устанавливаемых путём коммутации (замыкания перемычкой) резисторов $\boldsymbol{R_2}$, $\boldsymbol{R_3}$, $\boldsymbol{R_4}$.

Сбросовые характеристики можно наблюдать непосредственно на экране осциллографа, если регулятор тока переключить в режим дискретного изменения тока с подключением к его входу управления внешнего или встроенного в лабораторном стенде генератора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется удельным зарядом электрона?
2. Какая сила действует на электрон в электрическом поле?
3. Какая сила действует на электрон, движущийся в магнитном поле?
4. Выведите формулу для радиуса кривизны электрона, движущегося в однородном магнитном поле.
5. Какой вид может принимать форма траектории электрона при разных значениях индукции магнитного поля в магнетроне.
6. Что собой представляет сбросовая характеристика магнетрона?
7. Какова методика определения $\boldsymbol{B_{кр}}$?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1974. 336 с.

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978. 480 с.

Трофимова Т. И. Курс общей физики: М.: Высшая школа, 1985. 432 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.10

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы

Целью работы является изучение колебательных процессов, наблюдаемых в электрической цепи на примере работы колебательного контура.

Краткая теория

Колебательным контуром называется электрическая цепь, содержащая катушку индуктивности ***L*** и конденсатор ***C***. В такой цепи могут возбуждаться электромагнитные колебания.

Если в любом колебательном контуре возбудить свободные электрические колебания, то через некоторое время эти колебания прекратятся. Это связано с тем, что часть запасённой в колебательном контуре энергии затрачивается на разогрев проводников. Другая часть энергии непрерывно расходуется на создание электромагнитного излучения, унося эту энергию в окружающее пространство. Потери энергии колебательного контура, связанные с нагревом проводников, значительно больше потерь энергии, связанных с излучением. Однако если изготовить колебательный контур из сверхпроводящих материалов, излучение будет являться основной причиной затухания свободных электрических колебаний в таком контуре.

Для создания и поддержания электрических колебаний в колебательном контуре, к нему нужно непрерывно подводить энергию от внешнего источника. В такой цепи через некоторое время установятся так называемые стационарные вынужденные колебания, частота которых будет равна частоте вынуждающего напряжения, а фазовые и амплитудные соотношения напряжений и токов для различных элементов колебательного контура будут зависеть от параметров электрической цепи и параметров вынуждающего колебания.

Поскольку любая электрическая цепь обладает активным сопротивлением, индуктивностью и электроёмкостью, то изучение характера вынужденных колебаний в такой простейшей системе, как колебательный контур, представляет большой практический интерес.

На рис. 10 схематически показан последовательный колебательный контур. Вынуждающая электродвижущая сила (ЭДС) $E(t)$ изменяется во времени по закону:

$$E(t) = E_0 \cdot \cos(\omega t), \qquad (2.10.1)$$

где E_0 — амплитуда вынуждающей ЭДС; ω — циклическая частота; t — время.

$$\omega = 2\pi \cdot f,$$

где f — частота воздействующего напряжения.

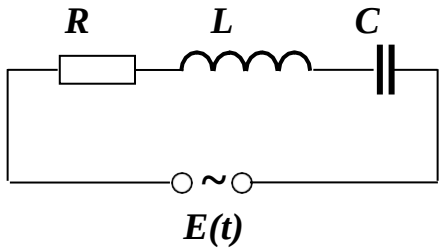


Рис. 10. Электрическая цепь колебательного контура

Если в колебательном контуре протекает ток, то согласно закону сохранения энергии можно записать: $U_R = E_L + E(t) — U_C$.

По закону Ома для участка цепи $U_R = I \cdot R$, по закону Фарадея для явления самоиндукции $E_L = -L\frac{dI}{dt}$, а также с учётом определений индуктивности $L = \Phi/I$ и электрической ёмкости $C = q/U_C$, при $L = const$ и $C = const$ получим:

$$I \cdot R + \frac{q}{C} = -L\frac{dI}{dt} + E_0 \cos(\omega \cdot t). \qquad (2.10.2)$$

Учитывая, что сила тока по определению $I = dq/dt$, преобразуем полученное уравнение к виду дифференциального неоднородного уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dq}{dt} + \omega_0{}^2 q = \frac{E_0}{L}\cos(\omega t), \qquad (2.10.3)$$

где I, U_R, U_C, q —мгновенные значения силы тока в цепи, напряжения на резисторе, разности потенциалов на конденсаторе, заряда конденсатора соответственно; R —суммарное электрическое сопротивление всех элементов цепи; β — коэффициент затухания, равный $R/2L$, ω_0 —частота собственных незатухающих колебаний:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Как известно, решение этого уравнения представляет собой сумму общего решения однородного уравнения

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \cdot \frac{dq}{dt} + \omega_0{}^2 q = 0, \qquad (2.10.4)$$

описывающего переходный процесс, и частного решения уравнения (2.10.3), описывающего установившиеся стационарные колебания.

Общее решение однородного уравнения (2.10.4) соответствует затухающим колебаниям:

$$q = q_m \exp(-\beta t)\cos(\Omega t + \alpha), \qquad (2.10.5)$$

где q_m —заряд конденсатора в начальный момент времени $t = 0$, Ω — циклическая частота свободных затухающих колебаний.

Поскольку в выражении (2.10.5) присутствует экспоненциальный множитель $\exp(-\beta t)$, который за достаточно короткое время становится очень малым, то общим решением однородного дифференциального уравнения можно пренебречь.

Частное решение уравнения (2.10.3) имеет вид:

$$q = q_m \cos(\omega t + \psi), \qquad (2.10.6)$$

Подставляя (2.10.6) в (2.10.3), получим:

$$q_0 = \frac{E_0}{L \cdot \sqrt{(\omega_0{}^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \qquad (2.10.7)$$

$$tg\,\psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0{}^2 - \omega^2}. \qquad (2.10.8)$$

С учётом значений ω_0 и β формулы (2.10.7) и (2.10.8) могут быть записаны следующим образом:

$$q_0 = \frac{E_0}{\omega \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \qquad (2.10.9)$$

$$tg\,\psi = \frac{-R}{(1/\omega C) - \omega L} = \frac{R}{\omega L - (1/\omega C)}. \qquad (2.10.10)$$

Таким образом, установившиеся вынужденные колебания в колебательном контуре описываются уравнением (2.10.6).

В установившемся режиме для разности потенциалов на обкладках конденсатора можно записать:

$$U_C = \frac{q}{C} = U_{C0} \cdot \cos(\omega t + \psi), \qquad (2.10.11)$$

где

$$U_{C0} = \frac{E_0}{LC \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}. \qquad (2.10.12)$$

Величина U_C это амплитуда колебаний разности потенциалов и она численно совпадает с амплитудой колебаний напряжения на конденсаторе. Заметим, что в цепях с переменными токами также выполняется закон Ома:

$$I = \frac{U}{Z},$$

где I, U и Z — мгновенные значения тока, напряжения и полного сопротивления (импеданса) являются функциями комплексного переменного.

Из (2.10.12) видно, что $\Delta\varphi_{C0} = U_{C0}$ существенно зависит от частоты колебаний вынуждающей ЭДС. При приближении к некоторому, определённому для данного колебательного контура, значению ***амплитуда колебаний U_C резко возрастает***. Это явление называется ***резонансом напряжения***, а соответствующая частота $\omega_{рез}$ ***резонансной частотой***.

Чтобы определить резонансную частоту $\omega_{рез}$, нужно найти максимум функции (2.10.12) или минимум выражения, стоящего под корнем в знаменателе. Продифференцировав эту функцию по ω и приравняв её нулю, получим уравнение:

$$-4\omega(\omega_0^2 - \omega^2) + 8\beta^2\omega = 0. \qquad (2.10.13)$$

Это уравнение имеет несколько корней. Значение $\omega = 0$ соответствует постоянному (не изменяющемуся во времени) воздействию на колебательную систему и потому в рассматриваемом случае интереса не представляет. Сократив на ω (и полагая, что $\omega \neq 0$) запишем уравнение:

$$-4(\omega_0^2 - \omega^2) + 8\beta^2 = 0, \qquad (2.10.14)$$

имеющее два решения относительно ω:

$$\omega = \pm\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}, \qquad (2.10.15)$$

из которых физический смысл имеет лишь положительное значение. Следовательно, резонансная частота имеет одно значение

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = 2\pi \cdot f_{рез} \qquad (2.10.16)$$

Явление резкого возрастания амплитуды напряжения на конденсаторе вынужденных колебаний U_C при приближении частоты вынуждающей ЭДС к частоте $\omega_{рез}$ называется ***резонансом*** напряжения.

Подставляя (2.10.16) в (2.10.12) получим выражение для амплитуды колебаний разности потенциалов на обкладках конденсатора при резонансе

$$U_{C\,0\,рез} = \frac{E_0}{2LC\beta \cdot \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad . \qquad (2.10.17)$$

График зависимости амплитуды напряжения на конденсаторе U_{C0} от частоты ω (или f) также называется ***амплитудно-частотной характеристикой*** (АЧХ) или ***резонансной кривой***. Резонансные кривые изображены на рис.2.10.2. При $f \to 0$ все резонансные кривые сходятся в одной точке с ординатой U_{C0} (при $\omega \to 0$), равной E_0. Максимум при резонансе получается тем выше и острее, чем меньше коэффициент затухания β, то есть чем меньше активное сопротивление R и больше индуктивность L контура.

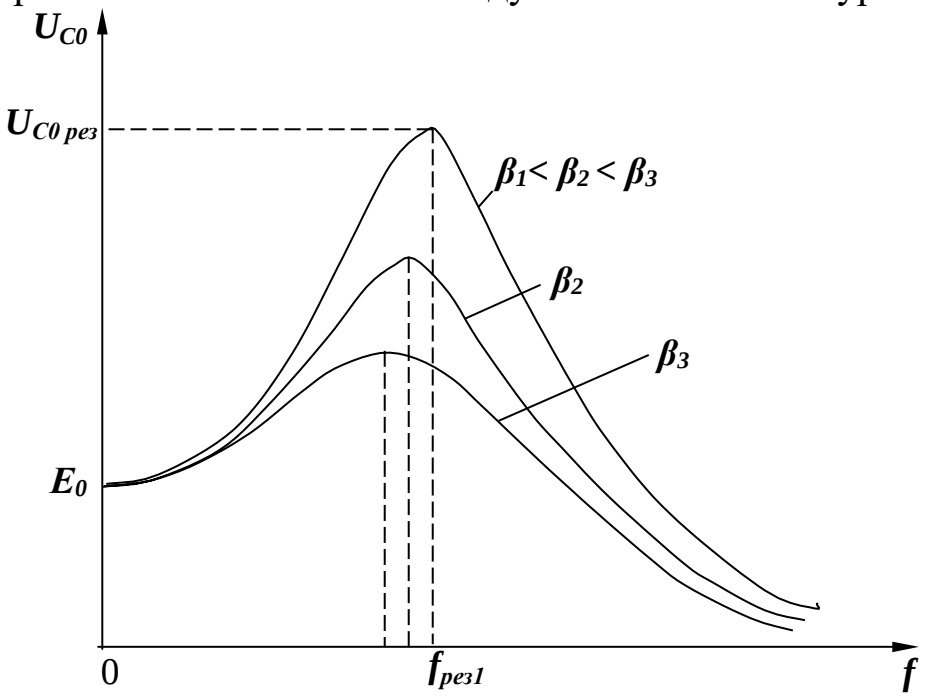


Рис. 11. Вид резонансных кривых при различных значениях коэффициента затухания.

Одной из важнейших характеристик колебательной системы является её добротность.

Добротностью колебательной системы называется безразмерная физическая величина Q, равная произведению 2π на

отношение энергии ***W(t)*** колебаний системы в произвольный момент времени ***t*** к убыли этой энергии за один период ***T*** собственных затухающих колебаний.

$$Q = 2\pi \cdot \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}. \qquad (2.10.18)$$

Чем меньше потери энергии системы, тем выше её добротность.

Поскольку энергия ***W(t)*** пропорциональна квадрату амплитуды колебаний, то

$$Q = \frac{2\pi}{1 - \frac{W(t+T)}{W(t)}} = \frac{2\pi}{1 - \exp(-2\beta t)}. \qquad (2.10.19)$$

При слабом затухании колебаний, когда $\beta^2 << \omega_0^2$, период T собственных затухающих колебаний практически равен периоду T_0 собственных колебаний, $\beta T_0 << 1$, $\exp(-2\beta T_0) \approx 1 - 2\beta T_0$ и добротность системы

$$Q = \frac{\pi}{\beta \cdot T_0} = \frac{\pi}{\lambda} \qquad (2.10.20)$$

где λ — логарифмический декремент затухания (см. 2.10.11).
В этом случае добротность колебательного контура может быть вычислена по формуле

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (2.10.21)$$

Добротность колебательного контура можно оценить и по его резонансной кривой. Из (2.10.17) следует, что

$$\frac{U_{C0\,рез}}{U_{C0}(\omega \to 0)} = \frac{1}{2LC\beta \cdot \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}, \qquad (2.10.22)$$

или при слабом затухании, когда $\beta^2 << \omega_0^2$

$$\frac{U_{C0\,рез}}{U_{C0}(\omega \to 0)} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (2.10.23)$$

Сравнивая выражения (2.10.21) и (2.10.23), находим добротность, как

$$Q = \frac{U_{C0\,рез}}{U_{C0}(\omega \to 0)}. \qquad (2.10.24)$$

Таким образом, ***добротность колебательного контура***

показывает, во сколько раз амплитуда колебаний разности потенциалов на обкладках конденсатора при резонансе превышает амплитуду колебаний ЭДС источника тока.

Аналогичный анализ можно сделать для колебаний силы тока в контуре

$$I = \frac{dq}{dt} = q_0 \omega \cdot \sin(\omega t + \psi) = \\ = I_0 \cos(\omega t + \psi + \pi/2) = I_0 \cos(\omega t + \psi_1) \quad , \qquad (2.10.25)$$

где

$$\psi_1 = arctg \frac{(1/\omega C) - \omega L}{R}, \qquad (2.10.26)$$

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} . \qquad (2.10.27)$$

Резонанс токов наблюдается в последовательном колебательном контуре, если

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \cdot \qquad (2.10.28)$$

Этому условию удовлетворяет частота собственных незатухающих (совершаемых в отсутствие потерь) колебаний

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (2.10.29)$$

Сдвиг фазы ψ_1 вынужденных колебаний тока по отношению к колебаниям вынуждающей ЭДС определяет характер полного сопротивления контура на произвольной частоте колебаний. Электрическое сопротивление контура является комплексной величиной:

$$Z = R + jX,$$

где R — активное сопротивление (омическое сопротивление проводников), X — реактивное сопротивление, $j = +\sqrt{-1}$.

Модуль комплексного сопротивления представляет собой полное сопротивление цепи:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} .$$

Реактивное сопротивление можно определить как разность между индуктивным, и ёмкостным сопротивлениями:

$$X = (\omega L - 1/\omega C) .$$

Таким образом, согласно условию (2.10.28), резонанс токов

наступает при равенстве индуктивного и ёмкостного сопротивлений, при этом полное сопротивление контура равно активному сопротивлению $\boldsymbol{R}$, а сдвиг фазы $\boldsymbol{\psi_1}$ обращается в нуль, что следует из формулы (2.10.26).

На практике сдвиг фазы $\boldsymbol{\psi_1}$ (или $\boldsymbol{tg\ \psi_1}$) исследуют в зависимости от частоты вынуждающей ЭДС. Такие зависимости называются ***фазово-частотными характеристиками*** (ФЧХ). Они определяют характер поведения (реактивность) полного сопротивления колебательного контура, т. е. дают представление о том, какой характер сопротивления: индуктивный, ёмкостной или активный преобладает на данной частоте.

Резонансные методы используются для изучения свойств горных пород, например для определения относительной диэлектрической проницаемости ε . Для этого исследуемый образец вводят в конденсатор колебательного контура, изучают резонансные кривые до и после внесения диэлектрика и по добротности контура и его резонансной частоте определяют ε .

В процессе экспериментального исследования АЧХ последовательного колебательного контура с различными значениями сопротивлений потерь необходимо сравнить полученные резонансные кривые, отметить резонансные частоты, оценить добротность контура для каждого случая.

Выполнение работы

Необходимые приборы: лабораторный стенд, внутри которого смонтированы все элементы схемы; двухканальный осциллограф **С1-83**, генератор периодических сигналов **Г3 -112** и комбинированный прибор **В7-16А**.

На рис. 12 приведена схема экспериментальной установки, которая включает в себя лабораторный стенд и контрольно-измерительные приборы. Колебательный контур, необходимый для исследования, можно собрать из отдельных элементов на лабораторном стенде. На стенде для изменения добротности контура имеется набор резисторов, величины которых следует измерить комбинированным прибором **В7-16А**.

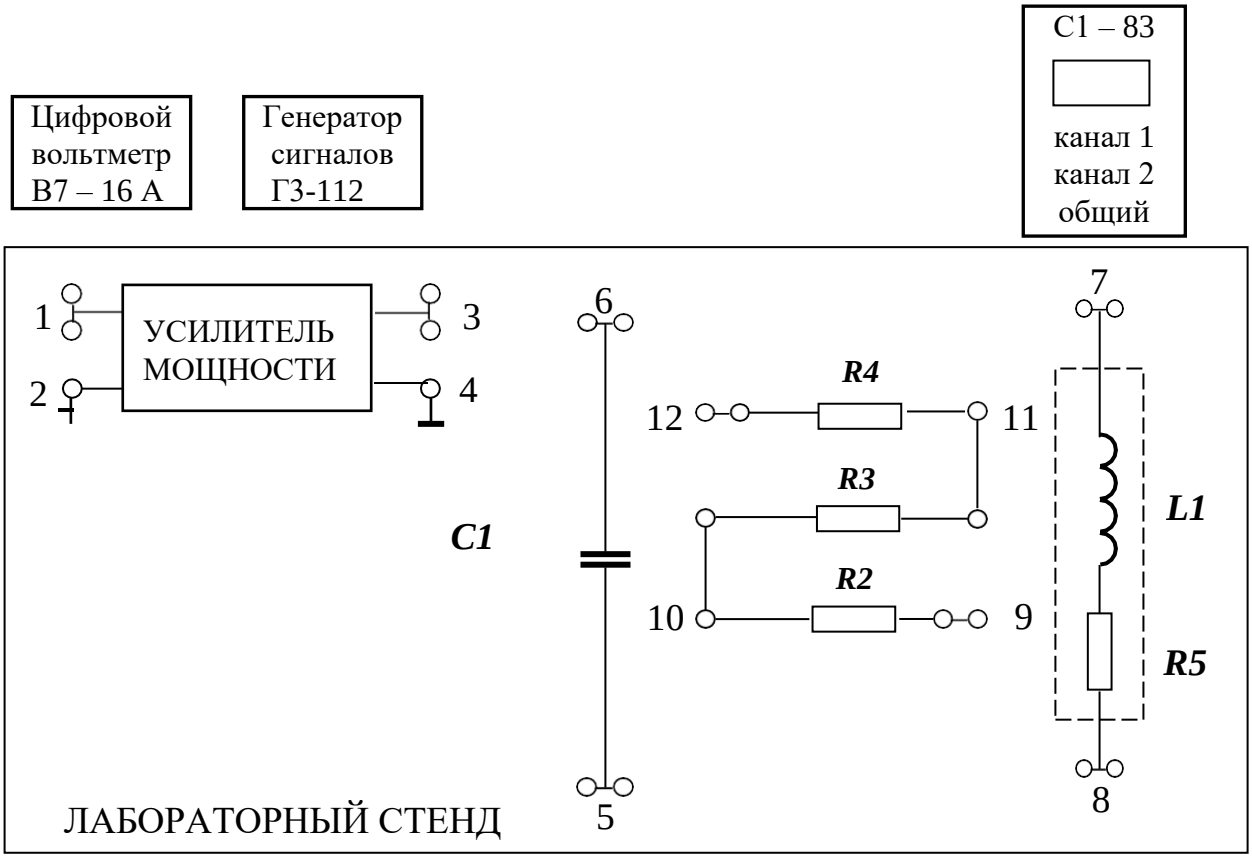


Рис. 12. Схема экспериментальной установки

Снятие амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) контура

Порядок выполнения работы

1. Подключить низкочастотный генератор **Г3-112** на вход усилителя мощности (клеммы 1-2), рис. 12.

2. Собрать схему последовательного колебательного контура, для чего к выходу усилителя мощности последовательно подключается катушка индуктивности ***L1*** и конденсатор ***C1*** (соединить клеммы 3-7, 8-6, 5-4).

3. **I канал** осциллографа подключить к конденсатору ***C1*** (клеммы 5-6), причём таким образом, чтобы заземлённый провод

осциллографа (обычно он чёрного цвета или более длинный) был присоединён к заземлённой пластине конденсатора (клемма 5).

4. После проверки схемы преподавателем включить приборы и стенд. Для данной схемы активное сопротивление минимальное и состоит из выходного сопротивления усилителя мощности, которое равно **75 Ом**.

5. Изменяя частоту ***f*** вынуждающего колебания с помощью генератора и наблюдая изменение амплитуды напряжения на конденсаторе U_C на экране осциллографа, ***добиться явления резонанса*** (максимальной амплитуды напряжения на конденсаторе **С1**). Записать значения резонансной частоты и амплитуды в табл. 10.1 (средняя точка на графике).

6. Уменьшая частоту генератора таким образом, чтобы построенная впоследствии резонансная кривая была информативна (см. методику выбора частот), произвести измерения амплитуды напряжения на конденсаторе (на экране осциллографа).

7. Вернуться к резонансной частоте и повторить п. 5, но в сторону увеличения частоты примерно до 35-40 кГц.

Методика выбора частот.

Выбирать частоты следует таким образом, чтобы вблизи резонансной частоты шаг по частоте был равен 0,5 кГц (3-4 точки), затем 1 кГц (3-4 точки), затем выбрать 2-3 точки вдали от резонансной частоты.

Например: резонансная частота **20,5** кГц. Выбираем следующие значения частот: 0; 10; 13; 16; 17; 18; 19; 19,5; 20; **20,5**; 21; 21,5; 22; 23; 24; 25; 30; 35, 40.

8. Между катушкой индуктивности ***L1*** и конденсатором ***C1*** последовательно включить резистор ***R2*** (убрать перемычку 8-6, соединить клеммы 8-9; 10-6) и повторить пункты 4-6.

9. Включить в схему максимально возможное сопротивление ***R2+R3+R4*** (соединены клеммы 8-9; 12-6) и повторить пункты 4-6.

10. Закончив измерения, выключить приборы, схему разобрать. Включить вольтметр и с его помощью измерить значения сопротивлений ***R2*** (клеммы 9-10) и ***R2+R3+R4*** (клеммы 9-12). При этом переключатель вольтметра “**РОД РАБОТЫ”** поставить в режим измерения сопротивлений **“*R*”** ,а переключатель “**ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЙ**”- в положении **10** (сопротивления получатся в килоомах). Значения сопротивлений потерь записать в табл. 10.1.

$R_{\text{потерь 1}}$ **= 75** Ом**;** $R_{\text{потерь 2}}$ **= 75 + R2** Ом**;**

$R_{\text{потерь 3}} = 75 + (R2 + R3 + R4)$ Ом.

11. Рассчитать добротность контура по формуле (2.10.24) для всех трёх случаев. Результаты занести в табл. 10.1.

12. Построить графики зависимости амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты вынуждающих колебаний.

13. Сделать вывод о влиянии активного сопротивления на добротность контура и характер резонансных кривых.

Таблица 10.1

Результаты исследования АЧХ контура

№ измерения	$R_{\text{потерь 1}}$ = 75 Ом		$R_{\text{потерь 2}}$ = Ом		$R_{\text{потерь 3}}$ = Ом	
	f, кГц	U_C, В	f, кГц	U_C, В	f, кГц	U_C, В
1						
2						
3						
.						
.						
20						
Резонансное значение	f_1 =	U_{Cm1} =	f_2 =	U_{Cm2} =	f_3 =	U_{Cm3} =
Добротность	Q_1 =		Q_2 =		Q_3 =	

.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется колебательным контуром?
2. Почему в реальном колебательном контуре свободные колебания всегда являются затухающими?
3. В чём заключается явление резонанса?
4. Что такое добротность колебательного контура и от чего она зависит?
5. Какая кривая называется резонансной? Как изменяется её вид при увеличении коэффициента затухания?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1974. 336 с.

Калашников С. Г. Электричество. Общий курс физики. М.: Наука, 1985.

576 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Цель работы

Целью данной работы является изучение процесса распространения электромагнитных волн и экспериментальное измерение скорости их распространения в воздухе методом стоячих волн.

Краткая теория

Ещё до того, как электромагнитные волны были впервые получены практически, Максвелл на основе своей теории электромагнитного поля вычислил их скорость. В диэлектрике скорость распространения электромагнитных волн

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_{\mathbf{0}}\mu\mu_{\mathbf{0}}}}, \qquad (2.11.1)$$

где ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды;

$\varepsilon_{\mathbf{0}} = \mathbf{8{,}85 \cdot 10^{-12}}$ Ф/м – электрическая постоянная;

$\mu_{\mathbf{0}} = \mathbf{4\pi \cdot 10^{-7}}$ Гн/м – магнитная постоянная.

В соответствии с формулой (2.11.1) скорости распространения электромагнитных волн в различных средах, в том числе в горных породах, различны, т. к. различны их ε и μ. Поэтому при распространении электромагнитных волн в неоднородной среде, какой является, например, земная кора, возникают разнообразные явления (отражение, преломление, интерференция, дифракция волн) на границах геологических объектов. Изучение связанных с этими явлениями вторичных электромагнитных волн составляет предмет обширной группы методов геофизической разведки – высокочастотной электроразведки. Вторичные электромагнитные волны при этом позволяют получить информацию о форме и взаимном расположении геологических объектов, глубине их залегания и т. д.

В вакууме $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$ и, согласно (2.11.1),

$$\mathrm{v} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\varepsilon_{\mathbf{0}}\mu_{\mathbf{0}}}} = \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{8{,}85 \cdot 10^{-12}} \cdot \mathbf{4\pi \cdot 10^{-7}}}} = \mathbf{3{,}00 \cdot 10^{8}}\ \text{м/с} \qquad (2.11.2)$$

Практически таким же является значение скорости распространения электромагнитных волн в воздухе. Поэтому результат, полученный в данной работе, должен с учётом допущенных при измерениях погрешностей совпадать со значением, рассчитанным в (2.11.2).

Электромагнитные волны – это распространяющиеся колебания электрического и магнитного полей. Если в точке **0** бесконечной однопроводной линии **0X** (рис. 13) электрическое поле изменяется по гармоническому закону, то вдоль оси **0X** с конечной скоростью будет распространяться («побежит») волна напряжённости электрического поля. Согласно законам, выраженным в уравнениях Максвелла, переменное электрическое поле ***E*** в каждой точке оси **0X** будет порождать магнитное поле ***H*** , которое также будет меняться по гармоническому закону. При этом колебания векторов напряженностей электрического поля ***E*** и магнитного поля ***H*** происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях. Из решения уравнений Максвелла также следует, что колебания ***E*** и ***H*** будут происходить в одной фазе, так что в данный момент времени электрическое и магнитное поля будут достигать максимальных значений в одних и тех же точках пространства на оси **0X**.

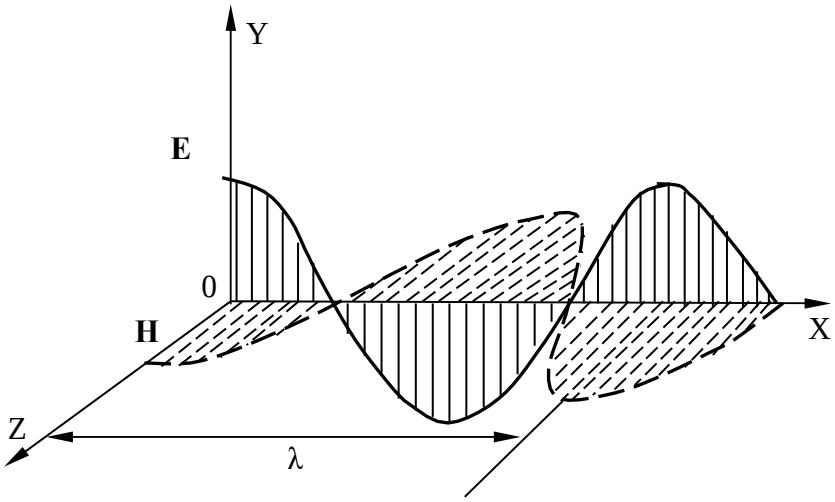


Рис. 13. Бегущая электромагнитная волна

Расстояние между двумя ближайшими точками среды, колебания в которых отличаются по фазе на 2π, называется ***длиной волны*** λ (рис. 13).

Электромагнитные колебания можно возбудить и в двухпроводной линии, в так называемой схеме Лехера, представляющей собой два длинных провода, натянутых параллельно друг другу, в которые через индуктивную связь L_1-L_2 (рис. 14) передаётся энергия колебаний генератора.

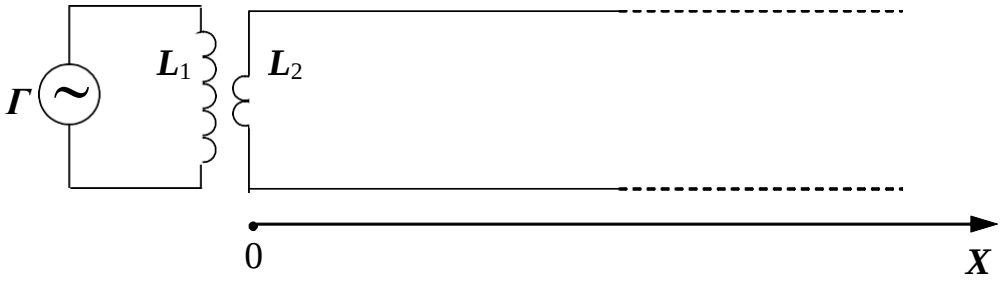


Рис. 14. Схема Лехера.

При включении генератора высокой частоты Γ вдоль линии начинает распространяться электромагнитная волна. При этом в пространстве между проводами вектор напряжённости электрического поля волны направлен от одного провода к другому (плоскость E) и периодически (с частотой генератора) меняет своё направление на обратное. Вектор напряжённости магнитного поля волны колеблется в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой расположены провода (плоскость H), и также периодически изменяет свое направление.

Векторы E и H перпендикулярны направлению скорости v распространения волны и образуют с ним правовинтовую систему.

Внутри проводов течёт переменный ток. Если частота генератора достаточно высока, этот ток вследствие скин-эффекта сосредоточен в тонком цилиндрическом слое на поверхности каждого провода. Пренебрегая потерями энергии на джоулево тепло, выделяющееся в проводах, опишем процесс распространения колебаний E и H уравнениями плоской волны. Рассмотрим прямую бегущую волну E_1 и H_1, распространяющуюся вдоль оси $0X$ (рис. 14). Для проекций векторов E_1 и H_1 на плоскости E и H соответственно запишем

$$E_1 = E_0 \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right],$$

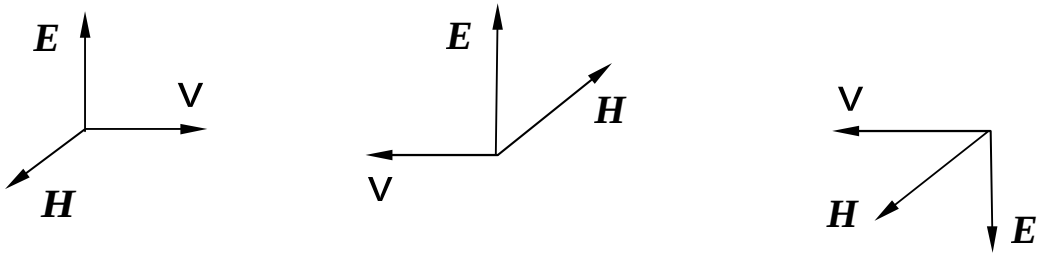
$$H_1 = H_0 \sin\left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{v}\right)\right], \qquad (2.11.3)$$

где E_0 и H_0 – амплитудные значения проекций напряжённостей электрического и магнитного полей; ω – циклическая частота колебаний; x – расстояние данной точки от источника колебаний; v – скорость распространения волны.

При этом x/v – время, на которое запаздывают колебания в точке с координатой x по отношению к колебаниям в точке **0**.

Неоднородность среды является причиной появления отражённой волны. В данном опыте отражение возникает от дальней границы линии.

При возникновении отражённой волны один из векторов, E или H, меняет направление колебаний на противоположное (рис. 15). Фазовые соотношения между колебаниями E и H в падающей и отражённой волнах зависят от условий на границе. В частности, для разомкнутой линии отражение E происходит в той же фазе, что и в падающей волне, а отражение H – в противофазе (рис. 15, *б*). Если линия замкнута на конце, то отражение E будет происходить в противофазе, а отражение H в той же фазе (рис. 15, *в*).



а) б) в)

Рис. 15. Взаимная ориентация векторов напряжённости электрического и магнитного поля до (**а**) и после (**б** и **в**) отражения электромагнитной волны

Явление изменения фазы при отражении можно строго обосновать при помощи уравнений Максвелла, мы же ограничимся простыми качественными рассуждениями.

В нашем случае линия на конце разомкнута. Переменные токи, возникающие в проводах, будут вызывать на конце линии, граничащей с диэлектриком, наибольшие колебания зарядов. Здесь амплитуда колебаний вектора напряжённости электрического поля максимальна. Это значит, что электрическое поле в отражённой волне направлено так же, как и в падающей, т. е. оно не изменяет фазы колебаний при отражении. При этих же условиях амплитуда тока будет равна нулю. Это означает, что магнитное поле в отражённой волне направлено противоположно полю падающей волны или меняет фазу на π. Для проекций векторов напряжённостей электрического $\boldsymbol{E_2}$ и магнитного $\boldsymbol{H_2}$ полей в отраженной волне можно записать:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E}_2 &= \boldsymbol{E}_0 \sin\left[\omega\cdot\left(\boldsymbol{t}+\frac{\boldsymbol{x}}{\mathrm{V}}\right)\right] \\ \boldsymbol{H}_2 &= -\boldsymbol{H}_0 \sin\left[\omega\cdot\left(\boldsymbol{t}+\frac{\boldsymbol{x}}{\mathrm{V}}\right)\right] \end{aligned} \qquad (2.11.4)$$

Знак «плюс» в круглых скобках означает, что отражённая волна распространяется в отрицательном направлении оси **0X**.

Для вычисления результирующих векторов напряжённостей электрического $\boldsymbol{E}$ и магнитного $\boldsymbol{H}$ поля достаточно сложить соответствующие величины в прямой и отражённой волнах. Так, проекция вектора напряжённости результирующего электрического поля будет равна:

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2=\boldsymbol{E}_0\left\{\sin\left[\omega\cdot\left(\boldsymbol{t}-\frac{\boldsymbol{x}}{\mathrm{V}}\right)\right]+\sin\left[\omega\cdot\left(\boldsymbol{t}+\frac{\boldsymbol{x}}{\mathrm{V}}\right)\right]\right\}= \\ =2\boldsymbol{E}_0\cos\left(\omega\frac{\boldsymbol{x}}{\mathrm{V}}\right)\cdot\sin\omega\boldsymbol{t} \qquad (2.15.5)$$

Это ***уравнение стоячей волны*** – уравнение гармонических колебаний напряжённости результирующего электрического поля с амплитудой, зависящей от координаты точки наблюдения $\left(\boldsymbol{x}\right)$

$$2\boldsymbol{E}_0\cos\left(\omega\frac{\boldsymbol{x}}{\mathrm{V}}\right). \qquad (2.11.6)$$

Проекция вектора напряжённости результирующего магнитного поля получается аналогично

$$H = H_1 + H_2 = H_0 \left\{ \sin\left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{v}\right)\right] - \sin\left[\omega \cdot \left(t + \frac{x}{v}\right)\right] \right\} = -2H_0 \cos\left(\omega \frac{x}{v}\right) \cdot \sin \omega t, \quad (2.11.7)$$

где $2H_0 \cos\left(\omega \frac{x}{v}\right)$ – амплитуда колебаний напряжённости результирующего магнитного поля.

В определённых точках двухпроводной линии ***амплитуда напряжённости электрического поля стоячей волны достигает максимума***. Такие точки называются ***пучностями*** стоячей волны, а точки, в которых ***амплитуда колебаний равна нулю***, называются ***узлами*** стоячей волны. Согласно (2.11.6), координаты x пучностей электрического поля определяются из условия:

$$\frac{\omega}{v} \cdot X = \pi \cdot n, \quad (2.11.8)$$

где n – целое число.

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$, а $\frac{v}{f} = \lambda$, где f – частота, а λ – длина волны, получим для координат пучностей выражение:

$$X = n \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (2.11.9)$$

Из этого выражения видно, что расстояние между соседними пучностями равно половине длины волны $\lambda/2$.

Координаты узлов электрического поля определяются, согласно (2.15.6), условием

$$\frac{\omega}{v} \cdot X = (2n + 1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (2.11.10)$$

где n – целое число.

Расстояние между соседними узлами также равно $\lambda/2$. Напряжённость магнитного поля в этих точках максимальная. Таким образом, в стоячей электромагнитной волне узлы электрического поля совпадают с пучностями магнитного поля и наоборот (рис. 16).

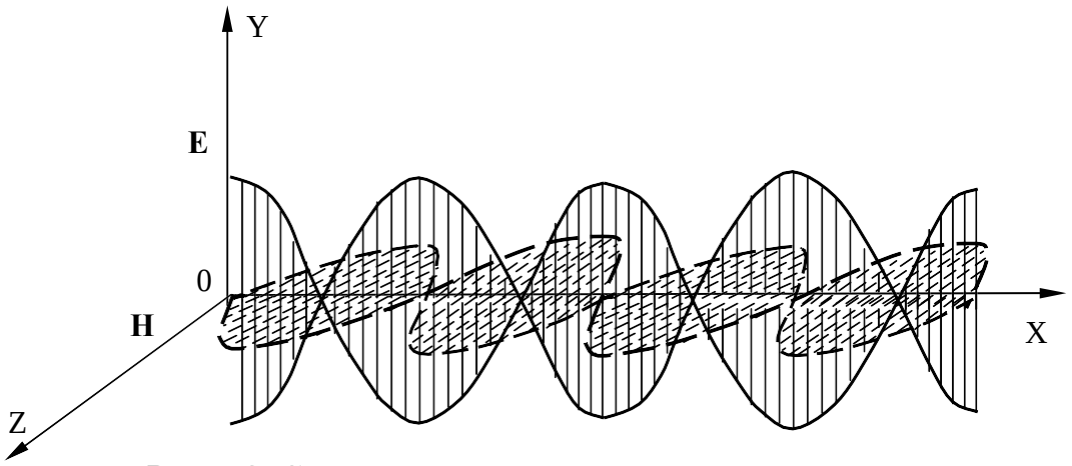


Рис. 16. Стоячие электромагнитные волны

Для экспериментального определения скорости v распространения электромагнитной волны в воздухе с помощью двухпроводной линии достаточно измерить расстояние ΔX между соседними пучностями (или узлами) электрического (или магнитного) поля, вычислить, согласно (2.15.9), длину волны $\lambda = 2 \cdot \Delta X$ и найти скорость v .

В данной работе индикатором пучностей электрического поля служит неоновая лампочка ***Л***, укреплённая на мостике ***М***. Мостик устанавливается на двухпроводную линию перпендикулярно проводам. При перемещении мостика вдоль линии, в местах пучностей лампочка ярко загорается. Вместо неоновой лампочки можно воспользоваться обыкновенной лампочкой накаливания (например, от карманного фонаря), но тогда при перемещении мостика вдоль линии, лампочка накаливания будет загораться в местах узлов стоячей волны электрического поля. Расстояние между пучностями (узлами) измеряется с помощью мерной ленты, натянутой вдоль двухпроводной линии.

Выполнение работы

Необходимые приборы: генератор высокой частоты с датчиком, двухпроводная линия с мерной лентой, частотомер.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 17.

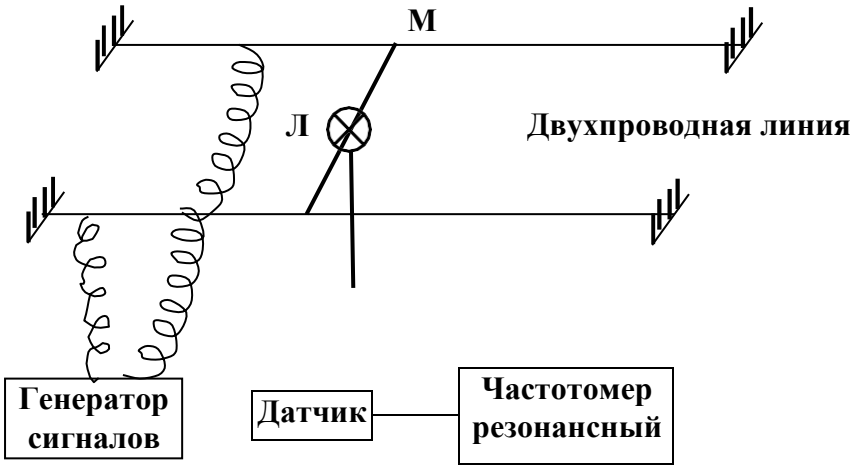


Рис. 17. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Включите генератор ***Г*** в сеть и дайте ему прогреться.

Мостик ***М*** с неоновой лампочкой ***Л*** подвесьте на провода у начала двухпроводной линии. Передвигая мостик вдоль линии, найдите пучности электрического поля по свечению лампочки. Запишите их координаты в нижнюю часть табл. 11.1.

По разности отсчётов определите расстояние между ***соседними*** пучностями ΔX**.** Опыт повторить столько раз, чтобы получилось не менее трёх значений ΔX, каждый раз вычисляя длину волны $\lambda = 2 \cdot \Delta X$. Затем найдите среднее значение длины волны $\bar{\lambda}$.

С помощью резонансного частотомера ***Ч*** с индукционным датчиком ***Д*** измерьте частоту f генератора. Для этого необходимо:

1. Поднести датчик вплотную к генератору.
2. Вращать ручку частотомера до тех пор, пока стрелка амперметра не будет максимально отклоняться. Это означает, что его частота совпала с частотой генератора.
3. Снимите отсчёт по верхней шкале частотомера и запишите в табл. 11.1.

Измерение частоты необходимо провести 3 раза и найти среднее значение $\bar{f}$**.** По результатам измерений вычислите среднее значение скорости распространения электромагнитных волн по формуле:

$$\bar{v} = \bar{\lambda} \cdot \bar{f}$$

Таблица 11.1

Результаты измерений

Номер опыта	ΔX, м	λ, м	$\Delta\lambda$, м	f, МГц	Δf, МГц
1					
2					
3					
Средние значения	$\Delta\overline{X} =$	$\overline{\lambda} =$	$\Delta\overline{\lambda} =$	$\overline{f} =$	$\Delta\overline{f} =$
Координаты пучностей	$X_1 =$	$X_2 =$	$X_3 =$	$X_4 =$	

По результатам измерений вычислите среднее значение скорости распространения электромагнитных волн по формуле:

$$\overline{v} = \overline{\lambda} \cdot \overline{f}$$

Вычислите относительную и абсолютную погрешности определения скорости электромагнитных волн

$$E_v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta f}{f}$$

$$\Delta v = E_v \cdot v .$$

Окончательный результат запишите в виде:

$$v = v \pm \Delta v .$$

Сравните с (2.11.2) и сделайте вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких характеристик среды зависит скорость распространения электромагнитных волн?
2. Как образуется стоячая электромагнитная волна в двухпроводной линии?
3. Записать и пояснить уравнение стоячей волны.
4. Что называется пучностью и узлом стоячей волны?
5. . Каким образом проводится определение длины волны?
6. Расскажите о порядке выполнения работы.

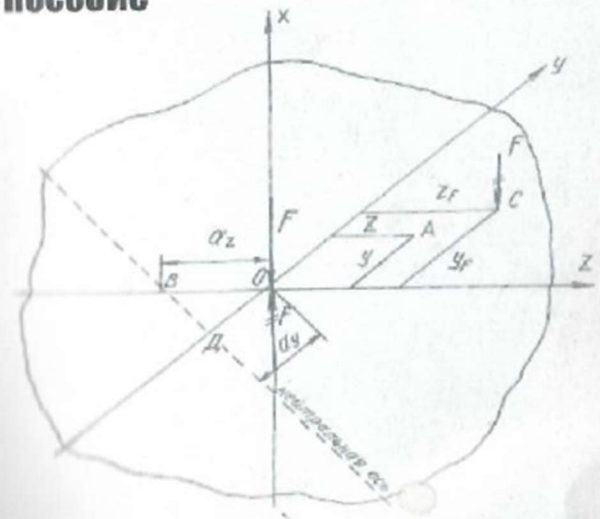
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Калашников С. Г. Электричество. Общий курс физики. М.: Наука, 1985. 576 с.

Физический практикум. Электричество и оптика /Под ред. В. И. Ивероновой. М.: Наука, 1968. 815 с

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие



Екатеринбург - 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Утверждено Редакционно-издательским советом
Уральского государственного горного университета
в качестве учебного пособия

Издание второе, исправленное и дополненное

Екатеринбург – 2012

УДК 620.10
М 74

Рецензенты: Таугер В. М., профессор кафедры мехатроника УрГУПС, канд. техн. наук, доцент; Раевская Л. Т., зав. кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики УГЛТУ, канд. техн. наук, доцент.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

М 74 **Сопротивление материалов в примерах и задачах:** учебное пособие / 2-е изд., испр. и доп. Екатеринбург Н. В. Мокрушин, С. А. Ляпцев, Л. Д. Чучманова, К. В. Середа; Уральский гос. горный университет.– Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2012.– 184 с.
ISBN 978-5-8019-0185-5

Учебное пособие отражает опыт проведения практических занятий по дисциплине «Сопротивление материалов» в Уральском государственном горном университете. В пособии приведены примеры расчетов стержней, валов, балок, испытывающих простые и сложные виды деформаций. Для самостоятельной работы представлены задания по основным темам дисциплины.

Учебное пособие предназначено для студентов очного и заочного обучения.

Рис. 42. Табл. 22. Библ. 21 наим.

УДК 620.10

ISBN 978-5-8019-0185-5

© Уральский государственный
горный университет, 2008, 2012
© Мокрушин Н. В., Ляпцев С. А.,
Чучманова Л. Д., Середа К. В., 2008, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Введение в учебную программу высших технических учебных заведений новых дисциплин, отражающих современное состояние науки и техники, при ограниченных сроках обучения привело к существенному сокращению количества лекционных часов по курсу сопротивления материалов.

Восполнение появившихся в результате этого пробелов в знании студентами вузов сопротивления материалов может быть достигнуто в известной мере за счет самостоятельного изучения ими необходимых разделов этого важного для будущего инженера курса. Данное учебное пособие составлено в соответствии с программой курса по сопротивлению материалов. По каждой теме предмета в пособии даны краткие теоретические сведения и основные формулы. Приведены примеры расчетов стержней на растяжение и сжатие (глава 1), примеры по определению главных моментов инерции поперечных сечений различного профиля (глава 2), рассмотрены примеры расчета вала на кручение (глава 3). В главе 4 рассмотрены примеры расчетов балок, испытывающих деформацию поперечного изгиба, на прочность и жесткость. С применением метода сил в главе 5 приведены примеры расчетов статически неопределимых неразрезных балок и плоских статически неопределимых рам. Виды сложного сопротивления (косой изгиб, внецентренное растяжение и сжатие, изгиб с кручением) рассмотрены в главе 6. Рассмотрение деформации продольного изгиба и расчеты на устойчивость гибких стержней приведены в главе 7.

Более подробное изложение теоретического материала приведено в работах [1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 18].

Для самостоятельного выполнения расчетно-графических работ по каждой теме составлены задания с необходимыми рисунками и таблицами. Для расчетов рекомендуется следующая литература [2, 8, 11, 14, 15, 16].

При выполнении практических расчетов используются следующие основные характеристики материалов [17]:

модули продольной упругости: стали $E_{\text{с}} = 2 \cdot 10^{11}$ Па; дюраля (и алюминия) $E_{\text{д}} = 0,7 \cdot 10^{11}$ Па; меди $E_{\text{м}} = 1 \cdot 10^{11}$ Па; чугуна $E_{\text{ч}} = 1,2 \cdot 10^{11}$ Па; дерева $E_{\text{д}} = 1 \cdot 10^{10}$ Па;

модуль сдвига стали: $G = 0,8 \cdot 10^{11}$ Па;

коэффициенты теплового линейного расширения: стали $\alpha_{\text{с}} = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/град; дюраля $\alpha_{\text{д}} = 2,25 \cdot 10^{-5}$ 1/град; меди $\alpha_{\text{м}} = 1,65 \cdot 10^{-5}$ 1/град;

коэффициент Пуассона для стали: $\nu = 0,30$.

Глава 1

ПРОДОЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ СТЕРЖНЕЙ

Растяжением называют такой вид деформации, при котором в каждом его поперечном сечении возникают только продольные внутренние усилия.

Продольное усилие F в любом поперечном сечении численно равно алгебраической сумме проекций на ось стержня внешних сил, приложенных к части стержня, расположенной по одну сторону от сечения. Усилие считается положительным, если вызывает растяжение рассматриваемого участка.

При растяжении (сжатии) в сечении возникают только нормальные напряжения, которые определяются по формуле (1.1):

$$\sigma = \frac{F}{A}, \tag{1.1}$$

где F – продольное усилие, кН; A – площадь поперечного сечения, м^2.

Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{max} \le \sigma_{adm}, \tag{1.2}$$

где σ_{adm} – допускаемое нормальное напряжение материала стержня, МПа.

Абсолютная деформация Δl однородного участка (постоянные сечение и материал) определяется **по закону Гука**:

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA}\ , \tag{1.3}$$

где l – длина участка, м; E – модуль продольной упругости материала (модуль Юнга), Па.

Для наглядного представления строятся эпюры. Эпюрами продольных сил и нормальных напряжений называют графики, показывающие законы изменения сил и напряжений в поперечных сечениях по длине стержня. Эпюры продольных сил, нормальных напряжений и перемещений поперечных сечений строятся в выбранном масштабе с учетом знаков.

Пример 1.1.

К узлу C кронштейна ABC (рис. 1.1, *а*) приложена сила F = 100 кН. Стержень AC – стальной, круглого сечения диаметром d = 30 мм; стержень BC – дюралюминиевый, квадратного сечения со стороной a = 40 мм. Определить напряжения в стержнях, а также горизонтальное, вертикальное и полное перемещения узла C.

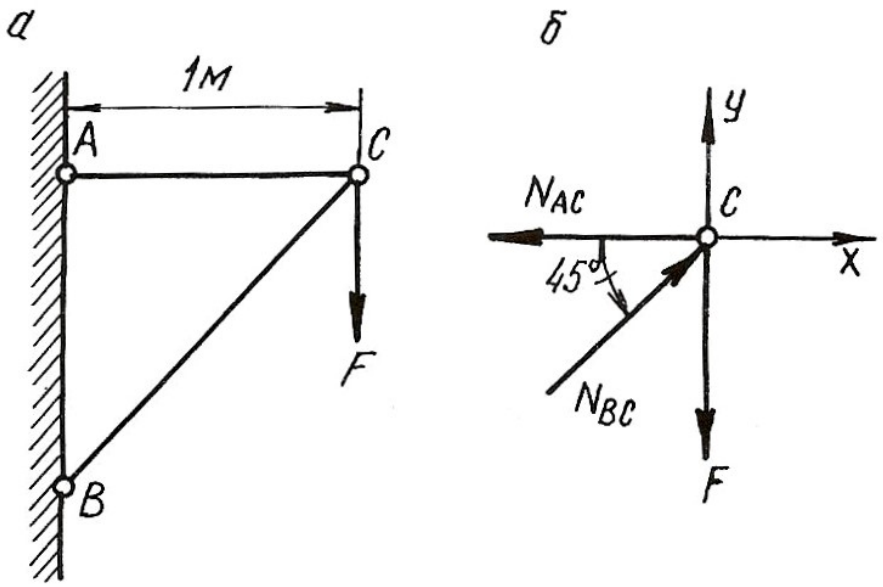


Рис. 1.1.

Решение.

Для определения продольных сил в стержнях AC и BC условно вырезаем узел C, заменяем действие стержней на узел усилиями и составляем уравнение равновесия для узла C (рис. 1.1, *б*)

$$\sum X = 0; \quad -N_{AC} + N_{BC} \cdot \cos 45^\circ = 0;$$

$$\sum Y = 0; \quad N_{BC} \cdot \sin 45^\circ - F = 0.$$

Откуда

$$N_{BC} = \frac{F}{\sin 45^\circ} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,707} = 141 \cdot 10^3 \text{ Н} = 141 \text{ кН},$$

$$N_{AC} = N_{BC} \cdot \cos 45^\circ = 141 \cdot 10^3 \cdot 0,707 = 100 \cdot 10^3 \text{ Н} = 100 \text{ кН}.$$

Стержень AC растянут, а стержень BC сжат. Определяем площади поперечных сечений стержней

$$A_{AC} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (30 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 706 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$A_{BC} = a^2 = (40 \cdot 10^{-3})^2 = 1600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Напряжения в поперечных сечениях стержней AC и BC

$$\sigma_{AC} = \frac{N_{AC}}{A_{AC}} = \frac{100 \cdot 10^3}{706 \cdot 10^{-6}} = 141 \cdot 10^6 \text{ Па} = 141 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{BC} = -\frac{N_{BC}}{A_{BC}} = -\frac{141 \cdot 10^3}{1600 \cdot 10^{-6}} = -88 \cdot 10^6 \text{ Па} = -88 \text{ МПа}.$$

Знак минус указывает на то, что в стержне BC возникает деформация сжатия.

Находим удлинения стержней:

$$\Delta l_{AC} = \frac{N_{AC} \cdot l_{AC}}{E_{\text{ст}} \cdot A_{AC}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 706 \cdot 10^{-6}} = 0,71 \cdot 10^{-3} \text{м} = 0,71 \text{ мм};$$

$$\Delta l_{BC} = -\frac{N_{BC} \cdot l_{BC}}{E_{\text{дюр}} \cdot A_{BC}} = -\frac{141 \cdot 10^3 \cdot 1,41}{7 \cdot 10^{10} \cdot 1600 \cdot 10^{-6}} = -1,77 \cdot 10^{-3} \text{м} = -1,77 \text{ мм},$$

где $l_{BC} = \frac{l_{AC}}{\cos 45^\circ} = \frac{1}{0,707} = 1,41$ м; $E_{\text{ст}}$, $E_{\text{дюр}}$ – модули продольной упругости стального и дюралюминиевого стержней, Па.

Для определения перемещения точки C мысленно разъединим стержни в этом шарнире и отметим их новые длины AC_1 и BC_2 (рис. 1.2, *а*). Для того, чтобы найти новое положение точки C, необходимо деформированные стержни свести вместе путем их вращения вокруг шарниров A и B. Точки C_1 и C_2 будут перемещаться по дугам, которые вследствие их малости могут быть приняты за прямые C_1C_3 и C_2C_3, перпендикулярные к стержням AC и BC. Точка пересечения этих перпендикуляров (точка C_3) и даст положение узла C после деформации. На рис. 1.2, *б* изображена диаграмма перемещений в большом масштабе.

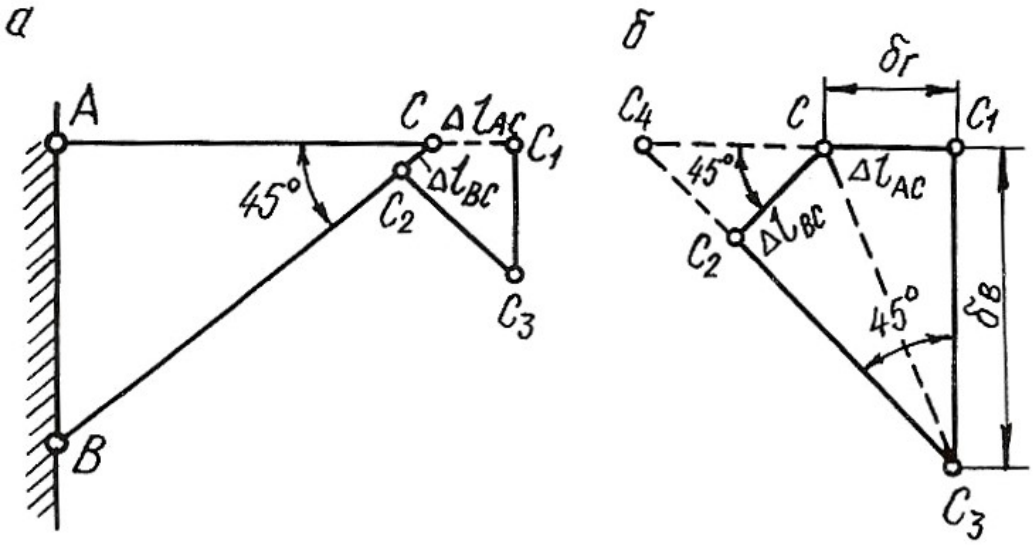


Рис. 1.2.

Горизонтальное перемещение узла C равно $\delta_{\text{г}} = \Delta l_{\text{AC}} = 0,71$ мм.

Для удобства определения вертикального перемещения произведем дополнительное построение. Продолжим линии C_1C и C_3C_2 до их пересечения в точке C_4.

Вертикальное перемещение узла C

$$\delta_в = C_1C_3 = \frac{C_1C_4}{\text{tg}45^o} = C_1C_4 = C_1C + CC_4 = \Delta l_{AC} + \frac{\Delta l_{BC}}{\cos 45^o};$$

$$\delta_в = 0,71 + \frac{1,77}{0,707} = 3,21 \text{ мм}.$$

Полное перемещение узла C

$$\delta = CC_3 = \sqrt{\delta_г^2 + \delta_в^2} = \sqrt{0,71^2 + 3,21^2} = 3,29 \text{ мм}.$$

1.1. Влияние собственного веса на напряжения и перемещения

Если ось в стержне вертикальна, то его собственный вес вызывает центральное растяжение или сжатие. Если вертикальный брус закреплен верхним концом, то от собственного веса он растягивается, а при закреплении нижнего конца – сжимается. Собственный вес вертикального бруса можно рассматривать как продольную (осевую) внешнюю нагрузку, распределенную вдоль оси бруса.

Рассмотрим брус постоянного сечения, закрепленный верхним концом. Продольная сила от собственного веса в поперечном сечении бруса на расстоянии x от его нижнего конца равна весу нижележащей части бруса

$$N_x = \rho g A x, \tag{1.4}$$

где N_x – продольная сила от собственного веса, Н; ρ – плотность материала, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; A – площадь поперечного сечения бруса, м^2; x – расстояние от нижнего конца стержня, м.

Напряжение от собственного веса определяется по формуле:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} = \rho g x. \tag{1.5}$$

По формулам (1.4) и (1.5) строятся эпюры N и σ с учетом знаков. Если на стержень действует дополнительная сила F, то продольная сила и нормальное напряжение определяются по формулам:

$$N_x = F + \rho g A x; \tag{1.6}$$

$$\sigma_x = \frac{F}{A} + \rho g x. \tag{1.7}$$

Полное удлинение (укорочение) стержня постоянного сечения от собственного веса определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{\rho g l^2}{2E}, \tag{1.8}$$

где l – длина стержня, м; E – модуль продольной упругости материала, Па.

При действии внешней силы F и собственного веса удлинение стержня определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA} + \frac{\rho g l^2}{2E}. \qquad (1.9)$$

В формулах (1.7) и (1.9) физический смысл первого слагаемого – напряжение и удлинение от внешней силы, второго – напряжение и удлинение от собственного веса.

Перемещение любого поперечного сечения бруса, закрепленного верхним концом, равно удлинению части бруса, лежащей над сечением, и равно сумме удлинений под действием собственного веса верхней части, нижней части бруса и внешней силы.

Рассмотрим подробнее решение типовой задачи.

Пример 1.2.

Для стального бруса переменного сечения (рис. 1.3, *а*) с учетом собственного веса и при продольной нагрузке F требуется:

1. Построить эпюры продольных сил и нормальных напряжений по длине бруса.
2. Найти полное удлинение (укорочение) бруса.
3. Определить перемещение сечения I-I.

Исходные данные: $A = 20$ см^2; $a = 1{,}0$ м; $b = 1{,}5$ м; $c = 1{,}0$ м; $F = 40$ кН.

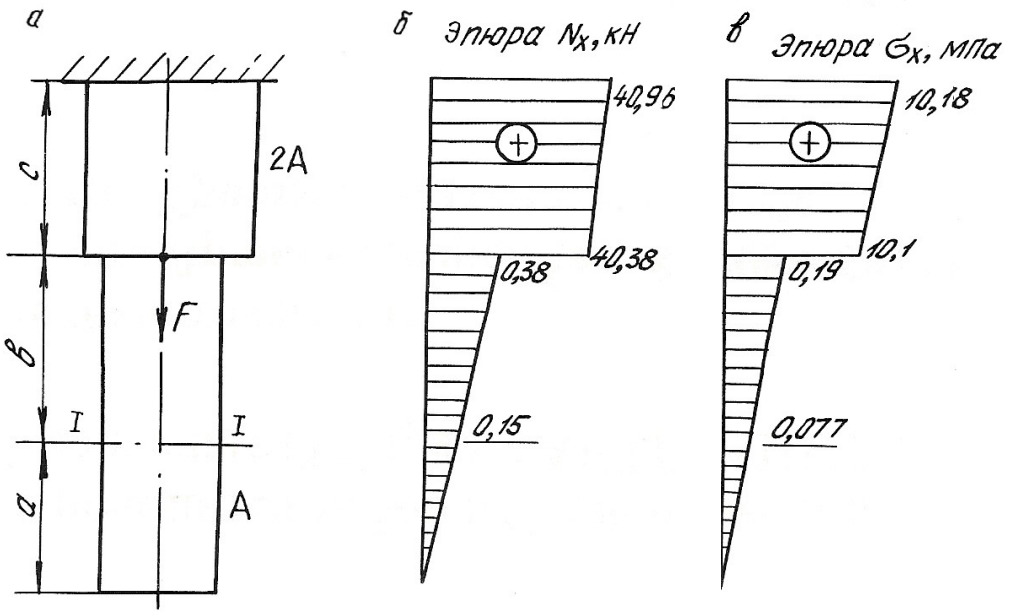


Рис. 1.3.

Решение.

Определим продольную силу и нормальное напряжение в поперечном сечении по формулам (1.6) и (1.7):

а) на участке длиной a (нижний участок): $0 \le x \le 1{,}0$ м;

$$N_x = \rho g A x;$$

$$\sigma_x = \rho g x.$$

При $x = 0$ $\quad N_x = 0,$

$\sigma_x = 0.$

При $x = 1$ м $\quad N_x = 7850 \cdot 9{,}81 \cdot 20 \cdot 10^{-4} \cdot 1 = 150$ Н $= 0{,}15$ кН;

$\sigma_x = 7850 \cdot 9{,}81 \cdot 1 = 80000$ Па $= 0{,}08$ МПа.

б) на участке длиной b (средний участок): $1{,}0 \le x \le 2{,}5$ м;

$$N_x = Q_a + \rho g A (x - a);$$

$$\sigma_x = \frac{Q_a}{A} + \rho g (x - a);$$

где $Q_a = \rho g A a = 0{,}15$ кН – вес нижнего участка бруса; для среднего участка он играет роль внешней силы.

При $x = 1{,}0$ м; $\quad N_x = Q_a = 0{,}15$ кН;

$\sigma_x = 0{,}08$ МПа.

При $x = 2{,}5$ м; $\quad N_x = 0{,}15 + 7850 \cdot 9{,}81 \cdot 20 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}38$ кН;

$\sigma_x = 0{,}08 + 7850 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}19$ МПа.

в) на участке длиной c (верхний участок): $2{,}5 \le x \le 3{,}5$ м;

$$N_x = Q_a + Q_b + F + \rho g 2A (x - a - b);$$

$$\sigma_x = \frac{Q_a + Q_b + F}{2A} + \rho g (x - a - b),$$

где $Q_b = \rho g A b = 0{,}23$ кН – вес среднего участка бруса.

При $x = 2{,}5$ м; $\quad N_x = 0{,}15 + 0{,}23 + 40 + 7850 \cdot 9{,}81 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 40{,}38$ кН;

$\sigma_x = 10{,}1$ МПа.

При $x = 3{,}5$ м; $\quad N_x = 0{,}15 + 0{,}23 + 40 + 7850 \cdot 9{,}81 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-7} = 40{,}96$ кН;

$\sigma_x = 10{,}18$ МПа.

Строим эпюры $\boldsymbol{N}_x$ (рис. 1.3, *б*) и σ_x (рис. 1.3, *в*).

Определим полное удлинение стержня по формуле (1.9). Полное удлинение складывается из удлинений каждого участка бруса под действием внешних сил и собственного веса.

$$\Delta l = \Delta a + \Delta b + \Delta c \ ;$$

где $\Delta a = \dfrac{\rho g a^2}{2E} = \dfrac{7850 \cdot 9{,}81 \cdot 1^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}} = 0{,}19 \cdot 10^{-6}$ м;

$$\Delta b = \frac{Q_a \cdot b}{EA} + \frac{\rho g b^2}{2E} = \frac{0{,}15 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5}{2 \cdot 10^{11} \cdot 20 \cdot 10^{-4}} + \frac{7850 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}5^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}} =$$

$$= 0{,}56 \cdot 10^{-6} + 0{,}43 \cdot 10^{-6} = 0{,}99 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\Delta c = \frac{(Q_a + Q_b + F)c}{E \cdot 2A} + \frac{\rho g c^2}{2E} = \frac{(0{,}15 + 0{,}23 + 40) \cdot 10^3 \cdot 1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 2 \cdot 20 \cdot 10^{-4}} + \frac{7850 \cdot 9{,}81 \cdot 1^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}} =$$

$$= 50{,}48 \cdot 10^{-6} + 0{,}19 \cdot 10^{-6} = 50{,}67 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\Delta l = 0{,}19 \cdot 10^{-6} + 0{,}99 \cdot 10^{-6} + 50{,}67 \cdot 10^{-6} = 51{,}85 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Перемещение сечения I-I равно удлинению лежащей над сечением части бруса, т. е.

$$\delta_{\text{I-I}} = \Delta c + \Delta b = 0{,}99 \cdot 10^{-6} + 50{,}67 \cdot 10^{-6} = 51{,}66 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

1.2. Напряженное состояние материала в точке

Напряженным состоянием называют совокупность напряжений, действующих по всевозможным площадкам, проведенным через данную точку. В различных точках тела напряженное состояние неоднородно и определить все значения возникающих напряжений затруднительно. В связи с этим в сопротивлении материалов точку рассматривают в виде элементарного параллелепипеда с гранями $dx \cdot dy \cdot dz$. При этом считается, что возникающие напряжения на гранях и в наклонных сечениях распределяются равномерно. Нормальные напряжения на гранях обозначаются: σ_x, σ_y, σ_z, а касательные: τ_{xy}, τ_{yx}, τ_{zy}, τ_{yz}, τ_{xz}, τ_{zx}. Двойной индекс при касательных напряжениях указывает на направление и плоскость, где они действуют. Например, индексы при напряжении τ_{xy} означают, что x – направление действия этого напряжения по оси x; y – это напряжение возникает в плоскости, нормаль к которой параллельна оси y.

Во взаимно перпендикулярных сечениях касательные напряжения равны по величине и противоположны по знаку. Это свойство касательных напряжений называется **законом парности касательных напряжений**

$$-\tau_{xy} = \tau_{yx}.$$

Рассматриваемый параллелепипед в теле стержня можно сориентировать таким образом, что по его граням будут действовать только нормальные напряжения, а касательные будут равны нулю. В этом случае грани будут называться главными площадками, а действующие на них нормальные напряжения – главными напряжениями. По количеству главных напряжений, возникающих одновременно на главных площадках, различают три вида напряженного состояния точки упругого тела: линейное, плоское и объемное. Главные напряжения обозначаются: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Принято считать, что $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Наиболее часто встречается плоское напряженное состояние материала.

Для правильной оценки опасности, угрожающей прочности стержня, необходимо знать полностью его напряженное состояние. Это требует умение вычислять напряжения не только по сечениям, перпендикулярным оси стержня, но и по наклонным сечениям.

Напряжения в наклонных сечениях, нормаль к которым с осью x составляет угол α, определяются по следующим формулам:

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2\alpha + \sigma_y \sin^2\alpha - \tau_{yx} \sin 2\alpha; \qquad (1.10)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{yx} \cos 2\alpha, \qquad (1.11)$$

Для сечений, проходящих под углом $\beta = \alpha + 90^\circ$, возникающие напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_\beta = \sigma_x \sin^2\alpha + \sigma_y \cos^2\alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha; \qquad (1.12)$$

$$\tau_\beta = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{yx} \cos 2\alpha, \qquad (1.13)$$

Угол α положительный, если он отсчитан в направлении от оси x к оси y по кратчайшему угловому пути, против хода часовой стрелки.

Нормальное напряжение σ_α считается положительным, если его направление совпадает с направлением внешней нормали к наклонной площадке. Положительное направление τ_α образовано поворотом внешней нормали к наклонной площадке на угол 90^o по ходу часовой стрелки.

Противоположные направления σ_α и τ_α следует считать отрицательными.

Площадки, где действуют экстремальные нормальные напряжения и нет касательных напряжений, называются главными площадками, а напряжения, действующие на главных площадках – главными напряжениями. Они обозначаются: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ и определяются по следующим формулам:

$$\sigma_{max} = \sigma_1 = \frac{1}{2}\left[(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2} \right]; \qquad (1.14)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_2 = \frac{1}{2}\left[(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2} \right]. \qquad (1.15)$$

Положение главных площадок определяется углом наклона α_0

$$\mathrm{tg}2\alpha_0 = \frac{-2\tau_{yx}}{\sigma_x - \sigma_y}, \qquad (1.16)$$

Наибольшие касательные напряжения действуют на площадках под углом 45^o

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2}\ . \qquad (1.17)$$

Пример 1.3.

Стальной кубик находится под действием сил, создающих плоское напряженное состояние: $\sigma_x = 80$ МПа; $\alpha = 30^o$; $\tau_{xy} = 10$ МПа (рис. 1.4). Требуется найти:

1. Главные напряжения и положение главных площадок.
2. Максимальные касательные напряжения.
3. Определить аналитически величины нормальных σ_α и касательных τ_α напряжений, действующих на площадках, нормаль, к которой составляет угол α с горизонтальной осью x. Показать на чертеже заданный элемент и направление соответствующих напряжений.

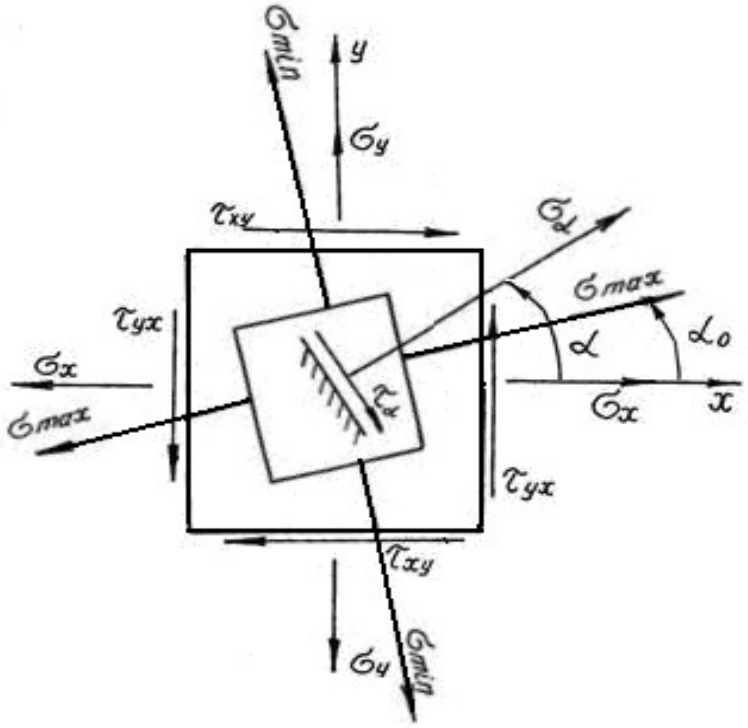


Рис. 1.4.

Решение.

Определим главные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}\left[(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2}\right] = \frac{1}{2}\left[(80+20) + \sqrt{(80-20)^2 + 4\cdot 10^2}\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[100 + 63,6\right] = 81,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}\left[(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{yx}^2}\right] = \frac{1}{2}\left[(80+20) - \sqrt{(80-20)^2 + 4\cdot 10^2}\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[100 - 63,6\right] = 18,2 \text{ МПа}.$$

Найдем положение главных площадок

$$\operatorname{tg}2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{yx}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{-2\cdot(-10)}{80-20} = 0,333; \qquad 2\alpha_0 = 18^o 24'; \qquad \alpha_0 = 9^o 12'.$$

Определим аналитически величины σ_α и τ_α, действующие на площадке, нормаль к которой составляет угол 30^o с горизонтальной осью (см. рис. 1.4.)

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2\alpha + \sigma_y \sin^2\alpha - \tau_{yx}\sin 2\alpha = 80\cdot 0,866^2 + 20\cdot 0,5^2 - (-10)\cdot 0,866 =$$

$$= 73,65 \text{ МПа};$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\alpha + \tau_{yx}\cos 2\alpha = \frac{80-20}{2}0,866 + (-10)\cdot 0,5 = 20,98 \text{ МПа}.$$

Вектор максимальных главных напряжений σ_{max} всегда проходит через те четверти осей координат, в которых стрелки касательных напряжений сходятся.

1.3. Статически неопределимые стержневые системы

Статически неопределимыми системами называют такие системы, у которых реакции или все внутренние суммарные силовые факторы, возникающие в сечениях их элементов при действии произвольной нагрузки, не могут быть определены из уравнений равновесия статики.

Равновесие плоской стержневой системы обеспечивается тремя опорными направлениями. Всякое закрепление сверх трех опорных направлений является «лишним» с точки зрения равновесия системы, что делает ее *статически неопределимой*. Термин «лишние» является условным. Постановка дополнительных опорных закреплений производится с целью уменьшения деформации, веса конструкции или с целью увеличения ее грузоподъемности.

Расчет статически неопределимой системы начинается с определения степени статической неопределимости системы, которая равна числу «лишних» связей (число неизвестных сил минус три – число уравнений статики для плоской системы).

Определение усилий в статически неопределимой системе связано с необходимостью составления дополнительных уравнений – уравнений совместности деформаций. Число этих уравнений должно быть равно степени статической неопределимости стержневой системы.

Уравнения совместности деформаций устанавливают геометрические зависимости между упругими перемещениями отдельных элементов при соблюдении равновесия всей системы в целом.

Геометрическая схема деформаций должна рассматриваться не с точки зрения обычной геометрии, а на основе кинематики малых перемещений, с учетом того, что траектории отдельных точек элементов являются прямыми линиями.

Решение статически неопределимых систем необходимо производить в следующей последовательности:

1. Заданную систему освободить от наложенных на нее связей, действие которых заменяется реакциями, и составить уравнения статики;
2. Определить степень статической неопределимости системы;
3. По числу «лишних» неизвестных составить дополнительные уравнения из условия совместности деформаций. В уравнениях упругие деформации выразить через усилия по закону Гука в развернутом виде по формуле (1.3);
4. Решить совместно уравнения равновесия статики и дополнительные уравнения, определяя усилия в элементах конструкций;
5. Исходя из условия задачи и на основании условия прочности, определить поперечные размеры стержней.

Рассмотрим подробнее пример расчета статически неопределимой системы.

Пример 1.4.

Для статически неопределимой системы (рис. 1.5), состоящей из жесткой невесомой балки AB и стальных стержней 1 и 2, соединенных с ней шарнирно, требуется:

1. Определить усилия, возникающие в стержне от действия силы F.
2. Подобрать сечение стержней из двух равнобоких уголков, каждое при $A_2 : A_1 = 2$; $F = 180$ кН; $a = 2{,}0$ м; $b = 1{,}0$ м; $h = 2{,}0$ м.

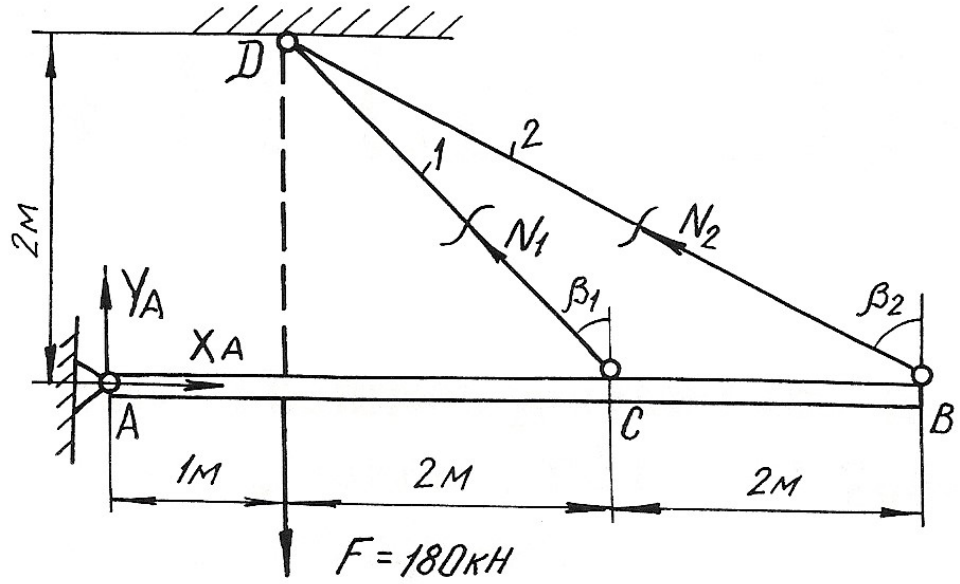


Рис. 1.5.

Решение.

Перед началом решения по приведенному плану определяем геометрические параметры системы

$$l_1 = DC = \sqrt{4+4} = 2{,}83 \text{ м}; \quad \beta_1 = 45°;$$

$$l_2 = DB = \sqrt{4+16} = 4{,}47 \text{ м}; \quad \sin\beta_2 = \frac{4}{4{,}47} = 0{,}89;$$

Далее освобождаем брус AB от наложенных связей, заменяя их действие реакциями X_A, Y_A, N_1, N_2. Так как на балку AB действуют четыре неизвестные силы, то одна связь «лишняя», т. е. задача является однажды статически неопределимой.

Из трех уравнений равновесия достаточно записать только одно уравнение, не содержащее X_A, Y_A, определение которых не ставится в задаче,

$$\sum M_A = 0; \qquad -F \cdot 1 + N_1 \cdot \cos\beta_1 \cdot 3 + N_2 \cdot \cos\beta_2 \cdot 5 = 0;$$

$$-180 + N_1 \cdot 0{,}707 \cdot 3 + N_2 \cdot 0{,}45 \cdot 5 = 0 \qquad (1.18)$$

В уравнении статики два неизвестных, поэтому нужно записать еще одно дополнительное уравнение из условия совместности деформаций стержней DB и DC. Рассматривая геометрическую схему деформаций этих стержней, считаем перемещение точек B и C балки вертикальными (рис. 1.6). Из подобия треугольников ACC_1 и ABB_1 имеем:

$$\frac{AC}{AB} = \frac{CC_1}{BB_1} = \frac{3}{5}.$$

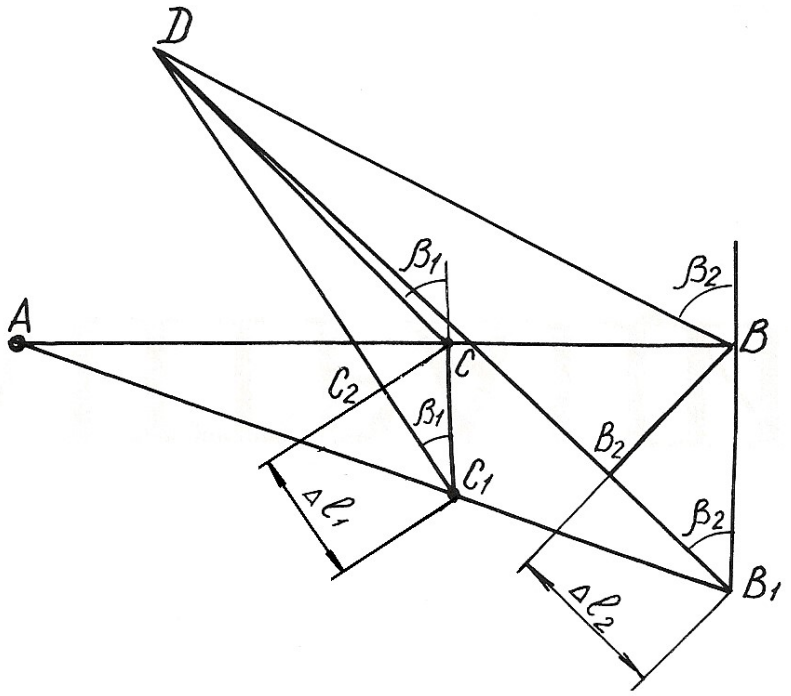


Рис. 1.6.

Учитывая, что $\begin{cases} CC_1 = \dfrac{CC_1}{\cos\beta_1} = \dfrac{\Delta l_1}{\cos\beta_1}; \\ BB_1 = \dfrac{B_1B_2}{\cos\beta_2} = \dfrac{\Delta l_2}{\cos\beta_2}, \end{cases}$

получим $\dfrac{\Delta l_1}{\cos\beta_1} = \dfrac{3}{5} \cdot \dfrac{\Delta l_2}{\cos\beta_2}$; откуда

$$\Delta l_1 = 0{,}94 \cdot \Delta l_2 . \qquad (1.19)$$

Равенство (1.19) и есть условие совместности деформации стержней 1 и 2. Выразим деформации через усилия по закону Гука

$$\Delta l_1 = \frac{N_1 l_1}{EA_1} = \frac{N_1 \cdot 2{,}83}{EA_1}; \qquad \Delta l_2 = \frac{N_2 l_2}{EA_2} = \frac{N_2 \cdot 4{,}74}{E \cdot 2A_1}.$$

Подставим полученные выражения в формулу (1.19)

$$\frac{N_1 \cdot 2{,}83}{EA_1} = 0{,}94 \frac{N_2 \cdot 4{,}74}{E \cdot 2A_1}.$$

Отсюда получим

$$2{,}83 \cdot N_1 - 2{,}10 \cdot N_2 = 0. \qquad (1.20)$$

Теперь можно определить усилия N_1 и N_2, решая совместно систему уравнений (1.18) и (1.20),

$$\begin{cases} 2{,}12 \cdot N_1 + 2{,}25 \cdot N_2 - 180 = 0; \\ 2{,}83 \cdot N_1 - 2{,}10 \cdot N_2 = 0. \end{cases}$$

Получаем $N_1 = 34{,}94$ кН; $N_2 = 47{,}08$ кН.

Подбираем сечение стержней из условий прочности:

$$A_1 \geq \frac{N_1}{\sigma_{adm}} = \frac{34{,}94 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 2{,}18 \cdot 10^{-4}\,\text{м}^2 = 2{,}18\ \text{см}^2;$$

$$A_2 \geq \frac{N_2}{\sigma_{adm}} = \frac{47{,}08 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 2{,}94 \cdot 10^{-4}\,\text{м}^2 = 2{,}94\ \text{см}^2.$$

Для площадей задано условие $A_2{:}A_1 = 2$. Если принять $A_1 = 2{,}18$ см^2, тогда $A_2 = 4{,}36$ см^2. Условие $A_2 \geq 2{,}94$ см^2 выполняется.

Сечение подбираем из двух равнобоких уголков по ГОСТ 8509-93 (табл. П. 3).

Для первого стержня подбираем два уголка №2 (20х20х3 мм) с площадью сечения 1,13 см^2. Для второго стержня принимаем два уголка №4 (40х40х3 мм) с площадью сечения 2,35 см^2.

Полные площади сечений будут равны $A_1 = 2{,}26$ см^2; $A_2 = 4{,}70$ см^2.

Проверим отношение площадей:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{4{,}70}{2{,}26} = 2{,}08.$$

Отклонение $\delta = \dfrac{2{,}08 - 2}{2} 100\ \% = 3{,}98\ \%.$

Погрешность допустимая.

Пример 1.5. Монтажная задача

Для статически неопределимой системы (рис. 1.7), состоящей из жесткой невесомой балки AB и стальных стержней 1 и 2, соединенных с ней шарнирно, требуется определить дополнительные усилия в стержнях конструкции, если стержень 2 изготовлен короче проектного размера на $\Delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м при $A_2 : A_1 = 2$; a =2,0 м; $b = 1{,}0$ м; $h = 2{,}0$ м.

При сборке стержни деформируются: стержень 2 – растянется, стержень 1 – сожмется. В соответствии с этим покажем направления дополнительных усилий N_1' и N_2' (см. рис. 1.7), возникающих после сборки конструкции.

Для определения усилий воспользуемся уравнением статики

$$\sum \text{M}_A = 0; \qquad -N_1' \cdot \cos\beta_1 \cdot 3 + N_2' \cdot \cos\beta_2 \cdot 5 = 0;$$

$$-2{,}12 N_1' + 2{,}25 N_2' = 0. \qquad (1.21)$$

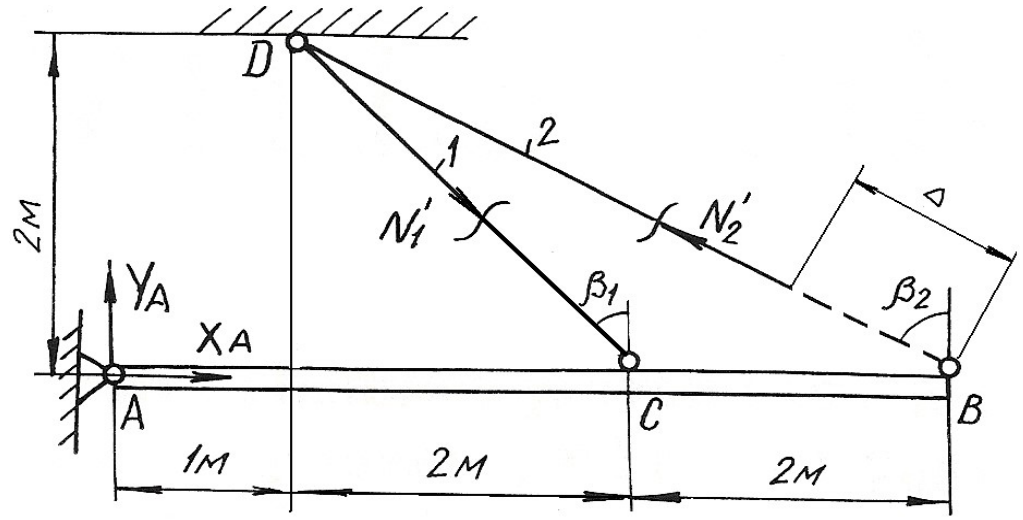


Рис. 1.7.

Уравнение одно, неизвестных два, следовательно, система один раз статически неопределима. Запишем дополнительно условие совместности деформаций. Рассмотрим картину деформаций стержней (см. рис. 1.8). Из подобия треугольников AC_1C и AB_1B получим $\dfrac{AC}{AB}=\dfrac{C_1C}{B_1B}=\dfrac{3}{5}$.

Учитывая соотношение $C_1C=\dfrac{CC_2}{\cos\beta_1}=\dfrac{\Delta l_1}{\cos\beta_1}$; $B_1B=\dfrac{B_2B}{\cos\beta_2}=\dfrac{\Delta-\Delta l_2}{\cos\beta_2}$,

получаем $\dfrac{\Delta l_1}{0{,}707}=\dfrac{3}{5}\cdot\dfrac{\Delta-\Delta l_2}{0{,}45}$; $\Delta l_1=0{,}94(\Delta-\Delta l_2)$. (1.22)

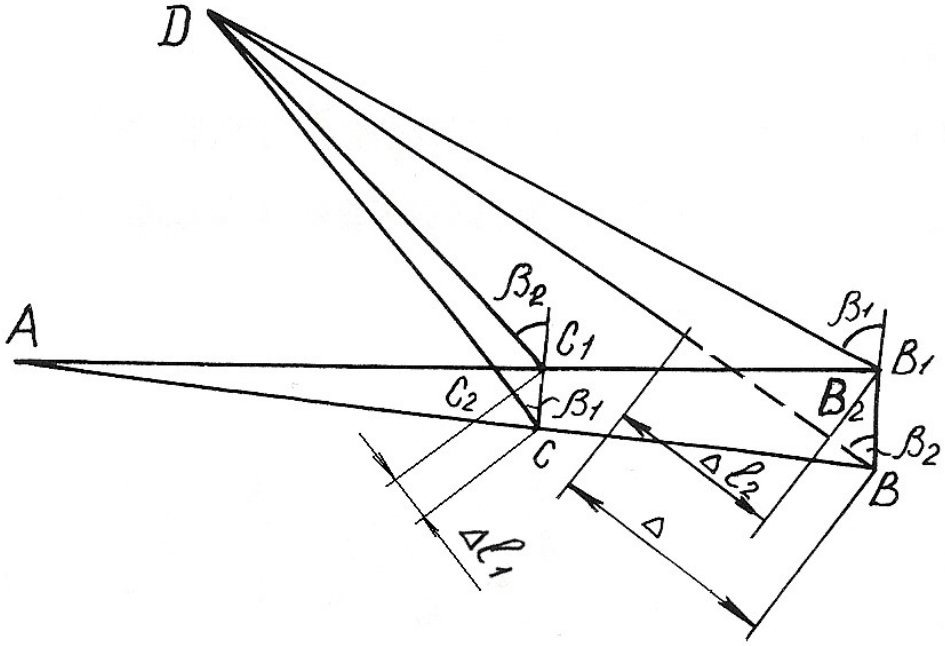


Рис. 1.8.

Выражение (1.22) – условие совместности деформаций стержней 1 и 2. Выражая деформацию через усилия по закону Гука, получим

$$\frac{N_1' l_1}{EA_1} + \frac{0{,}94 \cdot N_2' l_2}{EA_2} = 0{,}94 \cdot \Delta$$

или

$$1{,}25 \cdot N_1' + 0{,}894 \cdot N_2' = 94 \qquad (1.23)$$

Решая совместно систему уравнений (1.21) и (1.23), определяем усилия N_1' и N_2'

$$N_1' = 42{,}75 \text{ кН}; \; N_2' = 45{,}36 \text{ кН}.$$

Пример 1.6.

Стержень длиной l = 800 мм, защемленный обоими концами, подвергается действию двух сосредоточенных сил F_1=100 кН и F_2=150 кН (рис. 1.9, *а*). Определить напряжения, возникающие в различных сечениях стержня, и проверить его прочность, если допускаемое напряжение σ_{adm}=140 МПа. Площадь поперечного сечения A = 10 см^2, l_1 = 200 мм и l_2 = 600 мм.

Решение.

Обозначим реакции в заделках стержня через R_A и R_B. На стержень действует система сил, направленных вдоль одной прямой. Для такой системы статика дает одно уравнение равновесия

$$\sum Y = 0; \quad R_A - F_1 - F_2 + R_B = 0,$$

откуда $R_A + R_B = F_1 + F_2$. (1.24)

Для составления уравнения совместности деформаций мысленно отбросим нижнюю заделку и заменим ее действие на стержень реакцией R_B, т. е. приложим к сечению B (к нижнему торцовому сечению) такую силу, которая оказывает на стержень воздействие, полностью аналогичное воздействию заделки. Таким образом, изображенная система эквивалентна заданной системе и, поскольку в заданной системе перемещение сечения B равно нулю, то и для второй системы (рис.1.9, *б*) должно соблюдаться то же условие

$$\delta_B = 0. \qquad (1.25)$$

Для определения вида левой части записанного равенства используем принцип независимости действия сил, т. е. вычислим перемещение сечения B как сумму перемещений, вызванных каждой силой F_1, F_2 и R_B в отдельности

$$\delta_B = \delta_{F_1} + \delta_{F_2} + \delta_{R_B}.$$

Под действием одной лишь силы F_1 деформируется только верхняя часть стержня, нижняя и средняя части перемещаются как твердое тело. Таким образом, перемещение сечения B, вызванное силой F_1, равно удлинению верхней части стержня

$$\delta_{F_1} = \frac{F_1 l_1}{EA}.$$

Аналогично установим, что перемещение сечения B от действия силы F_2, равно удлинению верней и средней частей

$$\delta_{F_2} = \frac{F_2 l_2}{EA}.$$

Наконец, перемещение сечения B от действия силы R_B равно укорочению всего стержня

$$\delta_{R_B} = \frac{R_B l}{EA}.$$

Суммируя полученные величины и приравнивая сумму нулю согласно равенству (1.25), получим уравнение совместности деформаций,

$$\frac{F_1 l_1}{EA} + \frac{F_2 l_2}{EA} - \frac{R_B l}{EA} = 0,$$

откуда $R_B = \dfrac{F_1 l_1 + F_2 l_2}{l} = \dfrac{100 \cdot 0,2 + 150 \cdot 0,6}{0,8} = 137,5$ кН.

Подставив значение реакции R_B в уравнение равновесия (1.24), определим значение реакции в точке A:

$$R_A = F_1 + F_2 - R_B = F_1 + F_2 - \frac{F_1 l_1 + F_2 l_2}{l} = \frac{(F_1 + F_2) l - (F_1 l_1 + F_2 l_2)}{l} =$$

$$= \frac{(100 + 150) \cdot 0,8 - (100 \cdot 0,2 + 150 \cdot 0,6)}{0,8} = 112,5 \text{ кН}.$$

На рис. 1.9, *в* приведена эпюра продольных сил, в соответствии с которой определяем напряжения на различных участках стержня.

В поперечных сечениях верхней части стержня

$$\sigma^{(1)} = \frac{N_1}{A} = \frac{112,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = 112,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 112,5 \text{ МПа};$$

в поперечных сечениях средней части

$$\sigma^{(2)} = \frac{N_2}{A} = \frac{12,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = 12,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 12,5 \text{ МПа},$$

а в нижней части

$$\sigma^{(3)} = \frac{N_3}{A} = -\frac{137,5 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^{-4}} = -137,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = -137,5 \text{ МПа}.$$

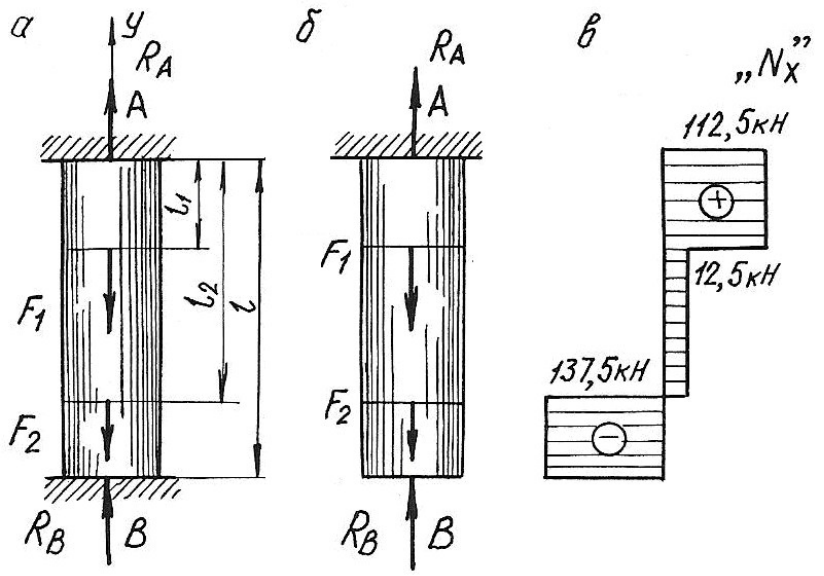


Рис. 1.9.

Наиболее напряженными, как видно из расчетов, являются поперечные сечения нижней части стержня. Это напряжение используем для проверки стержня на прочность:

$$\left|\sigma^{(3)}\right| = 137{,}5 \text{ МПа} < \sigma_{adm} = 140 \text{ МПа},$$

т. е. условие прочности выполняется.

Пример 1.7. Температурная задача

Определить допускаемое повышение температуры составного стержня (рис. 1.10.) из условия, чтобы напряжения сжатия не превышали в стальной части $\sigma_c = 120$ МПа, в медной $\sigma_м = 60$ МПа и в алюминиевой $\sigma_a = 70$ МПа. (линейные размеры на рисунке приведены в мм).

Решение.

Площади поперечных сечений ступеней стержня

$$A_м = \frac{\pi(50\cdot10^{-3})^2}{4} = 1963\cdot10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$A_a = \frac{\pi(40\cdot10^{-3})^2}{4} = 1257\cdot10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$A_c = \frac{\pi(30\cdot10^{-3})^2}{4} = 707\cdot10^{-6} \text{ м}^2.$$

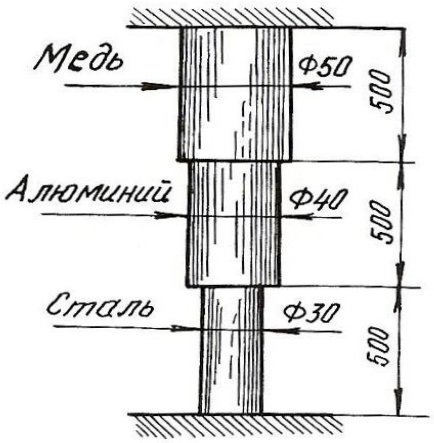


Рис. 1.10.

Продольные силы, при которых напряжения в ступенях будут равны заданным величинам, должны быть следующими:

$$N_{\text{м}} = A_{\text{м}} \cdot \sigma_{\text{м}} = 1963 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 10^{6} = 118000 \text{ Н} = 118 \text{ кН};$$

$$N_{\text{а}} = A_{\text{а}} \cdot \sigma_{\text{а}} = 1257 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot 10^{6} = 88000 \text{ Н} = 88 \text{ кН};$$

$$N_{\text{с}} = A_{\text{с}} \cdot \sigma_{\text{с}} = 707 \cdot 10^{-6} \cdot 120 \cdot 10^{6} = 84800 \text{ Н} = 84{,}8 \text{ кН}.$$

Величина продольной силы не одинакова для всего стержня, следовательно, в качестве допускаемой продольной силы должно быть принято меньшее из трех полученных значений, а именно $N = N_{\text{с}} = 84{,}8$ кН.

Длина стержня в результате защемления обоих концов остается при изменении температуры неизменной. Следовательно, удлинение стержня в результате повышения температуры должно равняться полученному упругому укорочению

$$\Delta l_t = \Delta l = l_{\text{м}} \alpha_{\text{м}} \Delta t + l_{\text{а}} \alpha_{\text{а}} \Delta t + l_{\text{с}} \alpha_{\text{с}} \Delta t = l(\alpha_{\text{м}} + \alpha_{\text{а}} + \alpha_{\text{с}}) \Delta t,$$

где $\alpha_{\text{м}}$, $\alpha_{\text{а}}$, $\alpha_{\text{с}}$ – соответствующие коэффициенты теплового линейного расширения.

$$\Delta l = \Delta l_{\text{м}} = \Delta l_{\text{а}} = \Delta l_{\text{с}} = \frac{N l_{\text{м}}}{E_{\text{м}} A_{\text{м}}} + \frac{N l_{\text{а}}}{E_{\text{а}} A_{\text{а}}} + \frac{N l_{\text{с}}}{E_{\text{с}} A_{\text{с}}} = Nl\left(\frac{1}{E_{\text{м}} A_{\text{м}}} + \frac{1}{E_{\text{а}} A_{\text{а}}} + \frac{1}{E_{\text{с}} A_{\text{с}}}\right);$$

$$l(\alpha_{\text{м}} + \alpha_{\text{а}} + \alpha_{\text{с}}) \Delta t = Nl\left(\frac{1}{E_{\text{м}} A_{\text{м}}} + \frac{1}{E_{\text{а}} A_{\text{а}}} + \frac{1}{E_{\text{с}} A_{\text{с}}}\right),$$

откуда $\Delta t = \dfrac{N\left(\dfrac{1}{E_{\text{м}} A_{\text{м}}} + \dfrac{1}{E_{\text{а}} A_{\text{а}}} + \dfrac{1}{E_{\text{с}} A_{\text{с}}}\right)}{\alpha_{\text{м}} + \alpha_{\text{а}} + \alpha_{\text{с}}}.$

Подставим численные значения величин и произведем вычисления

$$\Delta t = \frac{84800\left[\dfrac{1}{1 \cdot 10^{11} \cdot 1963 \cdot 10^{-6}} + \dfrac{1}{0{,}7 \cdot 10^{11} \cdot 1257 \cdot 10^{-6}} + \dfrac{1}{2 \cdot 10^{11} \cdot 707 \cdot 10^{-6}}\right]}{16{,}5 \cdot 10^{-6} + 25 \cdot 10^{-6} + 12{,}5 \cdot 10^{-6}} = 36^{\circ}.$$

Далее определим напряжения в поперечных сечениях стержня при повышении температуры на 36°

$$\sigma_{\text{м}} = -\frac{N}{A_{\text{м}}} = -\frac{84800}{1963 \cdot 10^{-6}} = -43 \cdot 10^{6} \text{ Па} = -43 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{а}} = -\frac{N}{A_{\text{а}}} = -\frac{84800}{1257 \cdot 10^{-6}} = -67{,}5 \cdot 10^{6} \text{ Па} = -67{,}5 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{с}} = -120 \text{ МПа}.$$

1.4. Задания для расчетов стержней с учетом собственного веса

Для стального бруса с учетом собственного веса и при продольной нагрузке F (табл. 1.1.) требуется по указанной схеме (табл. 1.2.):

1. Построить эпюры продольных сил и нормальных напряжений по длине бруса.

2. Найти полное удлинение (укорочение) бруса для геометрических размеров, приведенных в табл. 1.1. Плотность стали ρ=7850 кг/см^3; ускорение силы тяжести g = 9,81 м/с^2, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

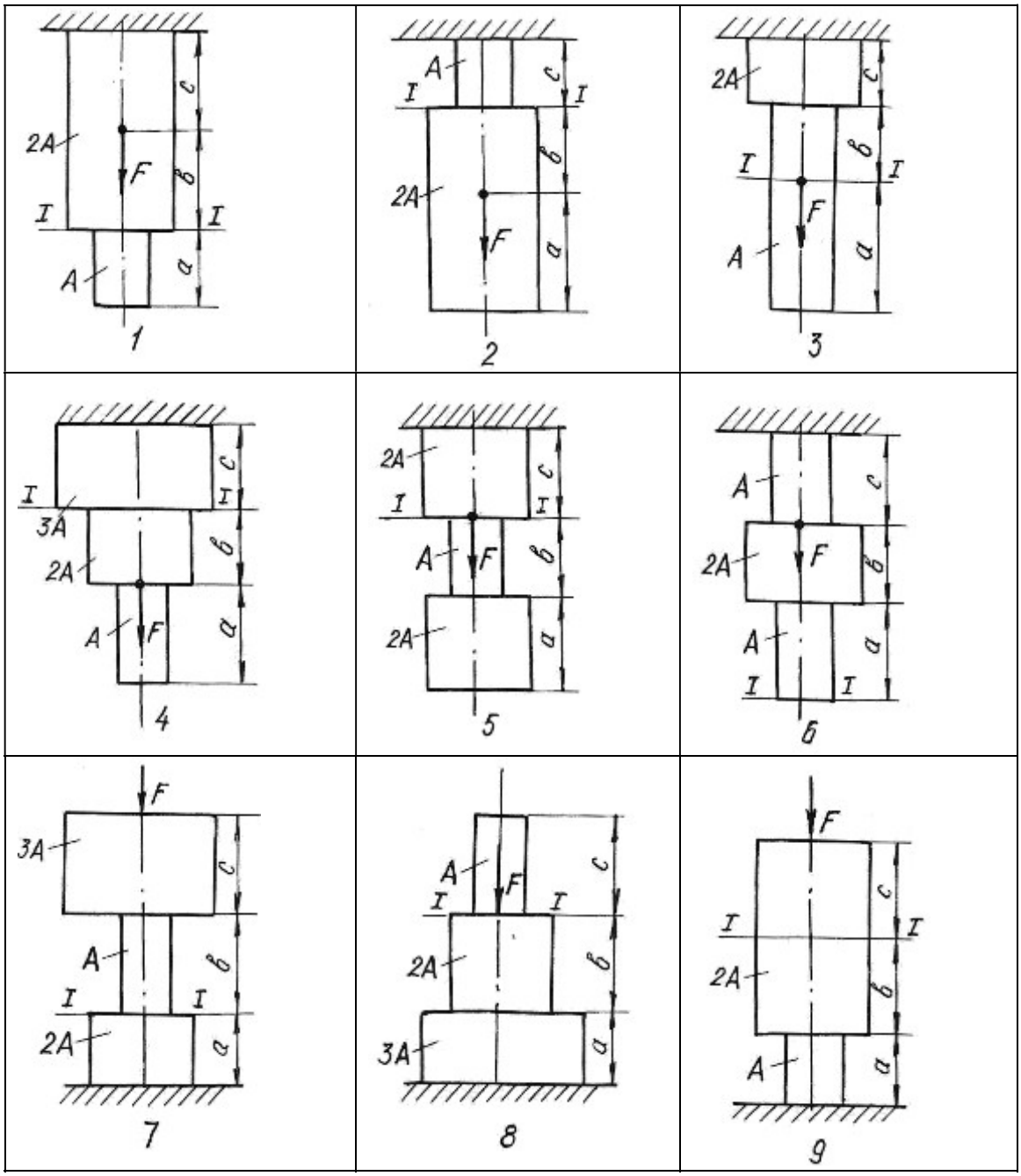
3. Определить перемещение сечений I-I.

Таблица 1.1

Номер варианта	a, м	b, м	c, м	F, кН	A, см²
1	1,5	1,0	2,0	30	20
2	1,0	1,5	2,0	40	30
3	2,0	1,0	2,0	50	40
4	2,0	1,0	1,5	60	18
5	2,0	1,5	1,5	20	24
6	1,5	1,0	2,0	40	28
7	1,5	1,0	1,0	50	30
8	1,0	1,5	2,0	50	32
9	1,5	1,0	1,5	60	12
10	2,0	1,0	1,5	70	14
11	1,0	2,0	1,0	20	15
12	2,0	2,0	1,0	40	18
13	1,0	1,5	1,0	30	20
14	1,4	1,0	1,0	40	24
15	1,0	3,0	1,0	50	28
16	1,0	2,0	1,0	40	30
17	1,2	1,0	2,4	70	32
18	2,0	1,5	2,0	60	20
19	2,6	1,0	1,7	60	18
20	2,0	1,0	1,5	50	22
21	1,5	1,8	1,4	40	15
22	2,0	1,0	1,4	30	16
23	1,2	1,2	1,2	20	20
24	1,5	1,0	2,0	10	16
25	1,4	2,0	1,0	40	18

Таблица 1.2

Расчетные схемы бруса



1.5. Задания для определения напряжений при плоском напряженном состоянии

Стальной кубик находится под действием сил, создающих плоское напряженное состояние (рис. 1.11.). Показать на рисунке элемент и направления напряжений в соответствии с вариантом задания.

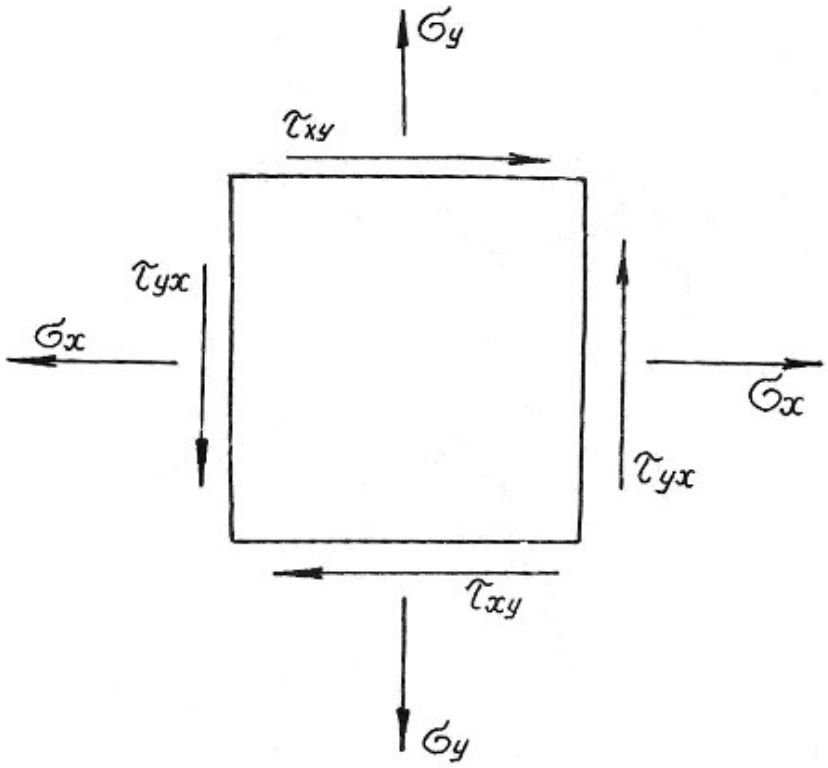


Рис. 1.11.

Требуется найти:

1. Главные напряжения и положение главных площадок.
2. Максимальные касательные напряжения.
3. Определить аналитически величины нормальных σ_α и касательных напряжений τ_α, действующих на площадках, нормаль к которым составляет угол α с горизонтальной осью x.

Данные приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Номер варианта	σ_x , МПа	σ_y , МПа	τ_{xy} , МПа	α, град
1	40,0	-20,0	-10,0	30
2	12,0	10,0	-80,0	-45
3	-10,0	-14,0	-12,0	15
4	15,0	12,0	90,0	30
5	20,0	-40,0	80,0	15
6	-12,0	10,0	-80,0	45
7	20,0	-2,0	10,0	-30
8	80,0	10,0	-60,0	45
9	12,0	14,0	10,0	30
10	-14,0	-10,0	50,0	15
11	20,0	10,0	-80,0	-45
12	30,0	-50,0	-10,0	60
13	-25,0	10,0	50,0	15
14	16,0	80,0	10,0	30
15	18,0	-10,0	10,0	-30
16	22,0	12,0	-90,0	45
17	-16,0	-12,0	10,0	20
18	10,0	80,0	-60,0	-20
19	25,0	-25,0	10,0	30
20	-10,0	10,0	60,0	60
21	12,0	10,0	-60,0	20
22	18,0	-10,0	-12,0	45
23	-40,0	30,0	20,0	30
24	50,0	-60,0	10,0	-30
25	45,0	35,0	15,0	-45

1.6. Задания для расчета статически неопределимых стержневых систем

Для статически неопределимой системы, состоящей из жесткой невесомой балки и стальных стержней 1 и 2, соединенных с ней шарнирно (табл.1.4), требуется:

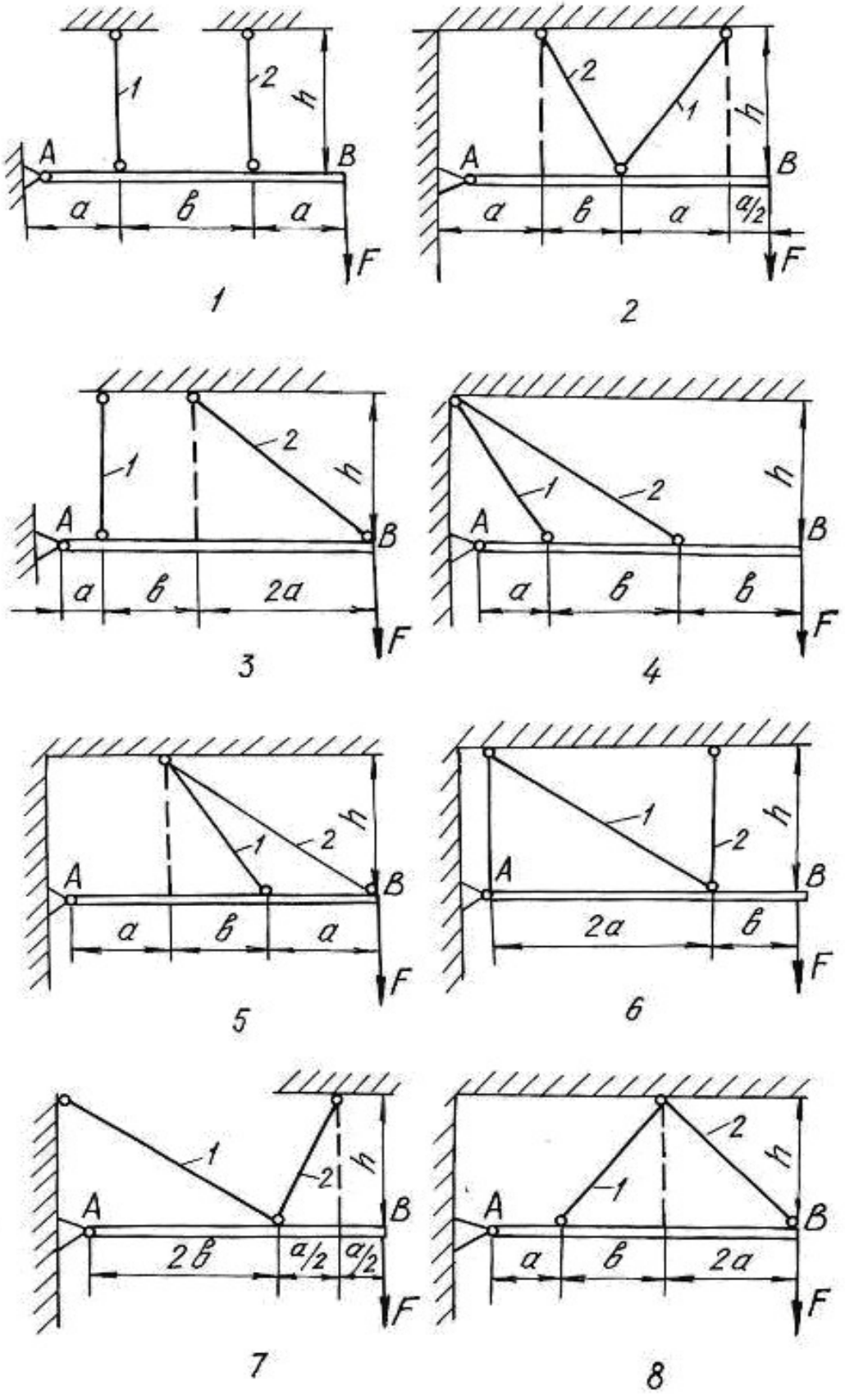
1. Определить усилия, возникающие в стержнях от действия нагрузки F;
2. Подобрать сечение стержней из двух равнобоких уголков каждое по ГОСТ 8509-93 (см. табл. П. 3).
3. Определить дополнительные усилия в стержнях конструкции, если стержень 2 изготовлен короче проектного размера на $\Delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

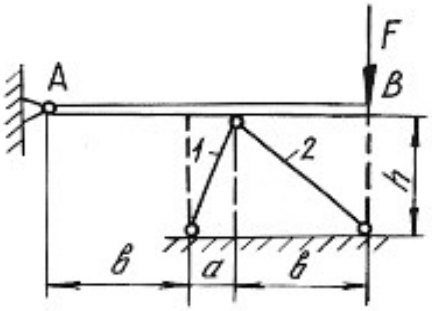
При расчетах принять $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; σ_{adm}=160 МПа, остальные данные приведены в табл. 1.4. Расчетные схемы приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.4

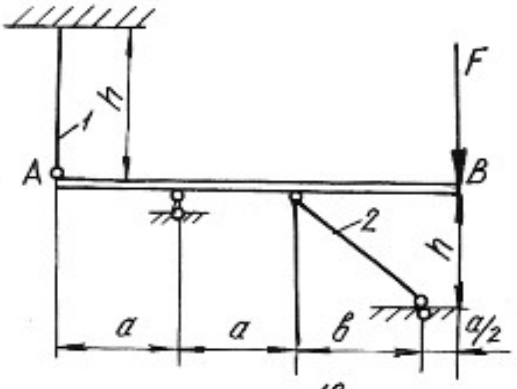
Номер варианта	a, м	b, м	h, м	$A_2 : A_1$	F, кН
1	2,0	1,4	1,8	2,0	80
2	2,2	1,6	2,0	1,5	120
3	2,6	1,8	2,2	1,2	150
4	2,5	1,1	1,5	1,0	180
5	1,8	1,0	1,2	1,5	100
6	2,0	1,0	1,5	2,0	240
7	2,4	1,4	1,6	1,8	140
8	2,8	1,6	2,	2,0	120
9	1,6	1,2	1,5	1,5	100
10	2,4	1,4	1,6	1,8	180
11	3,0	2,0	2,0	1,5	260
12	2,4	1,8	2,2	2,0	320
13	1,8	1,4	1,2	1,5	400
14	2,0	1,5	1,3	1,2	360
15	1,5	1,5	2,0	1,5	400
16	1,0	0,9	1,5	1,1	340
17	1,1	1,3	1,8	1,8	250
18	1,5	1,2	2,0	2,0	120
19	0,9	0,6	3,0	1,4	170
20	0,8	0,7	2,3	1,6	210
21	1,2	1,7	1,3	1,3	200
22	1,3	1,4	0,8	1,7	90
23	2,0	2,0	2,0	0,9	110
24	2,0	1,1	1,0	0,8	130
25	1,5	1,6	0,8	0,7	280

Таблица 1.5

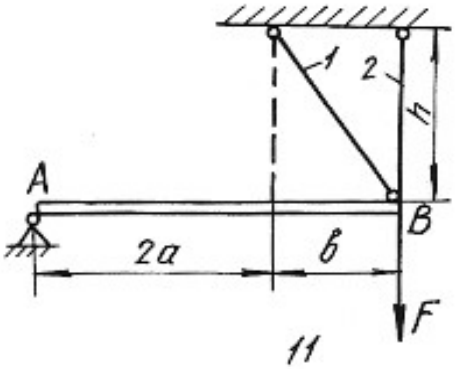

1
A
B
a
в
a
F
2
h
2
1
A
B
a
в
a
a/2
F
3
A
B
a
в
2a
F
4
A
B
a
в
в
F
5
A
B
a
в
a
F
6
A
B
2a
в
F
7
A
B
2в
a/2
a/2
F
8
A
B
a
в
2a
F



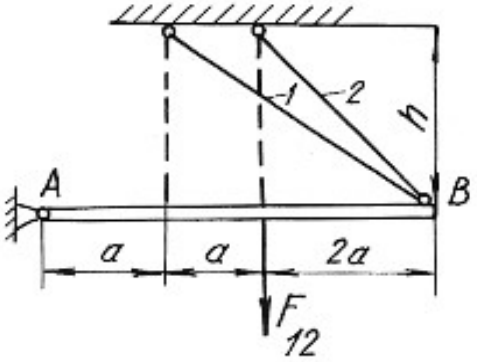
9



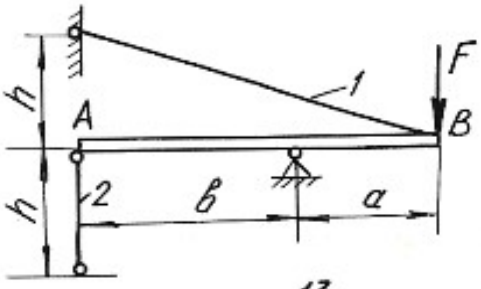
10



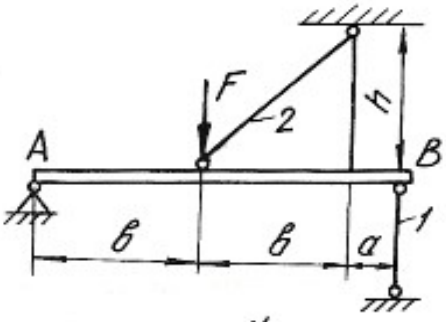
11



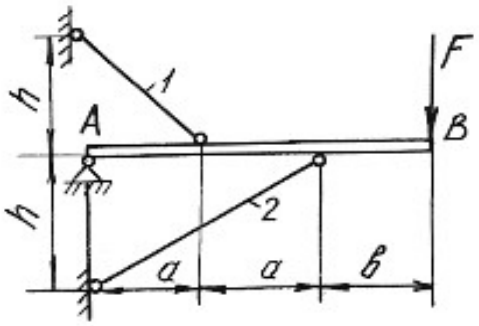
12



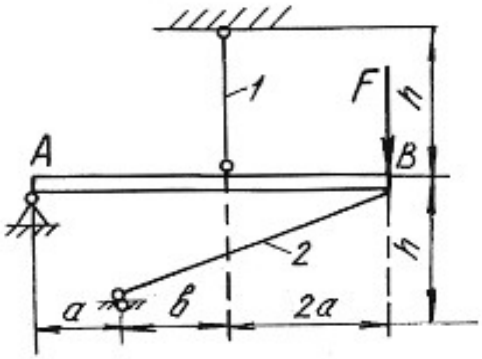
13



14



15



16

Глава 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ

Моментами инерции являются геометрические характеристики, отражающие заполнение веществом плоского поперечного сечения балки. Значения моментов инерции для стандартных поперечных сечений можно найти в любой литературе, список которой приведен в конце настоящего пособия. Моменты инерции относительно собственных осей простых фигур определяются по известным формулам.

Для прямоугольника

$$J_x = \frac{bh^3}{12}; \qquad J_y = \frac{hb^3}{12}; \qquad J_{xy} = 0, \tag{2.1}$$

где x, y – горизонтальная и вертикальная оси, проходящие через центр тяжести прямоугольника; b – ширина; h – высота прямоугольника.

Для круга

$$J_x = J_y = \frac{\pi d^4}{64}; \qquad J_{xy} = 0. \tag{2.2}$$

Для треугольника

$$J_x = \frac{bh^3}{36}; \qquad J_y = \frac{hb^3}{36}; \qquad J_{xy} = \pm\frac{b^2h^2}{72}. \tag{2.3}$$

При этом знак центробежного момента определяется следующим образом. Треугольник вычерчивается в масштабе, через его центр проводятся оси, которые делят треугольник на четыре четверти. В первой и третьей четвертях площадь положительна, в остальных – отрицательна. Если суммарная положительная площадь будет по размеру больше отрицательной, то знак центробежного момента будет тоже положительный и наоборот.

Осевые моменты инерции прокатных профилей выписываются из таблицы (сортамента проката) в соответствии с номером профиля. Для равнополочных уголков центробежный момент относительно горизонтальной и вертикальной осей определяется по формуле:

$$J_{xy} = \left(J_{x_0} - J_{y_0}\right)\frac{\sin 2\alpha}{2} + J_{x_0y_0}\cos 2\alpha, \tag{2.4}$$

где x_0, y_0 – оси, проходящие через центр тяжести уголка под углом 45° к горизонтальной и вертикальной осям уголка.

При этом нужно помнить, что угол поворота осей *xy* относительно осей x_0y_0 будет отрицательным. Если уголок неравнополочный, то его условно разбивают на два прямоугольника, находят их центры тяжести, и центробежный

момент относительно собственных осей всего уголка определяют по формуле центробежных моментов инерции относительно параллельных осей.

Для составного сечения необходимо определять положение центра тяжести, разбив его на простейшие части (прямоугольник, круг, треугольник, двутавр, швеллер, уголок). Формулы для определения центра тяжести имеют вид:

$$x_c = \frac{\sum S_{x_{\text{вр}}}}{\sum A} = \frac{\left(A_1 x_1 + A_2 x_2 + \ldots, + A_n x_n\right)}{\left(A_1 + A_2 + \ldots, + A_n\right)};$$
$$y_c = \frac{\sum S_{y_{\text{вр}}}}{\sum A} = \frac{\left(A_1 y_1 + A_2 y_2 + \ldots, + A_n y_n\right)}{\left(A_1 + A_2 + \ldots, + A_n\right)}, \qquad (2.5)$$

где $S_{y_{\text{вр}}}, S_{x_{\text{вр}}}$ – статические моменты площадей простых фигур относительно временных осей; A_1, A_2,…, A_n – площади простых фигур; x_n, y_n – координаты центров тяжести простых фигур во временных осях.

Главными моментами инерции плоской фигуры (сечения) называют моменты инерции, определяемые относительно главных центральных осей сечения. Такие оси должны отвечать следующим требованиям:

1) они проходят через центр тяжести сечения;

2) относительно этих осей наблюдаются экстремальные значения моментов инерции (главные моменты инерции);

3) центробежный момент инерции относительно главных осей равен нулю.

В формулы напряжений, содержащие моменты инерции, необходимо всегда подставлять значения главных моментов инерции. Определение главных моментов инерции проводится в следующем порядке.

1. Заданное поперечное сечение сложной конфигурации вычерчивается в выбранном масштабе с указанием всех размеров.

2. Сечение условно разбивается на простейшие фигуры (прямоугольник, круг, треугольник, двутавр, швеллер, уголок).

3. Определяется положение центра тяжести площадки каждой простой фигуры и из этих центров проводятся собственные оси координат.

4. Для всей фигуры сечения проводятся временные (вспомогательные) оси координат $(x_{\text{вр}}, y_{\text{вр}})$ параллельно собственным осям отдельных фигур (желательно, чтобы временные оси проходили через центры тяжести простых фигур, что ведет к уменьшению объема вычислений).

5. Определяются координаты центра тяжести площади всего сечения по формулам (2.5).

6. Центр тяжести сечения наносится на чертеж, и из него проводятся опорные оси координат (x_c, y_c) параллельно временным осям.

7. Определяются осевые и центробежные моменты инерции сечения относительно опорных осей. При этом используют формулы для определения моментов инерции относительно параллельных осей:

$$J_{x_c} = \left(J_{x_1} + A_1 a_1^2\right)^{\text{I}} + \left(J_{x_2} + A_2 a_2^2\right)^{\text{II}} + \ldots + \left(J_{x_n} + A_n a_n^2\right)^{n};$$

$$J_{y_c} = \left(J_{y_1} + A_1 b_1^2\right)^{\text{I}} + \left(J_{y_2} + A_2 b_2^2\right)^{\text{II}} + \ldots + \left(J_{y_n} + A_n b_n^2\right)^{n}; \qquad (2.6)$$

$$J_{x_c y_c} = \left(J_{x_1 y_1} + A_1 a_1 b_1\right)^{\text{I}} + \left(J_{x_2 y_2} + A_2 a_2 b_2\right)^{\text{II}} + \ldots + \left(J_{x_n y_n} + A_n a_n b_n\right)^{n},$$

где $J_{x_1}, J_{x_2}, \ldots, J_{x_n}$ и $J_{y_1}, J_{y_2}, \ldots, J_{y_n}$ – моменты инерции простых фигур относительно собственных осей; $J_{x_1 y_1}, J_{x_2 y_2}, \ldots, J_{x_n y_n}$ – центробежные моменты инерции простых фигур относительно собственных осей; $a_1, a_2, \ldots, a_n$ – расстояния между собственными осями $x_1, x_2 \ldots, x_n$ простых фигур и центральной осью x_c; $b_1, b_2 \ldots, b_n$ – расстояния между собственными осями $y_1, y_2 \ldots, y_n$ простых фигур и центральной осью y_c (с учетом знаков).

8. Определяется положение главных осей инерции по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2 \cdot J_{x_c y_c}}{J_{y_c} - J_{x_c}}. \qquad (2.7)$$

Положительным считается угол α_0, откладываемый против хода часовой стрелки.

9. Проводятся главные оси на чертеже под углом α_0 по отношению к центральным осям.

10. Определяются главные моменты инерции по формулам:

$$\begin{aligned} J_{x_0} &= J_{x_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{y_c} \sin^2 \alpha_0 - J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0; \\ J_{y_0} &= J_{x_c} \sin^2 \alpha_0 + J_{y_c} \cos^2 \alpha_0 + J_{x_c y_c} \sin 2\alpha_0 \end{aligned} \qquad (2.8)$$

или

$$J_{\max/\min} = \frac{J_{x_c} + J_{y_c}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(J_{x_c} - J_{y_c}\right)^2 + 4 \cdot J_{x_c y_c}^2}. \qquad (2.9)$$

11. Проводится проверка правильности решения задачи в двух вариантах:

а) суммы главных моментов инерции и моментов инерции относительно центральных осей должны быть равны

$$J_{x_0} + J_{y_0} = \left(J_{x_c} + J_{y_c}\right) \pm 5\ \%; \qquad (2.10)$$

б) центробежный момент инерции относительно главных осей должен быть равен нулю

$$J_{x_0y_0} = \frac{J_{x_c} - J_{y_c}}{2}\sin 2\alpha_0 + J_{x_cy_c}\cos 2\alpha_0 = 0\,. \qquad (2.11)$$

Пример 2.1.

Для заданного поперечного сечения, состоящего из швеллера и равнополочного уголка (рис. 2.1), требуется:

1) определить положение центра тяжести;

2) найти осевые и центробежный моменты инерции относительно осей, проходящих через центр тяжести;

3) определить направления главных центральных осей x_0 и y_0;

4) найти моменты инерции относительно главных центральных осей;

5) вычертить сечение в масштабе 1:2 и указать на нем все размеры в числах и все оси.

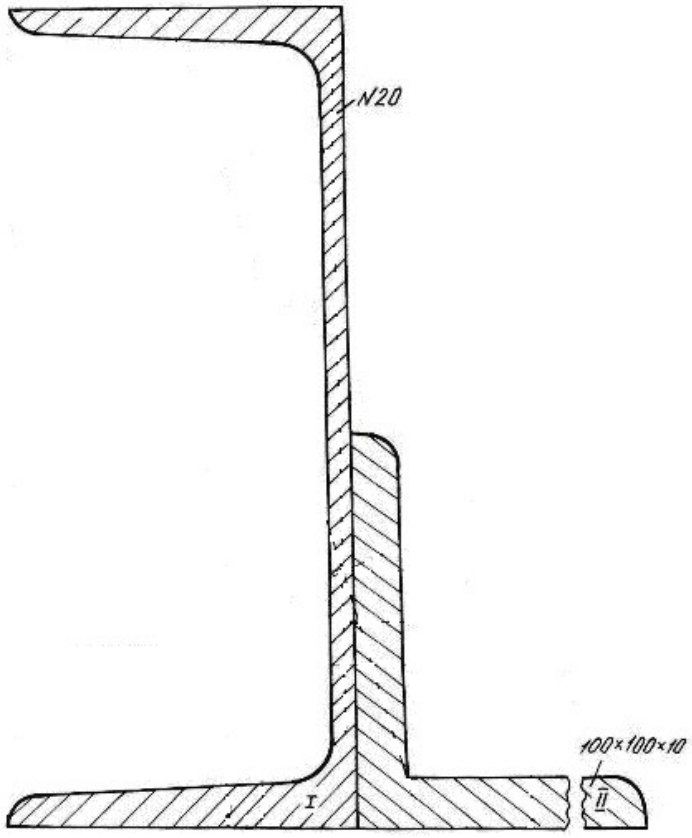


Рис. 2.1.

Решение.

1. Проводим временные оси $x_{вр}$ и $y_{вр}$ через левый нижний угол сечения (рис. 2.2) и разбиваем сечение на две фигуры: швеллер I и уголок II.

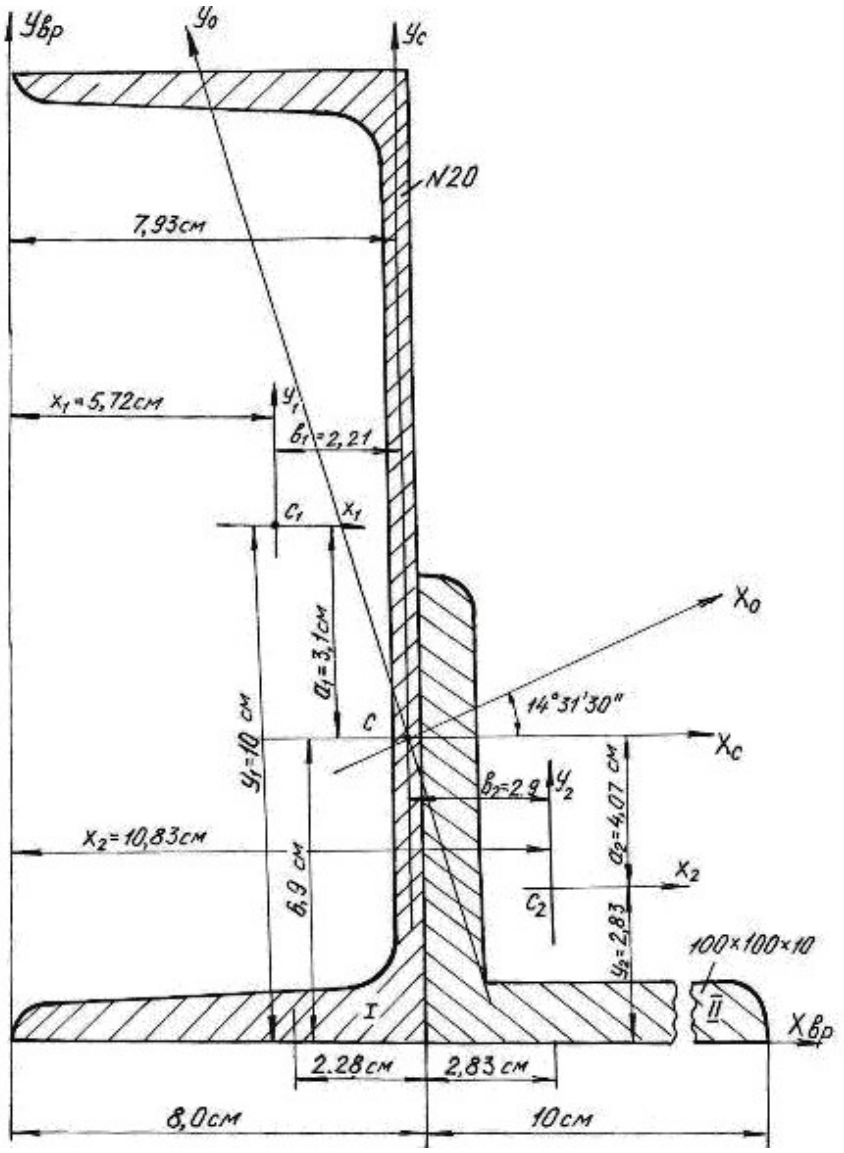


Рис. 2.2.

Основные данные фигур выписываем из таблиц сортамента проката.

Швеллер № 20а: $A_1 = 25{,}2$ см^2, $Z_0 = 2{,}28$ см, $J_{x_1} = 1670$ см^4, $J_{y_1} = 139$ см^4.

Уголок 100×100×10 мм: $A_2 = 19{,}2$ см^2, $Z_0 = 2{,}83$ см, $J_{x_0} = 284$ см^4, $J_{y_0} = 74{,}1$ см^4, $J_{x_2} = J_{y_2} = 179$ см^4 (рис. 2.3).

Координаты центра тяжести сечения

$$x_c = \frac{(A_1 x_1 + A_2 x_2)}{(A_1 + A_2)} = \frac{25{,}2 \cdot 5{,}72 + 19{,}2 \cdot 10{,}83}{25{,}2 + 19{,}2} = 7{,}93 \text{ см};$$

$$y_c = \frac{\left(A_1 y_1 + A_2 y_2\right)}{\left(A_1 + A_2\right)} = \frac{25{,}2 \cdot 10 + 19{,}2 \cdot 2{,}83}{25{,}2 + 19{,}2} = 6{,}9 \text{ см};$$

где A_1, A_2 – площади поперечного сечения первой и второй фигур; x_1, x_2, y_1, y_2 – координаты центров тяжести фигур относительно временных осей.

По значениям координат центра тяжести фигуры наносим точку C (см. рис. 2.2.) и проводим центральные оси x_c и y_c параллельно временным осям.

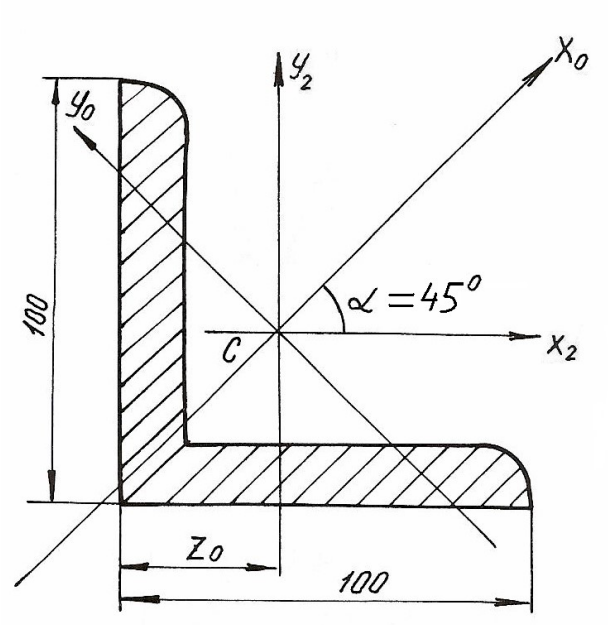


Рис. 2.3.

2. Вычисляем осевые моменты инерции относительно центральных опорных осей

$$J_{x_C} = \left(J_{x_C}\right)^{\text{I}} + \left(J_{x_C}\right)^{\text{II}} = \left(J_{x_1} + A_1 a_1^2\right) + \left(J_{x_2} + A_2 a_2^2\right) =$$

$$= \left[1670 + 25{,}2\left(3{,}1\right)^2\right] + \left[179 + 19{,}2\left(-4{,}07\right)^2\right] = 2409 \text{ см}^4;$$

$$J_{y_C} = \left(J_{y_C}\right)^{\text{I}} + \left(J_{y_C}\right)^{\text{II}} = \left(J_{y_1} + A_1 b_1^2\right) + \left(J_{y_2} + A_2 b_2^2\right) =$$

$$= \left[139 + 25{,}2\left(\text{-}2{,}21\right)^2\right] + \left[179 + 19{,}2\left(2{,}9\right)^2\right] = 603 \text{ см}^4.$$

3. Вычисляем центробежный момент инерции сечения относительно осей x_c и y_c. Центробежный момент швеллера относительно собственных осей равен 0, так как его оси проходят через центр тяжести и одна из них является осью симметрии.

Для уголка собственные центральные оси, т. е. оси x_2 и y_2 не являются главными, поэтому центробежный момент уголка в этой системе координат не равен 0. Вычислим его.

Из таблиц сортамента

$$J_{x_0} = 284 \text{ см}^4; \quad J_{y_0} = 74{,}1 \text{ см}^4;$$

$$J_{x_2y_2} = \frac{\left(J_{x_0} - J_{y_0}\right)}{2}\sin 2\alpha + J_{x_0y_0}\cos 2\alpha = \frac{284 - 74{,}1}{2}(-1) + 0 = -104{,}95 \text{ см}^4.$$

Угол α отрицателен, так как поворот осей x_0, y_0 направлен по ходу часовой стрелки.

$$J_{x_cy_c} = \left(J_{x_cy_c}\right)^{\text{I}} + \left(J_{x_cy_c}\right)^{\text{II}} = (J_{x_1y_1} + A_1a_1b_1) + (J_{x_2y_2} + A_2a_2b_2) =$$

$$= [0 + 25{,}2(3{,}1)(-2{,}21)] + [-104{,}95 + 19{,}2(-4{,}07)(2{,}90)] =$$

$$= -172{,}0 - 104{,}95 - 225 = -501{,}95 \text{ см}^4.$$

Угол поворота главных осей инерции

$$\text{tg}2\alpha_0 = \frac{2J_{x_cy_c}}{\left(J_{y_c} - J_{x_c}\right)} = \frac{2(-501{,}95)}{(603 - 2409)} = 0{,}555, \quad 2\alpha_0 = 29^{\text{o}}03', \quad \alpha_0 = 14^{\text{o}}31'30''.$$

4. Откладываем полученный угол против хода часовой стрелки от центральных осей x_c, y_c и проводим главные оси инерции x_0, y_0 (см. рис. 2.2).

5. Определяем главные моменты инерции

$$J_{x_0} = J_{x_c}\cos^2\alpha_0 + J_{y_c}\sin^2\alpha_0 - J_{x_cy_c}\sin 2\alpha_0 = 2536 \text{ см}^4;$$

$$J_{y_0} = J_{x_c}\sin^2\alpha_0 + J_{y_c}\cos^2\alpha_0 + J_{x_cy_c}\sin 2\alpha_0 = 476 \text{ см}^4.$$

Так как $J_{x_c} > J_{y_c}$, то $J_{\max}$ будет относительно оси x_0, а $J_{\min}$ будет относительно оси y_0.

Проверка.

а) Согласно формуле (2.10)

$$J_{x_c} + J_{y_c} = \left(J_{x_0} + J_{y_0}\right) \pm 5\ \%;$$

$$(2409 + 603)\cdot 10^{-8} = (2536 + 476)\cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$3012\cdot 10^{-8} \text{ см}^4 = 3012\cdot 10^{-8} \text{ см}^4.$$

б) Согласно формуле (2.11)

$$J_{x_0y_0} = \frac{\left(J_{x_c} - J_{y_c}\right)}{2}\sin 2\alpha_0 + J_{x_cy_c}\cos 2\alpha_0 = 0;$$

$$J_{x_0y_0} = \frac{(2409-603)}{2}\sin 2\left(14^\circ 31' 30''\right) - 501{,}95 \cdot \cos 2\left(14^\circ 31' 30''\right) = 0;$$
$$J_{x_0y_0} = 438 - 438 = 0.$$

Проверка показывает, что главные моменты инерции определены правильно.

6. Вычерчиваем поперечное сечение в масштабе 1:2 с указанием всех осей и размеров.

Пример 2.2.

Для заданного поперечного сечения (рис. 2.4) определить положение центра тяжести, найти положение главных осей инерции и значения главных моментов инерции.

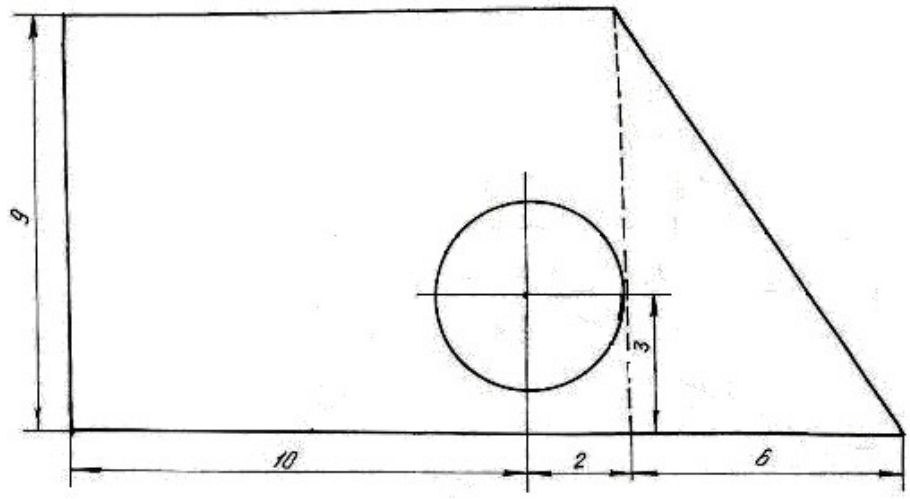


Рис. 2.4.

Решение.

1. Чертим поперечное сечение в масштабе 1:1;

2. Разбиваем сечение на простейшие фигуры: I – прямоугольник, II – прямоугольный треугольник, III – круг;

3. Проводим временные оси $x_{вр}$ и $y_{вр}$ через левый нижний угол заданного сечения (рис. 2.5).

4. Обозначив на рисунке центры тяжести простейших фигур, находим их координаты относительно временных осей и определяем площади фигур

$$C_1\begin{cases} x_1 = 6 \text{ см}; \\ y_1 = 4{,}5 \text{ см}; \end{cases} \qquad C_2\begin{cases} x_2 = 14 \text{ см}; \\ y_2 = 3 \text{ см}; \end{cases} \qquad C_3\begin{cases} x_3 = 10 \text{ см}; \\ y_3 = 3 \text{ см}. \end{cases}$$

$$A_1 = 108 \text{ см}^2, \qquad A_2 = 27 \text{ см}^2, \qquad A_3 = 12{,}56 \text{ см}^2.$$

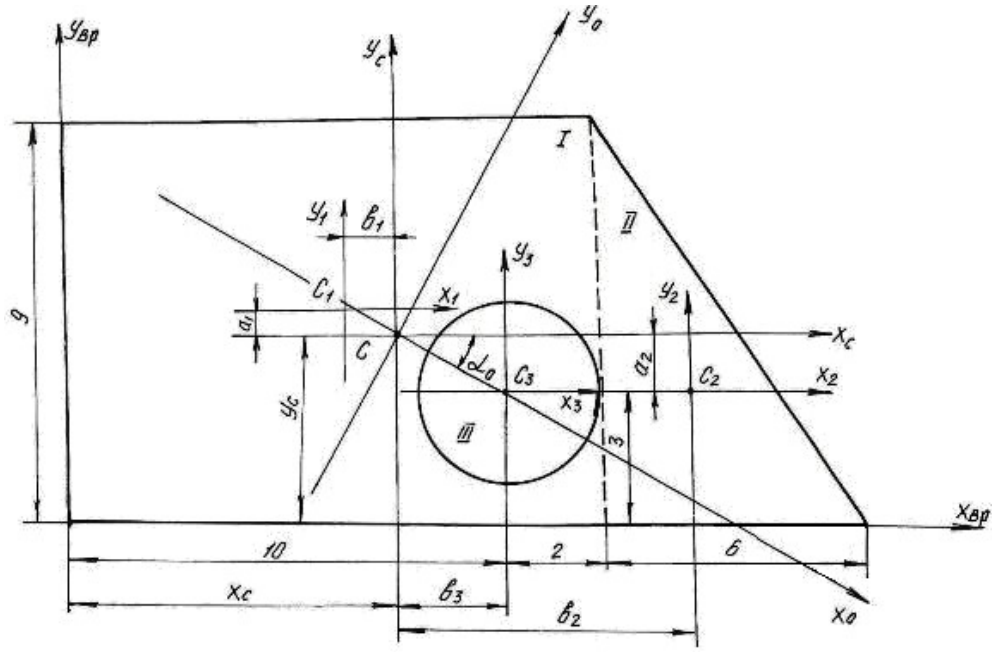


Рис. 2.5.

5. Определим координаты центра тяжести сечения

$$x_C = \frac{S_y}{A} = \frac{x_1 A_1 + x_2 A_2 - x_3 A_3}{A_1 + A_2 - A_3} = \frac{6 \cdot 108 + 14 \cdot 27 - 10 \cdot 12{,}56}{108 + 27 - 12{,}56} = 7{,}35 \text{ см};$$

$$y_C = \frac{S_x}{A} = \frac{y_1 A_1 + y_2 A_2 - y_3 A_3}{A_1 + A_2 - A_3} = \frac{4{,}5 \cdot 108 + 3 \cdot 27 - 3 \cdot 12{,}56}{108 + 27 - 12{,}56} = 4{,}32 \text{ см}.$$

Обозначим на рис. 2.5 положение центра тяжести C (x_c =7,35 см; y_c =4,32 см) и проведем центральные оси x_c и y_c параллельно временным осям.

6. Определим координаты центров тяжести простейших фигур $(C_1,\ C_2,\ C_3)$ относительно центральных осей x_c и y_c

$$C_1 \begin{cases} b_1 = x_1 - x_C = 1{,}35 \text{ см} \\ a_1 = y_1 - y_C = 0{,}18 \text{ см} \end{cases} \qquad C_2 \begin{cases} b_2 = x_2 - x_C = 6{,}65 \text{ см} \\ a_2 = y_2 - y_C = -1{,}32 \text{ см} \end{cases}$$

$$C_3 \begin{cases} b_3 = x_3 - x_C = 2{,}65 \text{ см} \\ a_3 = y_3 - y_C = -1{,}32 \text{ см}. \end{cases}$$

7. Определим моменты инерции простейших фигур относительно их центральных осей

Для прямоугольника:

$$J_{x_1} = \frac{bh^3}{12} = \frac{12 \cdot 9^3}{12} = 729 \text{ см}^4;\ J_{y_1} = \frac{b^3 h}{12} = \frac{12^3 \cdot 9}{12} = 1296 \text{ см}^4;\ J_{x_1 y_1} = 0.$$

Для треугольника:

$$J_{x_2}=\frac{bh^3}{36}=\frac{6\cdot 9^3}{36}=121{,}5\text{ см}^4;\qquad J_{y_2}=\frac{b^3h}{36}=\frac{6^3\cdot 9}{36}=54\text{ см}^4;$$

$$J_{x_2y_2}=-\frac{b^2h^2}{72}=-\frac{6^2\cdot 9^2}{72}=-40{,}5\text{ см}^4,$$

знак минус указывает на преобладание суммарной отрицательной части площади поперечного сечения.

Для круга:

$$J_{x_3}=J_{y_3}=\frac{\pi d^4}{64}=\frac{3{,}14\cdot 4^4}{64}=12{,}56\text{ см}^4;\qquad J_{x_3y_3}=0.$$

8. Определим моменты инерции всего сечения относительно центральных осей x_c и y_c, используя формулы моментов инерции относительно параллельных осей

$$J_{x_c}=\left(J_{x_c}\right)^{\text{I}}+\left(J_{x_c}\right)^{\text{II}}-\left(J_{x_c}\right)^{\text{III}}=\left(J_{x_1}+A_1a_1^2\right)+\left(J_{x_2}+A_2a_2^2\right)-\left(J_{x_3}+A_3a_3^2\right)=$$

$$=\left(729+0{,}18^2\cdot 108\right)+\left(121{,}5+(-1{,}32)^2\cdot 27\right)-\left(12{,}56+(-1{,}32)^2\cdot 12{,}56\right)=866{,}6\text{ см}^4;$$

$$J_{y_c}=\left(J_{y_c}\right)^{\text{I}}+\left(J_{y_c}\right)^{\text{II}}-\left(J_{y_c}\right)^{\text{III}}=\left(J_{y_1}+A_1b_1^2\right)+\left(J_{y_2}+A_2b_2^2\right)-\left(J_{y_3}+A_3b_3^2\right)=$$

$$=\left(1296+(-1{,}35)^2\cdot 108\right)++\left(54+6{,}65^2\cdot 27\right)-\left(12{,}56+2{,}65^2\cdot 12{,}56\right)=1093{,}32\text{ см}^4;$$

$$J_{x_cy_c}=\left(J_{x_cy_c}\right)^{\text{I}}+\left(J_{x_cy_c}\right)^{\text{II}}-\left(J_{x_cy_c}\right)^{\text{III}}=$$

$$=\left(J_{x_1y_1}+a_1b_1A_1\right)+\left(J_{x_2y_2}+a_2b_2A_2\right)-\left(J_{x_3y_3}+a_3b_3A_3\right)=$$

$$=\left(0+0{,}18\cdot(-1{,}35)\cdot 108\right)+\left(-40{,}5+(-1{,}32)\cdot 6{,}65\cdot 27\right)-\left(0+(-1{,}32)\cdot 2{,}56\cdot 12{,}56\right)=$$

$$=-259{,}82\text{ см}^4.$$

Получили, что центробежный момент сечения $J_{x_cy_c}\neq 0$, следовательно, оси x_c и y_c не являются главными осями инерции.

9. Найдём положение главных осей инерции по формуле:

$$\operatorname{tg}2\alpha_0=\frac{-2\cdot J_{x_cy_c}}{J_{x_c}-J_{y_c}}=-2{,}29;\text{ откуда }\ 2\cdot\alpha_0=-66^{\text{o}}20';\ \ \alpha_0=-33^{\text{o}}10'.$$

10. Проводим главные оси инерции x_0, y_0 под углом α_0 относительно центральных осей и определяем значение главных моментов инерции

$$J_{x_0}=J_{x_c}\cos^2\alpha_0+J_{y_c}\sin^2\alpha_0-J_{x_cy_c}\sin 2\alpha_0=696{,}48\text{ см}^4;$$

$$J_{y_0} = J_{x_c}\sin^2\alpha_0 + J_{y_c}\cos^2\alpha_0 + J_{x_c y_c}\sin 2\alpha_0 = 1263{,}42 \text{ см}^4.$$

$$J_{\min} = J_{x_0} = 696{,}48 \text{ см}^4; \qquad J_{\max} = J_{y_0} = 1263{,}42 \text{ см}^4.$$

Проверка.

а) Согласно формуле (2.10)

$$J_{x_c} + J_{y_c} = \left(J_{x_0} + J_{y_0}\right) \pm 5\%;$$

$$\left(866{,}6 + 1093{,}32\right)\cdot 10^{-8} = \left(696{,}48 + 1263{,}42\right)\cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$1959{,}9\cdot 10^{-8}\text{см}^4 = 1959{,}9\cdot 10^{-8}\text{см}^4.$$

б) Согласно формуле (2.11)

$$J_{x_0 y_0} = \frac{\left(J_{x_c} - J_{y_c}\right)}{2}\sin 2\alpha_0 + J_{x_c y_c}\cos 2\alpha_0 = 0;$$

$$J_{x_0 y_0} = \frac{\left(866{,}6 - 1093{,}32\right)}{2}\sin 2\left(-33^{\circ}10'\right) + \left(-259{,}82\right)\cos 2\left(-33^{\circ}10'\right) = 0;$$

$$J_{x_0 y_0} = 104 - 104 = 0.$$

Проверка показывает, что главные моменты инерции определены правильно.

2.1. Задания для определения главных моментов инерции

а) Для заданного поперечного сечения (табл. 2.1), состоящего из швеллера и равнополочного уголка или из швеллера и двутавра (табл. 2.2), требуется:

1. Определить положение центра тяжести;
2. Найти осевые и центробежный моменты инерции относительно осей x_C и y_C, проходящих через центр тяжести сечения;
3. Определить положение главных осей инерции x_0 и y_0;
4. Найти главные моменты инерции относительно главных осей x_0 и y_0;
5. Вычертить сечение в выбранном масштабе и указать на нем все размеры в числах и все оси;
6. Сделать проверочные расчеты.

б) Для заданного поперечного сечения (табл. 2.3) требуется:

1. Определить положение центра тяжести;
2. Найти осевые и центробежный моменты инерции относительно осей x_C и y_C, проходящих через центр тяжести сечения;
3. Определить положение главных осей инерции x_0 и y_0;

4. Найти главные моменты инерции относительно главных осей x_0 и y_0;

5. Сделать проверочные расчеты.

Таблица 2.1

Номер варианта	Тип сечения	Швеллер №	Равнобокий уголок, мм	Двутавр №
1	I	14	80×80×8	12
2	II	16	80×80×6	14
3	III	18	90×90×8	16
4	IV	20	90×90×7	18
5	V	22	90×90×6	20а
6	VI	24	100×100×8	20
7	VII	27	100×100×10	22а
8	VIII	30	100×100×12	22
9	IX	33	125×125×10	24а
10	X	36	125×125×12	24

Таблица 2.2

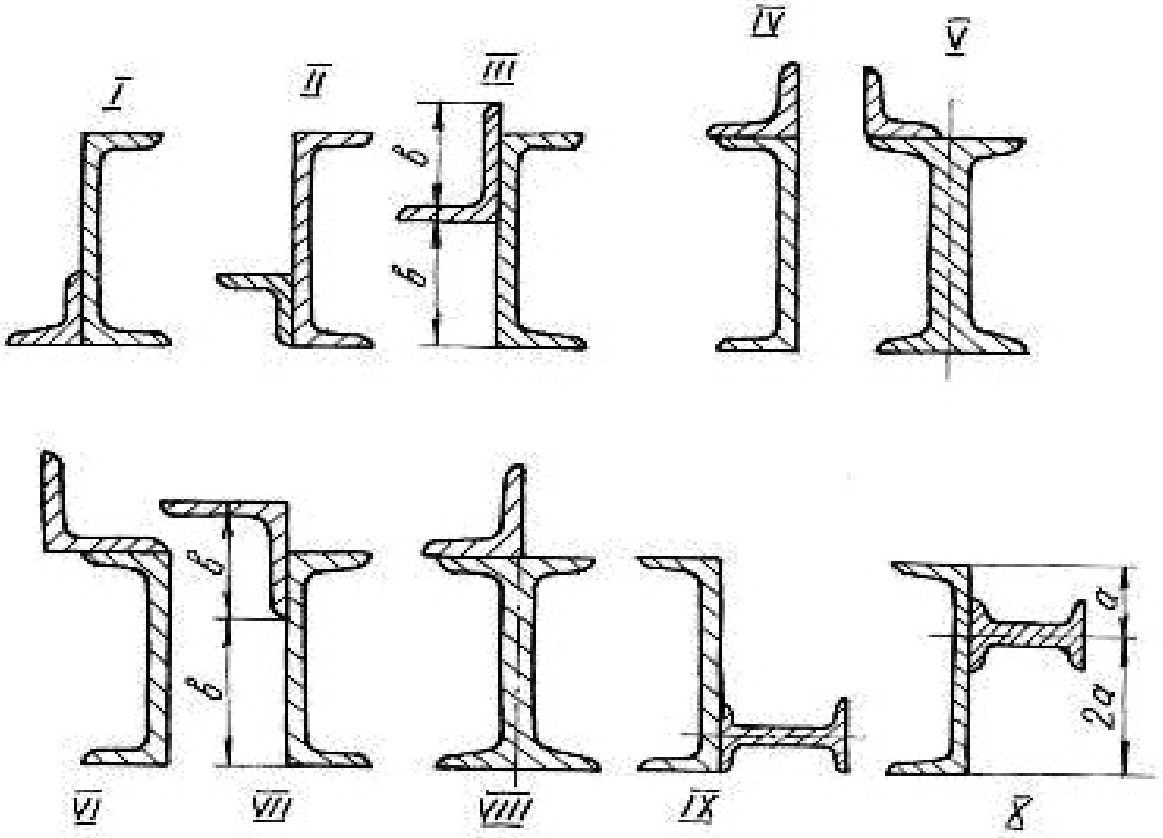
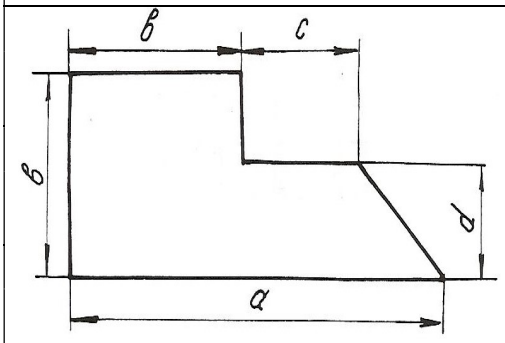
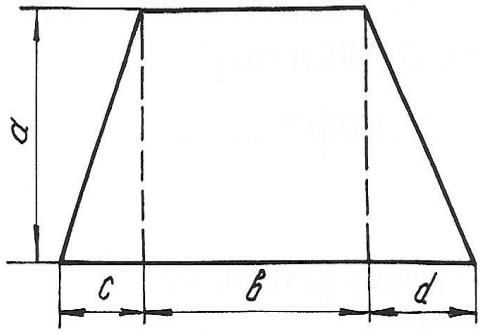
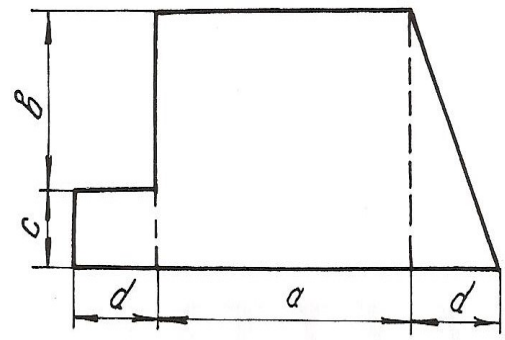
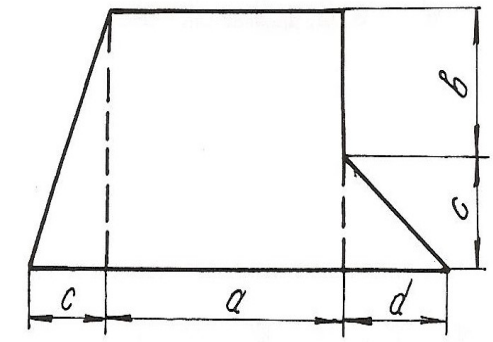
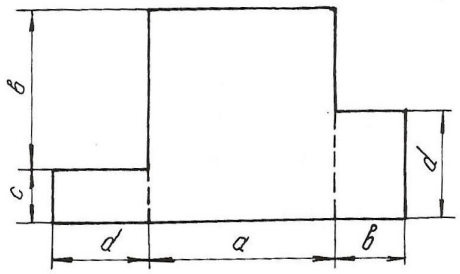
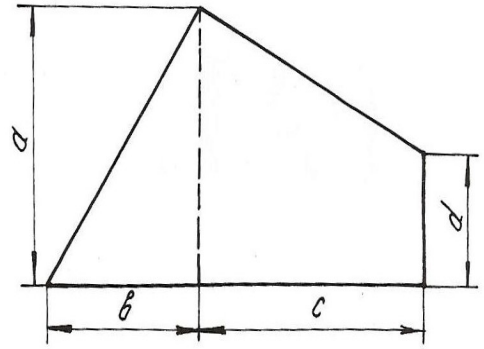
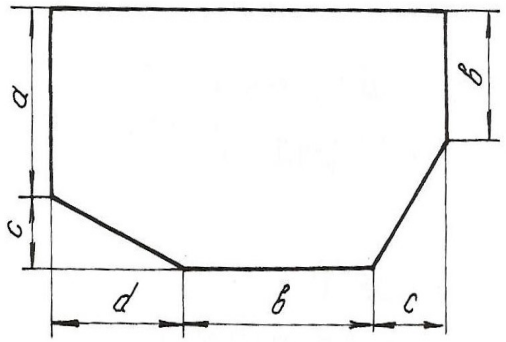
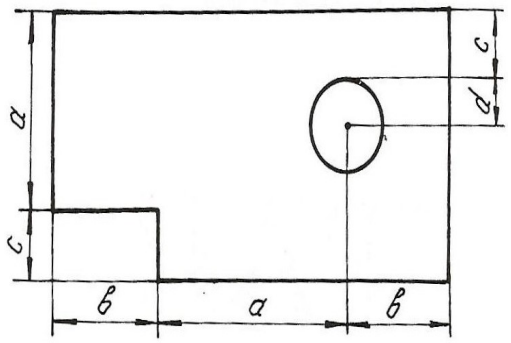


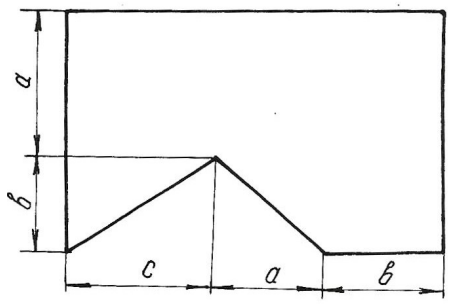
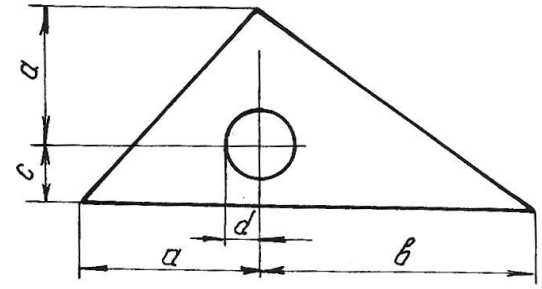
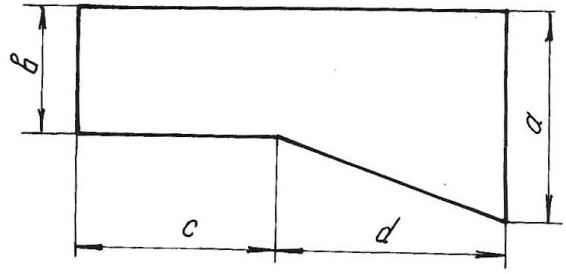
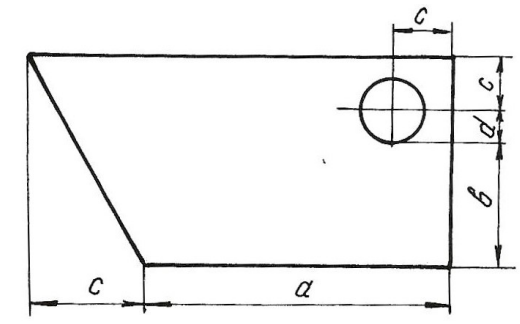
Таблица 2.3

Вид поперечного сечения	Номер варианта	*a*, см	*в*, см	*c*, см	*d*, см
	1	12	6	4	2
	2	16	10	2	6
	3	9	6	1	3
	4	6	9	3	5
	5	7	8	6	9
	6	8	6	4	6
	7	9	5	2	3
	8	6	4	3	4
	9	5	2	4	4
	10	4	3	2	5
	11	7	5	3	2
	12	9	4	4	6
	13	7	5	3	3
	14	6	3	6	4
	15	4	2	5	6

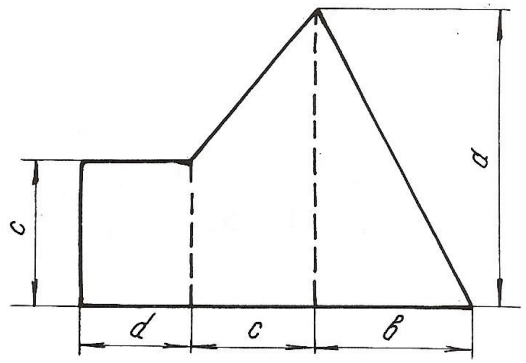
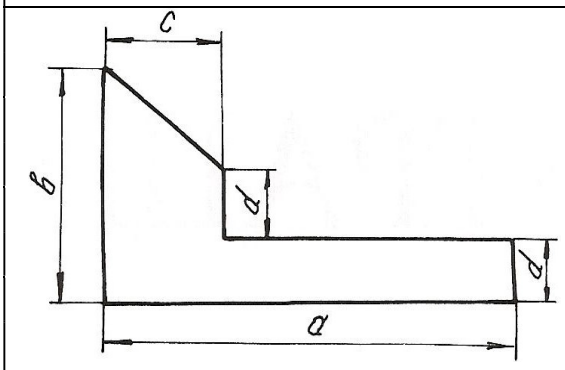
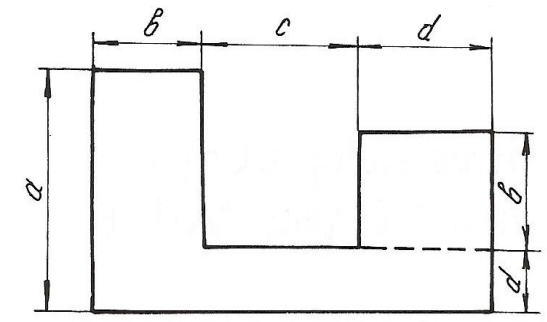
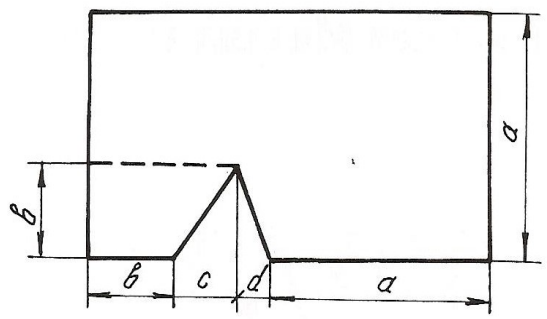
Продолжение табл. 2.3

Вид поперечного сечения	Номер варианта	*a*, см	*в*, см	*c*, см	*d*, см
	16	12	9	4	6
	17	18	12	5	8
	18	14	6	6	7
	19	15	19	3	4
	20	12	10	6	6
	21	16	8	9	4
	22	20	9	8	12
	23	14	14	12	6
	24	24	20	10	4
	25	10	8	4	3
	26	11	9	6	6
	27	13	12	5	9
	28	15	10	5	6
	29	8	4	8	12
	30	8	5	2	2
	31	9	4	1	2
	32	6	9	3	3
	33	10	6	4	1
	34	12	8	5	1

Продолжение табл. 2.3

Вид поперечного сечения	Номер варианта	*a*, см	*в*, см	*c*, см	*d*, см
	35	6	6	3	4
	36	9	4	6	5
	37	10	6	12	9
	38	12	9	10	6
	39	12	10	3	1
	40	10	12	3	2
	41	9	12	3	1
	42	8	10	3	2
	43	20	12	4	4
	44	18	10	3	5
	45	12	9	5	6
	46	15	12	6	4
	47	10	4	3	1
	48	12	6	4	2
	49	14	5	5	3
	50	16	6	4	1

Окончание табл. 2.3

Вид поперечного сечения	Номер варианта	*a*, см	*в*, см	*c*, см	*d*, см
	51	12	10	6	3
	52	18	12	4	9
	53	20	14	8	6
	54	22	16	10	4
	55	30	12	12	4
	56	24	14	10	6
	57	18	16	9	5
	58	12	10	8	3
	59	9	6	2	4
	60	6	5	4	2
	61	10	8	3	8
	62	12	9	4	1
	63	20	10	6	3
	64	12	6	4	3
	65	15	9	3	6
	66	18	10	9	6

Глава 3
ДЕФОРМАЦИЯ КРУЧЕНИЯ ВАЛА

Деформация кручения возникает при действии на вал пар сил, действующих в плоскостях, перпендикулярных к его продольной оси. При расчетах вала на кручение выполняются следующие условия прочности и жесткости:

$$\tau_{max} \le \tau_{adm}, \quad \varphi_{max} \le \varphi_{adm},$$

где τ_{max} – максимальное касательное напряжение, φ_{max} – максимальный угол закручивания вала.

Для определения максимального касательного напряжения и максимального угла закручивания необходимо иметь представление о том, как изменяется величина крутящего момента по длине вала. Текущие значения крутящих моментов определяются графиками их изменения, называемыми эпюрами. Вал по длине делится на участки вертикальными линиями, проведенными через те сечения, где приложены моменты пар сил. На каждом участке крутящий момент имеет постоянное значение и равен алгебраической сумме моментов относительно продольной оси, приложенных слева от сечения, проведенного условно на данном участке, или же приложенных справа от этого сечения.

Правило знаков: момент в сечении считается положительным, если, смотря на торцевое крайнее правое сечение вала, момент направлен по ходу часовой стрелки. Параллельно продольной оси вала проводится нулевая линия, от которой положительные моменты откладываются вверх, отрицательные – вниз в выбранном масштабе. Эпюра штрихуется вертикальными линиями. Диаметр сечения вала определяется из условия прочности

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{W_p} \le \tau_{adm}, \tag{3.1}$$

где T_{max} – максимальный крутящий момент из эпюры T; $W_p = \dfrac{J_p}{d/2} = \dfrac{\left(\pi d^4/32\right)}{\left(d/2\right)} = \dfrac{\pi d^3}{16}$ – полярный момент сопротивления кручению поперечного сечения.

Исходя из условия прочности $\dfrac{\pi d^3}{16} \ge \dfrac{T_{max}}{\tau_{adm}}$, можно определить диаметр вала

$$d \ge \sqrt[3]{\frac{16T_{max}}{\left(\pi\tau_{adm}\right)}} \quad . \tag{3.2}$$

Углы закручивания вала на отдельных участках определяются по формуле:

$$\varphi = \frac{Tl}{GJ_p}, \tag{3.3}$$

где T − крутящий момент на рассматриваемом участке вала, взятый из эпюры моментов; l - длина участка вала; GJ_p − жесткость вала при кручении; G − модуль сдвига; $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$ − полярный момент инерции поперечного сечения вала.

При построении эпюры углов закручивания вала необходимо помнить, что полный угол закручивания равен алгебраической сумме углов закручивания вала на отдельных участках. Значения углов закручивания в промежуточных сечениях определяются по формуле:

$$\alpha_{\text{прав}} = \alpha_{\text{лев}} + \varphi, \tag{3.4}$$

где $\alpha_{\text{лев}}$ − суммарный угол закручивания всех участков, которые находятся слева от рассматриваемого участка; φ − угол закручивания на данном участке.

Для определения максимального относительного угла закручивания определяют углы для каждого участка по формуле:

$$\theta = \frac{\varphi}{l}, \tag{3.5}$$

где l − длина рассматриваемого участка.

Пример 3.1.

К стальному валу приложены три известных момента: T_1=1100 Н·м, T_2=1400 Н·м, T_3= 1800 Н·м, a = 1,1 м, b = 1,4 м, c = 1,8 м (рис. 3.1).

Требуется:

1. Установить, при каком значении момента X угол закручивания правого концевого сечения вала равен нулю.

2. Построить эпюру крутящих моментов.

3. При заданном значении τ_{adm} определить диаметр вала из расчета на прочность и округлить его величину до ближайшего большого, соответственно равного 30, 35,40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 мм.

4. Построить эпюру углов закручивания.

5. Найти наибольший относительный угол закручивания и проверить вал на жесткость при $\theta_{\text{adm}} = 1{,}5\,\text{град}/\text{м}$.

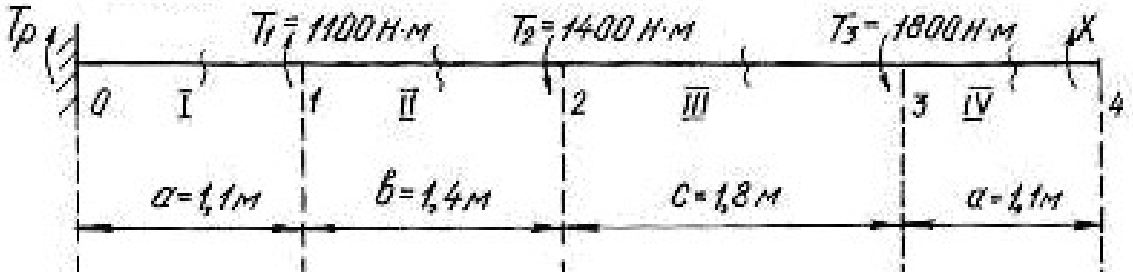


Рис. 3.1.

Решение.

1. Задача является статически неопределимой, так как невозможно определить из одного уравнения равновесия два неизвестных момента T_p и X. Для решения составим одно уравнение статики и одно уравнение совместности деформации. Уравнение статики представляем в виде уравнения моментов относительно продольной оси вала

$$\sum T = T_p + T_1 - T_2 - T_3 + X = 0 .$$

Угол закручивания правого концевого сечения может быть выражен как алгебраическая сумма взаимных углов закручивания сечений отдельных участков под действием каждого из моментов в отдельности

$$\sum \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0 ,$$

где φ_1 – угол закручивания вала на участке 0-1 под действием момента T_1; φ_2 – угол закручивания вала на участке под действием момента T_2; φ_3 – угол закручивания вала на участке под действием момента T_3; φ_4 – угол закручивания вала на участке 3-4 под действием неизвестного момента *X*.

При этом

$$\varphi_1 = \frac{T_1 a}{GJ_p}; \quad \varphi_2 = -\frac{T_2 (a+b)}{GJ_p}; \quad \varphi_3 = -\frac{T_3 (a+b+c)}{GJ_p}; \quad \varphi_4 = \frac{X(2a+b+c)}{GJ_p}.$$

$$\sum \varphi = \frac{T_1 a}{GJ_p} - \frac{T_2 (a+b)}{GJ_p} - \frac{T_3 (a+b+c)}{GJ_p} + \frac{X(2a+b+c)}{GJ_p} =$$

$$= T_1 a - T_2 (a+b) - T_3 (a+b+c) + X(2a+b+c) = 0.$$

Подставив данные, получим

$$1100 \cdot 1{,}1 - 1400 \cdot 2{,}5 - 1800 \cdot 4{,}3 + X \cdot 5{,}4 = 0 ;$$

откуда $X = \dfrac{-1210 + 3500 + 7740}{5{,}4} = 1857$ Н·м.

Реактивный момент находим из уравнения статики:

$$T_p = -T_1 + T_2 + T_3 - X;$$

$$T_p = -1100 + 1400 + 1800 - 1857 = 243 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Для построения эпюры моментов (рис. 3.2) определяем значения мо-

ментов методом сечений.

В сечении IV-IV $T_{IV} = 1857$ Н·м.

В сечении III-III $T_{III} = 1857 - 1800 = 57$ Н·м.

В сечении II-II $T_{II} = 1857 - 1800 - 1400 = -1343$ Н·м.

В сечении I-I $T_{I} = 1857 - 1800 - 1400 + 1100 = -243$ Н·м.

3. Найдем полярный момент инерции сечения

$$W_P \geq \frac{|T_{max}|}{\tau_{adm}} \geq \frac{1857}{60 \cdot 10^6} \geq 30{,}95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

где $\tau_{adm} = 60$ МПа; $T_{max} = 1857$ Нм.

Из соотношения $W_p = \frac{\pi d^3}{16}$ найдем диаметр вала:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot W_P}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 30{,}95 \cdot 10^{-6}}{3{,}14}} = 5{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 55 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр вала равным 60 мм.

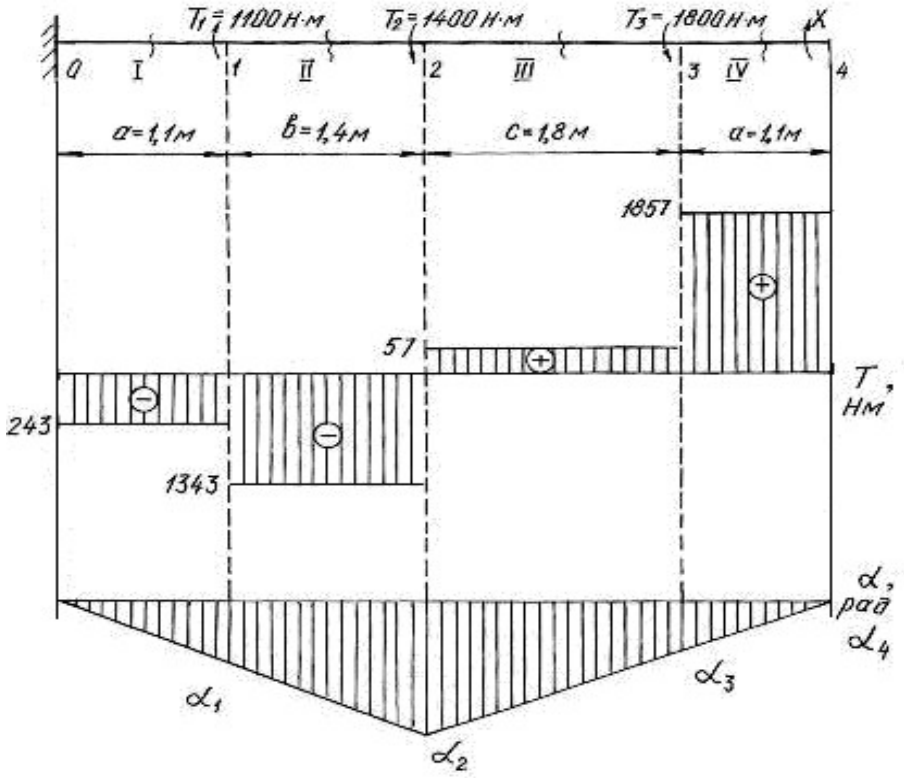


Рис. 3.2.

4. Углы закручивания вала на участках находим по формуле (3.3). Для этого сначала найдем J_p

$$J_p = \frac{3{,}14 \cdot 6^4}{32} = 127{,}2 \text{ см}^4 = 127{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

$$\varphi_{\text{I}} = \frac{T_{\text{I}} a}{G J_p} = -\frac{243 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}1}{8 \cdot 10^4 \cdot 127{,}2 \cdot 10^{-8}} = -0{,}0026 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{II}} = \frac{T_{\text{II}} b}{G J_p} = -\frac{-1343 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}4}{8 \cdot 10^4 \cdot 127{,}2 \cdot 10^{-8}} = -0{,}0185 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{III}} = \frac{T_{\text{III}} c}{G J_p} = \frac{57 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}8}{8 \cdot 10^4 \cdot 127{,}2 \cdot 10^{-8}} = 0{,}0010 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{IV}} = \frac{T_{\text{IV}} a}{G J_p} = \frac{1857 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}1}{8 \cdot 10^4 \cdot 127{,}2 \cdot 10^{-8}} = 0{,}0200 \text{ рад}.$$

В месте жёсткой заделки в сечении 0 вал неподвижен. По формуле (3.4), находим угол закручивания вала в сечениях 1, 2, 3, 4:

$\alpha_1 = \alpha_0 + \varphi_{\text{I}} = 0 - 0{,}0026$ рад;

$\alpha_2 = \alpha_1 + \varphi_{\text{II}} = -0{,}0026 - 0{,}0185 = -0{,}0211$ рад;

$\alpha_3 = \alpha_2 + \varphi_{\text{III}} = -0{,}0211 + 0{,}001 = -0{,}0201$ рад;

$\alpha_4 = \alpha_3 + \varphi_{\text{IV}} = -0{,}0201 + 0{,}02 = -0{,}0001 \approx 0$ рад.

Строим эпюру углов закручивания (см. рис.3.2). Относительный угол закручивания на каждом участке можно определить по формуле (3.5):

$$\theta_{\text{I}} = \frac{\varphi_{\text{I}}}{1{,}1} = -\frac{0{,}0026}{1{,}1} = -0{,}0023 \text{ рад/м};$$

$$\theta_{\text{II}} = \frac{\varphi_{\text{II}}}{1{,}4} = -\frac{0{,}0185}{1{,}4} = -0{,}0132 \text{ рад/м};$$

$$\theta_{\text{III}} = \frac{\varphi_{\text{III}}}{1{,}8} = \frac{0{,}0010}{1{,}8} = 0{,}0006 \text{ рад/м};$$

$$\theta_{\text{IV}} = \frac{\varphi_{\text{IV}}}{1{,}1} = \frac{0{,}0200}{1{,}1} = 0{,}0182 \text{ рад/м}.$$

5. Наибольшим является относительный угол закручивания на участке 3-4

$$\theta_{\max} = 0{,}0182 \text{ рад/м} = 0{,}0182 \frac{180^\circ}{\pi} = 1{,}04 \text{ град/м}.$$

Таким образом, $\theta_{\max} = 1{,}04$ град/м $< \theta_{\text{adm}} = 1{,}5$ град/м, т. е. условие жесткости выполняется.

Пример 3.2.

Шкив двухколодочного тормоза крана, имеющий диаметр $D = 300$ мм, жестко крепится на стальном валу диаметром $d = 30$ мм (рис. 3.3). Определить наибольшие напряжения кручения в сечении вала, если сила нажатия на колодки тормозного шкива Q = 820 Н, коэффициент трения скольжения между колодками и шкивом $f = 0{,}4$. Определить угол закручивания вала, если $l = 400$ мм.

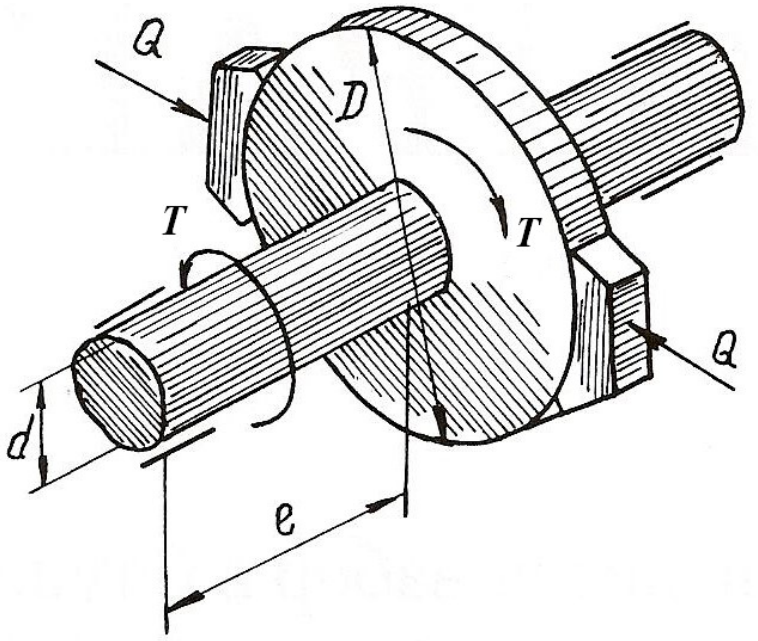


Рис. 3.3.

Решение.

Окружное усилие на тормозном шкиве равно силе трения, возникающей между колодками и шкивом

$$F = Qf = 820 \cdot 0{,}4 = 328 \text{ Н}.$$

Крутящий момент на тормозном шкиве

$$T = FD = 328 \cdot 30 \cdot 10^{-2} = 98{,}4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полярный момент сопротивления и полярный момент инерции сечения вала равны

$$W_p = \frac{\pi}{16} d^3 = \frac{\pi}{16}\left(3 \cdot 10^{-2}\right)^3 = 5{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$J_p = \frac{\pi}{32} d^4 = \frac{\pi}{32}\left(3 \cdot 10^{-2}\right)^4 = 7{,}96 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Наибольшее касательное напряжение в сечении определяем по формуле (3.1)

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_P} = \frac{98,4}{5,3 \cdot 10^{-6}} = 18,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 18,5 \text{ МПа}.$$

Угол закручивания вала тормозного шкива

$$\varphi = \frac{Tl}{GJ_p} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{98,4 \cdot 0,4}{8 \cdot 10^{-10} \cdot 7,96 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 0,36^\circ,$$

следовательно $\varphi = 22'$.

Пример 3.3.

К стальному валу, оба конца которого защемлены (рис. 3.4, *а*), приложен крутящий момент $T = 440$ Н·м. Определить реактивные моменты в опорах A и B и построить эпюру крутящих моментов при $l_1 = 0,2$ м, $l = 0,8$ м.

Решение.

Обозначим реактивные моменты в защемлении через T_A и T_B. Из статики знаем уравнение равновесия

$$-T_A + T - T_B = 0 \text{ или } T_A + T_B = T$$

Далее составим уравнение совместности деформаций. Для этого отбросим (мысленно) защемление правого конца вала и заменим его действием на вал неизвестным реактивным моментом T_B (рис. 3.4, *б*).

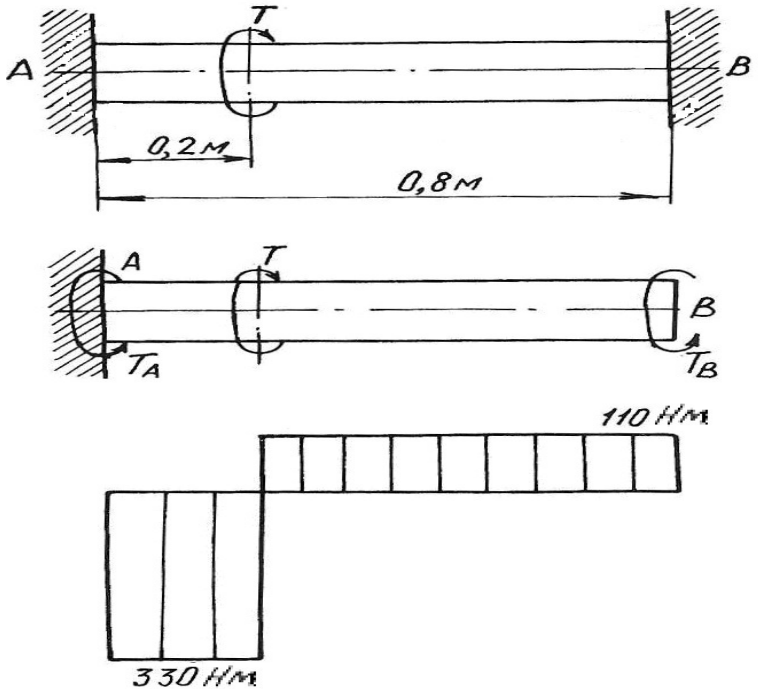


Рис. 3.4.

Величину момента T_B определим из условия, что угол закручивания правого крайнего сечения от действия моментов T и T_A равен нулю, так как это сечение вследствие защемления неподвижно. Угол закручивания правого освобожденного сечения вала на основе принципа независимости действия сил можно определить как сумму двух слагаемых

$$\varphi = \varphi' + \varphi'',$$

где φ' и φ'' – углы закручивания правого освобожденного сечения вала, найденные отдельно от моментов T и T_B, при этом $\varphi' = \dfrac{Tl_1}{GJ_p}$; $\varphi'' = -\dfrac{T_B l}{GJ_p}$.

Знак минус в выражении φ'' взят потому, что моменты T и T_B противоположны по направлению.

Полный угол закручивания правого сечения равен нулю, поэтому

$$\varphi = \varphi' + \varphi'' = \frac{Tl_1}{GJ_p} - \frac{T_B l}{GJ_p} = 0,$$

откуда $T_B = \dfrac{Tl_1}{l} = \dfrac{440 \cdot 0{,}2}{0{,}8} = 110$ Н·м.

Из уравнения статики определим момент T_A

$$T_A = T - T_B = 440 - 110 = 330 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Эпюра крутящих моментов приведена на рис. 3.4, *в*.

3.1. Задания для расчета валов на кручение

К стальному валу приложены три известных момента $T_1,\ T_2,\ T_3$.

Требуется:

1. Установить, при каком значении момента X угол закручивания правого концевого сечения вала равен нулю.

2. Построить эпюру крутящих моментов.

3. При заданном значении τ_{adm} определить диаметр вала из расчета на прочность и округлить его значение до ближайшего равного: 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100 мм.

4. Построить эпюру углов закручивания, найти наибольший относительный угол закручивания и проверить вал на жесткость при $\theta_{adm} = 1{,}5$ град/м.

Данные для расчета приведены на рис. 3.5 и в табл. 3.1.

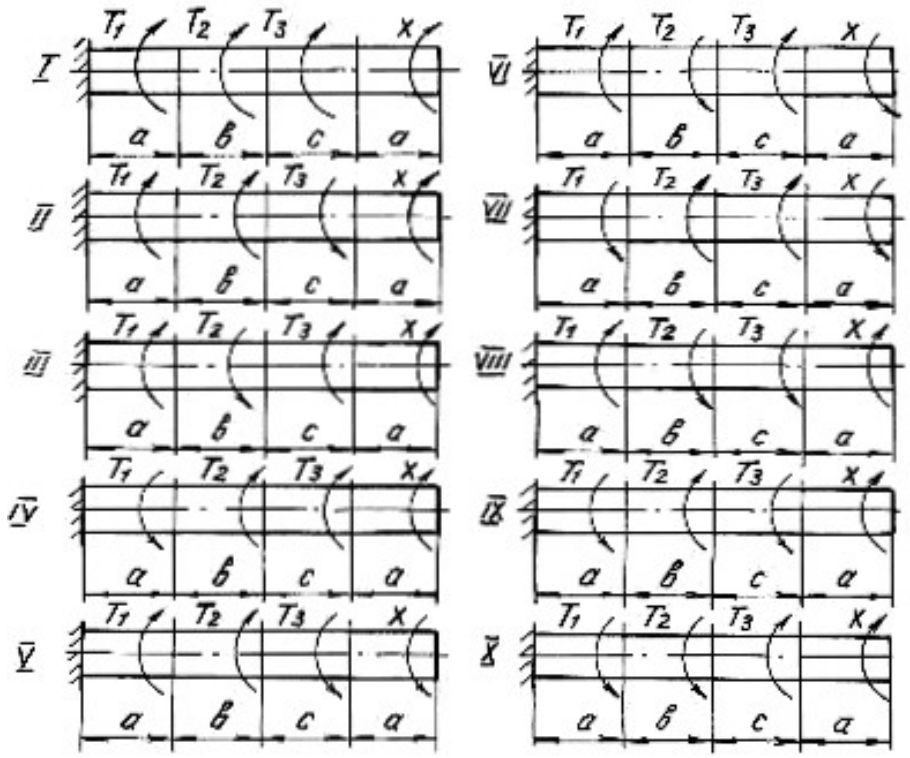


Рис. 3.5.

Таблица 3.1

Номер варианта	Номер схемы	Расстояние, м			Момент, Н·м			τ_{adm}, МПа
		a	*b*	*c*	T_1	T_2	T_3	
1	I	1,1	1,2	1,1	1100	1000	1200	35
2	II	1,2	1,3	1,2	1200	1100	1000	40
3	III	1,3	1,4	1,3	1300	1200	1100	45
4	IV	1,4	1,5	1,4	1400	1300	1200	50
5	V	1,5	1,6	1,5	1500	1400	1300	55
6	VI	1,6	1,7	1,6	1600	600	1500	60
7	VII	1,7	1,8	1,7	1700	700	1600	65
8	VIII	1,8	1,9	1,8	1800	800	1700	70
9	IX	1,9	2,0	1,9	1900	900	1800	75
10	X	2,0	2,1	2,0	2000	1000	2100	80

Глава 4
ДЕФОРМАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА БАЛОК

Деформация поперечного изгиба может возникнуть от любых нагрузок, если линии действия этих нагрузок находятся в плоскости, проходящей через продольную ось балки. Если в такой плоскости располагается одна из главных осей инерции поперечного сечения, то возникает деформация плоского изгиба. От действия внешних нагрузок в поперечных сечениях балок возникают внутренние силовые факторы – поперечные силы и изгибающие моменты. Для их нахождения пользуемся методом сечений и, изучая равновесие сил, приводим внешние нагрузки к центру тяжести поперечного сечения.

Поперечная сила Q_x в любом сечении равна алгебраической сумме проекций всех внешних сил, приложенных с одной стороны от рассматриваемого сечения, на ось, перпендикулярную к продольной оси балки.

Изгибающий момент M_x в любом сечении равен алгебраической сумме моментов всех сил, действующих с одной стороны от рассматриваемого сечения балки, относительно центра тяжести сечения.

Правило знаков для Q_x и M_x:

1) поперечная сила считается положительной, если она сдвигает левую часть балки от сечения вверх, а правую часть балки вниз;

2) изгибающий момент в сечении считается положительным, если он изгибает балку выпуклостью вниз; при изгибе балки выпуклостью вверх изгибающий момент считается отрицательным.

Уравновесить момент внешних сил может только момент внутренних сил упругости, который образован силами, направленными нормально к сечению балки. Поперечная сила может быть уравновешена силой, которая является равнодействующей внутренних сил упругости, расположенных в плоскости сечения балки.

Таким образом, нормальные напряжения, возникающие в поперечных сечениях балок, зависят от величины изгибающих моментов в этих сечениях, а касательные напряжения – от величины поперечных сил в этих сечениях. Эту зависимость в общем виде можно записать

$$\sigma = f_1(M_x); \quad \tau = f_2(Q_x)$$

Таким образом, для того, чтобы определить напряжения в поперечных сечениях, необходимо знать законы изменения Q_x и M_x по длине балок. Для этого строят два графика, называемых эпюрами поперечных сил и изгибающих моментов.

Порядок построения эпюр сводится к следующему:

1. Заданная балка вычерчивается в выбранном масштабе с указанием размеров и нагрузок;

2. С помощью уравнений равновесия статики определяются реакции опор с обязательной последующей проверкой;

3. Балка разбивается на отдельные участки. Каждый участок имеет свой закон изменения нагрузки;

4. Для каждого участка записываются уравнения для определения Q_x и M_x;

5. Вычисляют ординаты Q_x и M_x по составленным для отдельных участков уравнениям;

6. Строят в принятом масштабе эпюры Q_x и M_x.

Положительные значения найденных величин откладываются выше нулевой линии эпюры, а отрицательные − ниже ее.

Построение эпюр поперечных сил и изгибающих моментов можно выполнить, применяя следующие контрольные правила для построения эпюр:

1. На концевых шарнирных опорах Q_x равны реакциям, а M_x равны нулю, если на опорах не приложены пары с моментами *M.*

2. На участках балки, где отсутствует распределенная нагрузка, поперечная сила постоянна, а изгибающий момент изменяется по линейному закону.

3. На участках, где приложена равномерно распределенная нагрузка, эпюра Q_x изменяется по закону прямой наклонной линии, а эпюра M_x − по закону квадратичной параболы. В том сечении, где эпюра Q_x пересекается с нулевой линией, на эпюре M_x наблюдается экстремальное значение момента (вершина параболы).

4. На участках, где приложена нагрузка, изменяющаяся по закону треугольника, эпюра Q_x изменяется по закону квадратичной параболы, а эпюра M_x − по закону кубической параболы.

5. В тех сечениях, где приложены сосредоточенные силы (включая и реакции), на эпюре Q_x наблюдаются скачки (перепады) на величину этих сил, а на эпюре M_x − переломы смежных линий.

6. В тех сечениях, где приложены пары с моментами *M*, на эпюре M_x наблюдаются скачки на величину этих моментов.

7. На свободном конце консольной балки поперечная сила Q_x равна нулю, если в этом месте не приложена сосредоточенная сила; и изгибающий момент M_x равен нулю, если в этом месте не приложена пара с моментом *M.*

8. В жесткой заделке консольной балки Q_x равна реакции, а изгибающий момент M_x равен моменту заделки.

Нормальные напряжения при изгибе определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M_x}{J_{\text{н.о.}}} y, \qquad (4.1)$$

где M_x − изгибающий момент в сечении; $J_{\text{н.о.}}$ − момент инерции сечения относительно нейтральной оси поперечного сечения (нейтральная ось – это ось, в любой точке которой нормальные напряжения всегда равны нулю); y − расстояние до рассматриваемого волокна от нейтральной оси.

Касательные напряжения при изгибе могут быть определены по формуле Д. И. Журавского:

$$\tau = \frac{Q_x S_{\text{н.о.}}}{J_{\text{н.о.}} b}, \tag{4.2}$$

где Q_x − поперечная сила в сечении; $S_{\text{н.о.}}$ − статический момент площади отсеченной части поперечного сечения выше уровня, на котором определяются касательные напряжения относительно нейтральной оси; b − ширина сечения на уровне, для которого определяются напряжения.

Подбор поперечного сечения балки производится на основании следующего условия прочности:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\text{н.о.}}} \le \sigma_{\text{adm}}, \tag{4.3}$$

откуда

$$W_{\text{н.о.}} \ge \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}}, \tag{4.4}$$

где $M_{\max}$ − максимальный изгибающий момент, взятый из эпюры M_x; $W_{\text{н.о.}}$ − момент сопротивления поперечного сечения балки изгибу относительно нейтральной оси; σ_{adm} − допускаемое нормальное напряжение для материала балки.

После подбора поперечного сечения производится полная проверка балки на прочность по следующим напряжениям:

а) по рабочим нормальным напряжениям

$$\sigma_{\text{раб.}} = \frac{M_{\max}}{W_{\text{н.о.}}} \le \sigma_{\text{adm}},$$

где $W_{\text{н.о.}}$ − момент сопротивления выбранного поперечного сечения.

б) по максимальным касательным напряжениям

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max} S_{\text{н.о.}}}{J_{\text{н.о.}} b} \le \tau_{\text{adm}},$$

где $Q_{\max}$ − наибольшая поперечная сила, взятая из эпюры Q_x; $S_{\text{н.о.}}$ − статический момент части площади выбранного поперечного сечения, находящейся выше или ниже нейтральной оси, относительно этой оси; b − ширина сечения на уровне нейтральной оси; $J_{\text{н.о.}}$ − момент инерции выбранного сечения относительно нейтральной оси.

в) по главным напряжениям:

проверка проводится для балок, ширина сечений которых не постоянна. При этой проверке на основании эпюр выбирается опасное сечение балки, в котором одновременно значения Q_x и M_x большие. По формулам (4.1) и (4.2) для этого сечения строят эпюры нормальных и касательных напряжений, а затем определяют главные напряжения для характерных волокон сечения по его высоте, пользуясь формулой:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}). \tag{4.5}$$

Для стальных балок определяют расчётное (эквивалентное) напряжение для верхних (нижних), средних, переходных волокон (где резко изменяется ширина сечения) по III или IV теориям прочности.

Проверка прочности сводится к рассмотрению выполнения следующих условий прочности:

$$\sigma_p^{III} = \sigma_1 - \sigma_2 \le \sigma_{adm}, \tag{4.6}$$

$$\sigma_p^{IV} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \le \sigma_{adm}. \tag{4.7}$$

4.1. Расчет балки на прочность

Пример 4.1.

Для расчетной схемы с указанными размерами и нагрузками (рис. 4.1.) построить по длине балки эпюры изгибающих моментов и поперечных сил.

Подобрать поперечное сечение балки в двух вариантах:

а) прямоугольного профиля, полагая, что балка деревянная при $\sigma_{adm} = 10$ МПа; соотношение между размерами сечения принять равным $b:h = 1:2$;

б) двутаврового профиля (см. табл. П.1), материал сталь при $\sigma_{adm} = 160$ МПа, $\tau_{adm} = 96$ МПа.

в) провести полную проверку стальной балки на прочность.

Решение.

Определение опорных реакций.

Расчёт балки следует начинать с расстановки и определения величины опорных реакций. Величина и направление опорных реакций и реактивных моментов могут быть определены из решения уравнений равновесия. Для плоской

системы параллельных сил (поперечный плоский изгиб) условия равновесия описываются двумя уравнениями статики: $\sum M_A = 0;\ \sum M_B = 0$.

Рассматриваемая балка (см. рис. 4.1) имеет две шарнирные опоры. В опоре *A* (шарнирно-подвижной) возникает одна реакция R_A , в опоре *B* (шарнирно-неподвижной) направление реакции в общем случае неизвестно, поэтому разложим её на две составляющие: H_B − горизонтальную и R_B − вертикальную. Все нагрузки действуют перпендикулярно продольной оси балки, поэтому из уравнения проекций на горизонтальную ось *x* получается, что составляющая $H_B = 0$. Запишем уравнения моментов сил относительно опоры *B*

$$\sum M_B = 0, \qquad M_1 - R_A \cdot 5 + F \cdot 3 - M_2 + q \cdot 3 \cdot 0{,}5 = 0 .$$

Решаем уравнение относительно R_A

$$R_A = \frac{M_1 + F \cdot 3 - M_2 + q \cdot 3 \cdot 0{,}5}{5} = \frac{30 + 60 \cdot 3 - 50 + 20 \cdot 1{,}5}{5} = 38 \text{ кН} .$$

Запишем уравнения моментов сил относительно опоры *A*

$$\sum M_A = 0, \quad R_B \cdot 5 - q \cdot 3 \cdot 4{,}5 - M_2 - F \cdot 2 + M_1 = 0 .$$

Решаем уравнение относительно R_B

$$R_B = \frac{q \cdot 3 \cdot 4{,}5 + M_2 + F \cdot 2 - M_1}{5} = \frac{20 \cdot 3 \cdot 4{,}5 + 50 + 60 \cdot 2 - 30}{5} = \frac{410}{5} = 82 \text{ кН}.$$

Для проверки правильности вычисления опорных реакций составим уравнение проекций всех сил на вертикальную ось *y*:

$$\sum y = 0, \quad R_A - F - q \cdot 3 + R_B = 0; \quad 38 - 60 - 60 + 82 = 0, \ \ 120 - 120 = 0 .$$

Последнее уравнение обращается в тождество, следовательно, величина реакций и их направление определены правильно.

Если в результате решения уравнения реакция имеет отрицательное значение, то следует изменить направление реакции на противоположное и в дальнейших расчётах считать её положительной.

После определения опорных реакций можно перейти к построению эпюр изгибающих моментов и поперечных сил, предварительно разбив балку по длине на участки, в пределах которых закон изменения внешних нагрузок остаётся постоянным.

Границы участков располагаются в местах приложения моментов пар сил, сосредоточенных сил, начала или конца распределенной нагрузки.

Участки нумеруются слева или справа от концевых сечений балки. Рассчитываемая балка имеет пять участков I - V.

При составлении аналитических выражений для Q_x и M_x в пределах I-го участка проведём сечение с абсциссой x_1 и рассмотрим равновесие левой части консоли. На эту часть балки действует пара сил с моментом $M_1 = 30$ кН · м, поэтому поперечная сила $Q_\text{I} = 0$, а изгибающий момент в любом сечении будет постоянным $M_\text{I} = -M_1 = -30$ кН · м.

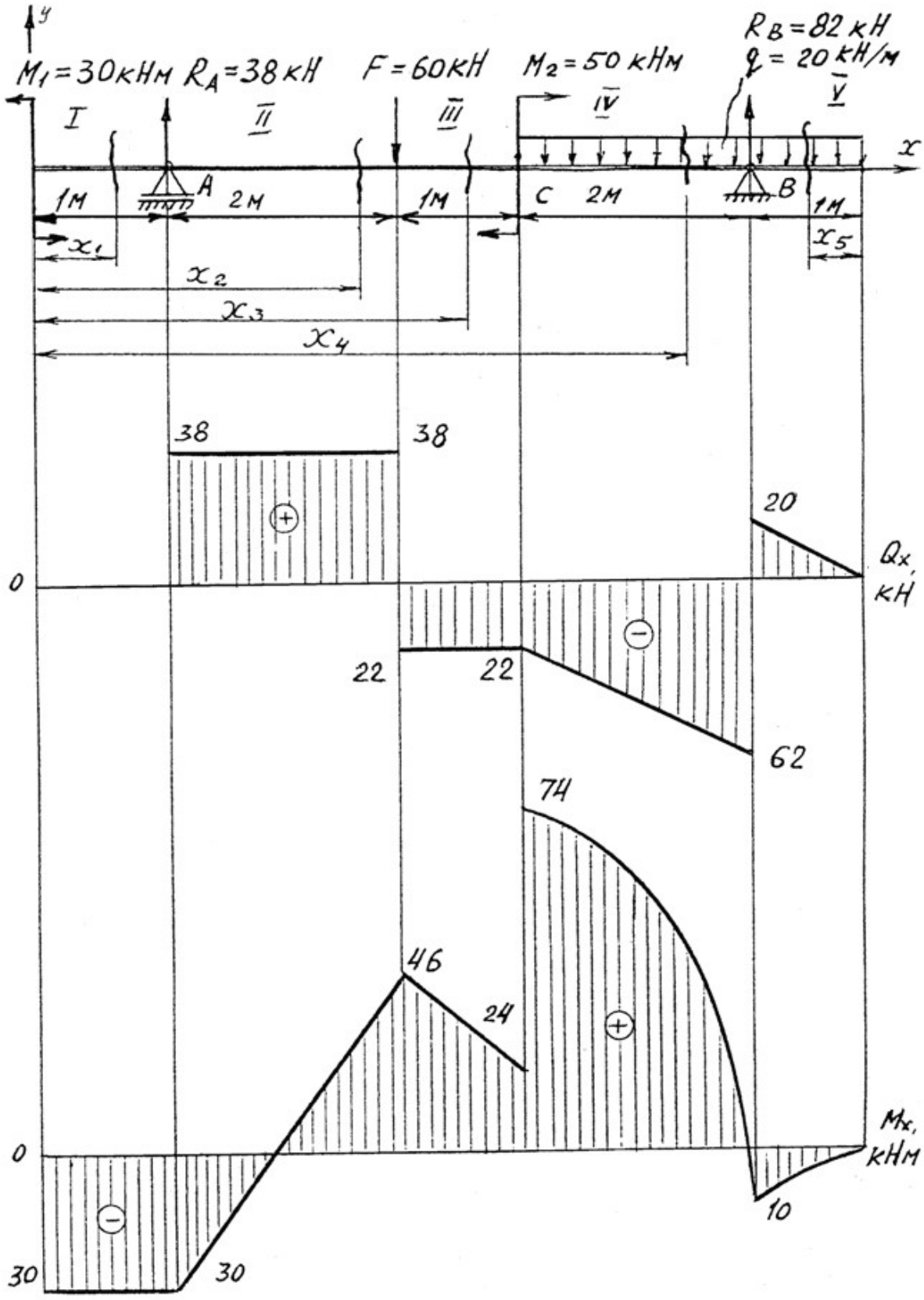

y
M1 = 30кНм
RA = 38 кН
F = 60кН
M2 = 50 кНм
RB = 82 кН
q = 20 кН/м
I
II
III
IV
V
x
A
B
C
1м
2м
1м
2м
1м
x1
x2
x3
x4
x5
38
38
20
0
Qx, кН
22
22
62
74
46
24
0
Mx, кНм
30
30
10

Рис. 4.1.

Для составления аналитических выражений Q_x и M_x в пределах II-го участка проводим сечение с абсциссой x_2 и рассматриваем равновесие левой части балки.

$Q_{\text{II}} = R_A = 38$ кН − поперечная сила в пределах II-го участка постоянна.

$M_{\text{II}} = -M + R_A(x_2 - 1)$.

Это уравнение прямой линии, для её построения достаточно определить ординаты изгибающего момента в двух точках (на концах участка):

при $x_2 = 1$ м $\quad M_{\text{II}} = -M_1 = -30$ кН·м;

при $x_2 = 3$ м $\quad M_{\text{II}} = -M_1 + R_A \cdot 2 = -30 + 76 = 46$ кН·м.

Для III-го участка (сечение с абсциссой x_3)

$Q_{\text{III}} = R_A - F = 38 - 60 = -22$ кН.

На этом участке поперечная сила не зависит от x_3 и поэтому на протяжении всего участка она не меняет своего значения.

$M_{\text{III}} = -M_1 + R_A(x_3 - 1) - F(x_3 - 3)$.

Это уравнение прямой линии.

Вычислим моменты при следующих значениях x_3:

при $x_3 = 3$ м $\quad M_{\text{III}} = -30 + 38 \cdot 2 = 46$ кН·м;

при $x_3 = 4$ м $\quad M_{\text{III}} = -30 + 38 \cdot 3 - 60 = 24$ кН·м.

Для IV-го участка (сечение с абсциссой x_4) поперечная сила равна:

$Q_{\text{IV}} = R_A - F - q(x_4 - 4)$.

Это уравнение прямой линии.

Вычислим ординаты в начале и в конце участка:

при $x_4 = 4$ м $\quad Q_{\text{IV}} = 38 - 60 = -22$ кН;

при $x_4 = 6$ м $\quad Q_{\text{IV}} = 38 - 60 - 40 = -62$ кН.

Уравнение изгибающих моментов для IV-го участка имеет вид

$$M_{\text{IV}} = -M_1 + R_A(x_4 - 1) - F(x_4 - 3) + M_2 - q\frac{(x_4 - 4)^2}{2}.$$

Это уравнение параболы.

Для её построения определяем моменты:

при $x_4 = 4$ м $\quad M_{\text{IV}} = -30 + 114 - 60 + 50 - 20 \cdot 0 = 74$ кН;

при $x_4 = 6$ м $\quad M_{\text{IV}} = -30 + 38 \cdot 5 - 60 \cdot 3 + 50 - 20 \cdot (4/2) = -10$ кН.

Прежде, чем составлять выражение поперечной силы и изгибающего момента для V-го участка, заметим, что их можно найти как из равновесия левой части, так и из равновесия отсеченной правой части. Каждый раз к выбору решения нужно подходить с точки зрения возможной простоты и наименьшего количества вычислений.

Для V-го участка (сечение с абсциссой x_5) поперечная сила равна

$Q_{\text{V}} = q x_5$.

Вычислим значения ординат:

при $x_5 = 0$ $\quad Q_{\text{V}} = 0$;

при $x_5 = 1$ м $\quad Q_{\text{V}} = 20$ кН.

Составим уравнение изгибающего момента для V-го участка:

$$M_{\text{V}} = -qx_5 \frac{x_5}{2} = -\frac{qx_5^2}{2}.$$

Получили уравнение параболы. Для её построения вычислим ординаты:

при $x_5 = 0$, $\quad M_{\text{V}} = 0$;

при $x_5 = 1$, $\quad M_{\text{V}} = -10$ кН·м.

При построении эпюр Q_x и M_x выбираем масштаб и откладываем положительные значения ординат эпюр от нулевой линии вверх, а отрицательные вниз (см. рис. 4.1). После построения эпюр устанавливаем наибольшие значения поперечной силы $Q_{\max} = 62$ кН и изгибающего момента $M_{\max} = 74$ кН·м.

Сечение *C* является опасным, в нем $Q_x = 22$ кН, $M_x = 74$ кН$\cdot$м.

Подбор поперечного сечения балки проводим в соответствии с условием задания в двух вариантах:

а) подбор сечения прямоугольного профиля деревянной балки

$$W_{\text{н.о.}} \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{74 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^6} = 7{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 7400 \text{ см}^3.$$

Для прямоугольного сечения $W_{\text{н.о.}} = \dfrac{J_{\text{н.о.}}}{y_{\max}} = \dfrac{(bh)^3/12}{h/2} = \dfrac{bh^2}{6}$.

При $h = 2b$, $\quad W_{\text{н.о.}} = (2/3)b^3 \geq 7400$ см^3, $\quad$ отсюда $\quad b \geq \sqrt[3]{\dfrac{3 \cdot 7400}{2}} = 22{,}3$ см;

$h = 2 \cdot 22{,}3 = 44{,}6$ см.

После округления размеров в большую сторону принимаем: $h = 46$ см, $b = 23$ см.

б) подбор сечения двутаврового профиля

$$W_{\text{н.о.}} \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{74 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 4{,}62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 462 \text{ см}^3.$$

Из таблицы сортамента проката этому значению соответствует двутавр № 30, для которого $W_{\text{н.о.}} = W_x^{\text{табл.}} = 472$ см^3.

Основные размеры и геометрические характеристики профиля:

высота $h = 0{,}3$ м; ширина полки $b = 0{,}135$ м; толщина полки $t = 0{,}01$ м; толщина стенки $d = 0{,}65 \cdot 10^{-2}$ м; площадь сечения $A = 46{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^2; момент инерции сечения относительно нейтральной оси $J_{\text{н.о.}} = J_x^{\text{табл.}} = 0{,}708 \cdot 10^{-4}$ м^4; статический момент половины площади сечения относительно нейтральной оси $S_{\text{н.о.}}^{\max.} = S_x^{\text{табл.}} = 2{,}68 \cdot 10^{-4}$ м^3.

Полная проверка стальной балки на прочность:

а) проверка по рабочим нормальным напряжениям

$$\sigma_{\text{раб.}} = \frac{M_{\max}}{W_x^{\text{табл.}}} = \frac{74 \cdot 10^3}{4,72 \cdot 10^{-4}} = 157 \cdot 10^6 \text{ Па} = 157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{раб.}} = 157 \text{ МПа} < \sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа},$$

т. е. условие прочности выполняется.

б) проверка по максимальным касательным напряжениям

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max} S_x^{\text{табл.}}}{J_x^{\text{табл.}} d} = \frac{62 \cdot 2,68 \cdot 10^{-4}}{0,708 \cdot 10^{-4} \cdot 0,65 \cdot 10^{-2}} = 36,2 \cdot 10^6 \text{ Па} = 36,2 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\max} = 36,2 \text{ МПа} < \tau_{\text{adm}} = 96 \text{ МПа}.$$

Таким образом, условие прочности выполняется.

в) проверка по главным напряжениям в опасном сечении *C*, в котором $Q_x = 22$ кН, $M_x = 74$ кН·м.

Строим эпюру нормальных напряжений для этого сечения по уровням (рис. 4.2):

$$\sigma_{1-1} = -\frac{M_x}{J_x^{\text{табл.}}} y_{1-1} = -\frac{74 \cdot 10^3}{0,708 \cdot 10^{-4}} 0,15 = -157 \cdot 10^6 \text{ Па} = -157 \text{ МПа}.$$

Знак «минус» при напряжении для верхних волокон указывает на то, что при положительной эпюре M_x в этом сечении верхняя часть волокон испытывает деформацию осевого сжатия.

$$\sigma_{7-7} = \sigma_{1-1} = 157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{2-2} = \sigma_{3-3} = -\frac{M_x}{J_x^{\text{табл.}}} y_{2-2} = -\frac{M_x}{J_x^{\text{табл.}}} \left(\frac{h}{2} - t\right) = -\frac{74 \cdot 10^3}{0,708 \cdot 10^{-4}} (0,15 - 0,01) =$$

$$= -147 \cdot 10^6 \text{ Па} = -147 \text{ МПа}; \qquad \sigma_{4-4} = 0, \text{ так как } y_{4-4} = 0.$$

Эпюра касательных напряжений также строится по значениям, определяемым для различных уровней (волокон) сечения

$$\tau_{1-1} = \tau_{7-7} = 0,$$

так как $S_{\text{н.о.}}^{1-1} = 0,$ т. е. статический момент площади сечения, находящейся выше или ниже уровня 1-1 относительно нейтральной оси, равен нулю.

Напряжения в волокнах уровня 2-2 и 6-6 можно не определять, так как они обычно очень малы.

В переходных волокнах 3-3 и 5-5 напряжения будут равны

$$\tau_{3-3} = \tau_{5-5} = \frac{Q_x S_{\text{н.о.}}^{3-3}}{J_x^{\text{табл.}} b_{3-3}} = \frac{Q_x bt(h/2 - t/2)}{J_x^{\text{табл.}} d} =$$

$$= \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 0{,}135 \cdot 0{,}01 \cdot (0{,}15 - 0{,}005)}{0{,}708 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}65 \cdot 10^{-2}} = 9{,}7 \cdot 10^6 \text{ Па} = 9{,}7 \text{ МПа}.$$

Для волокон нейтрального слоя

$$\tau_{4-4} = \frac{Q_x S_{\text{н.о.}}^{4-4}}{J_x^{\text{табл.}} b_{4-4}} = \frac{Q_x S_x^{\text{табл.}}}{J_x^{\text{табл.}} d} = \frac{22 \cdot 2{,}68 \cdot 10^{-4}}{0{,}708 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}65 \cdot 10^{-2}} = 12{,}8 \cdot 10^6 \text{ Па} = 12{,}8 \text{ МПа}.$$

Эпюры σ и τ строятся в масштабе (см. рис. 4.2).

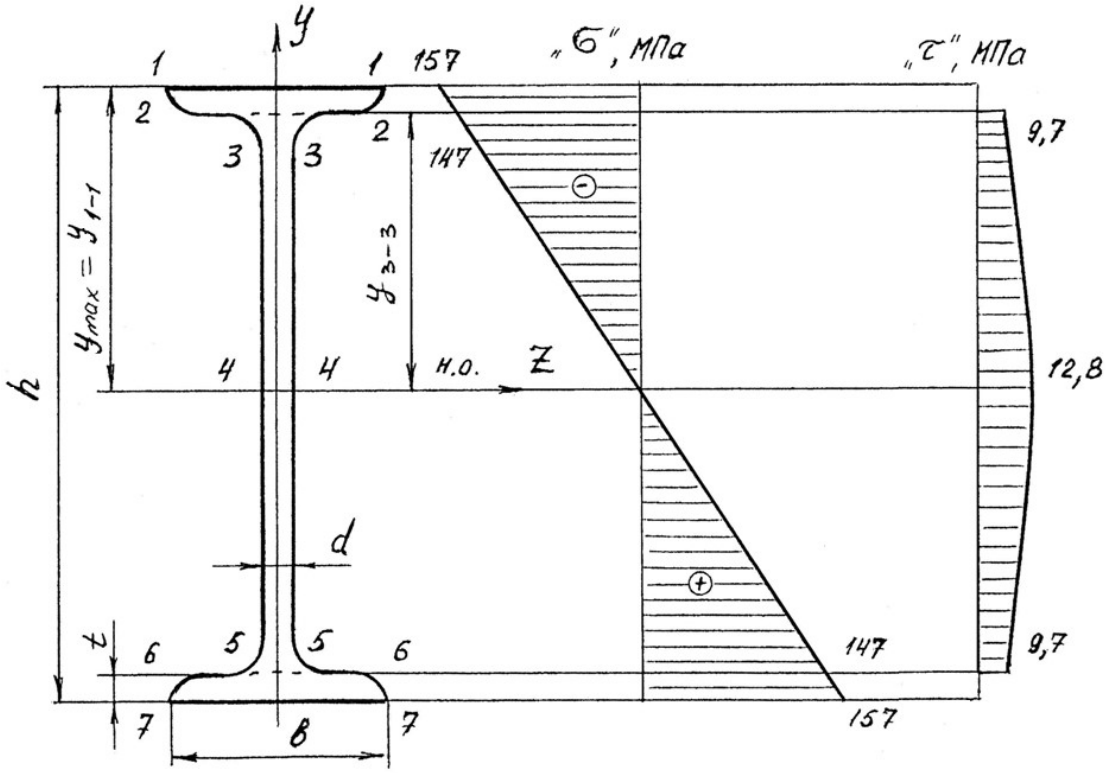


Рис. 4.2.

На основании эпюр напряжений определяют главные напряжения для верхних, переходных и средних волокон

$$\sigma_1^{1-1} = 1/2(\sigma_{1-1} + \sqrt{\sigma_{1-1}^2 + 4\tau_{1-1}^2}) = 1/2(-157 + \sqrt{157^2 + 4 \cdot 0^2}) = 0;$$

$$\sigma_2^{1-1} = 1/2(-157 - \sqrt{157^2 + 4 \cdot 0^2}) = -157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_1^{3-3} = 1/2(-147 + \sqrt{147^2 + 4 \cdot 9{,}7^2}) = 0{,}5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2^{3-3} = 1/2(-147 - \sqrt{147^2 + 4 \cdot 9{,}7^2}) = -147{,}5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_1^{4-4} = 1/2(0 + \sqrt{0^2 + 4 \cdot 12{,}8^2}) = 12{,}8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2^{4-4} = -12{,}8 \text{ МПа}.$$

Определим величины расчётных напряжений по третьей теории прочности:

$$\sigma_{\text{p}}^{1-1} = \sigma_1^{1-1} - \sigma_2^{1-1} = 0 - (-157) = 157 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{p}}^{3-3} = \sigma_1^{3-3} - \sigma_2^{3-3} = 0{,}5 - (-147{,}5) = 148 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{p}}^{4-4} = \sigma_1^{4-4} - \sigma_2^{4-4} = 12{,}8 - (-12{,}8) = 25{,}6 \text{ МПа},$$

таким образом условие прочности $\sigma_{\text{p}}^{\text{III}} < \sigma_{\text{adm}}$ выполняется.

По четвертой теории прочности

$$\sigma_{\text{p}}^{1-1} = \sqrt{(\sigma_1^{1-1})^2 + (\sigma_2^{1-1})^2 - \sigma_1^{1-1}\sigma_2^{1-1}} = \sqrt{0^2 + 157^2 - 0^2} = 157 \text{ МПа}.$$

Аналогично: $\sigma_{\text{p}}^{3-3} = 148$ МПа; $\sigma_{\text{p}}^{4-4} = 22{,}1$ МПа.

Таким образом, результаты по всем вариантам полной проверки прочности балки показывают, что все условия прочности выполняются, следовательно, к практическому применению принимается двутавр № 30.

Пример 4.2. Консольная балка, сложное сечение.

Для заданной схемы балки (рис. 4.3) построить эпюры поперечных сил Q_x и изгибающих моментов M_x, определить размеры сечения заданной формы из условия прочности, принимая $\sigma_{\text{adm}} = 160$ МПа.

Решение.

Определим реакции опоры A из уравнений равновесия

1) $\sum M_A = 0; \quad -M_A + M - q \cdot 1 \cdot 2{,}5 + F \cdot 3 = 0;$

$M_A = M - q \cdot 1 \cdot 2{,}5 + F \cdot 3 = 6 - 10 + 24 = 20 \text{ кН} \cdot \text{м}.$

2) $\sum Y = 0; \quad R_A - q \cdot 1 + F = 0$ (предварительное направление реакции R_A вверх);

$R_A = q \cdot 1 - F = 4 - 8 = -4$ кН (меняем направление реакции на противоположное).

Проверка

$\sum M_C = 0; \quad -M_A + R_A \cdot 3 + M + q \cdot 1 \cdot 0{,}5 = -20 + 12 + 6 + 2 = 0.$

Определим размеры поперечного сечения (см. рис. 4.3), для чего условно разбиваем это сечение на фигуры 1, 2, 3 и 4, площади которых равны: $A_1 = 5b \cdot 6b; \; A_2 = 2b \cdot 3b; \; A_3 = A_4 = b \cdot b.$

Для определения положения центра тяжести сечения проводим вспомогательную ось $x_{\text{вр}}$ и найдем координату y_C по известной формуле

$$y_c = \frac{S_{x_{\text{вр}}}}{A} = \frac{A_1 y_1 - A_2 y_2 + A_3 y_3 + A_4 y_4}{A_1 - A_2 + \cdot A_3 + A_4} =$$

$$= \frac{6b \cdot 5b \cdot 2{,}5b - 2b \cdot 3b \cdot 1{,}5b + 2b \cdot b \cdot 0{,}5b}{6b \cdot 5b - 2b \cdot 3b + 2b \cdot b} = 2{,}58b,$$

где y_1, y_2, y_3, y_4 – расстояния от центров тяжести фигур 1, 2, 3, 4 до оси $x_{вр}$.

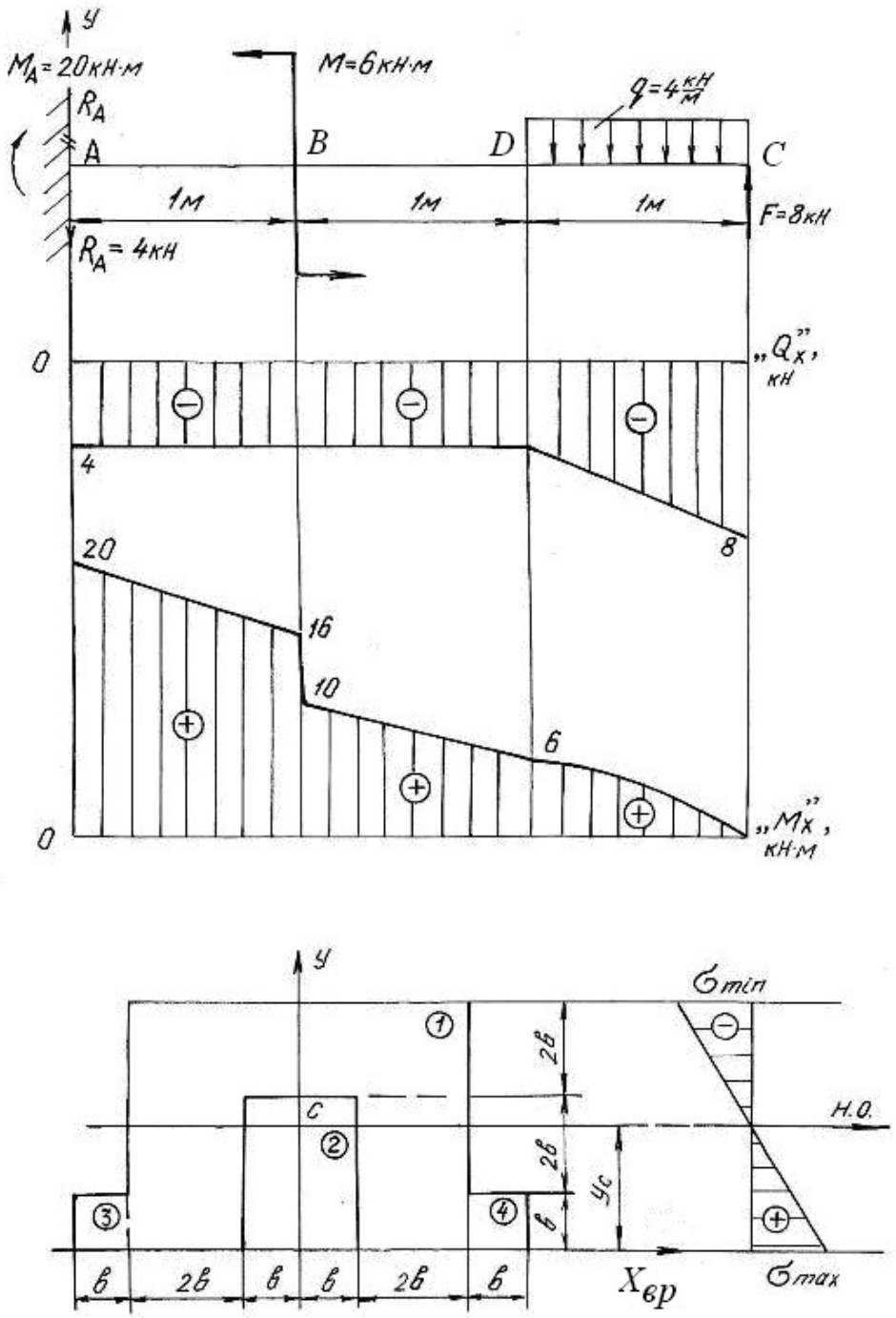


Рис. 4.3.

Так как сечение симметричное, то его центр тяжести лежит на оси симметрии y.

Проводим нейтральную ось через центр тяжести параллельно вспомогательной оси $x_{\text{вр}}$. Находим момент инерции относительно нейтральной оси

$$J_{\text{н.о.}} = \left(J_{\text{н.о.}}\right)^1 - \left(J_{\text{н.о.}}\right)^2 + 2\left(J_{\text{н.о.}}\right)^3 = \left[\frac{6b\cdot(5b)^3}{12} + 6b\cdot 5b\cdot(y_1 - y_c)^2\right] -$$

$$-\left[\frac{2b\cdot(3b)^3}{12} + 2b\cdot 3b\cdot(y_2 - y_c)^2\right] + 2\cdot\left[\frac{b\cdot b^3}{12} + b\cdot b\cdot(y_3 - y_c)^2\right] = 60\cdot b^4,$$

где $(y_n - y_C)$ – расстояние между собственной осью простой фигуры и нейтральной осью.

Строим эпюры поперечных сил Q_x и изгибающих моментов M_x, пользуясь контрольными правилами и начиная построения со свободного конца балки.

$Q_C = -F = -8$ кН; $Q_D = -F + q\cdot 1 = -8 + 4 = -4$ кН $= Q_B = Q_A$;

$M_C = 0$; $M_D = F\cdot 1 - q\cdot 1\cdot 0{,}5 = 8 - 2 = 6$ кН·м;

$M_B = F\cdot 2 - q\cdot 1\cdot 1{,}5 = 16 - 6 = 10$ кН·м.

В сечении B изгибающий момент возрастает на момент $M = 6$ кН·м, что на эпюре M_x отражается в виде скачка. Изгибающий момент в жесткой заделке равен моменту заделки M_A.

Максимальный изгибающий момент $M_{\max} = M_A = 20$ кН·м. Максимальные напряжения, возникающие в нижних волокнах этого сечения

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y^{\text{н}}_{\max}}{J_{\text{н.о.}}} = \frac{20\cdot 2{,}58\cdot b}{60\cdot b^4} = \frac{0{,}83\ \text{кН}\cdot\text{м}}{b^3}.$$

Максимальные напряжения, возникающие в верхних волокнах этого сечения

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\max} y^{\text{в}}_{\max}}{J_{\text{н.о.}}} = \frac{20\cdot 2{,}42\cdot b}{60\cdot b^4} = \frac{0{,}81\ \text{кН}\cdot\text{м}}{b^3}.$$

Приравнивая наибольшее напряжение к допускаемому напряжению σ_{adm}, получим размер сечения b

$$\sigma_{\max} = \frac{0{,}83\ \text{кН}\cdot\text{м}}{b^3} \le \sigma_{\text{adm}} = 160\ \text{МПа};\ b^3 \ge \frac{0{,}83\cdot 10^3}{160\cdot 10^6},$$

$$b \ge \sqrt[3]{5{,}2\cdot 10^{-6}} = 1{,}73\cdot 10^{-2}\ \text{м};\ \ b = 18\ \text{мм}.$$

4.2. Задания для расчета балок на прочность

Для расчетной схемы балки необходимо:

1. Построить по длине балки эпюры изгибающих моментов и поперечных сил.

2. Подобрать поперечное сечение балки в двух вариантах:

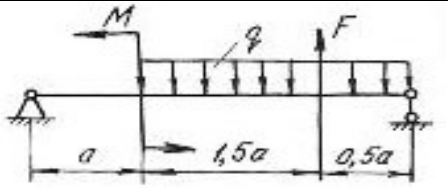
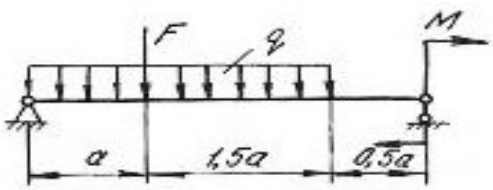
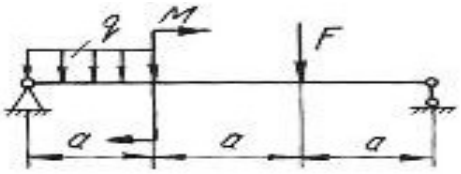
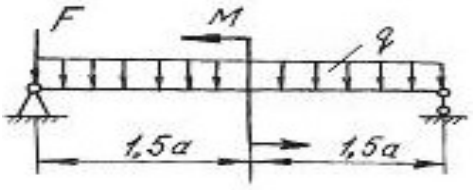
а) прямоугольного профиля, полагая, что балка деревянная при $\sigma_{adm} = 10$ МПа; соотношение между размерами сечения принять равными $b:h = 1:2$;

б) двутаврового профиля (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа, $\tau_{adm} = 96$ МПа.

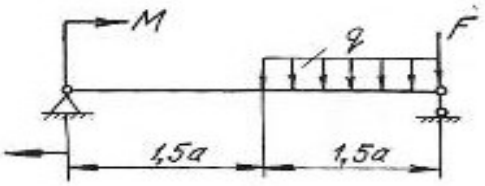
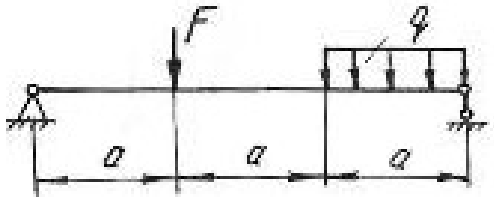
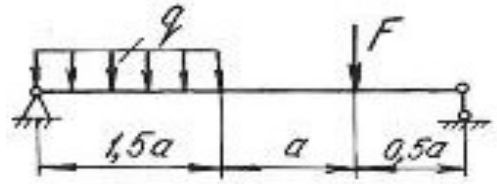
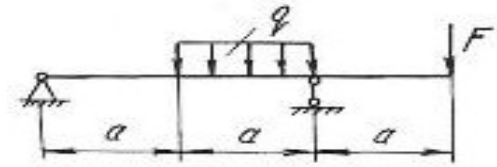
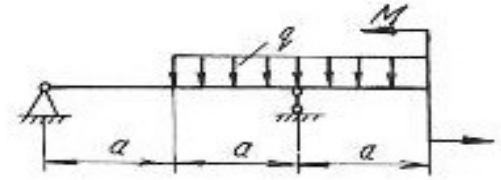
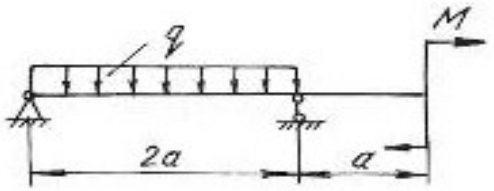
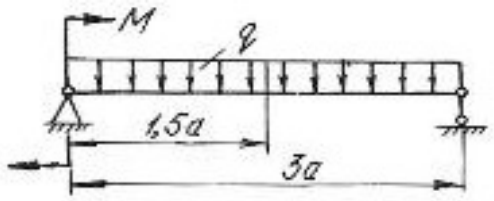
3. Провести полную проверку стальной двутавровой балки на прочность.

Данные для расчета приведены в табл. 4.1.

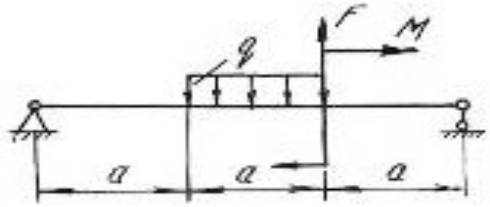
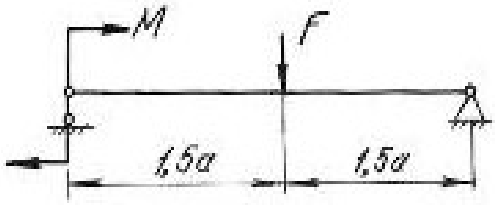
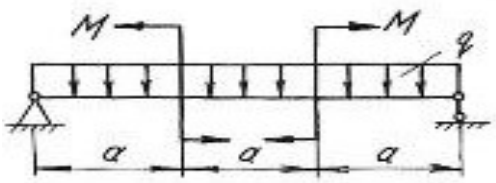
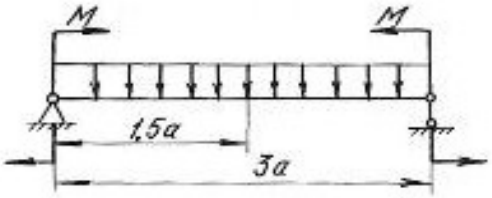
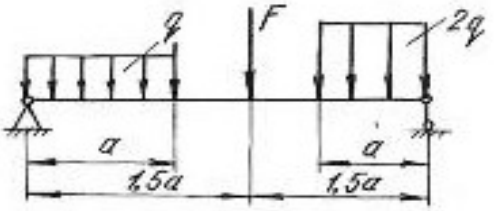
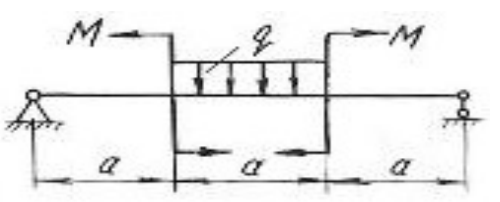
Таблица 4.1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	1	2,0	19	20	20
	2	1,0	16	35	40
	3	1,2	10	30	40
	4	2,0	10	25	50
	5	2,2	30	50	40
	6	2,4	10	10	20
	7	1,0	10	65	20
	8	1,2	10	55	40
	9	2,0	20	45	15
	10	1,0	18	32	60
	11	2,2	10	35	50
	12	1,8	30	42	30
	13	2,0	12	26	20
	14	1,0	14	14	20
	15	2,0	15	25	30

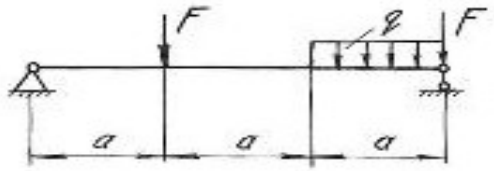
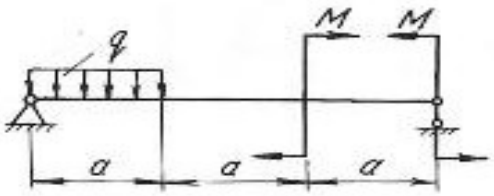
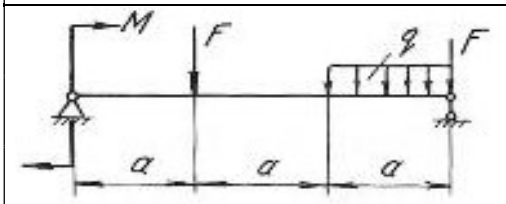
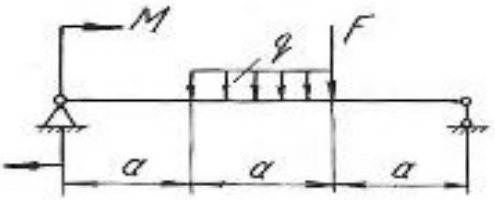
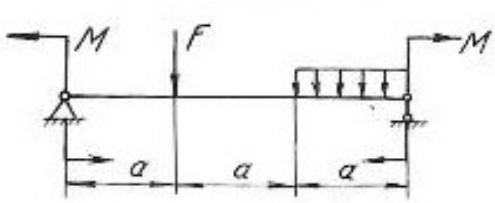
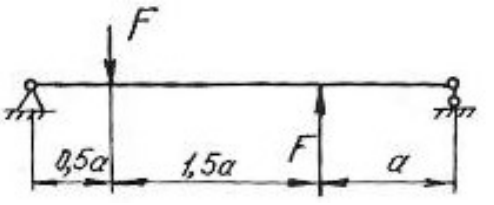
Продолжение табл. 4.1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	16	1,0	10	32	40
	17	2,0	25	42	20
	18	1,6	30	50	30
	19	1,0	10	–	10
	20	2,0	11	–	30
	21	1,0	12	–	30
	22	1,2	13	–	60
	23	2,2	14	–	70
	24	3,0	15	–	40
	25	3,0	16	–	20
	26	1,2	17	–	70
	27	2,0	18	–	70
	28	3,0	20	10	–
	29	2,0	21	60	–
	30	2,0	22	10	–
	31	2,1	23	30	–
	32	2,0	24	30	–
	33	2,2	25	30	–
	34	2,0	26	40	–
	35	2,0	27	40	–
	36	2,0	28	40	–

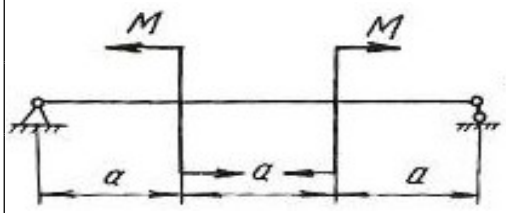
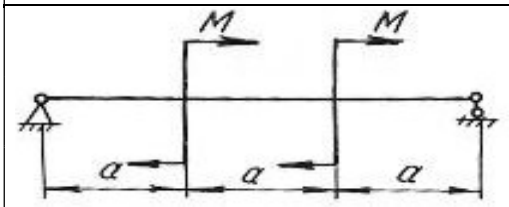
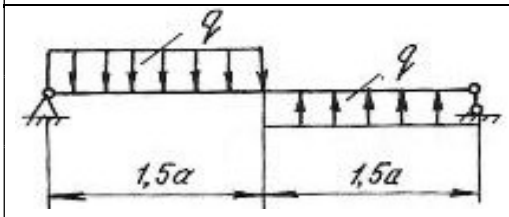
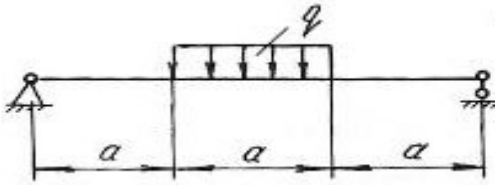
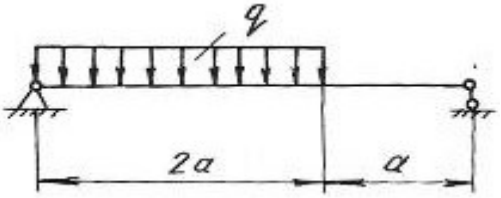
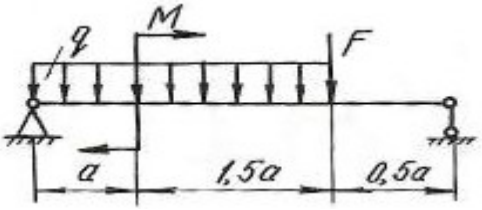
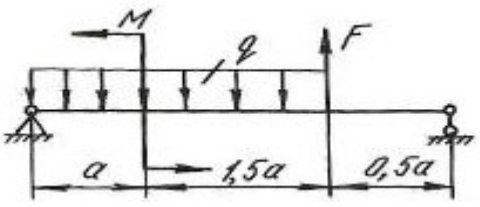
Продолжение табл. 4.1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	37	1,2	10	30	15
	38	1,3	12	40	10
	39	1,4	15	45	12
	40	1,0	14	50	10
	41	2,0	13	60	20
	42	2,0	12	55	12
	43	1,1	16	–	20
	44	1,4	17	–	16
	45	1,5	20	–	15
	46	1,6	18	30	–
	47	1,2	11	20	–
	48	1,3	14	10	–
	49	0,8	15	40	–
	50	0,7	13	13	–
	51	1,1	17	22	–
	52	0,5	24	–	20
	53	0,6	28	–	30
	54	0,9	30	–	40
	55	1,1	10	30	–
	56	1,2	20	31	–
	57	1,3	30	32	–

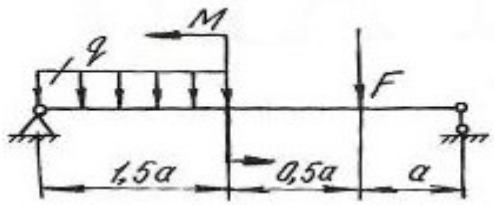
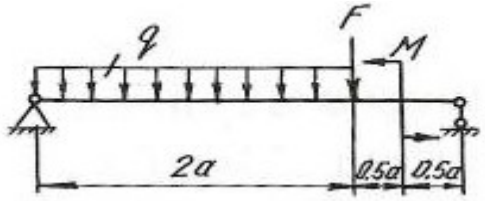
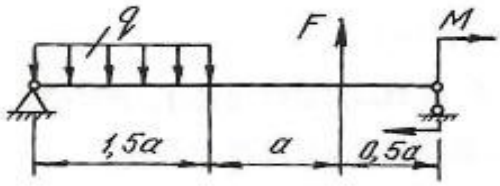
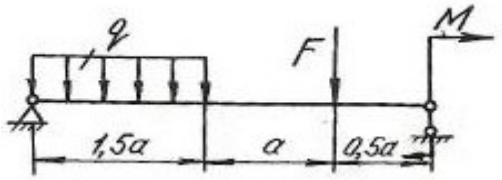
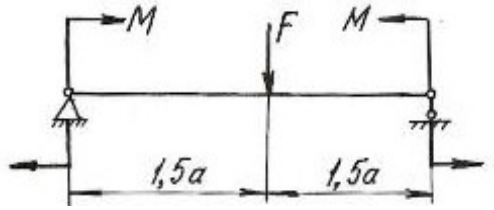
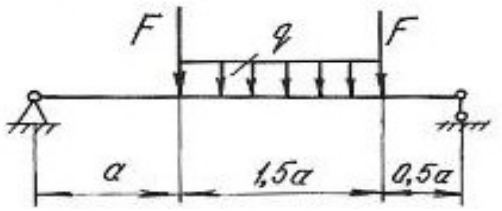
Продолжение табл. 4.1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	58	1,4	40	–	40
	59	1,2	35	–	50
	60	2,0	28	–	80
	61	1,5	12	20	–
	62	1,7	14	30	–
	63	1,9	16	40	–
	64	2,1	18	20	20
	65	2,3	19	30	30
	66	2,5	20	25	40
	67	2,0	12	30	25
	68	2,4	10	35	30
	69	2,7	10	30	35
	70	1,0	12	10	40
	71	2,0	14	20	30
	72	2,0	16	30	40
	73	1,0	–	–	20
	74	2,0	–	–	30
	75	2,5	–	–	40

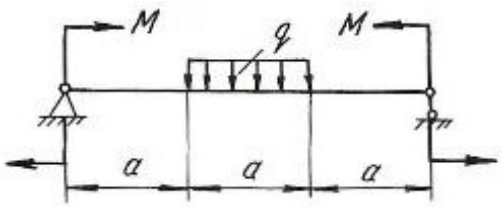
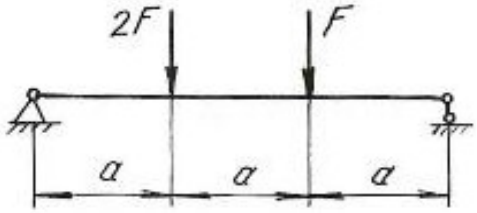
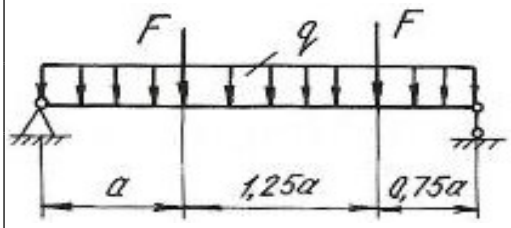
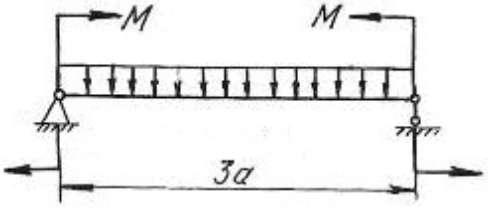
Продолжение табл. 4.1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	76	1,5	–	30	–
	77	2,5	–	40	–
	78	1,2	–	50	–
	79	1,3	–	40	–
	80	1,4	–	25	–
	81	1,6	–	30	–
	82	1,7	10	–	–
	83	1,8	10	–	–
	84	1,9	10	–	–
	85	2,1	30	–	–
	86	2,2	20	–	–
	87	2,3	10	–	–
	88	2,0	25	–	–
	89	1,0	15	–	–
	90	2,3	10	–	–
	91	1,0	15	30	80
	92	2,0	20	40	90
	93	2,0	25	50	100
	94	1,2	10	45	25
	95	1,4	12	50	30
	96	1,6	15	60	35

Продолжение табл. 4. 1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	97	1,8	15	30	40
	98	1,0	18	20	45
	99	1,4	21	55	50
	100	1,0	10	30	55
	101	2,0	20	35	80
	102	1,0	30	60	40
	103	1,9	15	25	60
	104	1,7	13	50	40
	105	1,3	17	75	20
	106	1,0	18	20	35
	107	2,2	16	60	45
	108	2,3	14	40	55
	109	1,0	–	30	50
	110	0,6	–	40	50
	111	0,8	–	30	60
	112	1,0	2	–	70
	113	0,6	30	–	60
	114	1,2	40	–	50

Окончание табл. 4.1

Схема балки и нагрузки	Номер варианта	Числовые значения нагрузок и размеров			
		a, м	*q*, кН/м	*M*, кН·м	*F*, кН
	115	1,2	20	40	–
	116	1,3	10	20	–
	117	1,4	20	30	–
	118	1,5	–	–	40
	119	1,0	–	–	30
	120	1,3	–	–	20
	121	1,0	10	–	20
	122	1,0	20	–	40
	123	1,0	30	–	10
	124	1,2	10	20	–
	125	1,3	11	40	–
	126	1,5	12	50	–

4.3. Расчет балки на жесткость

После проверки балок на прочность они обычно проверяются на жесткость.

Проверка состоит в определении максимальных перемещений балки при изгибе и сравнении их с допускаемыми значениями для данного материала и типа балки. При этом должны выполняться следующие условия:

$$y_{\max} \le y_{\text{adm}}; \quad y_{\text{adm}} = (\frac{1}{20} \div \frac{1}{250})l; \qquad \theta_{\max} \le \theta_{\text{adm}},$$

где y_{adm} – допускаемый прогиб; θ_{adm} – допускаемый угол поворота; l – пролёт балки.

Для определения прогибов и углов поворота в статически определимых балках обычно применяют метод начальных параметров, который записывается в виде следующих универсальных уравнений:

$$EJ_Z\theta = EJ_Z\theta_0 + \sum_{i=1}^{n}\frac{M_i(x-a_i)^1}{1!} + \sum_{i=1}^{n}\frac{F_i(x-b_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^{n}\frac{q_i(x-c_i)^3}{3!}, \quad (4.8)$$

где n – количество нагрузок на рассматриваемых участках.

$$EJ_z y = EJ_Z y_0 + EJ_Z\theta_0 x + \sum_{i=1}^{n}\frac{M_i(x-a_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^{n}\frac{F_i(x-b_i)^3}{3!} + \sum_{i=1}^{n}\frac{q_i(x-c_i)^4}{4!}, \quad (4.9)$$

где θ – угол поворота в исследуемом сечении; y – прогиб в исследуемом сечении; y_0 – прогиб в начале координат; θ_0 – угол поворота в начале координат; x – расстояние от начала координат до сечения, в котором определяются перемещения; M, F, q – внешние нагрузки, включая и реакции; a – расстояния от начала координат до сечений, где приложены моменты; b – расстояния от начала координат до сечений, где приложены сосредоточенные силы; c – расстояния от начала координат до начала каждого участка, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой; EJ_Z – жесткость балки при поперечном изгибе.

Метод начальных параметров применяется при условии, что жесткость EJ_Z постоянна по всей длине балки.

Слагаемые, которые включают M, F, q, по знаку определяются в соответствии с правилами знаков, принятыми для определения M_x при расчете слева. При использовании метода начальных параметров необходимо выполнить следующие требования:

1. Начало координат принимается единым для всей балки (обычно в левом крайнем сечении балки);

2. Если равномерно распределенная нагрузка не доходит до рассматриваемого сечения, то ее необходимо продлить до этого сечения, а для сохранения равновесия приложить такую же по величине, но противоположного направления нагрузку. Эту контрнагрузку необходимо включить в уравнения.

Начальные параметры y_0 и θ_0 определяются следующим образом. Если начало координат находится не на опоре (рис. 4.4, *б*), то составляем два дополнительных уравнения прогибов для двух опор, где заранее известно, что прогибы на опорах равны нулю. Если начало координат находится на концевой шарнирной опоре (рис. 4.4, *в*), то составляем одно дополнительное уравнение прогибов для другой опоры. Если начало координат находится в жесткой заделке (рис. 4.4, *г*), то дополнительные уравнения составлять не нужно.

При решении задач необходимо иметь в виду, что положительное направление оси y принято вверх. При этом условии положительное значение угла поворота соответствует вращению сечения против хода часовой стрелки, положительный прогиб направлен вверх.

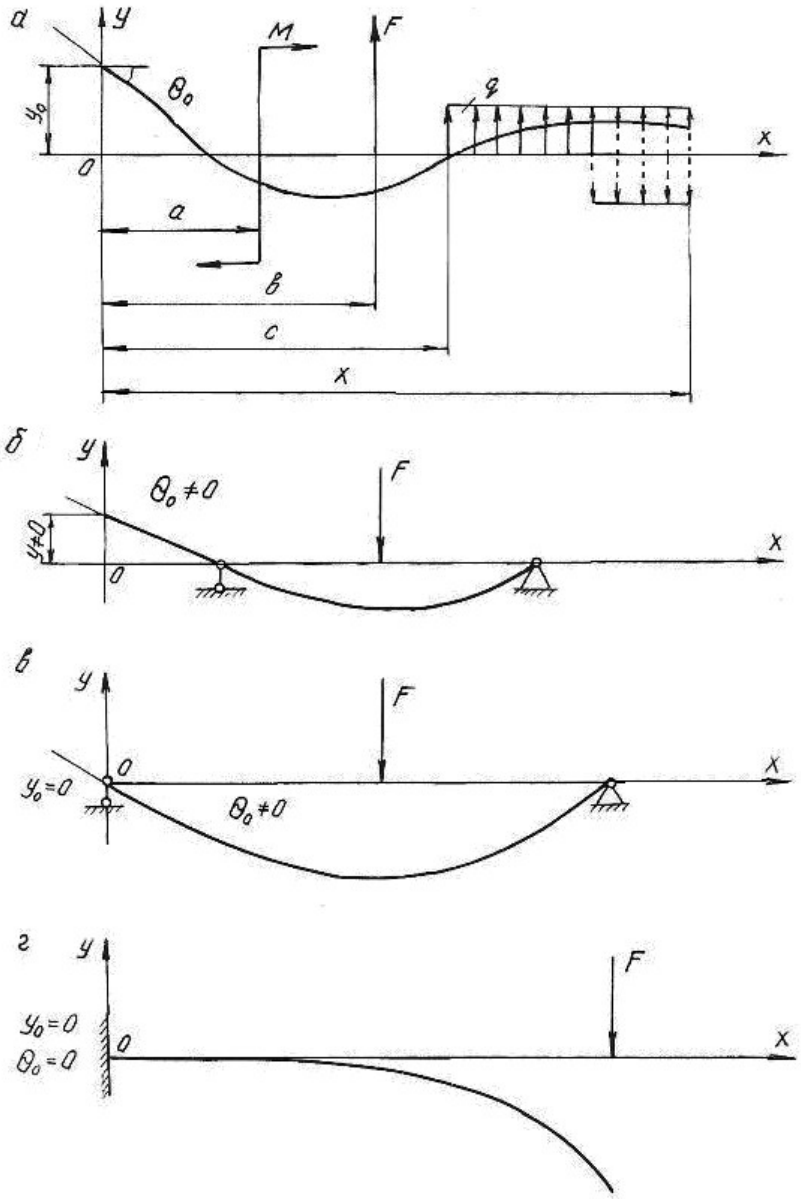


Рис. 4.4.

Пример 4.3.

Для балки, изображенной на рис. 4.5, построить эпюры Q_x и M_x, подобрать поперечное двутавровое сечение (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. По методу начальных параметров определить прогибы в сечениях C и D и угол поворота сечения B. Построить эпюру прогибов и провести проверку на жесткость при $y_{adm} = (1/200)l = (1/200)4 = 0,02$ м $= 2$ см, где l – пролет балки.

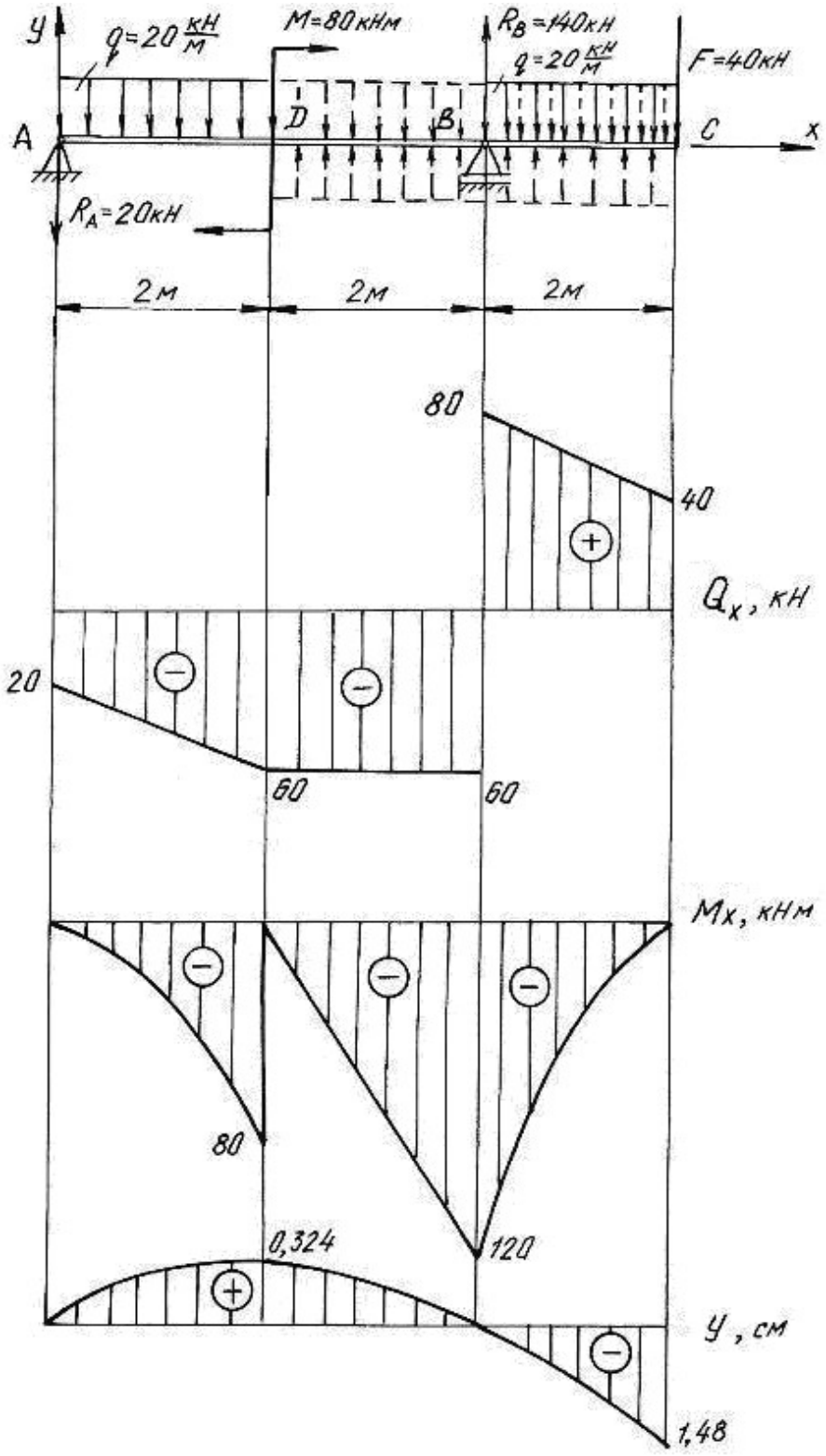

y
q=20 кН/м
M=80кНм
R_B=140кН
q=20 кН/м
F=40кН
A
D
B
C
x
R_A=20кН
2м
2м
2м
80
40
Q_x, кН
20
60
60
M_x, кНм
80
0,324
120
y, см
1,48

Рис. 4.5.

Решение.

Определим опорные реакции:

$$\sum M_B = 0, \qquad R_A \cdot 4 + q \cdot 2 \cdot 3 - M - q \cdot 2 \cdot 1 - F \cdot 2 = 0;$$
$$R_A \cdot 4 + 20 \cdot 2 \cdot 3 - 80 - 20 \cdot 2 \cdot 1 - 40 \cdot 2 = 0; \quad R_A = 20 \text{ кН}.$$
$$\sum M_A = 0, \quad R_B \cdot 4 - q \cdot 2 \cdot 1 - M - q \cdot 2 \cdot 5 - F \cdot 6 = 0;$$
$$R_B \cdot 4 - 20 \cdot 2 \cdot 1 - 80 - 20 \cdot 2 \cdot 5 - 40 \cdot 6 = 0; \qquad R_B = 140 \text{ кН}.$$

Проводим проверку

$$\sum Y = 0; \qquad -R_A + R_B - q \cdot 2 - F - q \cdot 2 = 0;$$
$$-20 + 140 - 20 \cdot 2 - 40 - 20 \cdot 2 = 0; \quad 0 = 0$$

По контрольным правилам строим эпюры Q_x и M_x, и подбираем поперечное сечение при $M_{\max} = 120$ кН.

$$W_z = \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{adm}}} = \frac{120 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 750 \text{ см}^3.$$

По таблице сортамента (см. табл. П.1) принимаем двутавр № 36:

$J_z = J_x^{\text{табл.}} = 13380 \text{ см}^4 = 13380 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$.

Для определения перемещений помещаем начало координат на левой опоре (прогиб $y_0 = 0$, угол поворота $\theta_0 \neq 0$). Составляем дополнительное уравнение прогибов для сечения B (при $x_B = 4$ м), где заранее известно, что прогиб на опоре y_B равен нулю.

Распределенная нагрузка обрывается в сечении D. Продолжим её до сечения B, в котором определяем перемещение, но, чтобы не нарушить прежнее равновесие, вводим уравновешивающую нагрузку обратного направления на участке BD.

$$EJ_Z y_B = EJ_Z \theta_0 x_B + \frac{M(x-2)^2}{2} - \frac{R_A(x_B - 0)^3}{6} - \frac{q(x_B - 0)^4}{24} + \frac{q(x_B - 2)^4}{24};$$
$$0 = EJ_Z \theta_0 \cdot 4 + \frac{80(4-2)^2}{2} - \frac{20(4-0)^3}{6} - \frac{20(4-0)^4}{24} + \frac{20(4-2)^4}{24}.$$

Последний член уравнения учитывает компенсирующую нагрузку. Подставляя числовые значения, получим $EJ_Z \theta_0 = EJ_Z \theta_A = 63,3 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$.

Определим прогибы на границах заданных участков. При определении прогиба в сечении C равномерно распределенную нагрузку необходимо продлить до этого сечения и уравновесить её.

В сечении C ($x_C = 6$ м):

$$EJ_Z y_C = EJ_Z \theta_0 x_C + \frac{M(x_C-2)^2}{2} - \frac{R_A(x_C-0)^3}{6} + \frac{R_B(x_C-4)^3}{6} -$$
$$- \frac{q(x_C-0)^4}{24} + \frac{q(x_C-2)^4}{24} - \frac{q(x_C-4)^4}{24};$$

$$EJ_Z y_C = 63{,}3 \cdot 6 + \frac{80 \cdot (6-2)^2}{2} - \frac{20 \cdot (6-0)^3}{6} + \frac{140 \cdot (6-4)^3}{6} - \frac{20 \cdot (6-0)^4}{24} +$$
$$+ \frac{20(6-2)^4}{24} - \frac{20(6-4)^4}{24} = -393 \text{ кНм}^3;$$

$$y_C = \frac{-393 \cdot 10^3}{EJ_Z} = \frac{-393 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 13380 \cdot 10^{-8}} = -0{,}0148 \text{ м}; \; y_C = -1{,}480 \text{ см};$$

в сечении D ($x_D = 2$ м):

$$EJ_Z y_D = EJ_Z \theta_0 \cdot x_D - \frac{R_A(x_D-0)^3}{6} - \frac{q(x_D-0)^4}{24} = 63{,}3 \cdot 2 - \frac{20(2-0)^3}{6} - \frac{20(2-0)^4}{24} =$$

$$= 86{,}7 \text{ кНм}^3; \qquad y_D = \frac{86{,}7 \cdot 10^3}{EJ_Z} = \frac{86{,}7 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 13380 \cdot 10^{-8}} = 0{,}00324 \text{ м} = 0{,}324 \text{ см}.$$

По полученным значениям прогибов строим изогнутую ось балки (см. рис. 4.5).

Определим угол поворота сечения B ($x_B = 4$ м), продлив и уравновесив распределенную нагрузку

$$EJ_Z \theta_B = EJ_Z \theta_0 + \frac{M(x-2)^1}{1} - \frac{R_A(x-0)^2}{2} - \frac{q(x-0)^3}{6} + \frac{q(x-2)^3}{6} =$$

$$= 63{,}3 + \frac{80(4-2)^1}{1} - \frac{20(4-0)^2}{2} - \frac{20(4-0)^3}{6} + \frac{20(4-2)^3}{6} = -123 \text{ кНм}^2;$$

$$\theta_B = -\frac{123 \cdot 10^3}{EJ_Z} = -\frac{123 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^{11} \cdot 13380 \cdot 10^{-8}} = -46 \cdot 10^{-4} \text{ рад} =$$
$$= -46 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{180}{\pi} = -0{,}26^\circ = -0^\circ 15' 36''.$$

Максимальный прогиб балки $y_{\max} = y_C = 1{,}480$ см.

Таким образом, $y_{\max} = 1{,}480$ см $< y_{\text{adm}} = 2$ см, следовательно, условие жесткости выполняется.

4.4. Задания для расчета балок на жесткость

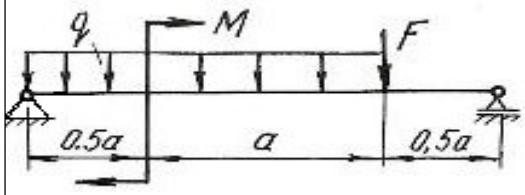
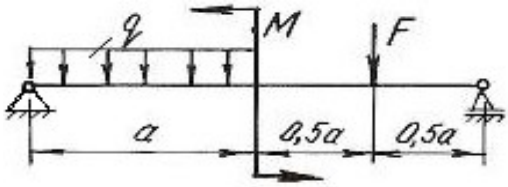
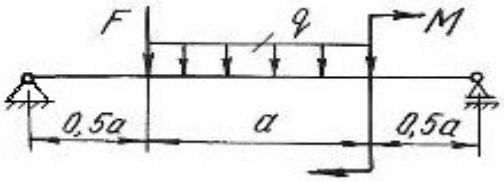
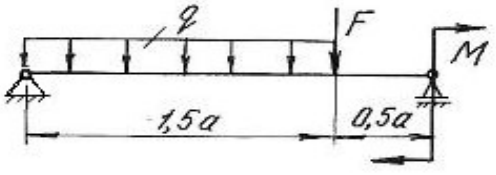
Для расчетной схемы (табл. 4.2) необходимо:

1. Построить по длине балки эпюры изгибающих моментов и поперечных сил.

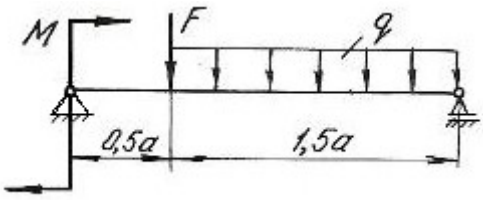
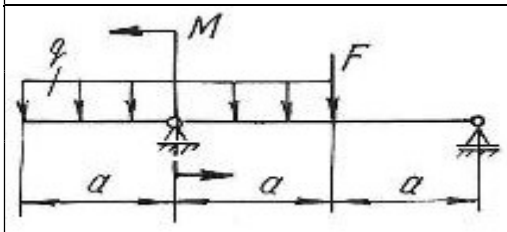
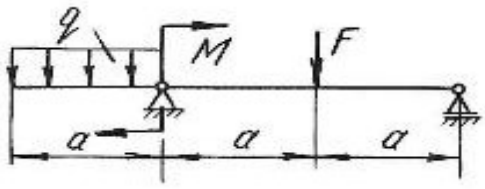
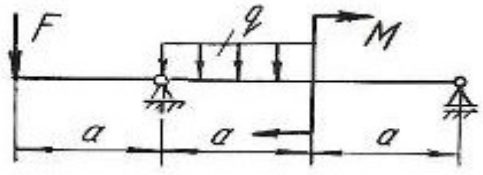
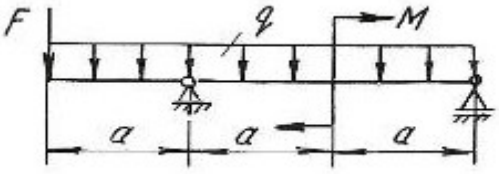
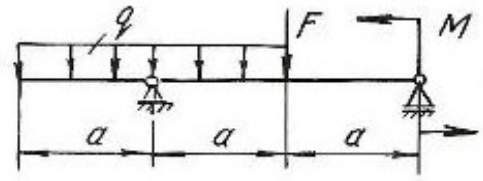
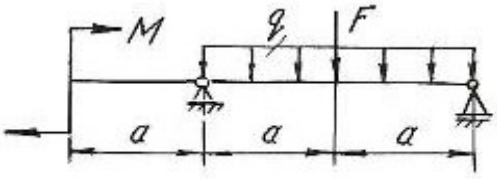
2. Подобрать поперечное сечение балки двутаврового профиля (см. табл. П. 1), материал – сталь при $\sigma_{adm} = 160$ МПа.

3. Определить по методу начальных параметров величину прогибов балки в характерных сечениях и провести проверку балки на жесткость, приняв $y_{adm} = (1/100)l$.

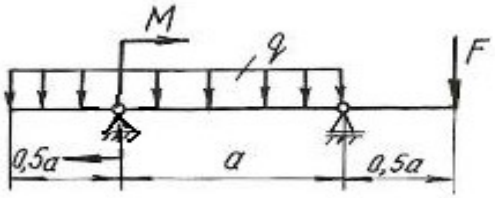
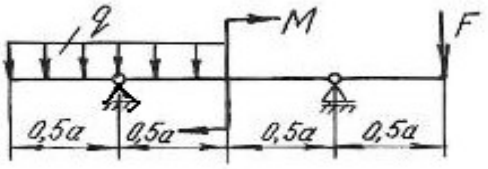
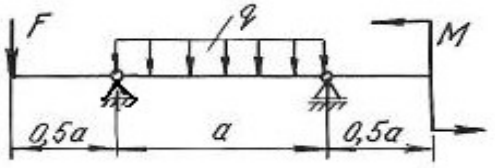
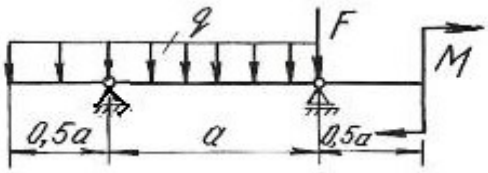
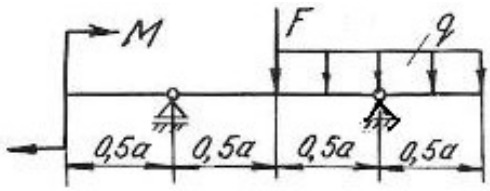
Таблица 4.2

Схема балки и нагрузки	Вариант	a, м	q, кН/м	M, кН·м	F, кН
	1	1	10	30	20
	2	0,5	20	25	30
	3	1	10	10	16
	4	2	20	30	10
	5	0,5	30	15	12
	6	1	12	36	24
	7	2	6	12	10
	8	1	4	12	8
	9	0,5	10	20	16
	10	2	4	12	10
	11	1	20	24	12
	12	1	12	12	10
	13	2	10	4	10
	14	1	8	20	30

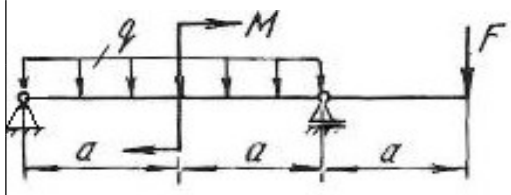
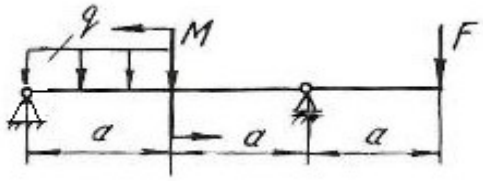
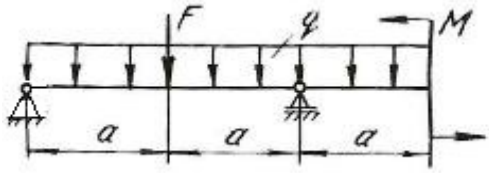
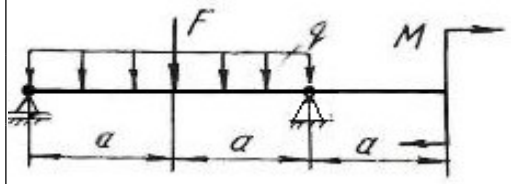
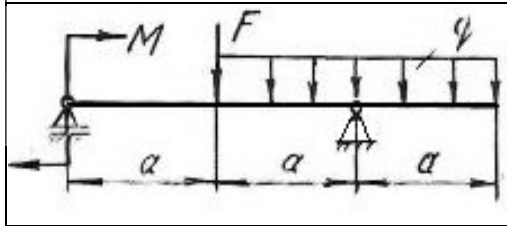
Продолжение табл. 4.2

Схема балки и нагрузки	Вариант	a, м	q, кН/м	M, кН·м	F, кН
	15	1	8	12	16
	16	1	12	14	10
	17	2	4	16	6
	18	1	10	18	24
	19	2	4	16	16
	20	0,5	20	32	24
	21	1	20	15	8
	22	2	8	14	4
	23	0,5	10	28	12
	24	1	24	10	10
	25	2	12	16	12
	26	0,5	4	18	24
	27	1	20	10	6
	28	2	10	8	16
	29	0,5	4	15	8
	30	1	2	6	4
	31	2	4	12	10
	32	0,5	8	12	18
	33	1	10	12	4
	34	2	12	18	12
	35	0,5	20	30	10

Продолжение табл. 4.2

Схема балки и нагрузки	Вариант	a, м	q, кН/м	M, кН·м	F, кН
	36	1	20	12	8
	37	2	12	16	16
	38	1	40	24	20
	39	1	10	20	12
	40	2	4	12	8
	41	1	8	4	12
	42	1	24	12	8
	43	2	8	10	4
	44	1	12	24	20
	45	1	36	12	24
	46	2	32	16	20
	47	1	16	8	8
	48	1	16	18	10
	49	2	12	20	12
	50	1	32	10	6
	51	1	24	20	4
	52	2	4	24	16
	53	1	8	30	10

Окончание табл. 4.2

Схема балки и нагрузки	Вариант	a, м	q, кН/м	M, кН·м	F, кН
	54	1	10	12	6
	55	2	4	10	8
	56	0,5	8	8	4
	57	1	20	12	6
	58	2	12	36	8
	59	1	24	16	12
	60	1	10	40	16
	61	0,5	12	18	10
	62	2	4	36	12
	63	1	10	20	10
	64	1	12	16	8
	65	2	4	16	12
	66	1	12	10	20
	67	2	8	32	16
	68	0,5	24	12	12
	69	1	10	18	12
	70	2	8	36	16
	71	0,5	20	42	8

Глава 5

СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫЕ НЕРАЗРЕЗНЫЕ МНОГОПРОЛЕТНЫЕ БАЛКИ И ПЛОСКИЕ РАМЫ

5.1. Статически неопределимые балки

Цельная балка, лежащая на нескольких опорах, называется неразрезной. С промежуточными опорами такая балка обычно соединена шарнирно. Концевые опоры могут быть или шарнирными или защемленными.

Неразрезные балки представляют собой статически неопределимые системы, так как для их расчета уравнений статики недостаточно. Эти балки могут быть рассчитаны с помощью теоремы о трех моментах или методом сил.

В данном разделе рассматривается решение неразрезной балки по методу сил.

Способ расчета статически неопределимых систем, при котором за «лишние» неизвестные принимаются силы или моменты, называется **методом сил**. Для расчета статически неопределимой балки необходимо раскрыть ее статическую неопределимость, для чего эту балку освобождают сначала от «лишних» связей, превращая ее тем самым в статически определимую (геометрически неизменяемую) систему, называемую основной системой. Она может быть получена путем введения необходимого количества шарниров, балочных опор, путем разреза контура (чаще для рам) и др.

Дополнительные уравнения для нахождения «лишних» неизвестных составляются из условий, что взаимные перемещения основной системы в местах приложения «лишних» неизвестных равны нулю (условия совместности деформаций – условия неразрезности).

Степень статической неопределимости балки соответствует количеству «лишних» неизвестных. В качестве «лишних» неизвестных можно принимать реакции на опорах балки или опорные моменты. Для многопролетных неразрезных балок за «лишние» неизвестные удобнее принять опорные моменты. Опорными моментами называют суммарные моменты внутренних сил упругости, возникающих в поперечных сечениях над опорами.

На рис. 5.1, *а* показана дважды статически неопределимая балка. За «лишние» неизвестные приняты опорные моменты на первой и второй опорах. Моменты на нулевой и третьей опорах равны нулю (рис. 5.1, *б*).

Для определения «лишних» неизвестных воспользуемся условием:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 0, \\ \Delta_2 &= 0, \end{aligned} \qquad (5.1)$$

где Δ_1 – суммарное возможное перемещение центра тяжести поперечного сечения от всех внешних нагрузок и от всех «лишних» неизвестных по направле-

нию действия первой «лишней» неизвестной X_1; Δ_2 – суммарное возможное перемещение центра тяжести поперечного сечения от всех внешних нагрузок и от всех «лишних» неизвестных по направлению действия второй «лишней» неизвестной X_2.

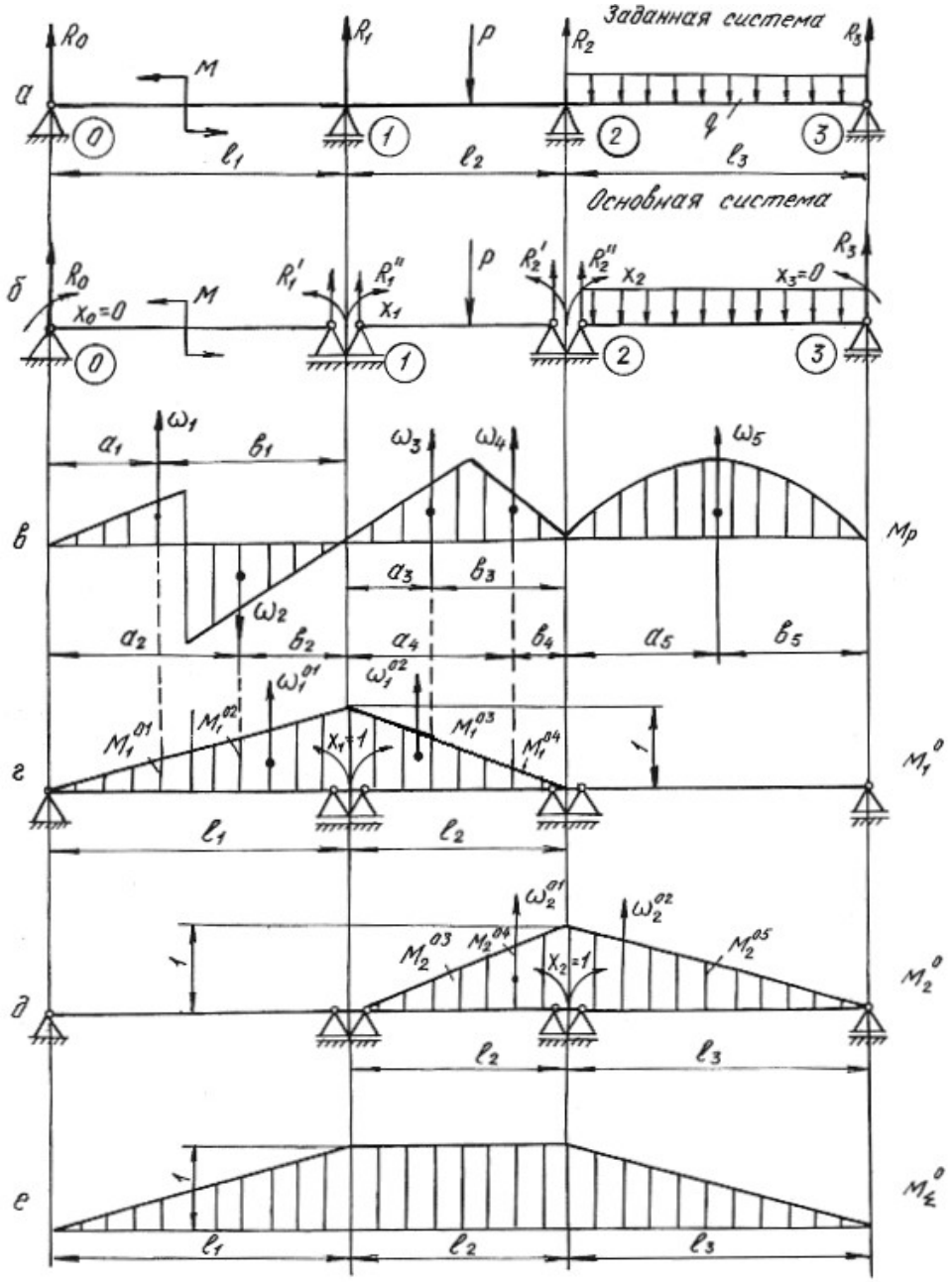


Рис. 5.1.

Эти перемещения в силу принципа независимости действия сил можно представить как сумму перемещений от каждой отдельной силы, приложенной к системе, т. е. от внешней нагрузки, обобщенно обозначаемой буквой *P,* и от неизвестных X_1, X_2, приложенных на опорах основной системы. Указанные пе-

ремещения выражаются через неизвестные X_1, X_2, нагрузку P и перемещения от единичных сил X_1=1, X_2=1.

$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0, \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0. \end{aligned} \tag{5.2}$$

Эти уравнения носят название канонических уравнений метода сил. Число их равно степени статической неопределимости системы. На примере первого уравнения рассмотрим обозначения:

δ_{11} – возможное перемещение центра тяжести поперечного сечения от действия единичной силы $X_1 = 1$ по направлению действия первой «лишней» неизвестной X_1;

$\delta_{11}X_1$ – возможное перемещение, вызванное действием X_1 по ее направлению;

δ_{12} – возможное перемещение от единичной нагрузки $X_2 = 1$ по направлению X_1;

$\delta_{12}X_2$– возможное перемещение от второй «лишней» неизвестной X_2 по направлению X_1;

Δ_{1p} – возможное перемещение от всех внешних нагрузок по направлению «лишней» неизвестной X_1.

Коэффициенты канонических уравнений с одинаковыми числовыми индексами δ_{11}, δ_{22} называются *главными коэффициентами***.** Они всегда положительны. Коэффициенты с разными числовыми индексами δ_{21}, δ_{12} называются *побочными*. Они могут быть положительными или отрицательными. На основании теоремы о взаимности перемещений побочные коэффициенты $\delta_{21} = \delta_{12}$.

Свободные члены канонических уравнений Δ_{1p}, и Δ_{2p} еще называют *грузовыми членами*, так как они представляют собой перемещения от внешних нагрузок.

Для вычисления коэффициентов и грузовых членов канонических уравнений строим эпюры изгибающих моментов от единичных нагрузок (единичные эпюры) – рис. 5.1, *г*, *д* и эпюры изгибающих моментов от внешних нагрузок (грузовые эпюры) – рис. 5.1, *в*.

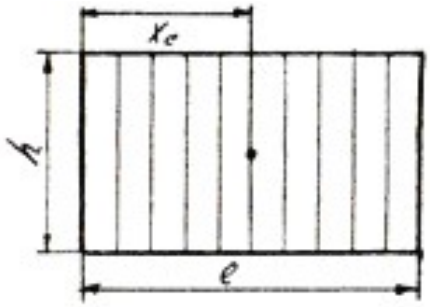
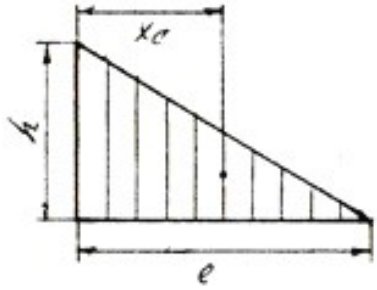
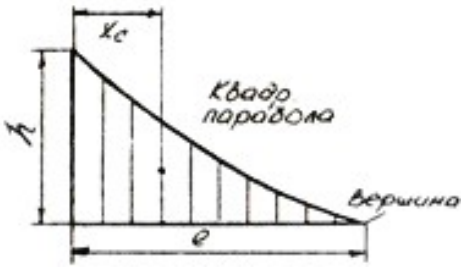
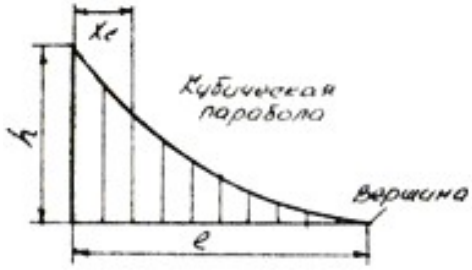
Коэффициенты уравнений и свободные члены находим путем перемножения эпюр по формуле Верещагина (или по формуле Симпсона)

$$\delta = \frac{1}{EJ}\sum \omega M_c^0, \tag{5.3}$$

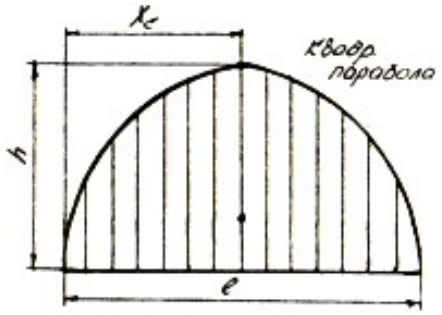
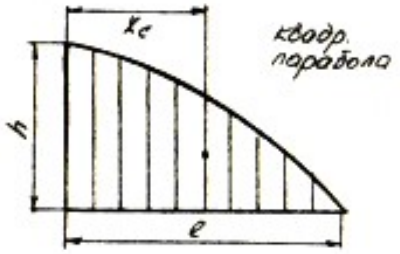
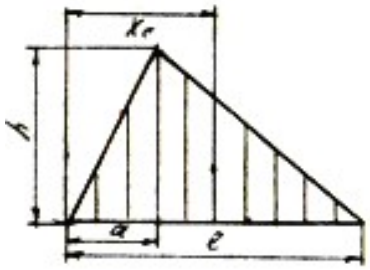
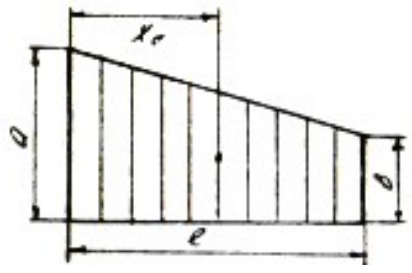
где ω – площадь эпюры изгибающих моментов; M_c^0 – ордината из единичной эпюры напротив центра тяжести грузовой эпюры; EJ – жесткость балки при изгибе.

Формулы для определения площадей и координат их центров тяжести приведены в табл. 5.1**.**

Таблица 5.1

Фигура	ω	x_c
	lh	$\frac{1}{2}l$
	$\frac{1}{2}lh$	$\frac{1}{3}l$
	$\frac{1}{3}lh$	$\frac{1}{4}l$
	$\frac{1}{4}lh$	$\frac{1}{5}l$

Окончание табл. 5.1

Фигура	ω	x_c
	$\frac{2}{3}lh$	$\frac{1}{2}l$
	$\frac{2}{3}lh$	$\frac{3}{8}l$
	$\frac{1}{2}lh$	$\frac{a+l}{3}$
	$l\frac{a+b}{2}$	$\frac{(a+2b)}{3(a+b)}l$

Главные коэффициенты δ_{11} и δ_{22} находим в результате перемножения единичных эпюр M_1^0, M_2^0 самих на себя

$$\delta_{11}=\frac{1}{EJ}\sum\omega_1^0 M_{c1}^0=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_1\cdot 1\frac{2}{3}\cdot 1\right)+\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_2\cdot 1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_1}{3}+\frac{l_2}{3}\right);$$

$$\delta_{22}=\frac{1}{EJ}\sum\omega_2^0 M_{c2}^0=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_2\cdot 1\frac{2}{3}\cdot 1\right)+\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_3\cdot 1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_2}{3}+\frac{l_3}{3}\right);$$

Побочные коэффициенты находим путем взаимного перемножения указанных единичных эпюр.

Для определения коэффициента δ_{12} берется площадь эпюры M_2^0 на участке длиной l_2, которая умножается на ординату с эпюры M_1^0

$$\delta_{12}=\delta_{21}=\frac{1}{EJ}\sum\omega_2^0 M_{c1}^0=\frac{1}{EJ}\sum\omega_1^0 M_{c2}^0=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_2\cdot 1\right)\cdot\frac{1}{3}\cdot 1=\frac{l_2}{6\cdot EJ}.$$

Свободные члены уравнений находим путем умножения грузовых эпюр M_p на единичные M_1^0 и M_2^0

$$\Delta_{1p}=\frac{1}{EJ}\sum\omega_p M_{c1}^0=\frac{1}{EJ}\left(\omega_1 M_1^{01}-\omega_2 M_1^{02}+\omega_3 M_1^{03}+\omega_4 M_1^{04}\right)=$$

$$=\frac{1}{EJ}\left(\omega_1\frac{a_1}{l_1}-\omega_2\frac{a_2}{l_1}+\omega_3\frac{b_3}{l_2}+\omega_4\frac{b_4}{l_2}\right),$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – площади грузовых эпюр; $M_1^{01}, M_1^{02}, M_1^{03}, M_1^{04}$ – ординаты, взятые из единичной эпюры M_1^0 напротив центров тяжести указанных площадей.

$$\Delta_{2p}=\frac{1}{EJ}\sum\omega_p M_{c2}^0=\frac{1}{EJ}\left(\omega_3 M_2^{03}+\omega_4 M_2^{04}+\omega_5 M_2^{05}\right)=$$

$$=\frac{1}{EJ}\left(\omega_3\frac{a_3}{l_2}+\omega_4\frac{a_4}{l_2}+\omega_5\frac{b_5}{l_3}\right).$$

После подстановки найденных перемещений в канонические уравнения получим

$$\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_1}{3}+\frac{l_2}{3}\right)X_1+\frac{l_2}{6EJ}X_2+\frac{1}{EJ}\left(\omega_1\frac{a_1}{l_1}-\omega_2\frac{a_2}{l_1}+\omega_3\frac{b_3}{l_2}+\omega_4\frac{b_4}{l_2}\right)=0;$$

$$\frac{l_2}{6EJ}X_1+\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_2}{3}+\frac{l_3}{3}\right)X_2+\frac{1}{EJ}\left(\omega_3\frac{a_3}{l_2}+\omega_4\frac{a_4}{l_2}+\omega_5\frac{b_5}{l_3}\right)=0.$$

Во избежание ошибок при определении «лишних» неизвестных необходимо проверить правильность определения коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Для этого необходимо построить суммарную эпюру единичных моментов M_Σ^0.

При умножении по правилу Верещагина суммарной единичной эпюры M_{Σ}^{0} на единичную эпюру M_{1}^{0} должна получиться сумма коэффициентов первого канонического уравнения

$$\delta_{11}+\delta_{12}=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_1\cdot 1\frac{2}{3}\cdot 1\right)+\frac{1}{EJ}\left(l_2\cdot 1\frac{1}{2}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_1}{3}+\frac{l_2}{2}\right).$$

При умножении суммарной эпюры M_{Σ}^{0} на эпюру M_{2}^{0} должна получиться сумма коэффициентов второго канонического уравнения

$$\delta_{21}+\delta_{22}=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_3\cdot 1\frac{2}{3}\cdot 1\right)+\frac{1}{EJ}\left(l_2\cdot 1\frac{1}{2}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_3}{3}+\frac{l_2}{2}\right).$$

Эта проверка называется построчной.

Произведение суммарной единичной эпюры саму на себя должно быть равным сумме всех коэффициентов канонических уравнений

$$\delta_{11}+\delta_{12}+\delta_{21}+\delta_{22}=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_1\cdot 1\frac{2}{3}\cdot 1\right)+\frac{1}{EJ}\left(l_2\cdot 1\cdot 1\right)+\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}l_3\cdot 1\frac{2}{3}\cdot 1\right)=$$

$$=\frac{1}{EJ}\left(\frac{l_1}{3}+l_2+\frac{l_3}{3}\right).$$

Эта проверка называется универсальной.

Правильность определения грузовых членов уравнений состоит в следующем: их сумма должна равняться произведению грузовой эпюры M_p на суммарную единичную эпюру M_{Σ}^{0}

$$\Delta_{1p}+\Delta_{2p}=\frac{1}{EJ}\left(\omega_1\frac{a_1}{l_1}-\omega_2\frac{a_2}{l_1}+\omega_3\cdot 1+\omega_4\cdot 1+\omega_5\frac{b_5}{l_3}\right).$$

Убедившись в правильности определения коэффициентов и свободных членов уравнений методом последовательного исключения, находим «лишние» неизвестные X_1 и X_2 из канонических уравнений. При правильном определении «лишних» неизвестных после их подстановки в канонические уравнения, последние должны обращаться в тождества.

Учитывая опорные моменты и внешние нагрузки, определяют по уравнениям статики опорные реакции, строят эпюру поперечных сил Q_x и эпюру изгибающих моментов M_x.

Порядок решения неразрезной балки методом сил сводится к следующему:

1. Определяют степень статической неопределимости балки;

2. Выбирают основную систему (тем самым выбираются «лишние» неизвестные);

3. По числу «лишних» неизвестных составляются канонические уравнения;

4. Строят эпюры изгибающих моментов от действующих на основную систему внешних нагрузок – грузовые эпюры;

5. В местах действия «лишних» неизвестных и по направлению их действия прикладывают единичные моменты и строят эпюры изгибающих моментов от этих единичных моментов – единичные эпюры;

6. Вычисляют главные, побочные коэффициенты и свободные члены канонических уравнений и проверяют правильность их вычисления;

7. Методом последовательного исключения неизвестных решают канонические уравнения и определяют «лишние» неизвестные с последующей проверкой;

8. С помощью уравнений равновесия определяют опорные реакции заданной балки с последующей проверкой;

9. Строят эпюры поперечных сил Q_x и изгибающих моментов M_x;

10. Подбирают поперечное сечение балки заданного профиля;

11. Производят проверку на прочность и жесткость балки, если это требуется по условию задачи.

Пример 5.1.

Для заданной схемы стальной неразрезной балки (рис. 5.2, *а*) требуется:

1. Построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов;
2. Подобрать поперечное сечение двутаврового профиля (см. табл. П. 1), если $\sigma_{adm} = 160\,\text{МПа}$, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Решение.

Определяем степень статической неопределимости балки. Она равна двум (числу опор без двух плюс единица из-за наличия жесткой заделки) и выбираем основную систему.

В качестве «лишних» неизвестных принимаются опорные моменты. Основная система показана на рис. 5.2, *б*.

Составляем канонические уравнения:

$$\delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \Delta_{1p} = 0,$$

$$\delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \Delta_{1p} = 0.$$

Для определения главных, побочных коэффициентов и свободных членов уравнений строим единичные эпюры M_1^0 (рис. 5.2, *г*), M_2^0 (рис. 5.2, *д*) и суммарную единичную эпюру M_Σ^0 (рис. 5.2, *е*). Грузовые эпюры M_p представлены на рис. 5.2, *в*.

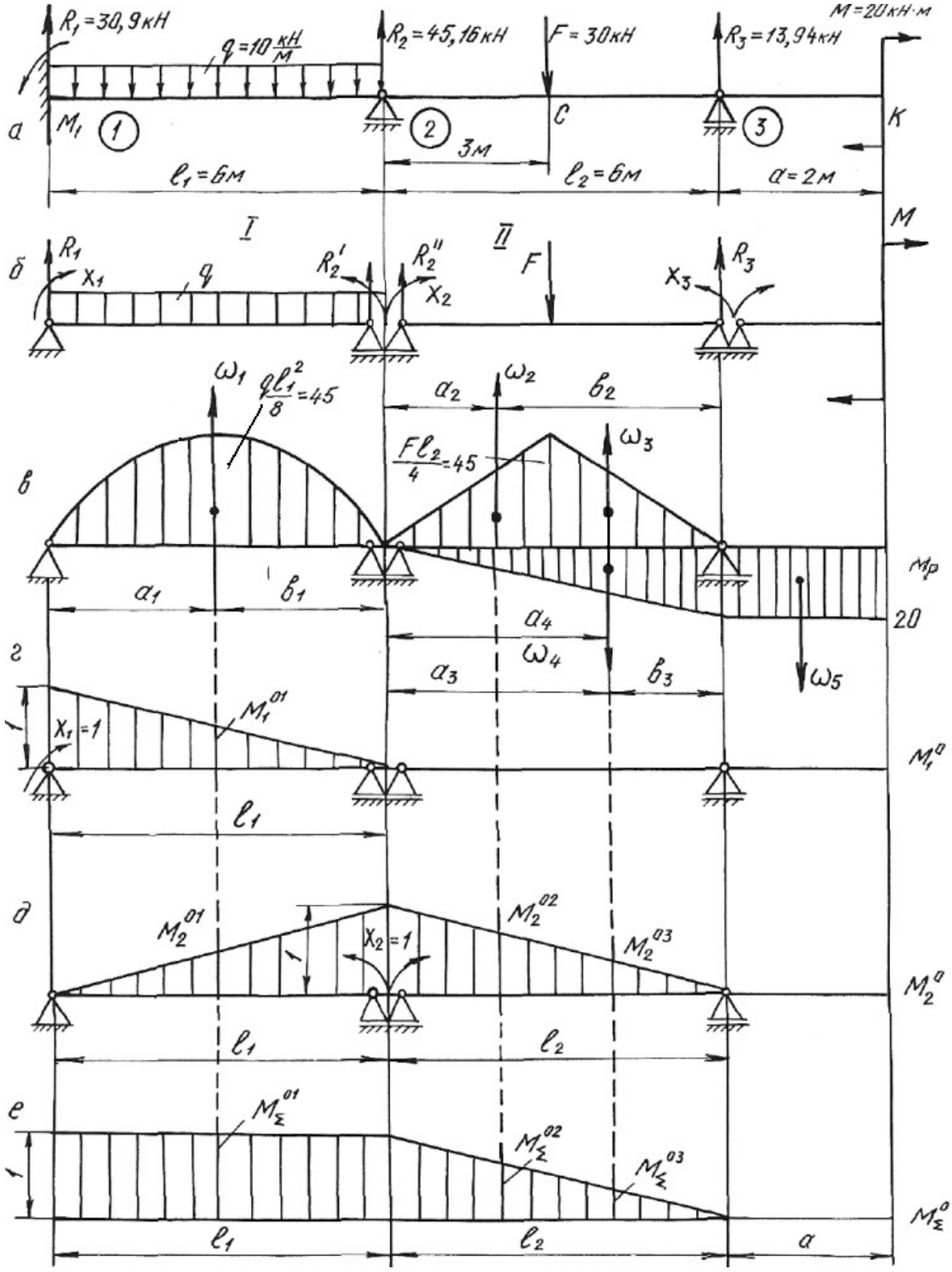

R1 = 30,9 кН
q = 10 кН/м
R2 = 45,16 кН
F = 30 кН
R3 = 13,94 кН
M = 20 кН·м
а
б
в
г
д
е
I
II
1
2
3
C
K
3 м
l1 = 6 м
l2 = 6 м
a = 2 м
M
X1
X2
X3
R2'
R2''
ω1
ω2
ω3
ω4
ω5
a1
b1
a2
b2
a3
b3
a4
Mр
20
M1^01
M2^01
M2^02
M2^03
M1^0
M2^0
MΣ^01
MΣ^02
MΣ^03
MΣ^0
l1
l2
a

Рис. 5.2.

Путем умножения эпюр M_1^0 и M_2^0 самих на себя, находим значения главных коэффициентов:

$$\delta_{11}=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}\cdot 1\cdot l_1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}\cdot 1\cdot 6\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{2{,}0}{EJ};$$

$$\delta_{22}=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}\cdot 1\cdot l_1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1+\frac{1}{2}\cdot 1\cdot l_2\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(2{,}0+2{,}0\right)=\frac{4{,}0}{EJ}.$$

Побочные коэффициенты определяем путем взаимного перемножения единичных эпюр M_1^0 и M_2^0

$$\delta_{12}=\delta_{21}=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}\cdot 1\cdot l_1\frac{1}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(\frac{1}{2}\cdot 1\cdot 6\cdot\frac{1}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}.$$

Находим свободные (грузовые) члены уравнений, перемножая эпюры изгибающих моментов от внешних нагрузок на единичные эпюры.

Площади грузовых эпюр:

$$\omega_1=\frac{2}{3}h_1l_1=\frac{2}{3}\cdot 4{,}5\cdot 10^4\cdot 6=18\cdot 10^4\ \text{Н}\cdot\text{м}^2;$$

$$\omega_2=\omega_3=\frac{1}{2}h_2\frac{l_2}{2}=\frac{1}{2}\cdot 4{,}5\cdot 10^4\cdot 3=6{,}75\cdot 10^4\ \text{Н}\cdot\text{м}^2;$$

$$\omega_4=\frac{1}{2}\cdot 20\cdot 10^3\cdot 6=6\cdot 10^4\ \text{Н}\cdot\text{м}^2.$$

Расстояния $a_1=b_1=3$ м; $a_2=b_3=2$ м; $b_2=a_3=4$ м; $a_4=4$ м.

$$\Delta_{1p}=\frac{1}{EJ}\left(\omega_1M_1^{01}\right)=\frac{1}{EJ}\left(18\cdot 10^4\cdot\frac{1}{2}\cdot 1\right)=\frac{9\cdot 10^4}{EJ},$$

где M_1^{01}– ордината единичной эпюры M_1^0 напротив центра тяжести площади грузовой эпюры ω:

$$\Delta_{2p}=\frac{1}{EJ}\left(\omega_1M_2^{01}+\omega_2M_2^{02}+\omega_3M_2^{03}-\omega_4M_2^{04}\right)=$$

$$=\frac{1}{EJ}\left(18\cdot 10^4\cdot\frac{1}{2}\cdot 1-6\cdot 10^4\cdot\frac{2}{6}+6{,}75\cdot 10^4\cdot\frac{4}{6}+6{,}75\cdot 10^4\cdot\frac{2}{6}\right)=$$

$$=\frac{15{,}75\cdot 10^4}{EJ}-\frac{2\cdot 10^4}{EJ}=\frac{13{,}75\cdot 10^4}{EJ},$$

где M_2^{01}, M_2^{02}, M_2^{03}, M_2^{04}– ординаты единичной эпюры M_2^0 напротив центров тяжести площадей грузовых эпюр ω_1, ω_2, ω_3, ω_4.

Производим проверку правильности определения коэффициентов и свободных членов уравнений, для чего строим суммарную единичную эпюру M_Σ^0.

Построчная проверка. Перемножая суммарную единичную эпюру M_{Σ}^{0} на единичную эпюру M_{1}^{0}, должны получить сумму коэффициентов первого канонического уравнения

$$\delta_{11}+\delta_{12}=\frac{1}{EJ}\left(1\cdot l_1\cdot\frac{1}{2}\cdot 1+0\right)=\frac{3}{EJ}.$$

При перемножении эпюры M_{Σ}^{0} на единичную эпюру M_{2}^{0} должны получить сумму коэффициентов второго канонического уравнения:

$$\delta_{21}+\delta_{22}=\frac{1}{EJ}\left(1\cdot l_1\cdot\frac{1}{2}\cdot 1+\frac{1}{2}\cdot l_2\cdot 1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(1\cdot 6\cdot\frac{1}{2}\cdot 1+\frac{1}{2}\cdot 6\cdot 1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{5{,}00}{EJ}.$$

Универсальная проверка. Умножаем суммарную единичную эпюру M_{Σ}^{0} саму на себя. Должны получить сумму всех коэффициентов канонических уравнений:

$$\delta_{11}+\delta_{12}+\delta_{21}+\delta_{22}=\frac{1}{EJ}\left(1\cdot l_1\cdot 1+\frac{1}{2}\cdot l_2\cdot 1\cdot\frac{2}{3}\cdot 1\right)=\frac{1}{EJ}\left(1\cdot 6\cdot 1+\frac{1}{2}\cdot 6\cdot 1\cdot\frac{2}{3}\right)=\frac{8{,}00}{EJ}.$$

Проводим проверку правильности определения грузовых членов уравнений.

Перемножением грузовой эпюры M_p на суммарную единичную эпюру M_{Σ}^{0} должны получить сумму свободных членов уравнений:

$$\Delta_{1p}+\Delta_{2p}=\frac{1}{EJ}\left(\omega_1 M_{\Sigma}^{01}+\omega_2 M_{\Sigma}^{02}+\omega_3 M_{\Sigma}^{03}-\omega_4 M_{\Sigma}^{04}\right)=$$

$$=\frac{1}{EJ}\left(18\cdot 10^4\cdot 1+6{,}75\cdot 10^4\cdot\frac{4}{6}+6{,}75\cdot 10^4\cdot\frac{2}{6}-6\cdot 10^4\cdot\frac{2}{6}\right)=\frac{22{,}75\cdot 10^4}{EJ}.$$

Подставляем коэффициенты и свободные члены в канонические уравнения:

$$\frac{2{,}00}{EJ}X_1+\frac{1{,}00}{EJ}X_2+\frac{9\cdot 10^4}{EJ}=0.$$

$$\frac{1{,}00}{EJ}X_1+\frac{4{,}0}{EJ}X_2+\frac{13{,}75\cdot 10^4}{EJ}=0.$$

После сокращения на жесткость получаем:

$$2{,}00X_1+1{,}00X_2+9\cdot 10^4=0.$$

$$1{,}00X_1+4{,}00X_2+13{,}75\cdot 10^4=0.$$

Решая совместно эти уравнения, находим:

$$X_1=M_1=-3{,}18\cdot 10^4\ \text{Н·м}=-31{,}8\ \text{кН·м},$$

$$X_2 = M_2 = -2{,}64 \cdot 10^4 \text{ Нм} = -26{,}4 \text{ кН·м}.$$

На опоре № 3 (см. рис. 5.2, *а*) опорный момент будет равен моменту M со знаком минус:

$$X_3 = M_3 = -20 \text{ кН·м}.$$

Подставив найденные значения «лишних» неизвестных в канонические уравнения, убеждаемся в том, что эти уравнения превращаются в тождества.

Определяем опорные реакции заданной балки из уравнений статики:

$$\sum M_1^{\text{I}} = 0; \quad R_2^1 l_1 + M_2 - \frac{q l_1^2}{2} - M_1 = 0;$$

$$R_2^{'} = -\frac{M_2}{l_1} + \frac{q l_1}{2} + \frac{M_1}{l_1} = \frac{26{,}4}{6} + \frac{10 \cdot 6}{2} - \frac{31{,}8}{6} = 29{,}1 \text{ кН}.$$

$$\sum M_2^{\text{I}} = 0; \quad -R_1 l_1 - M_1 + \frac{q l_1^2}{2} + M_2 = 0;$$

$$R_1 = -\frac{M_1}{l_1} + \frac{q l_1}{2} + \frac{M_2}{l_1} = \frac{31{,}8}{6} + \frac{10 \cdot 6}{2} - \frac{26{,}4}{6} = 30{,}9 \text{ кН}.$$

$$\sum M_2^{\text{II}} = 0; \quad M_3 + R_3 l_3 - F\frac{l_2}{2} - M_2 = 0;$$

$$R_3 = -\frac{M_3}{l_2} + \frac{F}{2} + \frac{M_2}{l_2} = \frac{20}{6} + \frac{30}{2} - \frac{26{,}4}{6} = 13{,}94 \text{ кН}.$$

$$\sum M_3^{\text{II}} = 0; \quad -M_2 - R_2^2 l_2 + P\frac{l_2}{2} + M_3 = 0;$$

$$R_2^{''} = -\frac{M_2}{l_2} + \frac{F}{2} + \frac{M_3}{l_2} = \frac{26{,}4}{6} + \frac{30}{2} - \frac{20}{6} = 16{,}06 \text{ кН}.$$

Окончательно:

$$R_1 = 30{,}9 \text{ кН}; R_2 = R_2^{'} + R_2^{''} = 29{,}1 + 16{,}06 = 45{,}16 \text{ кН}; \; R_3 = 13{,}94 \text{ кН}.$$

Проверка:

$$\sum Y = 0; \quad R_1 + R_2 + R_3 - F - q \cdot l_1 = 0; \quad 30{,}9 + 45{,}16 + 13{,}94 - 30 - 10 \cdot 6 = 0.$$

Строим эпюру поперечных сил Q_x и эпюру изгибающих моментов M_x по правилам, принятым при построении эпюр для статически определимых балок (рис. 5.3**).**

$Q_1 = R_1 = 30{,}9$ кН;

$Q_2 = R_1 - q \cdot l_1 = 30{,}9 - 10 \cdot 6 = -29{,}1$ кН;

Затем скачок вверх на $R_2 = 45{,}16$ кН.

На участке от опоры 2 до сечения C: $Q_x = 16{,}06$ кН.

Затем скачок вниз в сечении C на силу F, $Q_C = 16{,}06 - 30 = -13{,}94$ кН.

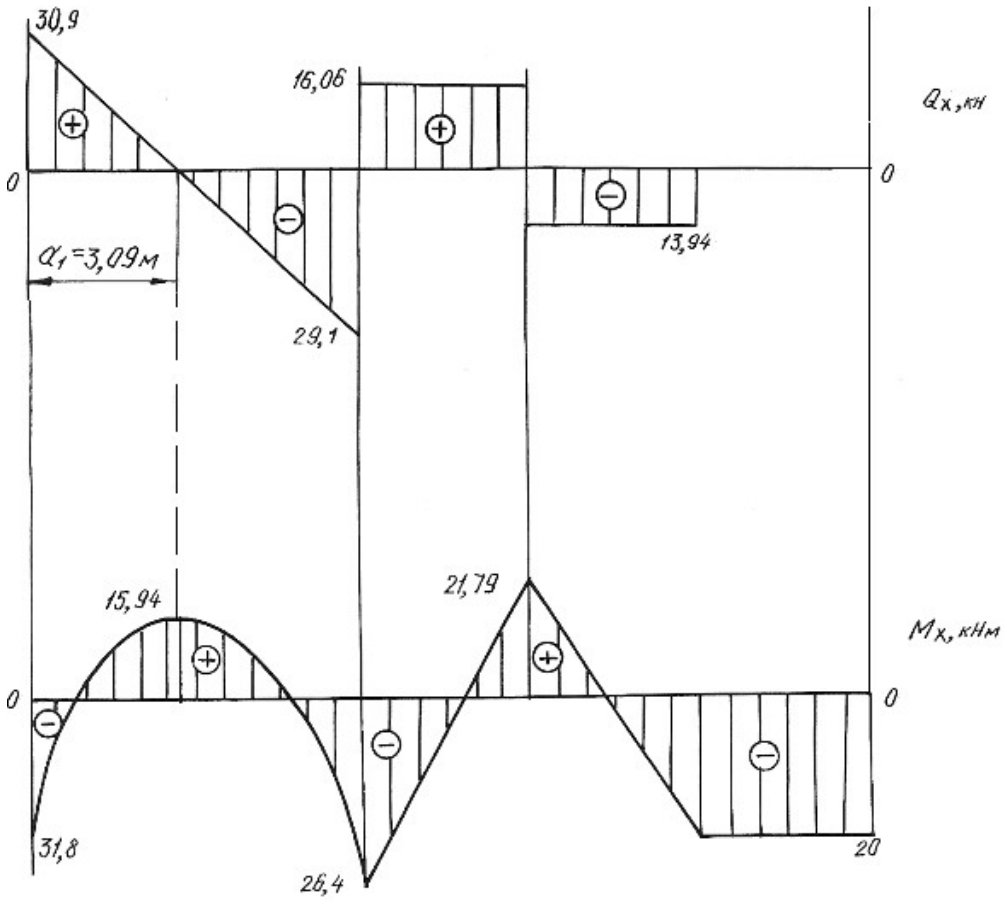


Рис. 5.3.

Находим расстояние *a*

$$\frac{30,9}{a_1}=\frac{29,1}{6-a_1},\ a_1=3,09\ \text{м}.$$

На участке от сечении *C* до опоры 3

$$Q_{C-3}=-13,94\ \text{кН}.$$

В левом крайнем сечении $M_x=-M_1=-31,8\ \text{кН}\cdot\text{м}$.

При $x=a_1=3,09\,\text{м}$

$$M_x=R_1a_1-\frac{qa_1^2}{2}-M_1=30,9\cdot3,09-\frac{10\cdot3,09^2}{2}-31,8=15,94\ \text{кН}\cdot\text{м}$$

В сечении над опорой 2

$$M_x=-M_1+R_1l_1-\frac{ql_1^2}{2}=-31,8+30,9\cdot6-\frac{10\cdot6^2}{2}=-26,4\ \text{кН}\cdot\text{м}.$$

До сечения *C* расчет производим справа:

$$M_k=-M=-20\ \text{кН}\cdot\text{м},$$

$$M_C=-M+R_3\cdot3=-20+13,93\cdot3=21,79\ \ \text{кН}\cdot\text{м}.$$

На участке балки от сечения *K* до опоры 3: $M_x = -20$ кН·м.

По сортаменту проката в соответствии с ГОСТ 8239-89 подбираем поперечное сечение двутаврового профиля, используя условие прочности

$$M_{\max} \le \sigma_{adm} \cdot W_{н.о.},$$

откуда $W_{н.о.} \ge \dfrac{M_{\max}}{\sigma_{adm}} = \dfrac{31{,}8 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 1{,}98 \cdot 10^{-4}$ м^3 $= 198$ см^3.

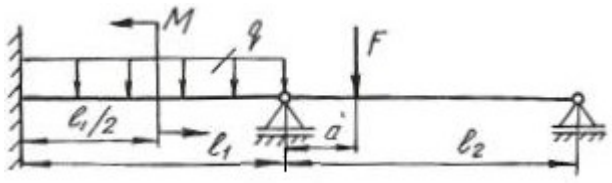
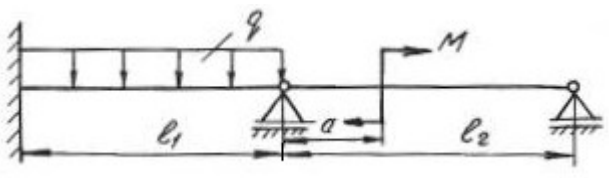
Принимаем двутавр № 20а, для которого $W_{н.о.} = W_x^{табл.} = 203$ см^3, $J_{н.о.} = J_x^{табл.} = 2030$ см^4, $A = 28{,}9$ см^2.

5.2. Задания для расчета статически неопределимых балок

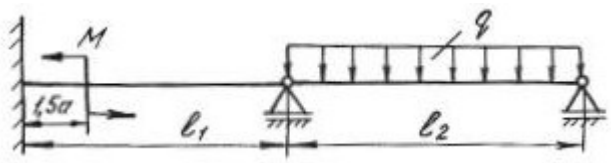
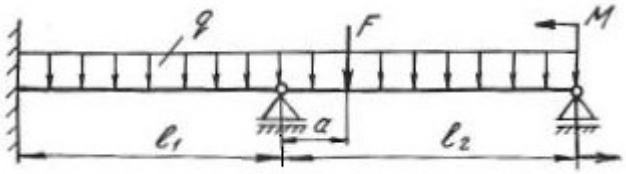
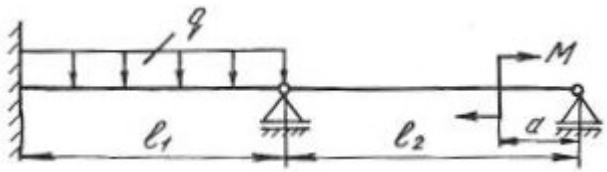
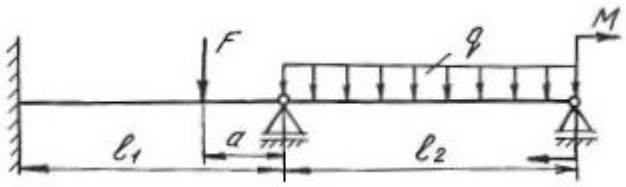
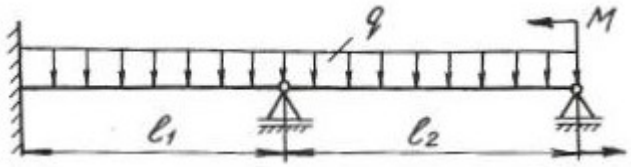
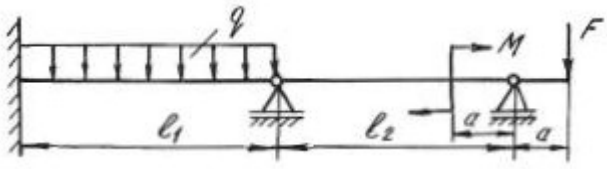
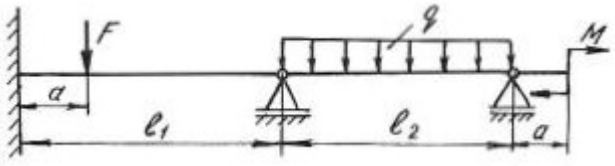
Для заданной схемы неразрезной балки при заданных значениях длин и нагрузок в соответствии с указанным номером варианта требуется:

1. Определить степень статической неопределимости балки, выбрать основную систему.
2. Составить канонические уравнения по методу сил.
3. Вычислить коэффициенты при неизвестных и свободные члены канонических уравнений. Проверить правильность их определения.
4. После определения неизвестных построить эпюры поперечных сил и изгибающих моментов.
5. Подобрать поперечное сечение балки двутаврового профиля (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа. Данные для расчета взять из табл. 5.2.

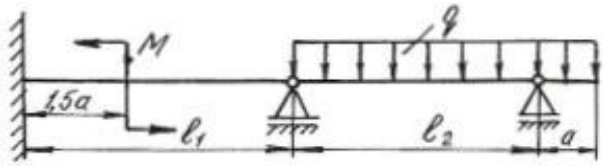
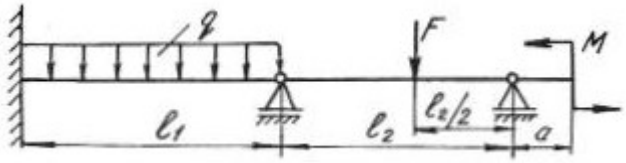
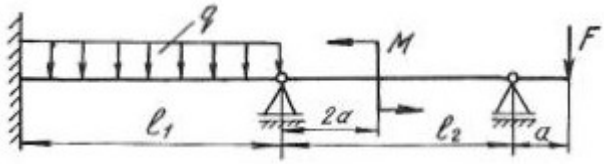
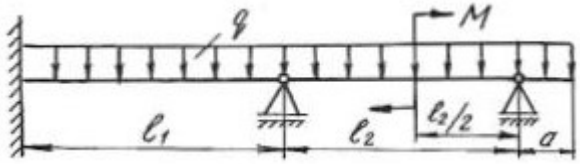
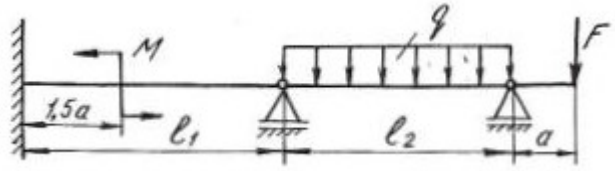
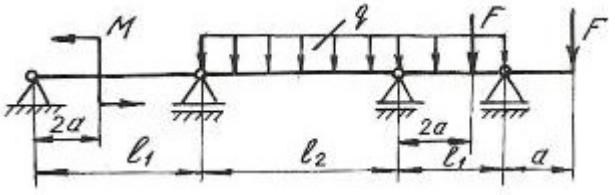
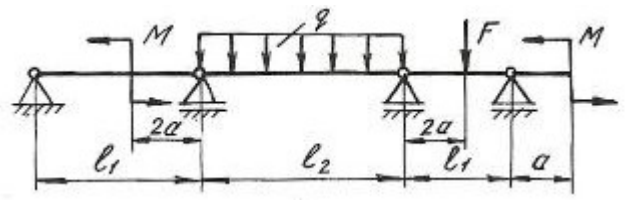
Таблица 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер варианта	*M*, кН·м	*F*, кН	*q*, кН/м	l_1, м	l_2, м	*a*, м
	1	10	10	15	3,5	5,0	0,5
	2	20	11	15	2,5	4,0	0,5
	3	30	12	15	4,0	4,0	0,5
	4	15	13	10	3,0	5,5	0,5
	5	20	14	10	3,5	5,0	0,5
	6	25	15	10	2,5	5,0	0,4

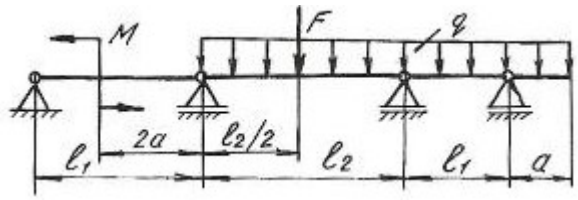
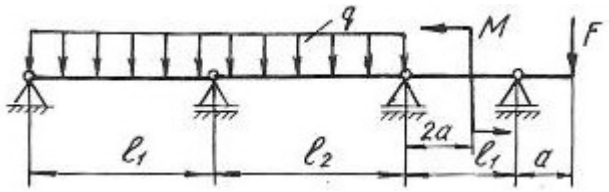
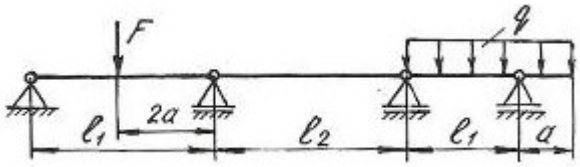
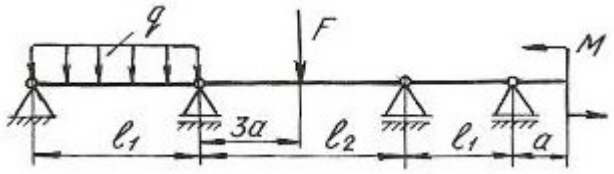
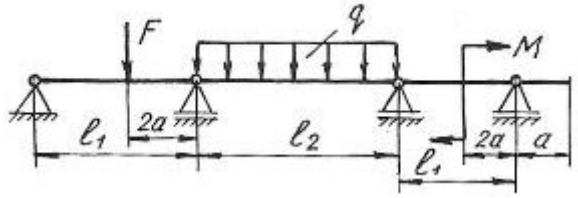
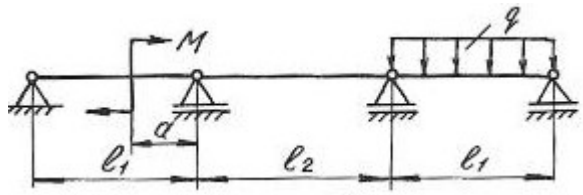
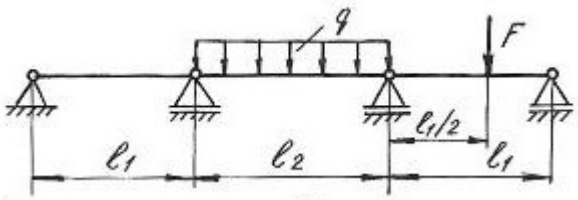
Продолжение табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер вари-анта	M, кН·м	F, кН	q, кН/м	l_1, м	l_2, м	a, м
	7	10	10	10	5,0	5,0	0,4
	8	15	11	15	3,5	6,0	0,6
	9	20	12	20	3,5	5,0	0,4
	10	10	15	20	4,0	5,0	0,4
	11	20	20	10	2,0	5,0	0,5
	12	30	25	10	3,0	4,0	0,6
	13	30	11	15	2,0	5,0	0,4
	14	40	10	15	4,5	5,0	0,5
	15	20	12	15	3,5	5,5	0,6
	16	15	12	10	3,5	4,5	0,5
	17	20	10	10	2,6	5,2	0,4
	18	25	11	10	2,0	5,0	0,8
	19	25	20	20	3,5	6,0	0,5
	20	20	25	15	3,0	5,5	0,8
	21	15	10	10	3,5	3,5	0,8
	22	20	10	10	3	5	0,5
	23	30	11	10	4	6	0,4
	24	25	12	10	5	6	0,6
	25	20	15	10	2	3	0,4
	26	30	16	10	3	4	0,5
	27	40	20	10	4	5	0,6

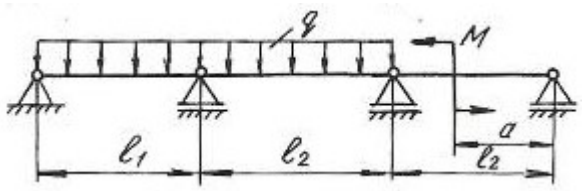
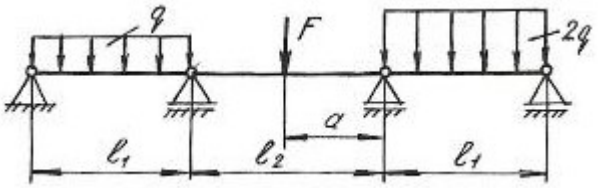
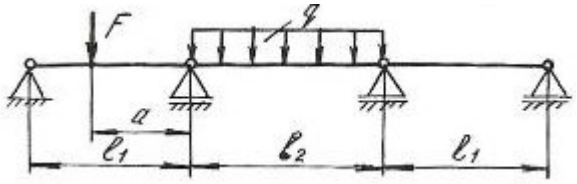
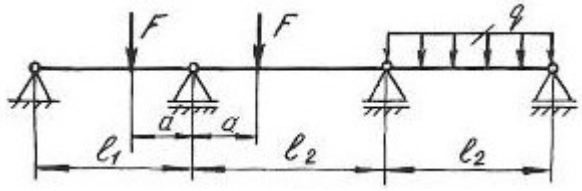
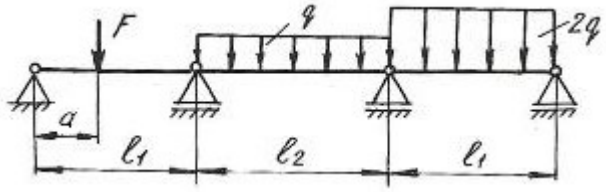
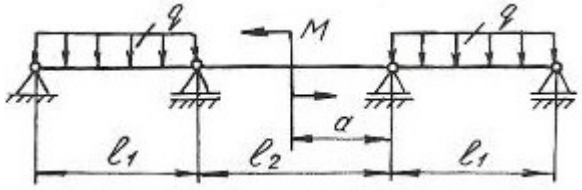
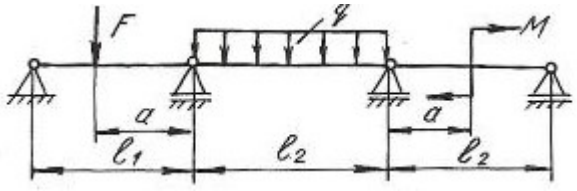
Продолжение табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер вари-анта	M, кН·м	F, кН	q, кН/м	l_1, м	l_2, м	a, м
	28	15	10	15	3	5	0
	29	20	15	15	4	6	0,5
	30	25	20	15	5	6	0,4
	31	30	12	20	2	3	0,4
	32	35	14	15	3	4	0,5
	33	40	16	20	2,5	5	0,6
	34	10	20	10	3	5,5	0,4
	35	15	15	15	2,5	4	0,5
	36	20	10	20	5	6	0,6
	37	20	12	15	4	6	0,4
	38	15	14	20	3,5	4	0,6
	39	10	16	25	4	5	0,5
	40	10	10	30	2,5	4	0,4
	41	15	20	20	3	5	0,5
	42	20	30	10	4	6	0,6
	43	10	15	10	3	5	0,4
	44	20	25	12	4	5	0,5
	45	30	35	14	5	6	0,6
	46	40	10	10	2	5	0,5
	47	20	25	16	3	4	0,6
	48	10	30	10	4	6	0,4

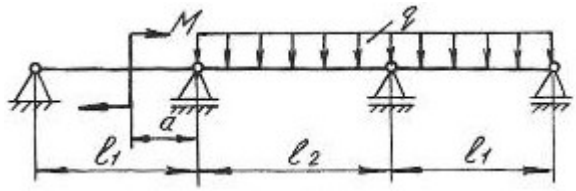
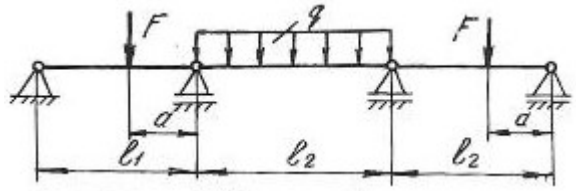
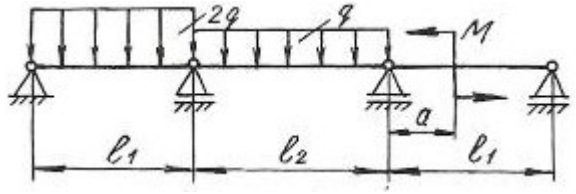
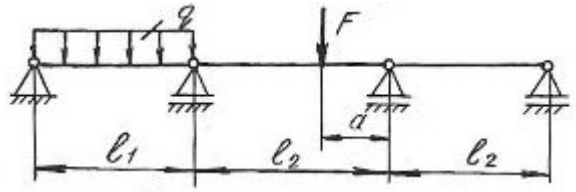
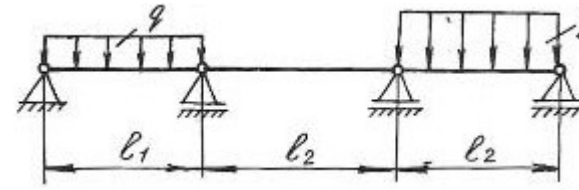
Продолжение табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер вари-анта	M, кН·м	F, кН	q, кН/м	l_1, м	l_2, м	a, м
	49	30	25	12	5	6	0,5
	50	15	15	15	6	5	0,4
	51	10	20	20	2	4	0,6
	52	10	20	10	4	5	0,5
	53	20	15	12	5	6	0,5
	54	30	40	14	4	6	0,5
	55	25	20	16	3	4	0,4
	56	35	30	10	5	6	0,5
	57	40	15	12	4	5	0,6
	58	10	20	14	5	6	0,6
	59	15	30	16	2	4	0,5
	60	20	40	10	4	5	0,4
	61	25	10	12	3	5	0,3
	62	35	15	14	5	6	0,6
	63	40	20	16	6	4	0,5
	64	10	–	10	3	4	0,5
	65	20	–	15	4	5	0,6
	66	30	–	12	5	6	0,4
	67	–	12	40	2	3	0,6
	68	–	14	30	3	4	0,5
	69	–	16	25	4	5	0,4

Продолжение табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер вари-анта	M, кН·м	F, кН	q, кН/м	l_1, м	l_2, м	a, м
	70	30	–	20	4	5	0,4
	71	20	–	15	3	4	0,6
	72	40	–	30	2	3	0,8
	73	–	20	20	3	3	0,5
	74	–	15	15	4	5	0,5
	75	–	16	30	5	6	0,5
	76	–	40	20	4	5	0,4
	77	–	30	10	3	5	0,5
	78	–	20	12	2	3	0,6
	79	–	10	20	2	3	0,6
	80	–	12	15	4	5	0,8
	81	–	15	10	6	6	0,5
	82	–	20	12	3	4	0,5
	83	–	10	15	4	5	0,6
	84	–	15	20	5	6	0,8
	85	20	–	12	3	5	0,5
	86	30	–	15	4	6	0,6
	87	40	–	20	5	6	0,8
	88	10	20	12	3	4	0,4
	89	15	30	14	4	6	0,6
	90	20	40	16	5	5	0,5

Окончание табл. 5.2

Схема закрепления и нагружения балки	Номер вари-анта	M, кН·м	F, кН	q, кН/м	l_1, м	l_2, м	a, м
	91	12	–	20	5	6	0,5
	92	15	–	30	4	5	0,5
	93	20	–	40	6	4	0,4
	94	–	20	12	5	6	0,5
	95	–	30	15	4	5	0,6
	96	–	40	16	6	4	0,4
	97	20	–	20	3	4	0,5
	98	30	–	30	4	5	0,5
	99	40	–	40	5	6	0,6
	100	–	12	10	6	4	0,4
	101	–	15	15	3	3	0,5
	102	–	20	20	4	5	0,6
	103	–	–	20	5	5	0,8
	104	–	–	30	6	6	0,6
	105	–	–	40	4	8	0,5

5.3. Статически неопределимые рамы

Плоской рамой называется геометрически неизменяемая система, состоящая из стержней, лежащих в одной плоскости и жестко соединенных между собой. Горизонтальные стержни рам называются *ригелями*, вертикальные – *стойками.*

Статически неопределимой рамой называется такая геометрически неизменяемая система, у которой реакции или все внутренние суммарные силовые факторы, возникающие в сечениях ее элементов при действии произвольной нагрузки, не могут быть определены из уравнений статики.

Расчет статически неопределимой рамы сводится к построению эпюр изгибающих моментов M_x, поперечных сил Q_x и нормальных сил N_x, на основании которых подбираются сечения, или проверяются напряжения в опасных сечениях различных элементов, или определяется несущая способность системы.

В пособии рассмотрено только построение эпюр M_x, Q_x, N_x, а также подбор поперечного сечения, так как это наиболее трудоемкая часть расчета.

Степень статической неопределимости плоской рамы определяется следующим образом:

1. Замкнутый контур (рама, оба конца которой жестко защемлены) имеет степень статической неопределимости, равную трем.

2. Наличие шарнира в раме понижает степень статической неопределимости на единицу.

3. Наличие подвижной опоры также понижает степень статической неопределимости на единицу.

Определение усилий в статически неопределимой раме связано с необходимостью составления дополнительных уравнений – уравнений совместности деформаций. Число этих уравнений должно быть равно степени статической неопределимости рамы.

Прежде, чем составлять уравнение деформаций, следует превратить заданную статически неопределимую раму в статически определимую, геометрически неизменяемую, устранив из нее «лишние» связи. Такая система называется *основной* системой.

Если к основной системе, кроме заданной нагрузки, приложить реакции устраненных связей, то деформации этой системы и возникающие в ней внутренние усилия, будут такими же, как и в заданной системе. То есть, обе системы будут эквивалентными.

В заданной системе в направлениях имеющихся связей перемещений быть не может. Поэтому, в основной системе перемещения в направлении отброшенных связей должны быть равны нулю.

Способ расчета статически неопределимых систем, при котором за «лишние» неизвестные принимаются силы и моменты, называется *методом сил.*

Данный метод рассмотрен при расчете статически неопределимых неразрезных балок в начале этой главы. Определение коэффициентов уравнений и грузовых членов и их проверки рассмотрены также при расчете балок.

Построение эпюр изгибающих моментов, поперечных и продольных сил.

При расчете рам на прочность в каждом поперечном сечении необходимо определять три силовых фактора: продольную силу N_x, поперечную силу Q_x, изгибающий момент M_x.

Продольная сила N_x равна алгебраической сумме проекций всех сил, действующих по одну сторону от сечения на продольную ось бруса. Если сила вызывает растяжение, она положительна, сжатие – отрицательна.

При построении эпюр продольных сил их значения откладываются симметрично от оси бруса в обе стороны с указанием знака.

Поперечная сила Q_x равна алгебраической сумме проекций на нормаль к оси бруса всех сил, действующих по одну сторону от сечения.

Если поперечная сила относительно сечения вращает часть бруса по часовой стрелке, то она положительна. Противоположное направление следует считать отрицательным. Условимся положительные ординаты откладывать снаружи контура, отрицательные – внутри.

При построении эпюр поперечных сил их значения откладываются по одну сторону от оси бруса с указанием знака.

Изгибающий момент M_x равен сумме моментов всех сил, взятых по одну сторону от сечения, относительно оси, проходящей через центр сечения перпендикулярно плоскости рамы. Условно принято построение эпюр изгибающих моментов со стороны растянутых волокон.

Общий порядок расчета статически неопределимых рам по методу сил сводится к следующему.

1. Определяют степень статической неопределимости рамы.
2. Удаляют «лишние» связи. Полученную таким образом основную систему загружают заданными силами и реакциями отброшенных связей.
3. В местах действия «лишних» неизвестных и по направлению их действия прикладывают единичные силы и строят эпюры изгибающих моментов от единичных сил, а также суммарную единичную эпюру.
4. Строят эпюры изгибающих моментов от действующих на основную систему внешних нагрузок.
5. Вычисляют главные, побочные коэффициенты и свободные члены канонических уравнений и проверяют правильность их определения.
6. Составляют и решают канонические уравнения, определяя «лишние» неизвестные.
7. Определяют остальные реакции с помощью уравнений статики.

8. Вычисляют значения изгибающих моментов, поперечных и нормальных сил и строят эпюры.

9. Подбирают поперечное сечение заданного профиля.

Пример 5.2.

Для заданной схемы статически неопределимой рамы (рис. 5.4, *а*), при заданных значениях длин и нагрузок, построить эпюры изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил. Жесткости стоек и ригеля одинаковы.

Решение.

Заданная система освобождается от наложенных на нее связей. Действия связей заменяются реакциями. Установим степень статической неопределимости рамы: 3(замкнутый контур) − 2(наличие двух шарниров) = 1, т. е. рама однажды статически неопределима.

За «лишнюю» неизвестную X_1 принимаем реакцию H_b. Нагружаем основную систему (рис. 5.4, *б*) заданными внешними силами и реакцией отброшенной связи. Выбирая основную систему, необходимо помнить, что она должна быть статически определимой и геометрически неизменяемой.

В месте действия «лишней» неизвестной и по направлению ее действия прикладываем единичную силу $X_1 = 1$ и строим единичную эпюру.

Рассмотрим подробно построение этой эпюры. Покажем реакции опор (рис. 5.5), их три. Определим эти реакции по уравнениям статики:

$$\sum X = 0; \qquad H'_a - X_1 = 0; \qquad H'_a = 1;$$

$$\sum M_A = 0; \quad -X_1 \cdot 3 + R'_b \cdot 4 = 0; \qquad R'_b = \frac{3}{4} = 0{,}75;$$

$$\sum M_B = 0; \quad -H'_a \cdot 3 + R'_a \cdot 4 = 0; \quad R'_a = \frac{3}{4} = 0{,}75.$$

Проверка правильности вычисления реакций:

$$\sum Y = 0; \qquad -R'_a + R'_b = 0; \qquad 0 = 0.$$

Получили тождество, следовательно, реакции определены правильно.

Разбиваем раму на участки, граница участка там, где приложены сосредоточенные силы и для рамы граница участка, где жестко соединяется стойка с ригелем. Участков три, находим значения изгибающих моментов на границах участков. На всех участках эпюра изгибающих моментов очерчена наклонной прямой, эпюра изгибающих моментов показана на рис. 5.4, *в*.

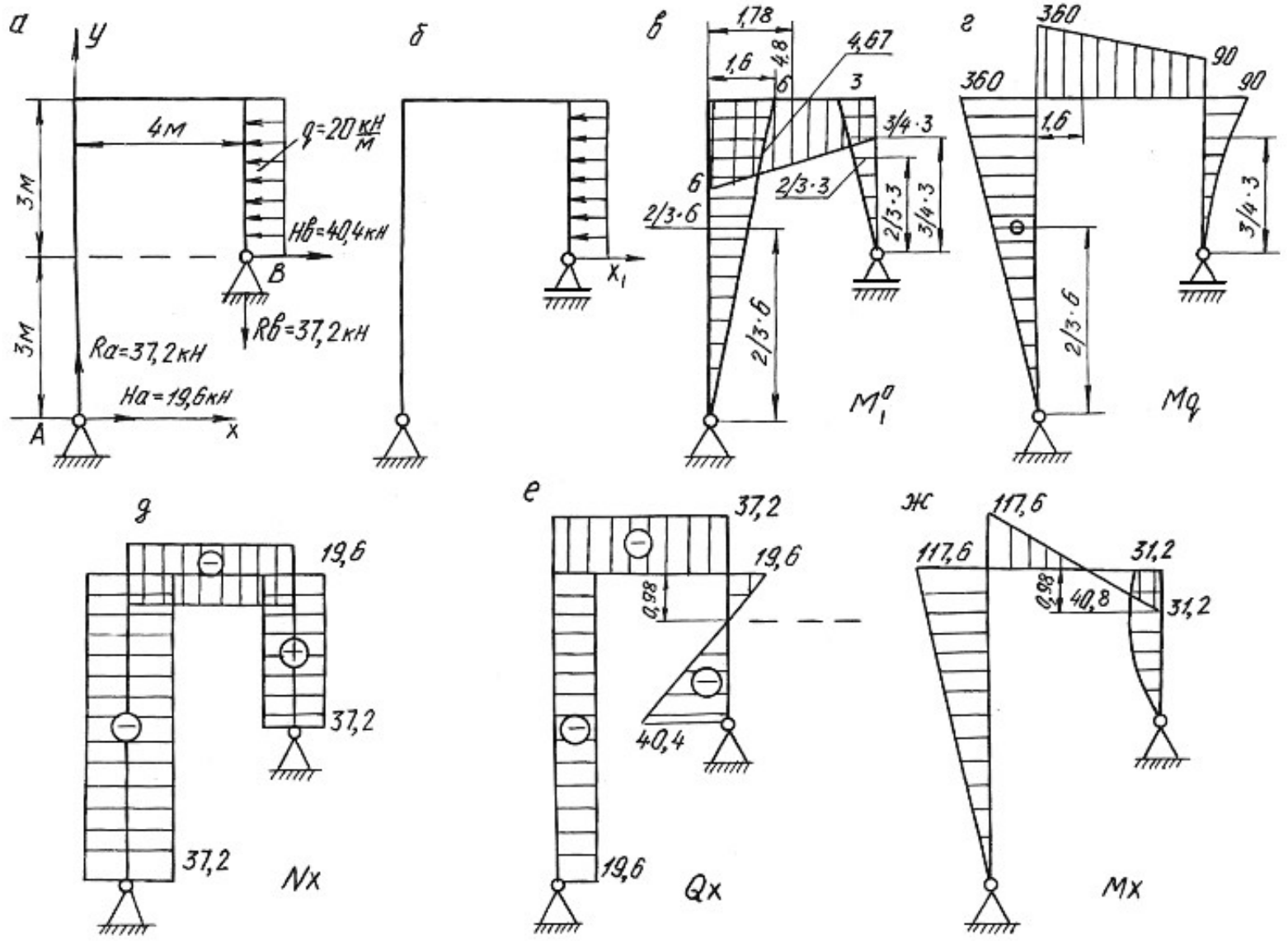

а
y
4м
q=20 кН/м
3м
HB=40,4кН
B
3м
RB=37,2кН
Ra=37,2кН
Ha=19,6кН
A
x
б
x1
в
1,78
1,6
4,8
4,67
6
3
3/4·3
6
2/3·3
2/3·6
2/3·3
3/4·3
2/3·6
M1q
г
360
90
360
90
1,6
3/4·3
2/3·6
Mq
д
19,6
37,2
37,2
Nx
е
37,2
19,6
0,98
40,4
19,6
Qx
ж
117,6
117,6
31,2
0,98
40,8
31,2
Mx

Рис. 5.4.

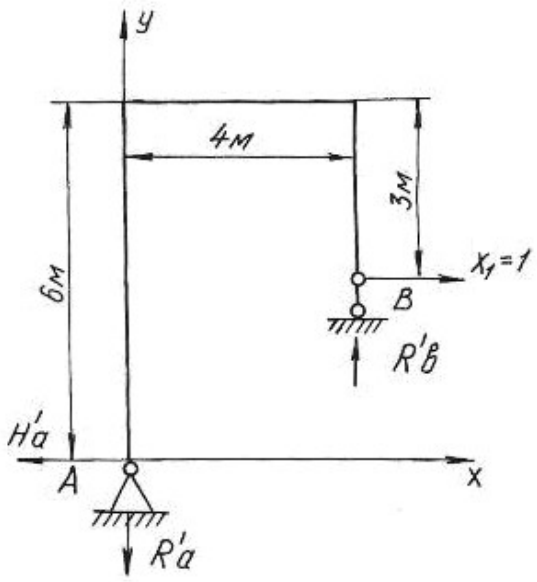


Рис. 5.5.

Строим эпюру изгибающих моментов от действия на основную систему внешней равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q (рис. 5.4, *г*). По приведенной выше методике определяем реакции опор, разбиваем раму на участки, определяем значения изгибающих моментов на границах участков и по контрольным правилам строим эпюру изгибающих моментов.

По числу «лишних» неизвестных записываем канонические уравнения метода сил

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0\,.$$

Перемещение δ_{11} определяется перемножением единичной эпюры самой на себя

$$\delta_{11} = \sum \frac{\omega_1^0 M_{c1}^0}{EJ},$$

где ω_1^0 – площадь единичной эпюры; M_{c1}^0 – ордината единичной эпюры под ее центром тяжести.

$$\delta_{11} = \sum \frac{\omega_1^0 M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\left\{\left(\frac{1}{2}6\cdot 6\right)\left[\frac{2}{3}\cdot 6\right] + \left(\frac{1}{2}3\cdot 3\right)\left[\frac{2}{3}\cdot 3\right] + \left(\frac{(3+6)}{2}4\right)[4{,}67]\right\} = \frac{165{,}06}{EJ}.$$

На участке по ригелю площадь эпюры изгибающих моментов представлена трапецией. Посмотрим подробнее как определить центр тяжести площади, площадь и ординату под ее центром тяжести (рис. 5.6).

$$C=\frac{4\left(2\cdot 3+6\right)}{3\left(3+6\right)}=1,78\text{ м};\quad \omega_0=\frac{1}{2}\left(3+6\right)\cdot 4=18\text{ кН}\cdot\text{м}^2,$$

где ω_0 –площадь трапеции.

$$M_c^0=\left(3+1,67\right)=4,67\text{ кН}\cdot\text{м},$$

где M_c^0 – ордината под центром тяжести трапеции.

Отрезок $1,67$ определяем из подобия треугольников $3:4=x:2,22$.

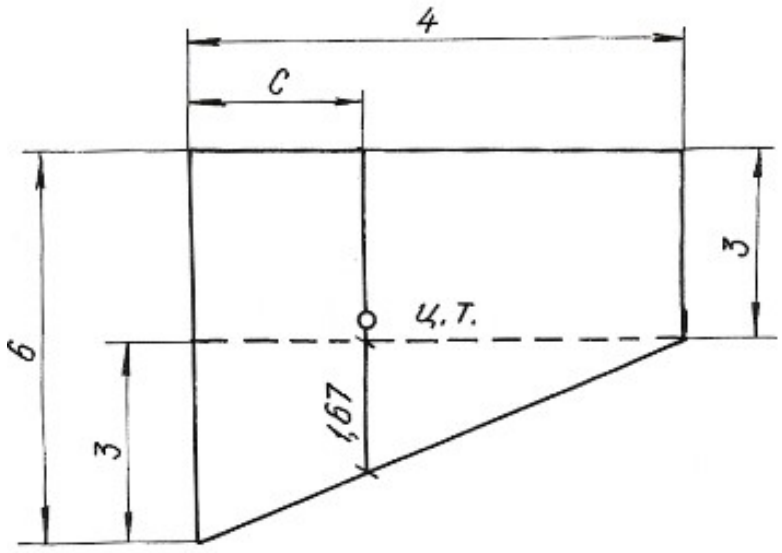


Рис. 5.6.

Перемещение Δ_{1p} получаем перемножением грузовой эпюры M_q на единичную M_1^0

$$\Delta_{1p}=\sum\frac{\omega_p M_{c1}^0}{EJ},$$

где ω_p – площадь грузовой эпюры; M_{c1}^0 – ордината с первой единичной эпюры под центром тяжести грузовой.

$$\Delta_{1p}=\frac{1}{EJ}\left\{-\left(\frac{1}{2}360\cdot 6\right)\left[\frac{2}{3}6\right]-\left(\left(\frac{90+360}{2}\right)\cdot 4\right)[4,8]-\left(\frac{1}{3}90\cdot 3\right)\left[\frac{3}{4}3\right]\right\}=-\frac{6682,5}{EJ}.$$

Полученные значения δ_{11} и Δ_{1p} подставляем в уравнения, определяем X_1:

$$\frac{165{,}06 \cdot X_1}{EJ} - \frac{6682{,}5}{EJ} = 0, \quad X_1 = 40{,}4\,\text{кН}.$$

Зная реакцию $H_b = X_1$, по уравнениям статики определяем R_a, H_a, R_b:

$$\sum X = 0, \qquad H_b + H_a - q \cdot 3 = 0, \qquad H_a = 19{,}6 \text{ кН};$$

$$\sum M_a = 0, \quad H_b \cdot 3 + R_b \cdot 4 - q \cdot 3 \cdot 4{,}5 = 0, \qquad R_b = 37{,}2 \text{ кН};$$

$$\sum M_b = 0, \quad H_a \cdot 6 - R_a \cdot 4 + q \cdot 3 \cdot 1{,}5 = 0, \qquad R_a = 37{,}2 \text{ кН}.$$

Проверка правильности вычисления реакций:

$$\sum Y = 0, \qquad R_a + R_b = 0.$$

Строим эпюры M_x, Q_x, N_x известным способом. Эпюры приведены на рисунке 5.4, *д*, *е*, *ж*.

Пример 5.3.

Для заданной схемы статически неопределимой рамы (рис. 5.7, *а*)**,** при заданных значениях длин и нагрузок, построить эпюры изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил. Подобрать поперечное сечение двутаврового профиля (см. табл. П. 1) при $\sigma_{adm} = 160$ МПа. Жесткости стойки и ригеля одинаковы.

Решение.

Заданная система освобождается от наложенных на нее связей. Действия связей заменяются реакциями. Установим степень статической неопределимости рамы: 3(замкнутый контур) – 1(наличие одного шарнира) = 2, т. е. рама дважды статически неопределима.

За «лишние» неизвестные принимаем $H_b = X_1$, $R_b = X_2$, тем самым выбираем основную систему. Нагружаем основную систему внешними силами (*q*, *M*) и реакциями отброшенных связей (X_1, X_2). Отбрасывая «лишние» связи, следует помнить, что основная система должна быть статически определимой и геометрически неизменяемой.

В местах действия «лишних» неизвестных и по направлению их действия прикладываем единичные силы $X_1 = 1$ и $X_2 = 1$ и строим эпюры изгибающих моментов от этих сил.

Строим эпюры изгибающих моментов от действия на основную систему внешних сил *q* и *M*.

Методика построения эпюр изгибающих моментов от единичных сил и внешних нагрузок, приложенных к основной системе, подробно рассмотрена при решении примера 5.1 и здесь не приводится.

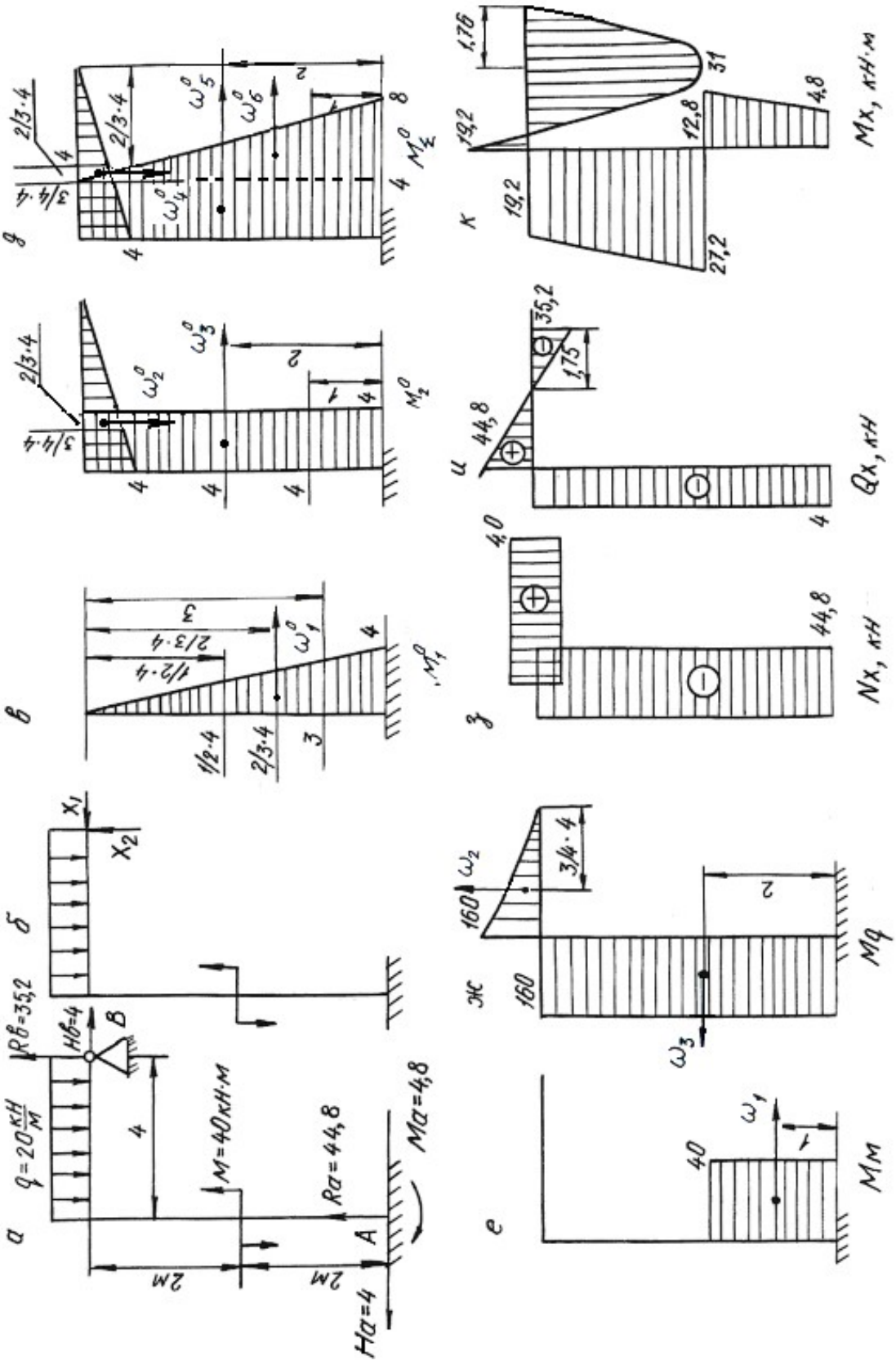


Рис. 5.7.

Составляем канонические уравнения метода сил:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0;$$
$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0.$$

Вычисляем коэффициенты и свободные члены канонических уравнений:

$$\delta_{11} = \sum \frac{\omega_1^0 M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\left\{\left(\frac{1}{2}4\cdot 4\right)\left[\frac{2}{3}4\right]\right\} = \frac{21{,}3}{EJ},$$

$$\delta_{22} = \sum \frac{\omega_2^0 M_{c2}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\left\{\left(\frac{1}{2}4\cdot 4\right)\cdot\left[\frac{2}{3}4\right] + (4\cdot 4)[4]\right\} = \frac{85{,}3}{EJ},$$

$$\delta_{21} = \delta_{12} = \sum \frac{\omega_2^0 M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\{(4\cdot 4)[2]\} = \frac{32}{EJ},$$

$$\Delta_{1p} = \sum \frac{\omega_p M_{c1}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\{(40\cdot 2)[3] - (160\cdot 4)[2]\} = -\frac{1040}{EJ},$$

$$\Delta_{2p} = \sum \frac{\omega_p \cdot M_{c2}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\left\{(40\cdot 2)[4] - (160\cdot 4)[4] - \left(\frac{1}{3}160\cdot 4\right)\left[\frac{3}{4}4\right]\right\} = -\frac{2880}{EJ}.$$

Проверяем правильность вычисления коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Для этого строим суммарную единичную эпюру M_Σ^0.

Для проверки правильности вычисления коэффициентов канонических уравнений применяем универсальную проверку:

$$\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{22} + \delta_{21} = \sum \frac{\omega_\Sigma^0 M_{C\Sigma}^0}{EJ};$$

$$\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{22} + \delta_{21} = \frac{1}{EJ}\left\{\left(\frac{1}{2}(4+8)\cdot 4\right)[6{,}22] + \left(\frac{1}{2}4\cdot 4\right)\left[\frac{2}{3}4\right]\right\} = \frac{170{,}6}{EJ}.$$

Поверяем правильность вычисления грузовых членов

$$\Delta_{1p} + \Delta_{2p} = \sum \frac{\omega_p M_{c\Sigma}^0}{EJ} = \frac{1}{EJ}\left\{(40\cdot 2)[7] - (160\cdot 4)[6] - \left(\frac{1}{3}160\cdot 4\right)\left[\frac{3}{4}4\right]\right\} =$$
$$= -\frac{3920}{EJ}.$$

В обоих случаях получили тождества, значит коэффициенты и свободные члены канонических уравнений определены правильно.

Подставляем вычисленные значения коэффициентов в канонические уравнения, определяем неизвестные X_1 и X_2:

$$\left.\begin{aligned} 21{,}3 \cdot X_1 + 32 \cdot X_2 - 1040 = 0 \\ 32 \cdot X_1 + 85{,}3 \cdot X_2 - 2880 = 0 \end{aligned}\right\}$$

$X_1 = -4$ кН; $X_2 = 35{,}2$ кН.

Сила X_1 получилась со знаком «минус», это говорит о том, что направление реакции будет противоположно единичной силе.

Зная реакции H_b и R_b, по уравнениям статики определяем остальные реакции

$$\begin{aligned} &\sum X = 0, \quad H_b - H_a = 0, && H_a = 4 \text{ кН;} \\ &\sum M_a = 0, \quad M - M_a - q \cdot 4 \cdot 2 + R_b \cdot 4 - H_b \cdot 4 = 0, && M_a = 4{,}8 \text{ кН·м;} \\ &\sum M_в = 0, \quad M - M_a - H_a \cdot 4 - R_a \cdot 4 + q \cdot 4 \cdot 2 = 0, && R_a = 44{,}8 \text{ кН·м.} \end{aligned}$$

Проверка:

$$\sum Y = 0, \quad R_a + R_b - q \cdot 4 = 0, \quad 35{,}2 + 44{,}8 - 80 = 0.$$

Строим эпюры изгибающих моментов, поперечных и нормальных сил по контрольным правилам. Эпюры приведены на рис. 5.7.

Выявляем опасное сечение рамы, где одновременно M_x и N_x имеют большие значения. Это сечение левой стойки, где $N_X = -44{,}8$ кН, $M_X = 27{,}2$ кН·м.

Условие прочности

$$\sigma_{\max} = \pm\frac{N_x}{A} \pm \frac{M_x}{W_z} \le \sigma_{\text{adm}}.$$

Выбираем сечение по моменту M_x

$$\frac{M_x}{W_z} \le \sigma_{\text{adm}} = 160 \text{ МПа}. \quad W_z \ge \frac{27{,}2 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 1{,}7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 170 \text{ см}^3.$$

По сортаменту проката выбираем двутавр № 20, $W_z = W_x^{\text{табл.}} = 184$ см^3, $A_{\text{табл.}} = 26{,}8$ см^2.

Производим проверку с учетом силы N_x:

$$\sigma_{\max} = -\frac{44{,}8 \cdot 10^3}{26{,}8 \cdot 10^{-4}} - \frac{27{,}2 \cdot 10^3}{184 \cdot 10^{-6}} = -1{,}67 \cdot 10^7 - 0{,}148 \cdot 10^9 \text{ Па} = 164{,}7 \text{ МПа},$$

$\sigma_{\max} = 164{,}7$ МПа> $\sigma_{\text{adm}} = 160$ МПа.

Отклонение (перегруз) $\delta = \dfrac{164{,}7 - 160}{160} \cdot 100 = 2{,}93\,\% < 5\,\%$, что допустимо.

5.4. Задания для расчета плоских рам

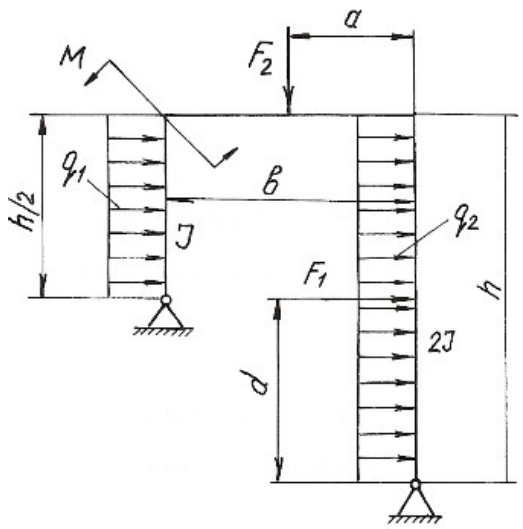
Для расчетной схемы статически неопределимой рамы при заданных значениях длин и нагрузок, определяемых в соответствии с указанным номером варианта, требуется:

1. Определить степень статической неопределимости рамы. Выбрать основную систему.
2. Составить канонические уравнения метода сил.
3. Вычислить коэффициенты при неизвестных и свободные члены канонических уравнений. Проверить правильность их вычисления.
4. Построить эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил.
5. Подобрать поперечное сечение элементов рамы в виде двутавра (см. табл. П. 1) при $\sigma_{\text{adm}} = 160$ МПа.

Данные для расчета взять из табл. 5.3.

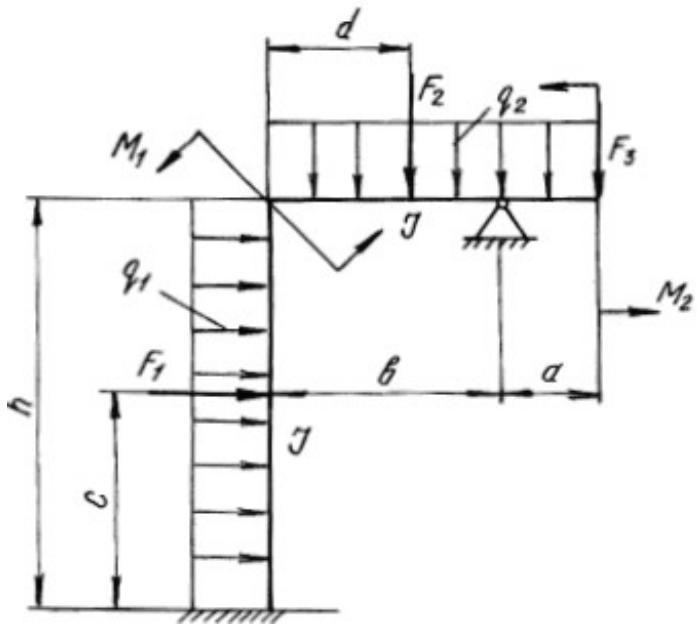
Таблица 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	M, кН·м
1	10	5	–	–	20	–	–	–	80
2	9	5	–	–	–	15	–	–	10
3	9	6	–	–	–	–	–	–	60
4	9	4	–	5	15	–	40	–	–
5	10	4	2	–	–	20	–	30	–
6	8	5	3	–	–	–	–	60	–
7	8	6	–	–	–	–	–	–	10
8	8	5	–	5	–	–	40	–	–
9	9	6	3	–	–	–	–	50	80
10	9	6	5	–	–	–	40	–	–



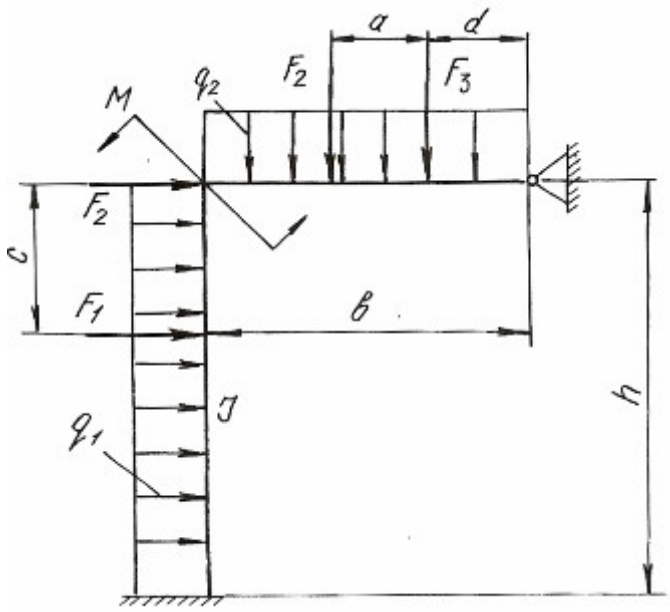
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M_1, кН·м	M_2, кН·м
11	10	5	0,5	6	–	20	–	40	–	–	–	–
12	11	6	0,4	6	–	–	20	40	–	–	–	–
13	11	5	0,3	4	–	–	–	30	–	–	–	10
14	9	4	0,6	–	–	–	25	–	–	–	–	12
15	9	5	0,4	–	4	30	–	–	60	–	–	–
16	8	4	0,3	–	3	–	–	–	30	20	–	–
17	8	4	0,3	–	–	–	–	–	–	30	10	–
18	6	3	0,2	–	–	25	–	–	–	–	15	80
19	7	4	0,6	–	3	–	–	–	30	20	12	–
20	10	6	0,6	–	–	–	30	–	–	–	10	–



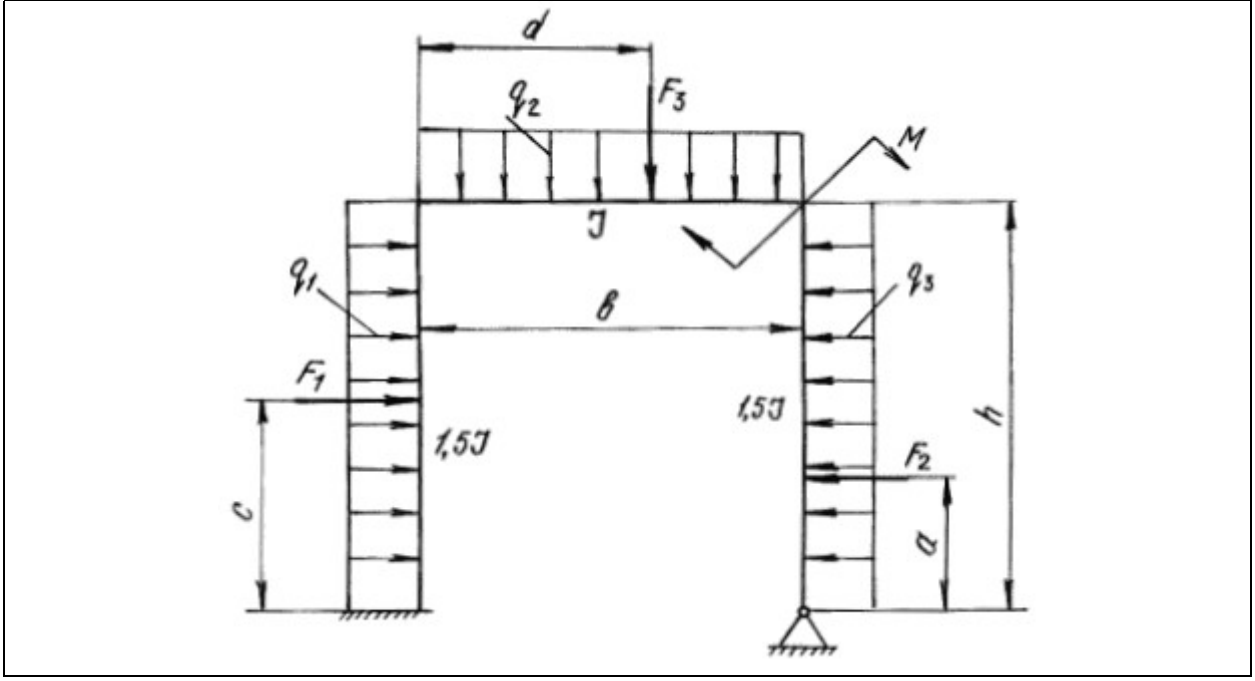
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M_1, кНм	M_2, кН·м
21	10	8	–	–	–	20	–	–	–	–	–	20
22	10	7	2	–	2	30	–	–	–	–	20	–
23	10	6	–	2	–	–	–	–	30	20	–	–
24	8	6	–	–	–	20	30	–	–	–	–	–
25	8	6	–	3	–	–	20	–	20	–	–	–
26	9	5	–	–	–	–	20	–	–	–	–	15
27	9	6	2	–	1	–	–	–	–	40	20	–
28	7	5	2	–	1	–	–	–	–	–	30	–
29	8	4	2	–	1	–	–	–	–	–	20	20
30	8	6	–	–	–	–	–	–	50	20	–	10



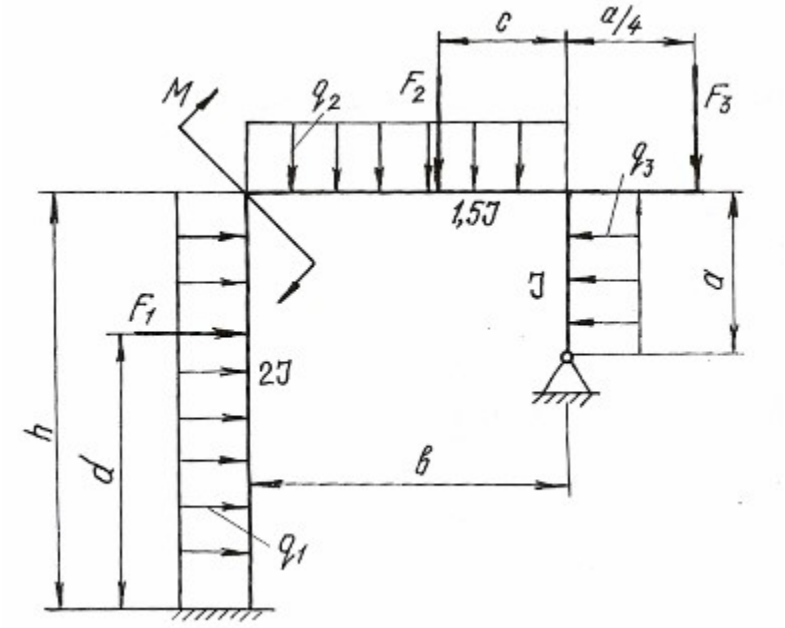
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	q_3, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M, кН·м
31	10	4	0,5	–	–	12	–	–	–	–	–	10
32	9	5	0,4	–	–	–	20	–	–	–	–	15
33	8	4	0,3	–	–	–	–	20	–	30	–	–
34	8	6	0,3	–	4	20	–	–	–	–	40	–
35	8	4	0,4	–	–	–	20	–	–	30	–	–
36	6	5	0,3	5	–	–	–	20	60	–	–	–
37	10	5	0,4	–	4	–	–	–	–	40	50	–
38	8	4	0,3	–	–	–	–	–	–	30	–	12
39	12	6	0,5	–	4	–	–	–	–	–	40	15
40	12	6	0,6	3	–	–	–	25	10	–	–	–



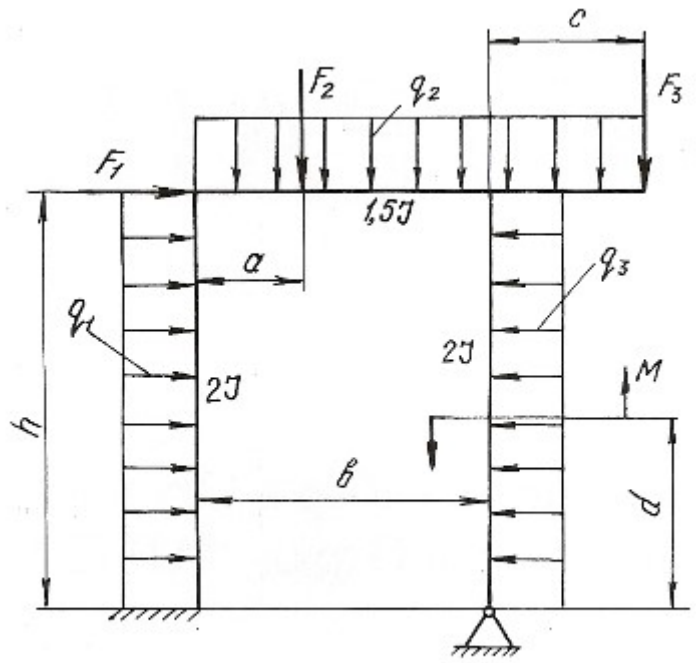
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	*h*, м	*b*, м	*a*, м	*c*, м	*d*, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	q_3, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	*M*, кН·м
41	10	5	4	–	–	20	–	–	–	–	–	50
42	9	6	4	–	–	–	15	–	–	–	–	10
43	8	6	5	–	–	–	–	20	–	–	30	–
44	8	5	6	–	2	15	–	–	30	–	–	–
45	8	4	5	2	–	–	20	–	–	40	–	–
46	9	6	3	–	5	–	–	15	40	–	–	–
47	9	8	4	2	–	–	–	–	–	10	–	60
48	9	6	6	–	–	–	–	–	–	–	40	10
49	10	8	5	3	–	–	–	–	–	20	40	–
50	10	6	4	1	4	–	–	–	10	25	–	–



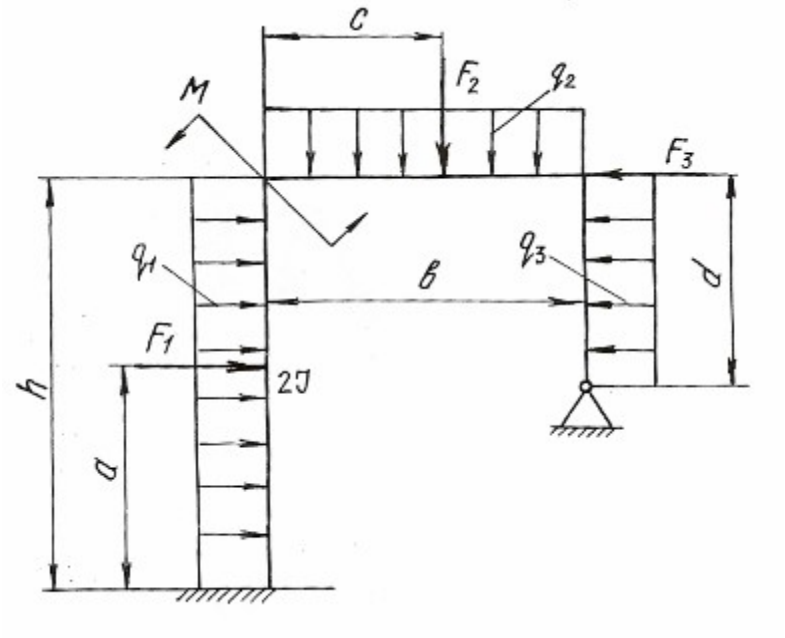
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	q_3, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M, кН·м
51	8	4	0,6	0,5	5	20	–	–	–	–	–	50
52	10	5	0,5	0,6	–	–	20	–	20	30	–	–
53	8	4	0,4	0,4	–	–	–	25	–	20	–	–
54	6	4	0,3	0,4	4	–	–	–	–	–	30	14
55	12	6	0,6	0,5	–	–	–	–	40	20	–	–
56	10	4	0,4	0,3	2	15	–	–	–	–	–	10
57	8	5	0,3	0,3	2	–	15	–	–	–	–	12
58	8	5	0,4	0,4	–	–	–	20	30	–	–	–
59	9	5	0,5	0,6	–	–	–	–	–	30	40	–
60	9	4	0,6	0,5	–	–	30	–	–	20	–	–



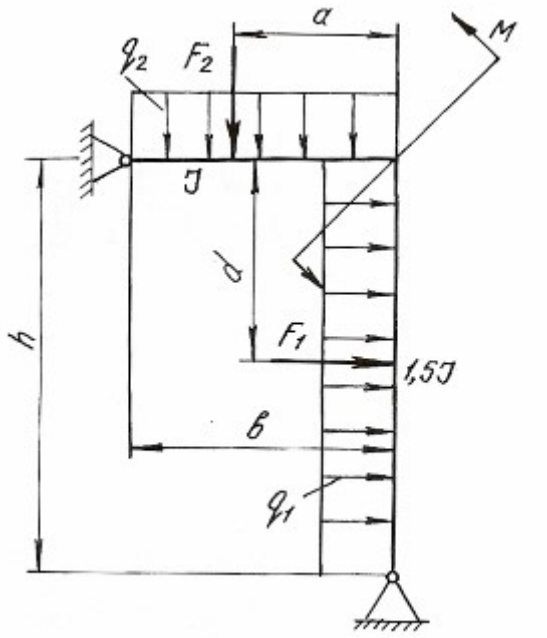
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	q_3, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M, кН·м
61	8	4	4	–	4	20	–	–	50	–	–	–
62	10	5	–	2,5	5	–	20	–	–	30	–	–
63	6	3	–	–	3	–	–	20	–	–	30	–
64	12	6	5	–	6	–	–	20	50	–	–	–
65	10	4	–	–	5	–	20	–	–	–	–	80
66	8	4	–	–	5	15	–	–	–	–	20	–
67	8	5	–	2	5	20	–	–	–	40	–	–
68	8	4	–	–	4	–	–	–	–	–	80	40
69	9	4	–	3	5	–	–	–	–	60	–	40
70	10	5	8	–	5	–	15	–	60	–	–	–



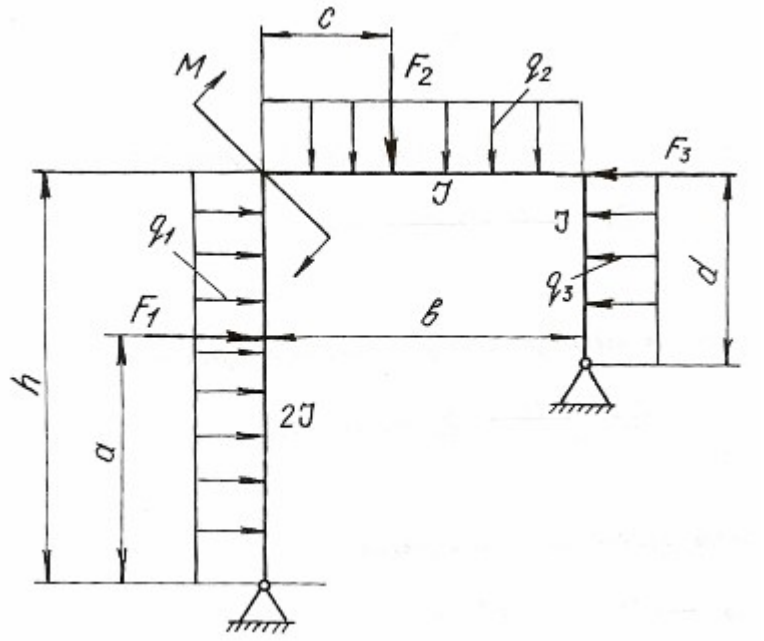
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	M, кН·м
71	10	5	2,5	–	20	–	–	80	–
72	10	6	–	–	–	15	–	–	–
73	10	4	2	–	–	–	–	–	–
74	10	5	–	–	15	–	–	80	–
75	9	5	–	–	–	20	–	–	–
76	9	6	–	–	–	–	–	–	60
77	9	4	2	–	–	–	–	10	–
78	8	6	3	–	–	–	–	80	10
79	8	6	3	4	–	–	40	60	–
80	8	5	–	4	–	–	30	–	–



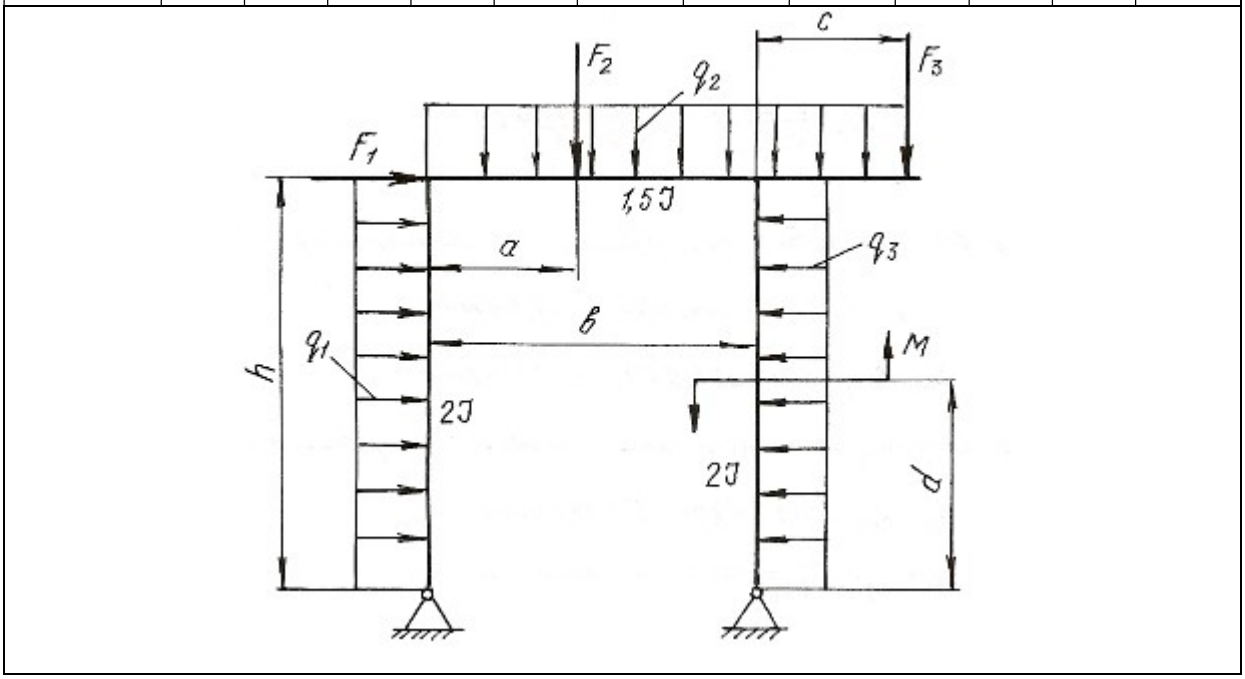
Продолжение табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	q_3, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M, кН·м
81	8	4	4	–	4	20	–	–	50	–	–	–
82	10	5	–	2,5	5	–	20	–	–	30	–	–
83	8	4	–	–	3	–	–	20	–	–	30	–
84	6	4	5	–	6	–	–	20	50	–	–	–
85	12	6	–	–	5	–	20	–	–	–	–	80
86	10	4	–	–	5	15	–	–	–	–	20	–
87	8	5	–	2	5	20	–	–	–	40	–	–
88	8	5	–	–	4	–	–	–	–	–	80	40
89	9	5	–	3	5	–	–	–	–	60	–	40
90	9	4	8	–	5	–	15	–	60	–	–	–



Окончание табл. 5.3

Номер варианта	h, м	b, м	a, м	c, м	d, м	q_1, кН/м	q_2, кН/м	q_3, кН/м	F_1, кН	F_2, кН	F_3, кН	M, кН·м
91	8	4	0,6	0,5	5	20	–	–	–	–	–	50
92	10	5	0,5	0,6	–	–	20	–	20	30	–	–
93	8	4	0,4	0,4	–	–	–	25	–	20	–	–
94	6	4	0,3	0,4	4	–	–	–	–	–	30	14
95	12	6	0,6	0,5	–	–	–	–	40	20	–	–
96	10	4	0,4	0,3	2	15	–	–	–	–	–	10
97	8	5	0,3	0,3	2	–	15	–	–	–	–	12
98	8	5	0,4	0,4	–	–	–	20	30	–	–	–
99	9	5	0,5	0,6	–	–	–	–	–	30	40	–
100	9	4	0,6	0,5	–	–	30	–	–	20	–	–



Глава 6
ВИДЫ СЛОЖНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сочетание простейших видов деформаций называется сложным сопротивлением. При расчете элементов конструкций, испытывающих сложные сопротивления, используют принцип независимости действия сил, т. е. определяют деформации и напряжения для каждого простейшего вида сопротивления, а затем результаты суммируют алгебраически, геометрически или согласно одной из теорий прочности. При этом задача сводится к определению опасного сечения по длине бруса и опасной точки в этом сечении.

В данной главе приведены методики решения задач на косой изгиб, внецентренное растяжение или сжатие, совместное действие изгиба с кручением.

6.1. Косой изгиб

Косой изгиб – вид сложного сопротивления, который возникает при действии внешних нагрузок, перпендикулярных продольной оси бруса, но расположенных вне главных плоскостей инерции. Поэтому косой изгиб можно рассматривать как сочетание двух плоских изгибов во взаимно перпендикулярных плоскостях, разложив все силы по направлению главных центральных осей инерции поперечных сечений.

При косом изгибе балки нормальные напряжения в произвольной точке поперечного сечения с координатами y и z определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M^{в}}{J_z} y + \frac{M^{г}}{J_y} z, \qquad (6.1)$$

где J_z и J_y – главные центральные моменты инерции поперечного сечения балки относительно осей z и y; $M^{в}$ и $M^{г}$ – изгибающие моменты в поперечном сечении в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Положение нейтральной оси поперечного сечения определяется по формуле:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{M^{г}}{M^{в}} \cdot \frac{J_z}{J_y}, \qquad (6.2)$$

где α - угол наклона нейтральной оси к горизонтальной главной центральной оси инерции.

Максимальные и минимальные нормальные напряжения возникают в точках, наиболее удаленных от обеих главных центральных осей инерции и для симметричных сечений определяются по формуле:

$$\sigma_{max} = \pm\frac{M^{г}}{W_y} \pm \frac{M^{в}}{W_z}, \qquad (6.3)$$

где W_z и W_y – моменты сопротивления поперечного сечения изгибу относительно осей z и y.

Если внешние нагрузки лежат в одной плоскости, то положение нейтральной оси определяется по формуле:

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\varphi \cdot \frac{J_z}{J_y}, \qquad (6.4)$$

где φ – угол между силовой плоскостью, в которой действуют внешние нагрузки, и главной вертикальной осью инерции поперечного сечения балки.

Напряжения в этом случае определяются по формуле:

$$\sigma_{max/min} = \pm M\left(\frac{\cos\varphi}{W_z} \pm \frac{\sin\varphi}{W_y}\right), \qquad (6.5)$$

где M – результирующий момент, действующий в силовой плоскости.

Прогиб f и угол поворота θ сечения балки при косом изгибе определяются как геометрические суммы прогибов и углов поворота от составляющих изгибающего момента, действующих в главных плоскостях инерции балки

$$f = \sqrt{f_z^2 + f_y^2} \text{ и } \theta = \sqrt{\theta_z^2 + \theta_y^2}, \qquad (6.6)$$

где f_z и f_y – прогибы в направлении осей z и y; θ_z и θ_y – углы поворота сечения вокруг осей z и y.

Пример 6.1.

Для балки (рис. 6.1) построить эпюры нормальных напряжений по сторонам поперечного сечения (см. табл. П. 1) в защемлении, определить наибольшее нормальное напряжение и полный прогиб свободного конца балки при $F = 2$ кН, $\varphi = 15^{o}$.

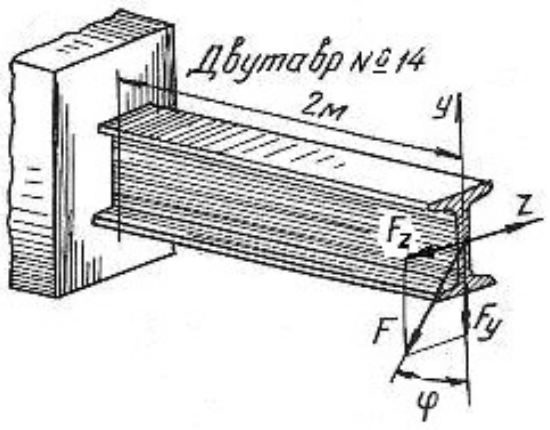


Рис. 6.1.

Решение.

Раскладываем силу F на ее составляющие, действующие в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$F_y = F \cdot \cos 15^\circ = 2000 \cdot 0,96 = 1920 \text{ Н};$$

$$F_z = F \cdot \sin 15^\circ = 2000 \cdot 0,26 = 520 \text{ Н}.$$

Максимальные изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях будут в защемленном сечении балки:

$$M^{\text{в}}_{\max} = F_y l = 1920 \cdot 2 = 3840 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M^{\text{г}}_{\max} = F_z l = 520 \cdot 2 = 1040 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По ГОСТ 8239-89 (см. табл. П. 1)для заданного профиля находим моменты инерции и моменты сопротивления сечения:

$$J_z = 572 \text{ см}^4; \quad J_y = 41,9 \text{ см}^4; \quad W_z = 81,7 \text{ см}^3; \quad W_y = 11,5 \text{ см}^3,$$

что при переводе в единицы СИ соответствует:

$$J_z = 572 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4; \; J_y = 41,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4; \; W_z = 81,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3; \; W_y = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Наибольшие нормальные напряжения от изгиба в вертикальной плоскости:

$$\sigma^{\text{в}}_{\max} = \frac{M^{\text{в}}_{\max}}{W_z} = \frac{3840}{81,7 \cdot 10^{-6}} = 47 \cdot 10^6 \text{ Па} = 47 \text{ МПа},$$

а наибольшие нормальные напряжения от изгиба в горизонтальной плоскости:

$$\sigma^{\text{г}}_{\max} = \frac{M^{\text{г}}_{\max}}{W_y} = \frac{1040}{11,5 \cdot 10^{-6}} = 90,4 \cdot 10^6 \text{ Па} = 90,4 \text{ МПа}.$$

Эпюры нормальных напряжений даны на рис. 6.2. Таким образом, наибольшие нормальные напряжение будут в крайних угловых точка поперечного сечения. Как видно по эпюрам нормальных напряжений

$$\sigma_{\max} = 47 + 90,4 = 137,4 \text{ МПа}; \qquad \sigma_{\min} = -47 - 90,4 = -137,4 \text{ МПа}.$$

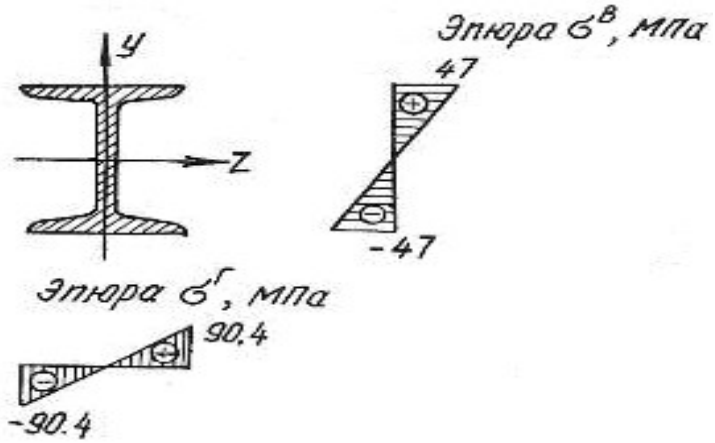


Рис. 6.2.

Прогиб свободного конца балки в вертикальной плоскости [10]

$$f_y = \frac{F_y l^3}{3EJ_z} = \frac{1920 \cdot 2^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 572 \cdot 10^{-8}} = 4{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad \text{или} \quad f_y = 4{,}5 \text{ мм},$$

а величина прогиба в горизонтальной плоскости

$$f_z = \frac{F_z l^3}{3EJ_y} = \frac{520 \cdot 2^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 41{,}9 \cdot 10^{-8}} = 16{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad \text{или} \quad f_z = 16{,}5 \text{ мм}.$$

Полный прогиб свободного конца балки

$$f = \sqrt{f_y^2 + f_z^2} = \sqrt{4{,}5^2 + 16{,}5^2} = 17{,}1 \text{ мм}.$$

Пример 6.2.

Для бруса прямоугольного поперечного сечения (рис. 6.3) требуется:

1. Построить эпюры изгибающих моментов в главных плоскостях; определить из расчета на прочность размеры поперечного сечения, принимая σ_{adm}=160 МПа и отношение сторон $\frac{h}{b} = 2$;

2. Для опасного поперечного сечения построить эпюры нормальных напряжений от каждого из изгибающих моментов и суммарную эпюру нормальных напряжений.

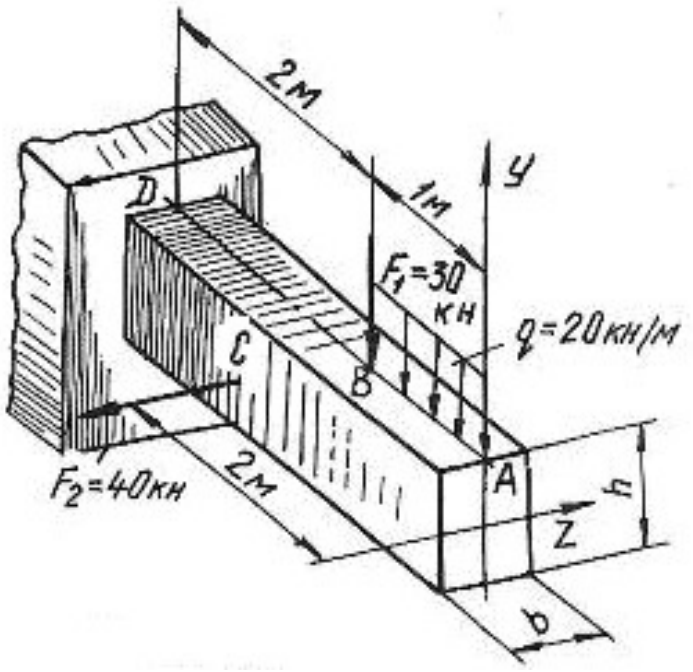


Рис. 6.3.

Решение.

Согласно принципу независимости действия сил рассмотрим отдельно действие сил, вызывающих изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Изгиб в вертикальной плоскости вызывается действием силы F_1 и равномерно распределенной нагрузкой. Определим величину изгибающих моментов в характерных точках:

$$M_A^{\text{в}} = 0;$$

$$M_B^{\text{в}} = -q \cdot 1 \cdot 0{,}5 = -20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0{,}5 = -10 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} = -10 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_D^{\text{в}} = -q \cdot 1 \cdot 2{,}5 - F_1 \cdot 2 = -20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 2{,}5 - 30 \cdot 10^3 \cdot 2 = -110 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} = -110 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Изгиб в горизонтальной плоскости вызывается силой F_2. Определим величину изгибающих моментов в характерных точках:

$$M_A^{\text{г}} = 0; \quad M_B^{\text{г}} = 0; \quad M_C^{\text{г}} = 0;$$

$$M_D^{\text{г}} = F_2 \cdot 1 = 40 \cdot 10^3 \cdot 1 = 40 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} = 40 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Эпюры изгибающих моментов показаны на рис. 6.4, *а.* Максимальные изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях будут в сечении D:

$$M_{\max}^{\text{в}} = M_D^{\text{в}} = 110 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad M_{\max}^{\text{г}} = M_D^{\text{г}} = 40 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

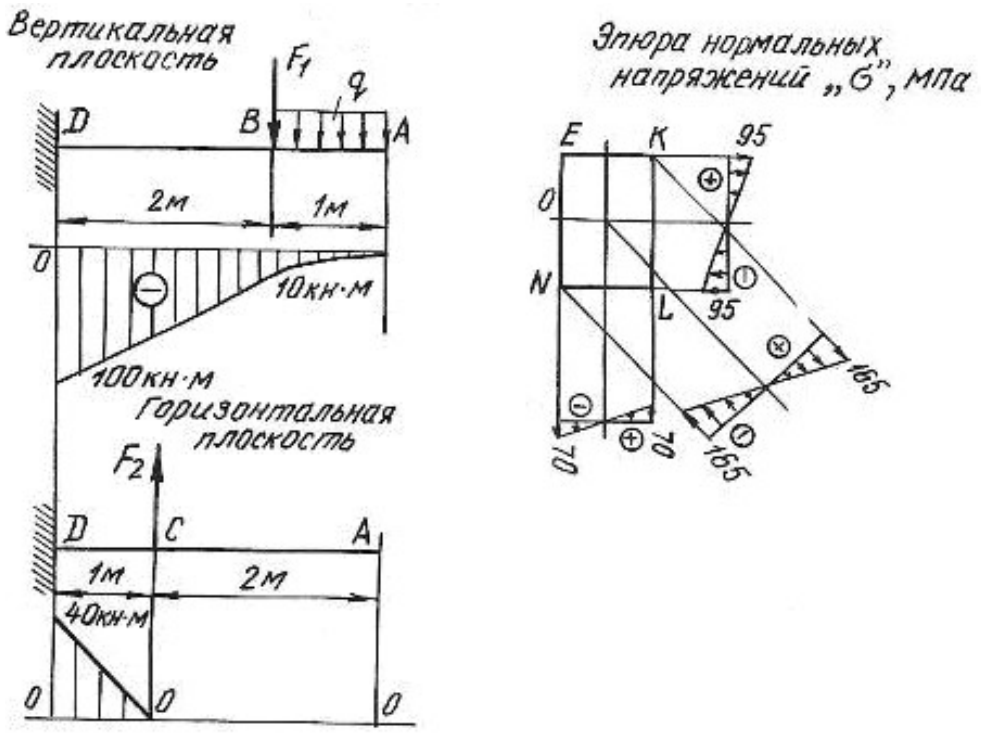


Рис. 6.4.

Опасное сечение балки будет в защемлении. Запишем условие прочности для опасного сечения

$$\sigma_{\max} = \frac{M^{\text{в}}_{\max}}{W_z} + \frac{M^{\text{г}}_{\max}}{W_y} \le \sigma_{\text{adm}}.$$

Для бруса прямоугольного сечения моменты сопротивления равны:

$$W_z = \frac{bh^2}{6} \quad \text{и} \quad W_y = \frac{b^2 h}{6};$$

при $h = 2 \cdot b$ получим

$$W_z = \frac{b(2 \cdot b)^2}{6} = \frac{2b^3}{3} \quad \text{и} \quad W_y = \frac{b^2 \cdot 2 \cdot b}{6} = \frac{b^3}{3}.$$

Подставляя значение величин в условие прочности, получим

$$\sigma_{\max} = \frac{110 \cdot 10^3}{\frac{2}{3} \cdot b^3} + \frac{40 \cdot 10^3}{\frac{1}{3} \cdot b^3} \le 160 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Решая уравнение относительно b, получим $b = 0{,}12$ м $= 120$ мм и $h = 2b = 240$ мм. Для построения эпюр нормальных напряжений определяем наибольшие напряжения, для чего вычислим моменты сопротивления сечения:

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = \frac{12 \cdot 10^{-2} \cdot (24 \cdot 10^{-2})^2}{6} = 1152 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$W_y = \frac{b^2 h}{6} = \frac{(12 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 24 \cdot 10^{-2}}{6} = 576 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Наибольшие нормальные напряжения от изгиба в вертикальной плоскости:

$$\sigma^{\text{в}}_{\max} = \frac{M^{\text{в}}_{\max}}{W_z} = \frac{110 \cdot 10^3}{1152 \cdot 10^{-6}} = 95 \cdot 10^6 \text{ Па} = 95 \text{ МПа}.$$

Наибольшие нормальные напряжения от изгиба в горизонтальной плоскости:

$$\sigma^{\text{г}}_{\max} = \frac{M^{\text{г}}_{\max}}{W_y} = \frac{40 \cdot 10^3}{576 \cdot 10^{-6}} = 70 \cdot 10^6 \text{ Па} = 70 \text{ МПа}.$$

Наибольшие нормальные напряжения будут в точках K и N:

$$\sigma_K = 95 + 70 = 165 \text{ МПа};$$
$$\sigma_N = -95 - 70 = -165 \text{ МПа}.$$

Эпюры нормальных напряжений показаны на рис. 6.4, *б*

6.2. Задания для расчета на косой изгиб

Для расчетной схемы балки при заданных значениях геометрических размеров и нагрузок необходимо:

1) определить положение нейтральной оси;

2) вычислить наибольшие и наименьшие напряжения в опасном сечении балки;

3) построить эпюры напряжений;

4) найти прогиб балки в середине пролета или на свободном конце консольной балки.

Данные для расчета взять из таблиц 6.1, 6.2, 6.3 и табл. П. 1.

Таблица 6.1

Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет *l*, м	Размеры сечения, см	Угол φ,град	Нагрузка		
						F, кН	*M*, кН·м	*q*, кН/м
1	А	дерево	1,5	*b*×*h*=12×20	60	–	4	–
	Б	Ст 3	1,4	двутавр № 24	30	–	3	–
	В	Ст 3	1,3	швеллер № 24	45	–	5	–
	Г	Ст 3	1,6	2 швеллера № 8	60	–	6	–
	Д	Ст 3	1,7	2 швеллера № 10	30	–	7	–
	Е	Ст 3	1,8	2 двутавра № 10	60	–	8	–
2	А	дерево	1,2	*b*×*h*=15×25	45	3	–	–
	Б	Ст 3	1,4	двутавр № 22	30	2	–	–
	В	Ст 3	1,5	швеллер № 27	60	4	–	–
	Г	Ст 3	1,6	2 швеллера № 18	30	8	–	–
	Д	Ст 3	1,8	2 швеллера № 20	60	10	–	–
	Е	Ст 3	1,7	2 двутавра № 12	45	9	–	–
3	А	дерево	1,2	*b*×*h*=14×28	30	–	–	4
	Б	Ст 3	1,3	двутавр № 24	60	–	–	3
	В	Ст 3	1,5	швеллер № 27	45	–	–	2
	Г	Ст 3	1,4	2 швеллера № 16	20	–	–	6
	Д	Ст 3	1,7	2 швеллера № 14	30	–	–	5
	Е	Ст 3	1,6	2 двутавра № 14	40	–	–	7

Продолжение табл. 6.1

Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет l,м	Размеры сечения, см	Угол φ, град	Нагрузка		
						F, кН	M, кН·м	q, кН/м
4	А	дерево	2,5	$b \times h$=12×30	30	–	6	–
	Б	Ст 3	4	двутавр № 55	40	–	5	–
	В	Ст 3	5	швеллер № 30	50	–	7	–
	Г	Ст 3	6	2 швеллера № 10	60	–	8	–
	Д	Ст 3	4	2 швеллера № 12	30	–	9	–
	Е	Ст 3	6	2 двутавра № 14	40	–	10	–
5	А	дерево	3	$b \times h$=18×30	40	6	–	–
	Б	Ст 3	4	двутавр № 36	60	2,5	–	–
	В	Ст 3	5	швеллер № 24	30	3	–	–
	Г	Ст 3	6	2 швеллера № 10	20	4	–	–
	Д	Ст 3	5,5	2 швеллера № 12	40	3	–	–
	Е	Ст 3	4,5	2 двутавра № 14	50	5	–	–
6	А	дерево	4	$b \times h$=16×28	60	–	–	2
	Б	Ст 3	6	двутавр № 20	50	–	–	4
	В	Ст 3	3	швеллер № 16	30	–	–	3
	Г	Ст 3	4	2 швеллера № 14	40	–	–	5
	Д	Ст 3	5	2 швеллера № 16	45	–	–	6
	Е	Ст 3	5,5	2 двутавра № 18	20	–	–	7
7	А	дерево	2	$b \times h$=16×24	–	1	–	–
	Б	Ст 3	2,5	двутавр № 28	–	3	–	–
	В	Ст 3	2,4	швеллер № 16	–	4	–	–
	Г	Ст 3	2,6	2 швеллера № 14	–	6	–	–
	Д	Ст 3	2,3	2 швеллера № 16	–	8	–	–
	Е	Ст 3	2,7	2 двутавра № 20	–	10	–	–
8	А	дерево	1,5	$b \times h$=15×25	–	2	3	–
	Б	Ст 3	1,8	двутавр № 18	–	3	4	–
	В	Ст 3	1,6	швеллер № 24	–	5	3	–
	Г	Ст 3	1,7	2 швеллера № 12	–	6	6	–
	Д	Ст 3	1,9	2 швеллера № 14	–	7	7	–
	Е	Ст 3	2	2 двутавра № 16	–	8	5	–

Продолжение табл. 6.1

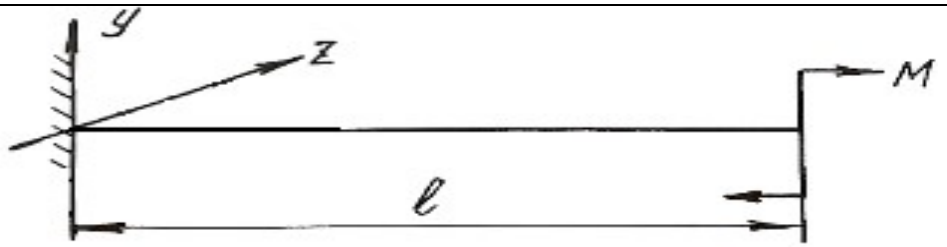
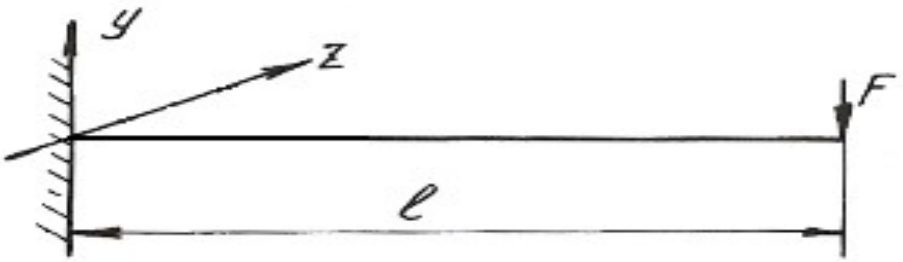
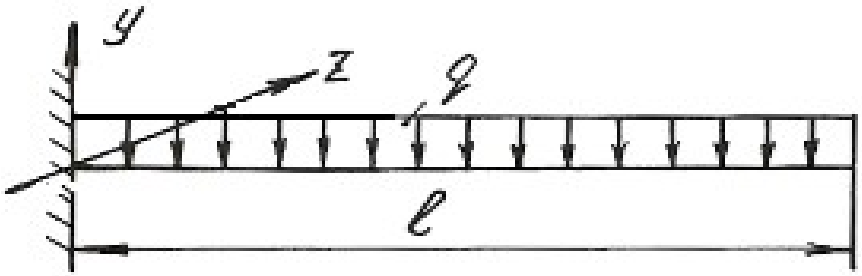
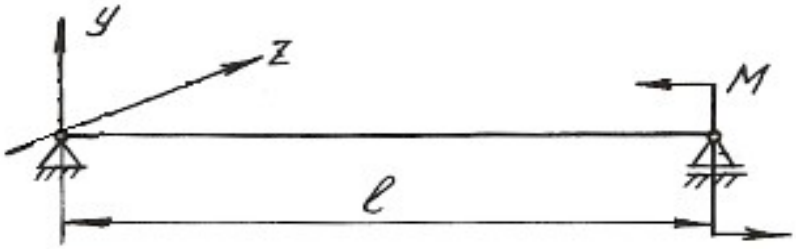
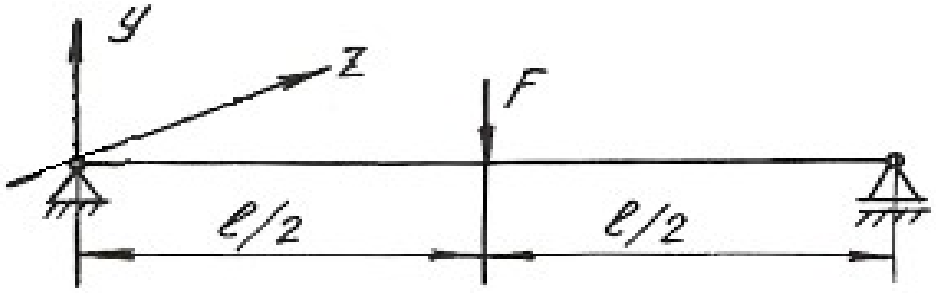
Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет l, м	Размеры сечения,см	Угол φ, град	Нагрузка		
						F, кН	M, кН·м	q, кН/м
9	А	дерево	2,5	$b \times h$=17×27	–	4	–	30
	Б	Ст 3	4	двутавр № 30	–	6	–	20
	В	Ст 3	3	швеллер № 27	–	5	–	40
	Г	Ст 3	5	2 швеллера № 14	–	7	–	50
	Д	Ст 3	6	2 швеллера № 16	–	8	–	60
	Е	Ст 3	4,6	2 двутавра № 18	–	9	–	70
10	А	дерево	1,6	$b \times h$=18×24	–	–	5	10
	Б	Ст 3	1,8	двутавр № 27	–	–	4	20
	В	Ст 3	1,9	швеллер № 20	–	–	3	30
	Г	Ст 3	2	2 швеллера № 14	–	–	6	40
	Д	Ст 3	2,1	2 швеллера № 16	–	–	7	50
	Е	Ст 3	2,2	2 двутавра № 20	–	–	8	60
11	А	дерево	1,5	$b \times h$=19×30	–	2	30	–
	Б	Ст 3	1,7	двутавр № 24	–	3	40	–
	В	Ст 3	1,9	швеллер № 24	–	5	60	–
	Г	Ст 3	1,8	2 швеллера № 18	–	7	80	–
	Д	Ст 3	2,3	2 швеллера № 20	–	6	70	–
	Е	Ст 3	2,4	2 двутавра № 14	–	4	50	–
12	А	дерево	1,2	$b \times h$=20×29	–	2	–	20
	Б	Ст 3	1,3	двутавр № 22	–	4	–	30
	В	Ст 3	1,4	швеллер № 24	–	5	–	40
	Г	Ст 3	1,5	2 швеллера № 22	–	7	–	50
	Д	Ст 3	1,6	2 швеллера № 20	–	6	–	60
	Е	Ст 3	1,7	2 двутавра № 20	–	7	–	70

Окончание табл. 6.1

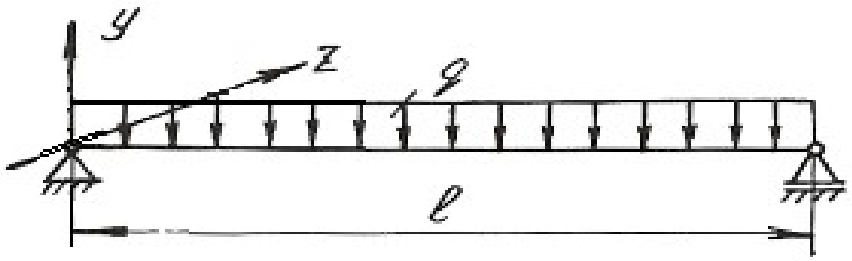
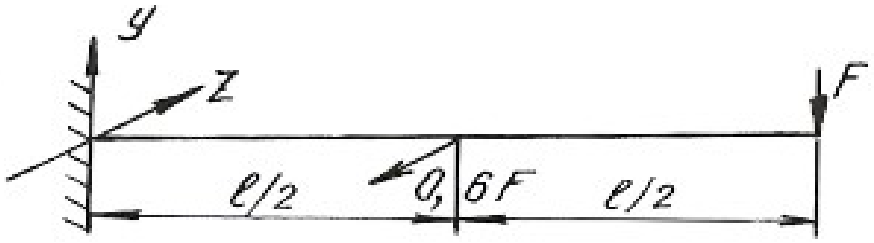
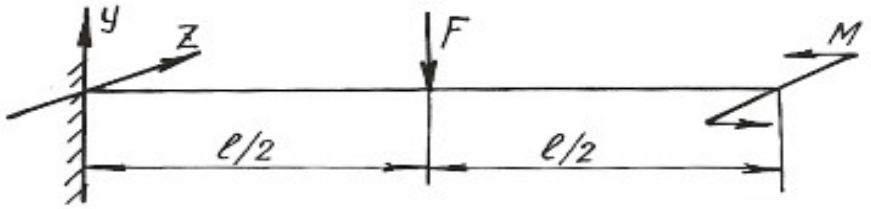
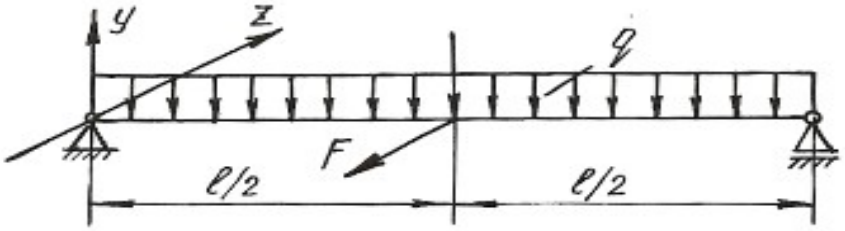
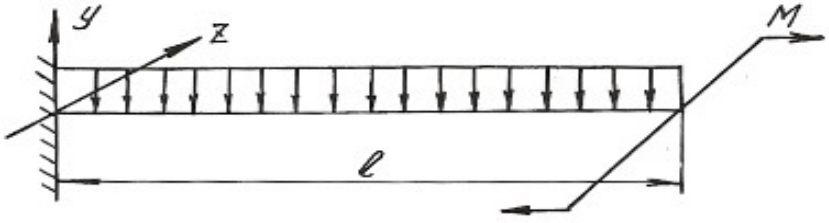
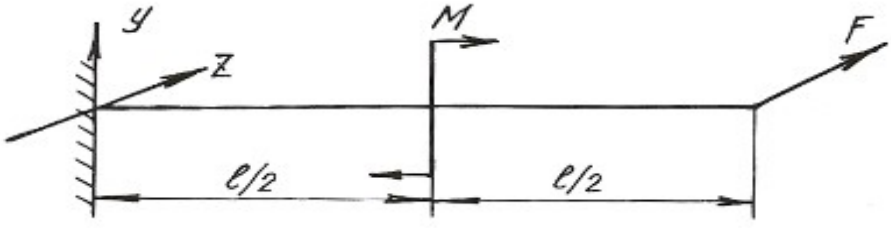
Схема балки	Схема сечения	Материал	Пролет l,м	Размеры сечения, см	Угол φ, град	Нагрузка		
						F, кН	M, кН·м	q, кН/м
13	А	дерево	1,5	$b \times h$=18×32	–	3	–	10
	Б	Ст 3	1,6	двутавр № 36	–	4	–	20
	В	Ст 3	1,7	швеллер № 36	–	5	–	30
	Г	Ст 3	1,8	2 швеллера № 18	–	6	–	40
	Д	Ст 3	1,9	2 швеллера № 20	–	7	–	50
	Е	Ст 3	2	2 двутавра № 24	–	8	–	60
14	А	дерево	1,3	$b \times h$=19×30	–	20	3	–
	Б	Ст 3	1,4	двутавр № 40	–	40	4	–
	В	Ст 3	1,5	швеллер № 30	–	60	5	–
	Г	Ст 3	1,6	2 швеллера № 16	–	50	6	–
	Д	Ст 3	1,7	2 швеллера № 20	–	60	7	–
	Е	Ст 3	1,8	2 двутавра № 18	–	70	8	–
15	А	дерево	1,4	$b \times h$=17×32	–	1	40	–
	Б	Ст 3	1,6	двутавр № 24	–	2	50	–
	В	Ст 3	1,8	швеллер № 20	–	3	60	–
	Г	Ст 3	1,9	2 швеллера № 22	–	4	70	–
	Д	Ст 3	2,1	2 швеллера № 18	–	5	80	–
	Е	Ст 3	2,2	2 двутавра № 20	–	6	60	–
16	А	дерево	1,6	$b \times h$=19×32	–	–	2	20
	Б	Ст 3	1,7	двутавр № 22	–	–	3	30
	В	Ст 3	1,9	швеллер № 27	–	–	4	40
	Г	Ст 3	1,8	2 швеллера № 16	–	–	5	50
	Д	Ст 3	2,3	2 швеллера № 20	–	–	6	40
	Е	Ст 3	2,4	2 двутавра № 22	–	–	7	50

Таблица 6.2

Схемы закрепления и нагружения балок

Номер схемы	Схема балки
1	
2	
3	
4	
5	

Продолжение табл. 6.2

Номер схемы	Схема балки
6	
7	
8	
9	
10	
11	

Окончание табл. 6.2

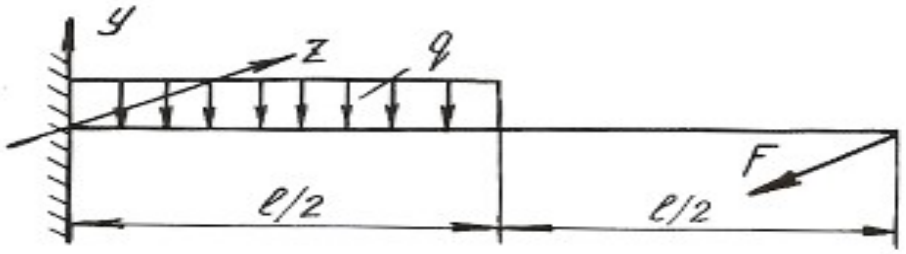
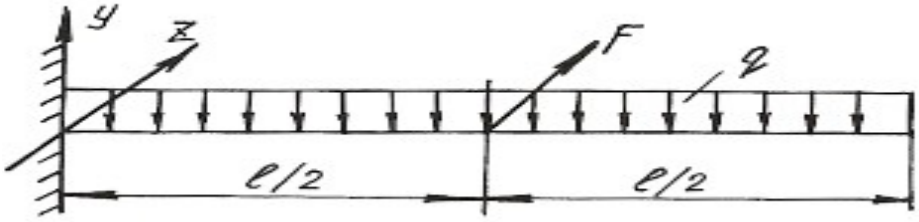
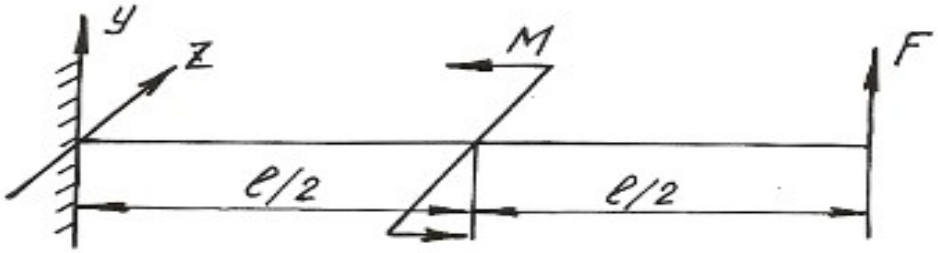
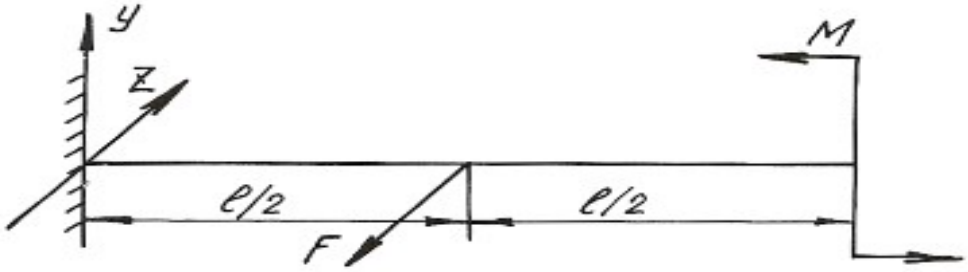
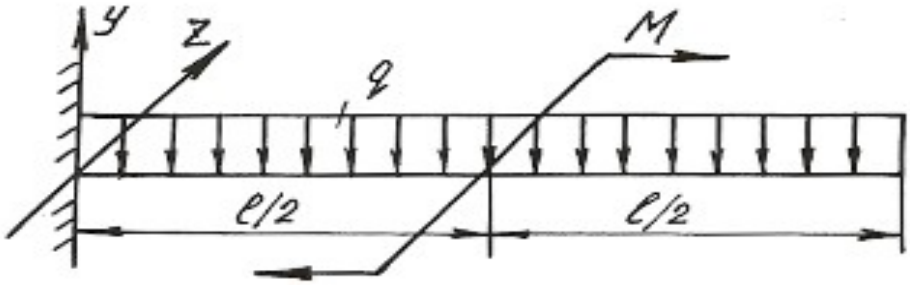
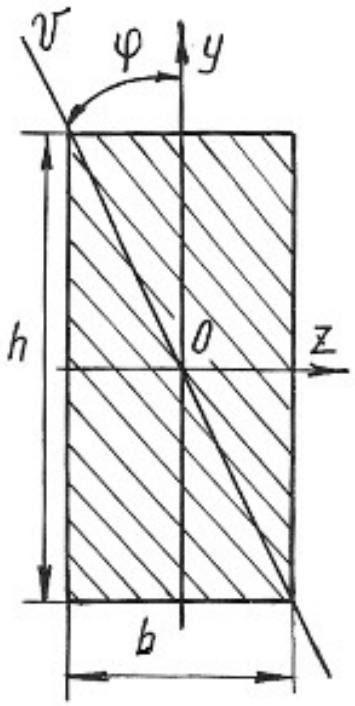
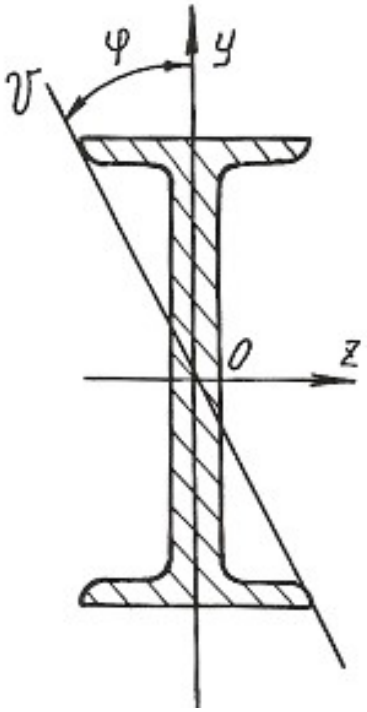
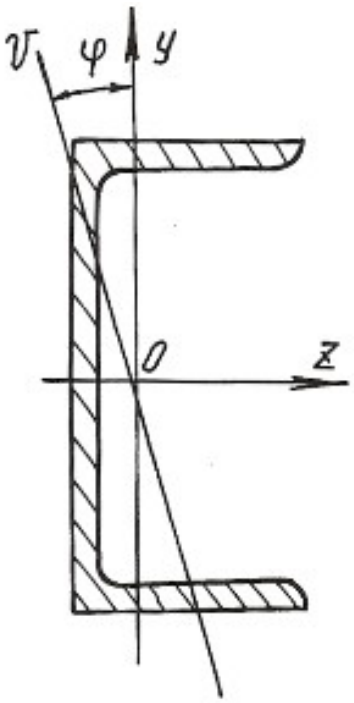
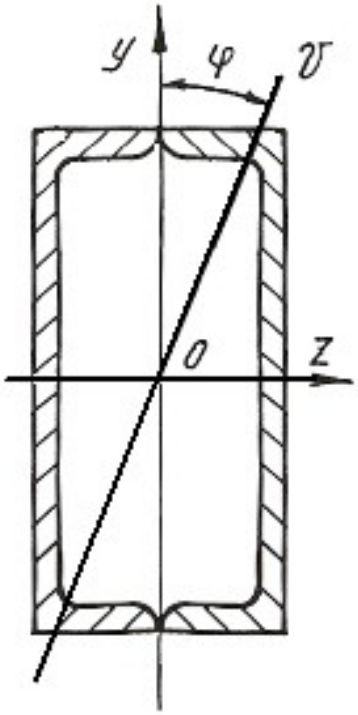
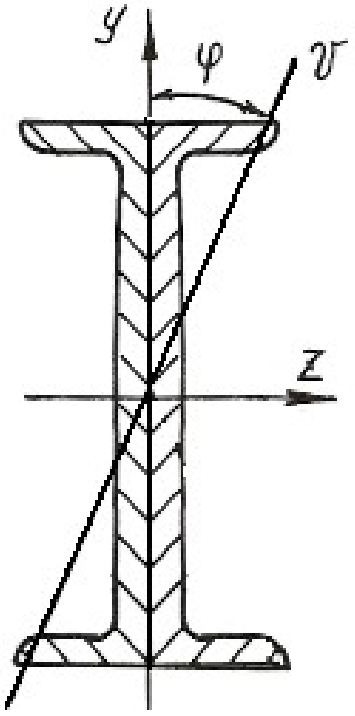
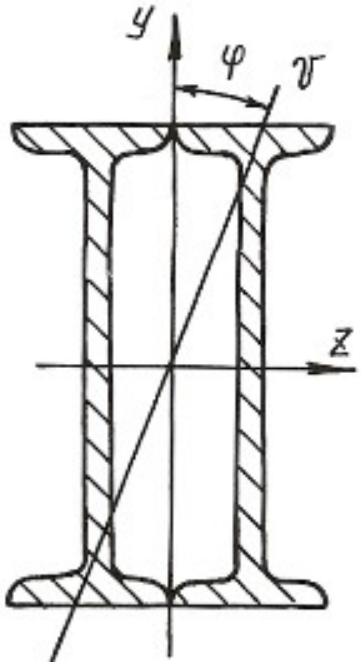
Номер схемы	Схема балки
12	
13	
14	
15	
16	

Таблица 6.3

Схемы поперечных сечений балок

А	Б	В
		
Г	**Д**	**Е**
		

6.3. Внецентренное растяжение или сжатие

Если действующая на брус продольная растягивающая или сжимающая сила приложена на некотором расстоянии от центра тяжести сечения, то возникает внецентренное растяжение или сжатие. Расстояние между точкой приложения силы и центром тяжести сечения бруса называется эксцентриситетом. Для практики весьма важны случаи внецентренного сжатия, например, для каменных и кирпичных столбов, бетонных колонн и др.

Внецентренное приложение сжимающей силы можно привести к случаю сжатия центральной силой F и чистому изгибу моментом $M = Fe$, если перенести силу F в центр тяжести поперечного сечения и уравновесить ее (рис. 6.5).

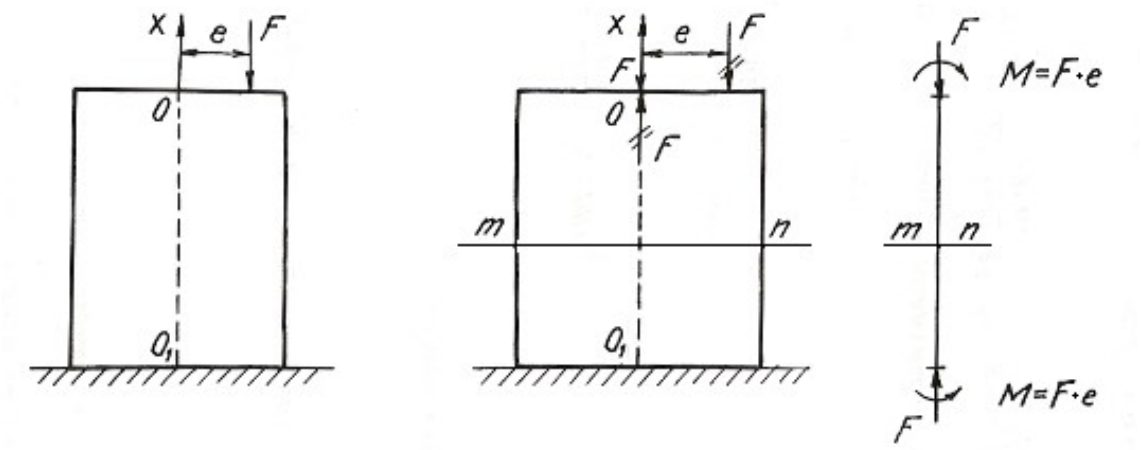


Рис. 6.5.

Так как изгибающий момент во всех сечениях постоянен, то проверку прочности можно производить по любому сечению бруса. Если отбросить верхнюю часть бруса по сечению *m-n* и рассмотреть нижнюю **(**рис. 6.6**),** то для любой точки A поперечного сечения с координатами y, z нормальное напряжение будет равно алгебраической сумме напряжений

$$\sigma_A = \sigma_F + \sigma_{M_y} + \sigma_{M_z}, \qquad (6.7)$$

где $\sigma_F = -\dfrac{F}{A}$ – напряжение от сжимающей центрально приложенной силы F;

$\sigma_{M_y} = -M_y \dfrac{z}{J_y}$ – напряжение от изгибающего момента относительно главной оси сечения y; $\sigma_{M_z} = -M_z \dfrac{y}{J_z}$ – напряжение от изгибающего момента относительно главной оси сечения z.

Знак минус указывает на то, что данные нагрузки вызывают в точке A деформацию сжатия.

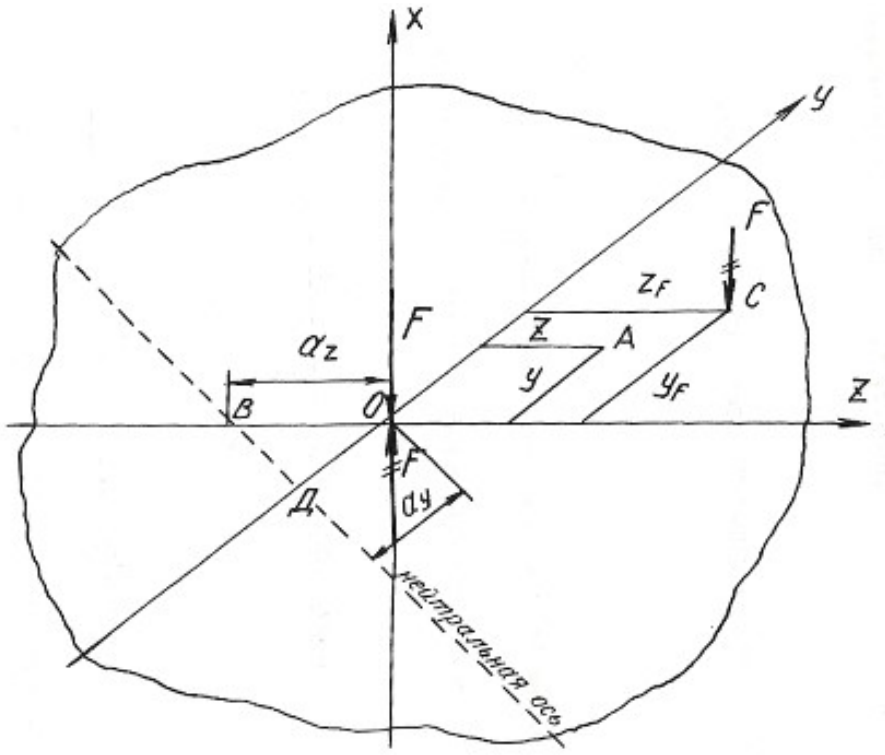


Рис. 6.6.

Изгибающие моменты определяются

$$M_y = Fz_F; \qquad M_z = Fy_F;$$

где z_F и y_F - координаты точки C приложения силы F.

После подстановки имеем:

$$\sigma_A = -\frac{F}{A} - Fz_F \frac{z}{J_y} - Fy_F \frac{y}{J_z}.$$

Окончательный вид формулы для определения напряжений в любой точке поперечного сечения получаем после простых преобразований

$$\sigma = F\left(\pm\frac{1}{A} \pm z_F \frac{z}{J_y} \pm y_F \frac{y}{J_z} \right), \tag{6.8}$$

где J_y, J_z – моменты инерции поперечного сечения; y_F, z_F – координаты точки приложения силы F.

У каждого из слагаемых данного уравнения знак плюс берется для растягивающего, а знак минус – для сжимающего напряжения.

Условие прочности при внецентренном растяжении или сжатии имеет вид:

$$\sigma_{\max} = F\left(\pm\frac{1}{A} \pm z_F \frac{z_{\max}}{J_y} \pm y_F \frac{y_{\max}}{J_z}\right) \le \sigma_{\text{adm}}, \qquad (6.9)$$

где $z_{\max}$, $y_{\max}$ – координаты наиболее удаленных точек сечения от его центра тяжести.

Уравнение нейтральной оси при внецентренном растяжении или сжатии имеет вид:

$$\pm\frac{1}{A} \pm z_F \frac{z_0}{J_y} \pm y_F \frac{y_0}{J_z} = 0, \qquad (6.10)$$

где z_0, y_0 – координаты точек, лежащих на нейтральной оси.

Это уравнение является уравнением прямой, не проходящей через центр тяжести сечения. Величины отрезков, отсекаемых на координатных осях y и z нейтральной осью, определяются из уравнения:

$$\pm 1 \pm z_F \frac{a_z}{i_y^2} \pm y_F \frac{a_y}{i_z^2} = 0, \qquad (6.11)$$

где $a_z = z_0$, $a_y = y_0$ - отрезки, определяющие положение нейтральной оси.

Величины отрезков определяются по формулам:

$$a_z = -\frac{i_y^2}{z_F}; \quad a_y = -\frac{i_z^2}{y_F}, \qquad (6.12)$$

где i_z, i_y - радиусы инерции поперечного сечения относительно осей y и z.

Знак минус в этих формулах указывает на то, что нейтральная ось располагается по другую сторону центра тяжести сечения, по сравнению с точкой приложения силы F, действующей на брус.

Если поперечное сечение имеет сложную форму, то необходимо найти центр тяжести сечения, положение главных центральных осей и главные моменты инерции, пользуясь формулами и указаниями, приведенными в главе 2. В формулы, содержащие моменты инерции, необходимо подставлять значения главных моментов инерции сечения.

Пример 6.3.

Короткий чугунный стержень, поперечное сечение которого показано на рис. 6.7, сжимается продольной силой F, приложенной в точке A**.**

Требуется:

1. Вычислить наибольшее растягивающее и наибольшее сжимающее напряжения в поперечном сечении, выразив величины этих напряжений через F и размеры сечений.

2. Найти допускаемую нагрузку F при заданных размерах сечения и допускаемых напряжениях для чугуна на сжатие σ^{c}_{adm} и на растяжение σ^{p}_{adm}: $\sigma^{c}_{adm} = 110$ МПа, $\sigma^{p}_{adm} = 24$ МПа.

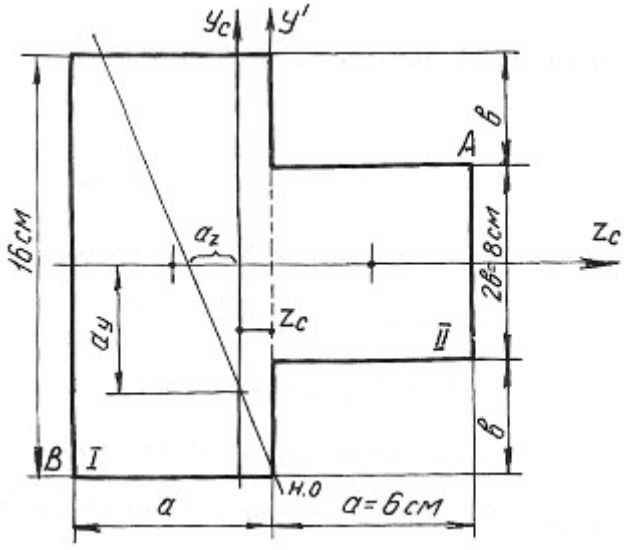


Рис. 6.7.

Определяем координату центра тяжести сечения. Проведем вспомогательную ось y':

$$z_c = \frac{\sum Sy'}{\sum A} = \frac{(A_1 z_1 + A_2 z_2)}{A_1 + A_2} = \frac{[16 \cdot 6 \cdot (-3) + 6 \cdot 8 \cdot 3]}{16 \cdot 6 + 6 \cdot 8} = \frac{-144}{144} = -1 \text{ см}.$$

Для определения положения нейтральной оси находим геометрические характеристики сечения.

Моменты инерции:

$$J_{y_c} = 16\frac{6^3}{12} + 6 \cdot 16 \cdot 2^2 + 8 \cdot \frac{6^3}{12} + 6 \cdot 8 \cdot 4^2 = 1584 \text{ см}^4;$$

$$J_{z_c} = 16^3 \frac{6}{12} + 6\frac{8^3}{12} = 2304 \text{ см}^4.$$

Радиусы инерции:

$$i_y = \sqrt{\frac{J_{y_c}}{A}} = \sqrt{\frac{1584}{144}} = \sqrt{11} = 3{,}31 \text{ см};$$

$$i_z = \sqrt{\frac{J_{z_c}}{A}} = \sqrt{\frac{2304}{144}} = \sqrt{16} = 4 \text{ см}.$$

Нейтральная ось пересекает оси z_c и y_c в точках:

$$a_y = -\frac{i_z^2}{y_F}; \qquad a_z = -\frac{i_y^2}{z_F}; \quad z_F = 7\,\text{см}; \quad y_F = 4\,\text{см}.$$

$$a_y = \frac{-4^2}{4} = -4\ \text{см}; \quad a_z = \frac{-3{,}31^2}{7} = -1{,}57\ \text{см}.$$

Максимальное напряжение возникает в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси, т. е. в точках *A* и *B*. Определяются они по формуле:

$$\sigma = -\frac{F}{A} \pm \frac{F z_F z_{\max}}{J_{y_c}} \pm \frac{F y_F y_{\max}}{J_{z_c}},$$

где $z_{\max}$, $y_{\max}$ – координаты точек *A* и *B*.

Наибольшее сжимающее напряжение:

$$\sigma_A = -F\left[\frac{1}{144} + 7\frac{7}{1584} + 4\frac{4}{2304}\right] = -0{,}044 \cdot F\,.$$

Наибольшее растягивающее напряжение:

$$\sigma_B = -F\left[\frac{1}{144} + 7\frac{(-5)}{1584} + 4\frac{(-8)}{2304}\right] = 0{,}028 \cdot F.$$

Находим допускаемую нагрузку:

$$\sigma_A \le \sigma^{\text{c}}_{\text{adm}} = 110\ \text{МПа}; \qquad 0{,}044 \cdot F \le 110; \quad F \le 0{,}25\ \text{МН}.$$

$$\sigma_B \le \sigma^{\text{p}}_{\text{adm}} = 24\ \text{МПа}; \qquad 0{,}028 \cdot F \le 24; \quad F \le 0{,}09\ \text{МН}.$$

Допускаемая нагрузка $F = 0{,}09$ МН.

6.4. Задания для расчета на внецентренное растяжение или сжатие

Колонна заданного поперечного сечения с известными размерами нагружена сжимающей силой F, приложенной вне центра тяжести сечения в указанной точке. Требуется:

1) Определить положение нейтральной оси;
2) Вычислить наибольшие напряжения в опасном сечении колонны;
3) Построить эпюры напряжений в опасном сечении.

Данные для расчета взять из таблиц 6.4, 6.5 и табл. П. 1.

Примечание: собственным весом колонны при расчетах пренебречь.

Таблица 6.4

Вариант	Схема сечения	Материал	Размеры сечения, см	Точка приложения силы F	Нагрузка F, кН
1	А	дерево	b x h = 15 x 25	1	20
	Б	Ст 3	двутавр № 16	2	30
	В	Ст 3	швеллер № 16	3	40
	Г	Ст 3	2 швеллера № 14	4	50
	Д	Ст 3	2 швеллера № 12	5	60
	Е	Ст 3	2 двутавра № 14	6	70
	Ж	чугун	b = 20	7	35
	З	чугун	b x h = 20 x 30, D = 10	8	45
	И	Ст 3	2 швеллера № 12, a = 10	1	75
	К	Ст 3	2 двутавра № 14, a = 10	2	80
2	А	дерево	b x h = 16 x 27	2	25
	Б	Ст 3	двутавр № 18	3	35
	В	Ст 3	швеллер № 18	4	45
	Г	Ст 3	2 швеллера № 16	5	50
	Д	Ст 3	2 швеллера № 18	6	60
	Е	Ст 3	2 двутавра № 16	7	70
	Ж	чугун	b = 30	8	55
	З	чугун	b x h = 25 x 35 , D = 12	1	65
	И	Ст 3	2 швеллера № 14, a = 10	2	65
	К	Ст 3	2 двутавра № 16, a = 10	3	75

Продолжение табл. 6.4

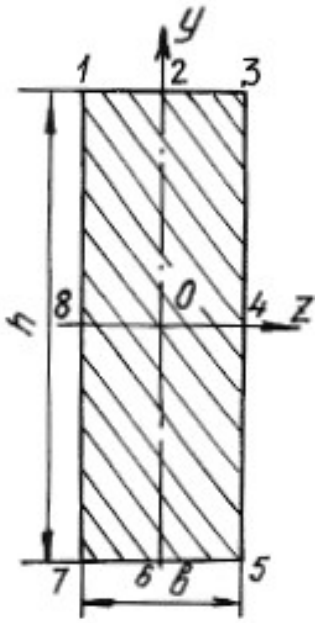
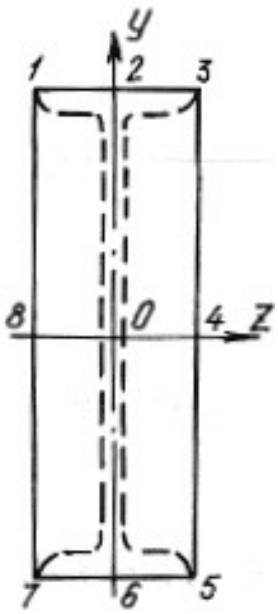
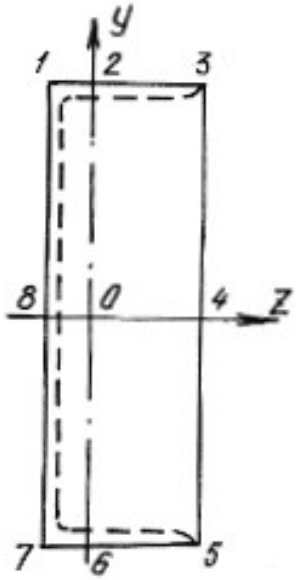
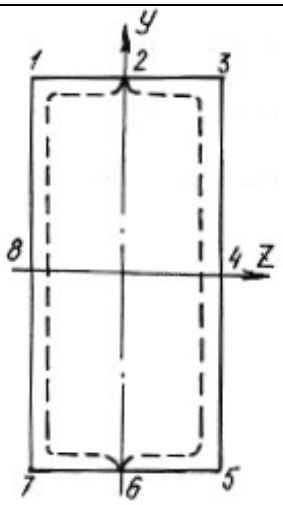
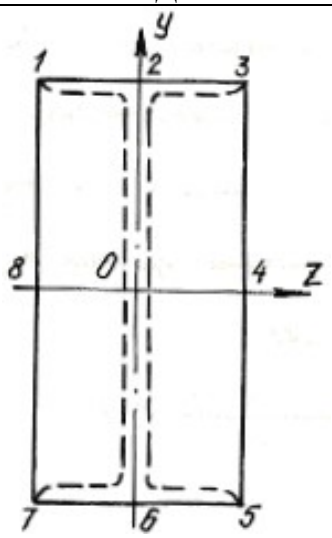
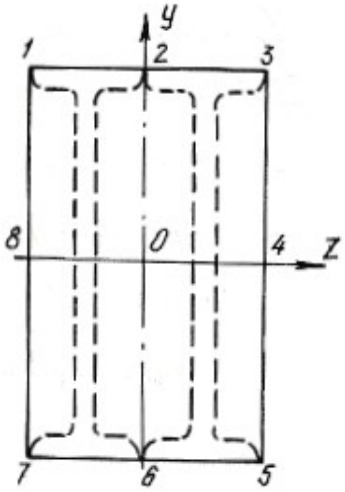
Вариант	Схема сечения	Материал	Размеры сечения	Точка приложения силы F	Нагрузка F, кН
3	А	дерево	b x h = 17 x 28	3	30
	Б	Ст 3	двутавр № 14	4	40
	В	Ст 3	швеллер № 20	5	48
	Г	Ст 3	2 швеллера № 14	6	52
	Д	Ст 3	2 швеллера № 16	7	62
	Е	Ст 3	2 двутавра № 18	8	72
	Ж	чугун	b = 32	1	60
	З	чугун	b x h = 24 x 32, D = 8	2	70
	И	Ст 3	2 швеллера № 18, a = 14	3	66
	К	Ст 3	2 двутавра № 12, a = 8	4	74
4	А	дерево	b x h = 18 x 36	4	40
	Б	Ст 3	двутавр № 20	5	44
	В	Ст 3	швеллер № 20	6	54
	Г	Ст 3	2 швеллера № 18	7	64
	Д	Ст 3	2 швеллера № 16	8	74
	Е	Ст 3	2 двутавра № 14	1	46
	Ж	чугун	b = 34	2	38
	З	чугун	b x h = 28 x 36, D = 14	3	48
	И	Ст 3	2 швеллера № 16, a = 8	4	58
	К	Ст 3	2 двутавра № 18, a = 12	5	72
5	А	дерево	b x h = 20 x 24	5	28
	Б	Ст 3	двутавр № 22	6	38
	В	Ст 3	швеллер № 22	7	48
	Г	Ст 3	2 швеллера № 20	8	62
	Д	Ст 3	2 швеллера № 22	1	76
	Е	Ст 3	2 двутавра № 20	2	78
	Ж	чугун	b = 28	3	46
	З	чугун	b x h = 22 x 34, D = 6	4	56
	И	Ст 3	2 швеллера № 20, a = 6	5	80
	К	Ст 3	2 двутавра № 20, a = 12	6	82

Продолжение табл. 6.4

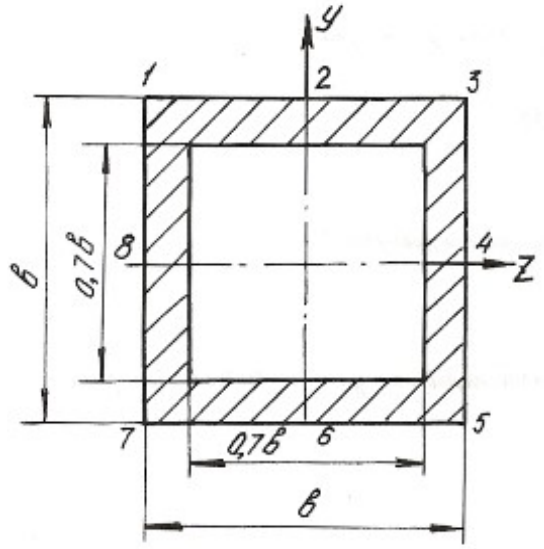
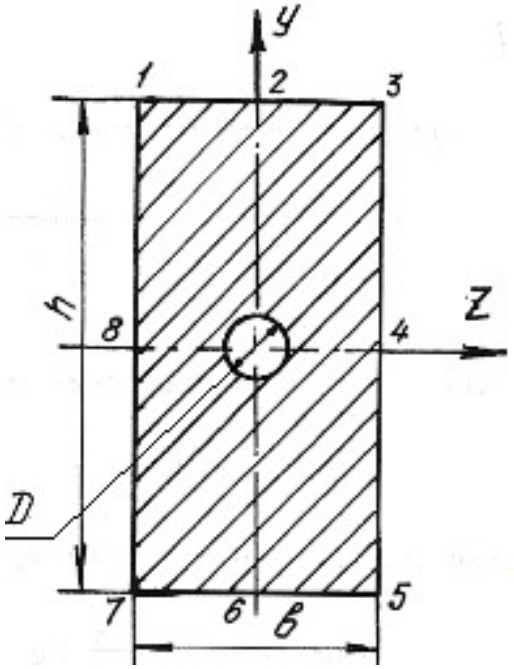
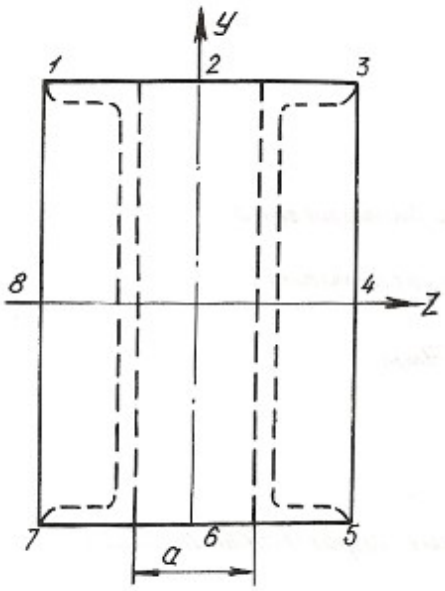
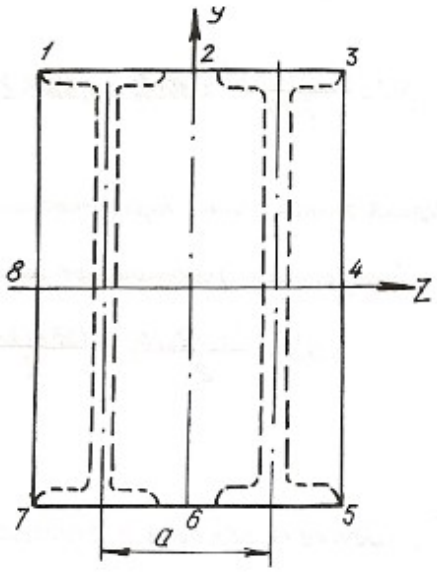
Вариант	Схема сечения	Материал	Размеры сечения, см	Точка приложения силы F	Нагрузка F, кН
6	А	дерево	b x h = 22 x 38	6	36
	Б	Ст 3	двутавр № 22	7	46
	В	Ст 3	швеллер № 22	8	48
	Г	Ст 3	2 швеллера № 22	1	68
	Д	Ст 3	2 швеллера № 20	2	72
	Е	Ст 3	2 двутавра № 22	3	74
	Ж	чугун	b = 24	4	50
	З	чугун	b x h = 24 x 34, D = 8	5	60
	И	Ст 3	2 швеллера № 22, a = 8	6	74
	К	Ст 3	2 двутавра № 22, a = 12	7	69
7	А	дерево	b x h = 22 x 30	7	25
	Б	Ст 3	двутавр № 24	8	48
	В	Ст 3	швеллер № 24	1	52
	Г	Ст 3	2 швеллера № 24	2	63
	Д	Ст 3	2 швеллера № 22	3	68
	Е	Ст 3	2 двутавра № 20	4	64
	Ж	чугун	b = 22	5	43
	З	чугун	b x h = 26 x 36, D = 6	6	49
	И	Ст 3	2 швеллера № 24, a = 4	7	78
	К	Ст 3	2 двутавра № 24, a = 13	8	84
8	А	дерево	b x h = 18 x 32	8	35
	Б	Ст 3	двутавр № 27	1	62
	В	Ст 3	швеллер № 27	2	68
	Г	Ст 3	2 швеллера № 22	3	85
	Д	Ст 3	2 швеллера № 24	4	87
	Е	Ст 3	2 двутавра № 22	5	78
	Ж	чугун	b = 26	6	52
	З	чугун	b x h = 26 x 36, D = 9	7	58
	И	Ст 3	2 швеллера № 27, a = 5	8	86
	К	Ст 3	2 двутавра № 27, a = 14	1	88

Таблица 6.5

Схемы поперечных сечений колонны

А	Б	В
		
Г	Д	Е
		

Окончание табл. 6.5

Ж	З
	
И	К
	

6.5. Изгиб с кручением

Помимо крутящих моментов валы могут испытывать воздействие изгибающих моментов. Последние возникают от действия собственного веса вала, усилий натяжения приводных ремней, весов шкивов, усилий зацепления в зубьях зубчатых передач и т. п.

Крутящий момент на валу или его участке определяется по формулам:

$$T = 9550\frac{N}{n}, \tag{6.13}$$

где T – крутящий момент, Нм; N – мощность двигателя, кВт; n – число оборотов вала в минуту, или

$$T = \frac{D}{2}\cdot(t_1 - t_1'), \tag{6.14}$$

где D – диаметр ведущего шкива, соединенного с двигателем приводным ремнем; t_1 – усилие натяжения в набегающей ветви приводного ремня; t_1' – усилие натяжения в сбегающей ветви приводного ремня.

Определив крутящий момент по формуле (6.13) и, зная соотношение между усилиями t_1 и t_1', определяют эти усилия из формулы (6.14) при известном диаметре шкива. Если усилия t_1, t_1' последовательно перенести в центр тяжести сечения вала и уравновесить их, то получим два момента пар сил, направленных в противоположные стороны. Равнодействующий момент этих моментов и будет равен крутящему моменту в том сечении, где находится шкив. Вместе с этим в центре этого сечения вала возникнет нагрузка, $S = t_1 + t_1'$, которая может быть направлена под углом к горизонту. В этом случае ее раскладывают на вертикальную и горизонтальную составляющие: $S_y = S\cdot\sin\alpha$; $S_z = S\cdot\cos\alpha$.

При наличии на валу нескольких ведомых шкивов крутящие моменты и изгибающие нагрузки определяются аналогичным способом. Таким образом, вал будет испытывать одновременно деформацию кручения от крутящих моментов и деформацию поперечного изгиба в двух плоскостях – вертикальной и горизонтальной. Дальнейший расчет вала на изгиб с кручением осуществляется в таком порядке:

1. Строится эпюра крутящих моментов T.
2. Вычерчивается схема вала в виде балки на двух опорах и загружается только вертикальными изгибающими нагрузками. С помощью уравнений статики определяются реакции на опорах, и строится эпюра изгибающих моментов от этих нагрузок $M_{\text{и}}^{\text{в}}$.

3. Вал загружается только горизонтальными изгибающими нагрузками, от них определяются реакции на опорах, и строится эпюра изгибающих моментов от горизонтальных нагрузок $M_{\text{и}}^{\text{г}}$.

4. В характерных сечениях вала определяются суммарные изгибающие моменты в виде геометрической суммы изгибающих моментов, возникающих в этих сечениях от вертикальных и горизонтальных нагрузок: $M_{\text{и}} = \sqrt{(M_{\text{и}}^{\text{в}})^2 + (M_{\text{и}}^{\text{г}})^2}$. Строится суммарная эпюра изгибающих моментов $M_{\text{и}}$. При построении эпюр выбирается необходимый масштаб, и применяются знаки, принятые в сопротивлении материалов при построении эпюр крутящих и изгибающих моментов.

5. Выбирается опасное сечение по длине вала, где одновременно крутящий и суммарный моменты достаточно большие – на основании эпюр $M_{\text{и}}$ и T.

6. На основании третьей или четвертой теории прочности для опасного сечения определяется расчетный (эквивалентный) момент по формулам:

$$M_{\text{р}}^{\text{III}} = \sqrt{T^2 + M_{\text{и}}^2}; \quad M_{\text{р}}^{\text{IV}} = \sqrt{M_{\text{и}}^2 + 0,75T^2}. \tag{6.15}$$

7. Определяется диаметр сечения вала на основании условия прочности:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{P}}}{W_z} \le \sigma_{\text{adm}}, \tag{6.16}$$

где $W_z = \dfrac{J_z}{d/2} = \pi \dfrac{d^4/64}{d/2} = \dfrac{\pi d^3}{32}$ – момент сопротивления поперечного сечения вала изгибу.

$$d \ge \sqrt[3]{\frac{32M_{\text{P}}}{\pi\sigma_{\text{adm}}}}. \tag{6.17}$$

Величина диаметра округляется до ближайшего целого.

Пример 6.4.

Шкив с диаметром D_1 и с углом наклона ветвей ремня к горизонту α_1 делает n оборотов в минуту и передает мощность N. Два других шкива имеют одинаковый диаметр D_2 и одинаковые углы наклона ветвей ремня к горизонту α_2 и, каждый из них передает мощность $N/2$ **(**рис. 6.8).

Требуется:

1. Определить моменты, приложенные к шкивам, по заданным N и n ;

2. Построить эпюру крутящих моментов T;

3. Определить окружные усилия t_1 и t_2 действующие на шкивы, по данным моментам и заданным диаметрам шкивов D_1 и D_2;

4. Принять $t_1 = 2 \cdot t_2$;

5. Определить силы, изгибающие вал в горизонтальной и вертикальной плоскостях (вес шкивов и вала не учитывать);

6. Построить эпюры изгибающих моментов от горизонтальных и вертикальных сил $M_{\text{верт.}}$, $M_{\text{гор.}}$;

7. Построить эпюры суммарных изгибающих моментов, пользуясь формулой $M_{\text{и}} = \sqrt{M_{\text{гор}}{}^2 + M_{\text{верт}}{}^2}$;

8. При помощи эпюр T и $M_{\text{и}}$ найти опасное сечение и определить максимальный расчетный момент (по третьей теории прочности);

9. Подобрать диаметр вала d при $\sigma_{\text{adm}} = 70$ МПа и округлить его значение.

Решение.

1. Определяем крутящие моменты:

$$T_1 = \frac{9{,}55 \cdot N_1}{650} = \frac{9{,}55 \cdot 90}{650} = 1{,}32 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$T_2 = \frac{9{,}55 \cdot N_2}{n} = \frac{9{,}55 \cdot 45}{650} = 0{,}66 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

2. Строим эпюру крутящих моментов (см. рис. 6.8).

3. Определяем усилия натяжения в ветвях ремней:

$$t_1 = \frac{2 \cdot T_1}{D_1} = \frac{2 \cdot 1{,}32}{1} = 2{,}64 \text{ кН}; \quad t_2 = \frac{2 \cdot T_2}{D_2} = \frac{2 \cdot 0{,}66}{0{,}6} = 2{,}2 \text{ кН}.$$

4. Определяем изгибающие нагрузки:

$$S_1 = t_1 + 2 \cdot t_2 = 7{,}92 \text{ кН}; \quad S_2 = t_2 + 2 \cdot t_2 = 6{,}60 \text{ кН}.$$

5. Определяем изгибающие нагрузки в вертикальной плоскости и реакции от этих нагрузок:

$$S_1^y = S_1 \cdot \sin\alpha_1 = 7{,}92 \cdot \sin 75^\circ = 7{,}92 \cdot 0{,}9659 = 7{,}65 \text{ кН};$$

$$S_2^y = S_2 \cdot \sin\alpha_2 = 6{,}6 \cdot \sin 80^\circ = 6{,}6 \cdot 0{,}9848 = 6{,}49 \text{ кН}.$$

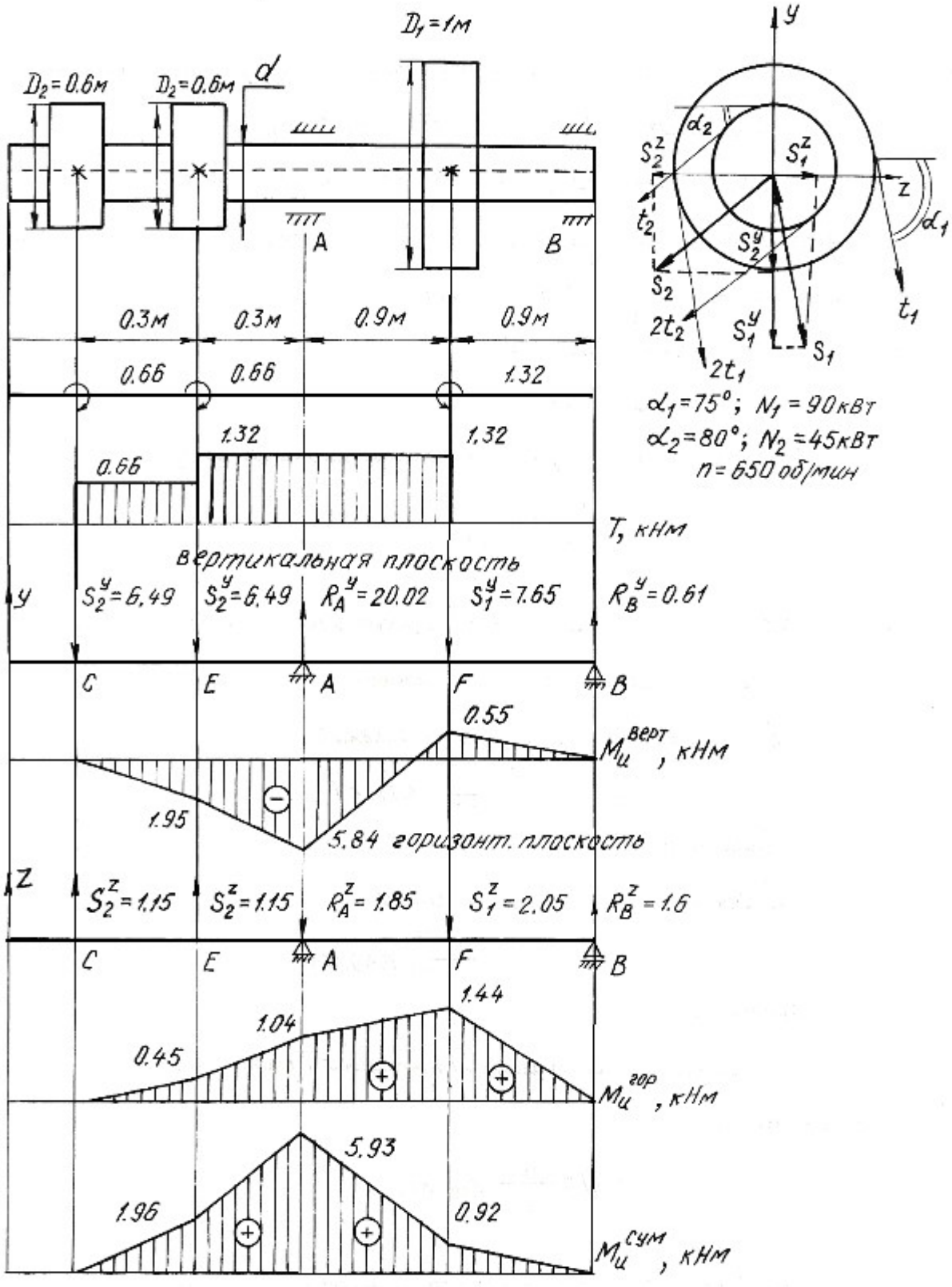

D1=1м
D2=0.6м
D2=0.6м
d
A
B
0.3м
0.3м
0.9м
0.9м
0.66
0.66
1.32
1.32
1.32
0.66
T, кНм
вертикальная плоскость
y
S2y=6.49
S2y=6.49
RAy=20.02
S1y=7.65
RBy=0.61
C
E
A
F
B
0.55
Mцверт, кНм
1.95
5.84 горизонт. плоскость
z
S2z=1.15
S2z=1.15
RAz=1.85
S1z=2.05
RBz=1.6
C
E
A
F
B
1.44
1.04
0.45
Mцгор, кНм
5.93
1.96
0.92
Mцсум, кНм
y
α2
S2z
S1z
z
α1
t2
S2y
S2
t1
2t2
S1y
S1
2t1
α1=75°; N1=90кВт
α2=80°; N2=45кВт
n=650 об/мин

Рис. 6.8.

$$\sum M_A = 0; \quad S_2^y \cdot 0,6 - S_1^y \cdot 0,9 + R_B^y \cdot 1,8 + S_2^y \cdot 0,3 = 0;$$

$$6,49 \cdot 0,6 + 6,49 \cdot 0,3 - 7,65 \cdot 0,9 + R_B^y \cdot 1,8 = 0;$$

$$R_B^y = 0,61 \text{ кН}.$$

$$\sum M_B = 0; \; S_2^y \cdot 2,4 + S_2^y \cdot 2,1 - R_A^y \cdot 1,8 + S_1^y \cdot 0,9 = 0;$$

$$6,49 \cdot 2,4 + 6,49 \cdot 2,1 - R_A^y \cdot 1,8 + 7,65 \cdot 0,9 = 0;$$

$$R_A^y = 20,02 \text{ кН}.$$

$$\sum Y = 0; \quad -S_2^y - S_2^y + R_A^y - S_1^y + R_B^y = 0;$$

$$-6,49 - 6,49 + 20,02 - 7,65 + 0,61 = 0;$$

$$0 = 0.$$

Строим эпюру изгибающих моментов в вертикальной плоскости:

$$M_{\text{и}}^E = -6,49 \cdot 0,3 = -1,95 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{и}}^A = -6,49 \cdot 0,6 - 6,49 \cdot 0,3 = -5,84 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{и}}^F = R_B^y \cdot 0,9 = 0,61 \cdot 0,9 = 0,55 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

6. Определяем изгибающие нагрузки в горизонтальной плоскости и реакции от этих нагрузок:

$$S_1^z = S_1 \cdot \cos\alpha_1 = 7,92 \cdot \cos 75^\circ = 2,05 \text{ кН};$$

$$S_2^z = S_2 \cdot \cos\alpha_2 = 6,6 \cdot \cos 80^\circ = 1,15 \text{ кН}.$$

$$\sum M_A = 0;$$

$$S_2^z \cdot 0,6 - S_1^z \cdot 0,9 + R_B^z \cdot 1,8 - S_2^z \cdot 0,3 = 0;$$

$$R_B^z = 1,6 \text{ кН}.$$

$$\sum M_B = 0;$$

$$-S_2^z \cdot 2,4 - S_2^z \cdot 2,1 + R_A^z \cdot 1,8 + S_1^z \cdot 0,9 = 0;$$

$$R_A^z = 1,85 \text{ кН}.$$

$$\sum Z = 0; \quad S_2^z + S_2^z - R_A^z - S_1^z + R_B^z = 0;$$

$$1,15 + 1,15 - 1,85 - 2,05 + 1,6 = 0;$$

$$0 = 0.$$

Строим эпюру изгибающих моментов в горизонтальной плоскости:

$$M_{\text{и}}^{E} = 1{,}15 \cdot 0{,}3 = 0{,}45 \text{ кН} \cdot \text{м};$$
$$M_{\text{и}}^{A} = 1{,}15 \cdot 0{,}6 + 1{,}15 \cdot 0{,}3 = 1{,}04 \text{ кН} \cdot \text{м};$$
$$M_{\text{и}}^{F} = 1{,}6 \cdot 0{,}9 = 1{,}44 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

7. Строим эпюру суммарных изгибающих моментов:

$$M_{\text{и}}^{E} = \sqrt{1{,}95^2 + 0{,}45^2} = 1{,}96 \text{ кН} \cdot \text{м};$$
$$M_{\text{и}}^{A} = \sqrt{5{,}84^2 + 1{,}04^2} = 5{,}93 \text{ кН} \cdot \text{м};$$
$$M_{\text{и}}^{F} = \sqrt{0{,}55^2 + 1{,}44^2} = 0{,}92 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

8. Опасным сечением будет сечение A:

$$M_{\text{и}}^{A} = 5{,}93 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad T = 1{,}32 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Расчетный момент для сечения A:

$$M_{\text{р}}^{\text{III}} = \sqrt{5{,}93^2 + 1{,}32^2} = 6{,}08 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

9. Определяем диаметр сечения вала:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_{\text{р}}}{\pi\sigma_{\text{adm}}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 6{,}08 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot 70}} = 0{,}096 \text{ м} = 96 \text{ мм}.$$

Принимаем диаметр вала $d = 100$ мм.

6.6. Задания для расчета на изгиб с кручением

Трансмиссионный вал делает n оборотов в минуту при мощности N. На шкив с диаметром D_1 с углом наклона ремней ветвей ремня к горизонту α_1 передается мощность N кВт от электродвигателя. Два других шкива имеют одинаковый диаметр D_2 и одинаковые углы α_2 наклона ветвей ремня к горизонту, и каждый из них передает мощность $0{,}5N$ на станки. Для заданной расчетной схемы и данных размеров и нагрузок требуется:

1) определить окружные моменты, приложенные к шкивам, по заданным величинам N и n;

2) построить эпюру крутящих моментов T;

3) определить окружные усилия, действующие на шкивы;

4) определить силы, изгибающие вал в горизонтальной и вертикальной плоскостях (вес шкива и вала не учитывать);

5) построить эпюры изгибающих моментов от горизонтальных сил $M_{\text{гор}}$ и от вертикальных сил $M_{\text{верт}}$;

6) построить эпюру суммарных изгибающих моментов;

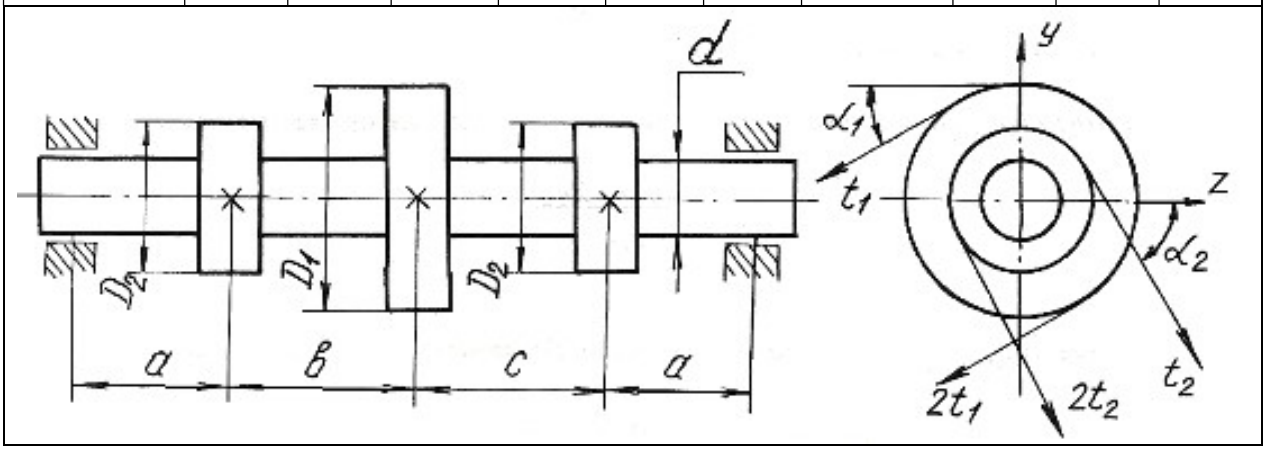
7) найти опасное сечение и определить величину максимально-расчетного момента по третьей теории прочности;

8) подобрать диаметр сечения вала при σ_{adm}=80 МПа.

Данные для расчета и схемы взять из табл. 6.6.

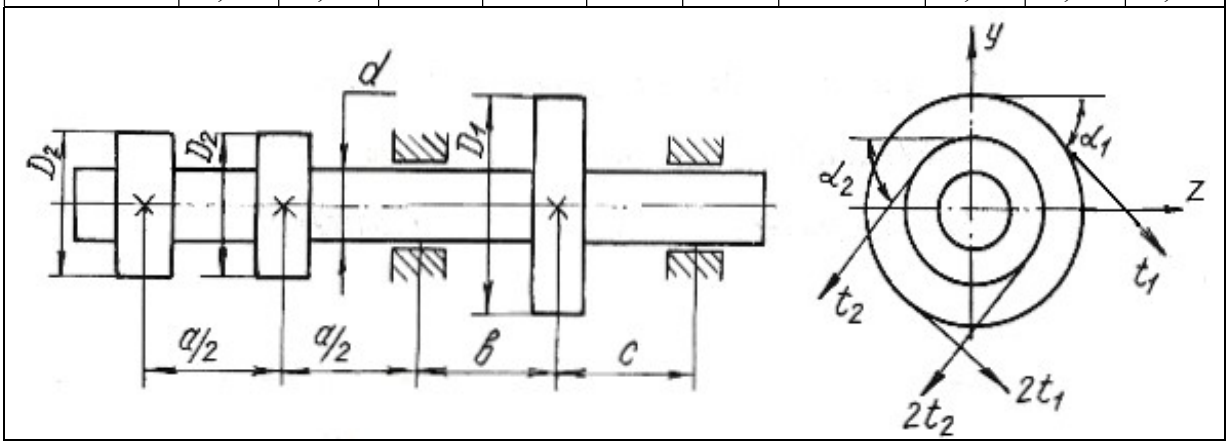
Таблица 6.6

Номер варианта	Числовые значения									
	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
1	1,00	0,30	45	40	30	15	250	0,50	1,00	1,00
2	0,80	0,40	15	10	40	20	200	0,50	1,30	1,20
3	1,00	0,40	30	35	30	15	250	0,40	1,25	2,00
4	1,20	0,50	60	55	50	25	200	0,40	1,00	2,50
5	1,40	0,40	45	45	60	30	300	0,60	1,20	1,80



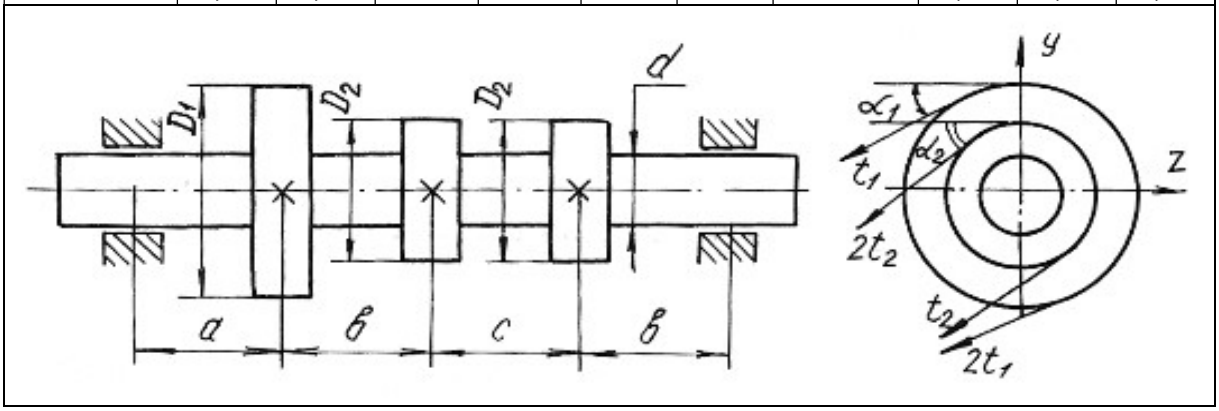
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
6	1,00	0,30	45	40	70	35	400	0,70	1,20	1,30
7	0,90	0,60	55	50	75	38	400	0,50	1,00	1,00
8	1,00	0,70	60	35	80	40	500	0,60	1,00	1,10
9	1,20	0,80	65	30	85	42	550	0,70	1,10	1,20
10	1,20	0,90	70	45	90	45	600	0,70	1,00	1,00



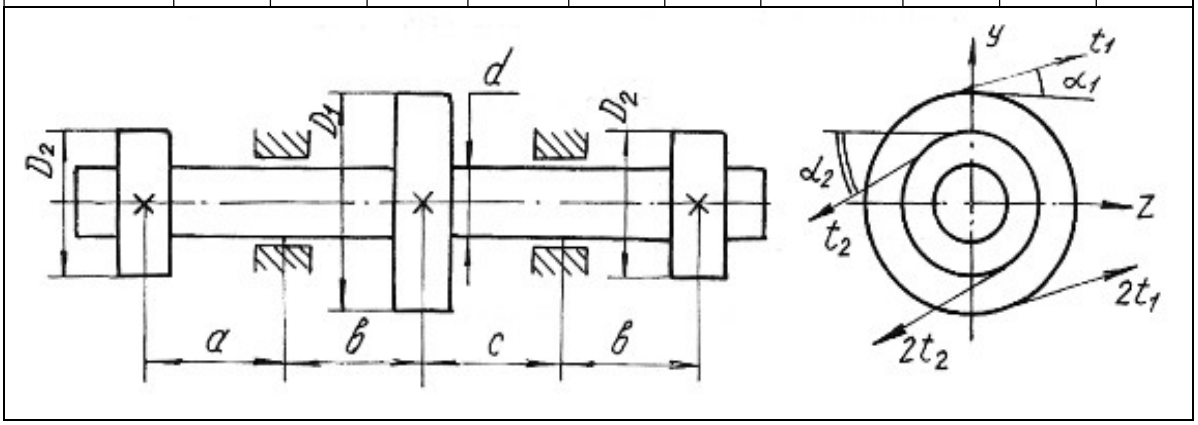
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
11	1,00	0,60	75	80	90	45	650	0,60	0,90	0,90
12	1,20	0,80	80	75	100	50	700	0,50	1,00	1,00
13	1,20	0,70	85	30	110	55	750	0,60	1,10	1,20
14	1,20	0,60	30	85	120	60	800	0,50	1,00	1,00
15	1,00	0,80	35	40	130	65	360	0,60	1,20	1,00



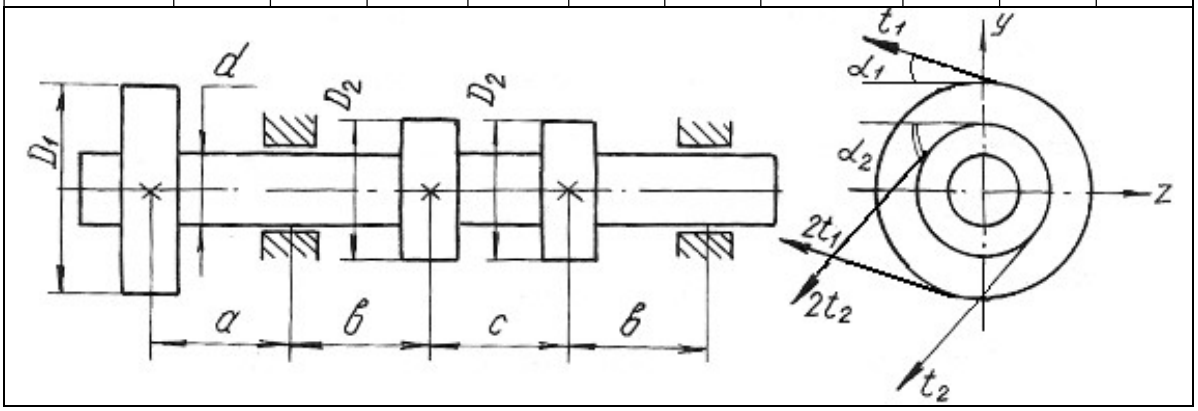
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
16	1,20	0,60	40	35	140	70	400	0,50	1,00	1,00
17	1,40	0,70	45	50	150	75	450	0,50	0,50	1,00
18	1,20	0,60	50	45	160	80	500	0,60	1,00	1,00
19	1,20	0,70	60	65	170	85	550	0,50	0,90	0,90
20	1,00	0,60	65	60	180	90	600	0,60	1,00	0,90



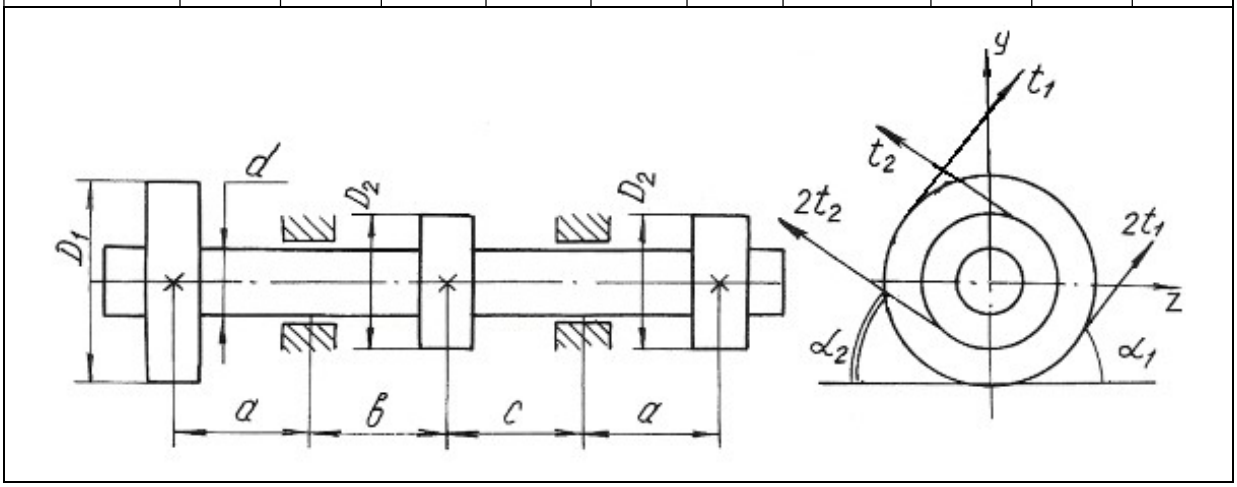
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
21	1,20	0,80	15	25	30	15	250	1,00	0,80	1,20
22	1,00	0,60	25	15	40	20	280	1,20	1,20	1,30
23	0,80	0,50	30	45	50	25	300	1,30	1,30	1,40
24	1,00	0,65	45	60	60	30	450	1,25	1,40	1,50
25	1,20	0,75	60	30	70	35	500	1,40	1,00	1,60



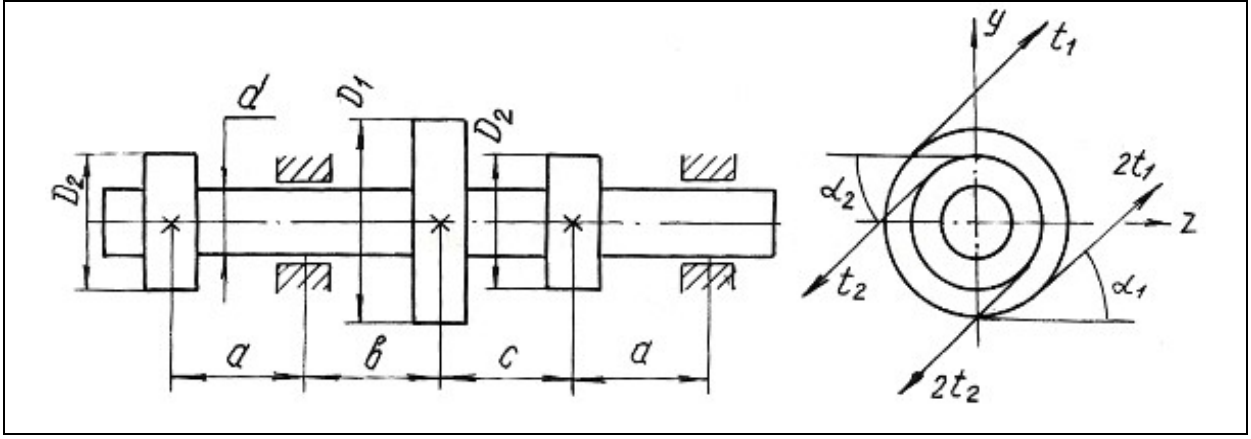
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
26	1,20	0,80	75	15	60	30	500	1,20	1,20	1,40
27	1,00	0,90	30	45	64	32	550	1,00	0,80	1,00
28	0,90	0,80	35	55	70	35	600	0,60	1,00	0,90
29	0,80	0,70	40	50	74	37	650	0,60	0,90	0,80
30	1,10	0,75	55	65	80	40	700	0,80	1,00	0,65



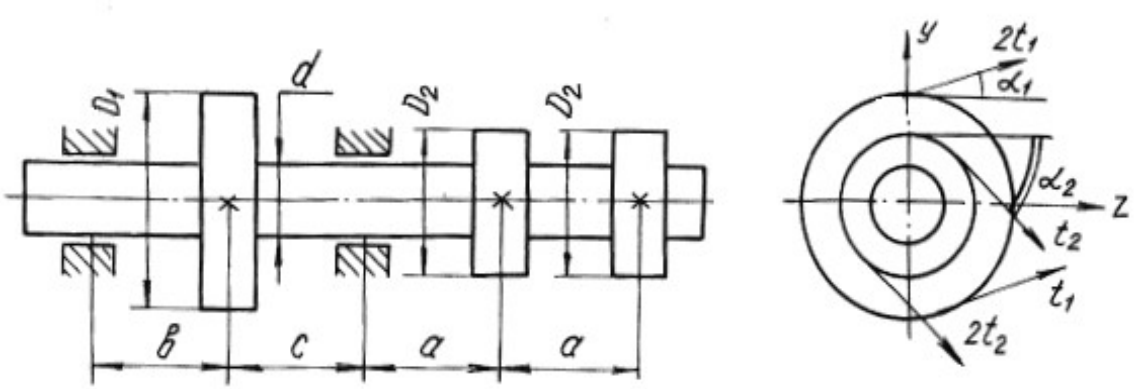
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
31	1,10	0,75	45	45	170	85	500	1,00	0,90	1,10
32	1,20	0,90	60	30	90	45	400	0,90	1,00	0,80
33	0,90	0,70	75	15	95	47	450	0,80	0,90	1,00
34	1,00	0,80	30	45	100	50	500	1,00	1,20	0,90
35	1,20	0,90	25	15	110	55	550	0,90	1,00	1,20



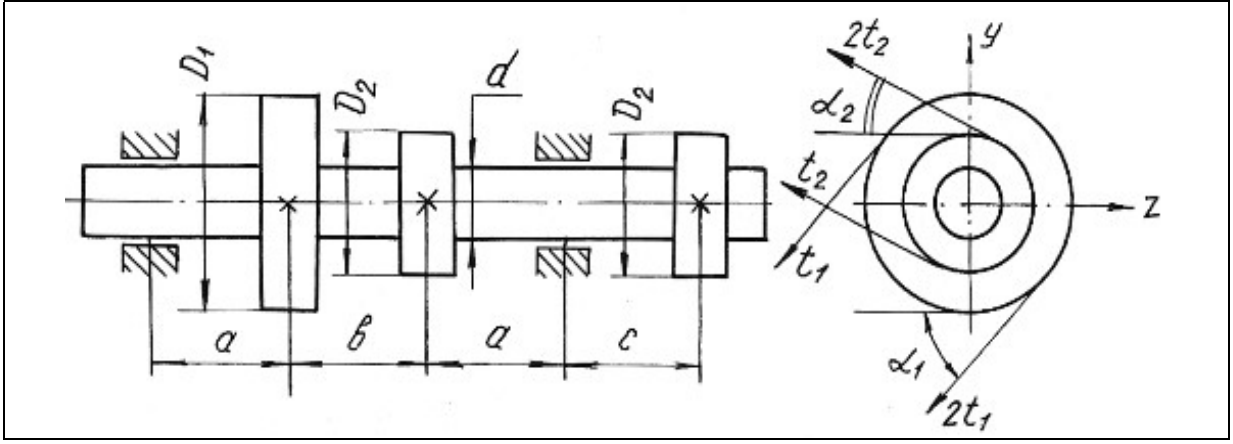
Продолжение табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
36	1,00	0,80	30	20	120	60	600	0,80	1,20	0,90
37	1,20	0,90	35	45	130	65	650	1,00	0,80	0,90
38	1,10	0,80	60	50	140	70	700	0,90	1,00	0,90
39	1,00	0,70	75	15	150	75	300	0,80	1,00	0,70
40	1,00	0,60	60	40	160	80	300	1,00	1,20	1,30



Окончание табл. 6.6

Номер варианта	D_1, м	D_2, м	α_1, град	α_2, град	N_1, кВт	N_2, кВт	n, об/мин	a, м	b, м	c, м
41	1,00	0,40	40	20	40	20	200	0,50	1,00	0,40
42	0,80	0,50	45	25	50	25	250	0,40	1,10	0,50
43	1,00	0,60	50	30	60	30	300	0,60	0,90	0,40
44	1,20	0,80	55	35	70	35	200	0,40	1,00	0,60
45	1,10	0,50	60	40	80	40	350	0,70	1,20	0,70



Глава 7

УСТОЙЧИВОСТЬ ГИБКИХ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

Стержни, длина которых относительно невелика по сравнению с их поперечными размерами, рассчитываются на сжатие, исходя из условия прочности:

$$\frac{F}{A} \le \sigma_{\text{adm}}.$$

При этом полагается, что вплоть до разрушения стержень работает на осевое сжатие и продольная ось его остаётся прямолинейной.

Иная картина наблюдается при сжатии стержней, длина которых значительно больше размеров поперечного сечения. В этих случаях прямолинейная продольная ось стержней может искривляться. Искривление происходит в плоскости наименьшей жесткости стержня.

Деформация, которая возникает при сжатии стерня и сопровождается искривлением продольной оси стержня, называется продольным изгибом, а переход прямолинейной формы продольной оси стержня в криволинейную носит название потери устойчивости. Нагрузка, при которой стержень теряет устойчивость, называется критической силой F_{cr}.

Напряжение, возникающее в поперечном сечении стержня от критической силы, называется критическим напряжением σ_{cr}.

Критические напряжения весьма опасны для сжатых стержней, поэтому необходимо проводить расчёты на устойчивость.

Для стержней, закрепленных на одной или двух опорах, величина критической силы может быть определена по формуле Эйлера:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E\, J_{\min}}{(\mu l)^2}, \qquad (7.1)$$

где E − модуль продольной упругости материала; $J_{\min}$ − минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня; l − длина стержня; μ − коэффициент приведенной длины стержня, отражающий способ закрепления концов стержня (рис. 7.1); μl − приведенная длина стержня.

Критические напряжения

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \qquad (7.2)$$

где λ − гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}, \tag{7.3}$$

где $i_{\min}$ – минимальный радиус инерции поперечного сечения стержня

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}, \tag{7.4}$$

Формула Эйлера применима для стержней с гибкостью более гибкости, предельной для данного материала стержня

$$\lambda_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{pr}}}, \tag{7.5}$$

где σ_{pr} – предел пропорциональности материала стержня (напряжение, при котором сохраняется прямая пропорциональность между σ и ε).

Для расчёта сжатых стержней любой гибкости применяется способ, основанный на применении коэффициентов φ. Этот способ расчёта сжатых стержней на устойчивость сводится к расчёту стержня как бы на простое сжатие, только по заниженному допускаемому напряжению с использованием формулы:

$$\sigma^{\text{у}}_{\text{adm}} = \varphi\, \sigma_{\text{adm}}, \tag{7.6}$$

где $\sigma^{\text{у}}_{\text{adm}}$ – допускаемое напряжение при расчете на устойчивость; φ – коэффициент продольного изгиба (коэффициент понижения основного допускаемого напряжения σ_{adm} на простое сжатие), значения коэффициентов φ для различных материалов приведены в табл. 7.1.

Величина допускаемой нагрузки на устойчивость $F^{\text{у}}_{\text{adm}}$ сжатого стержня соответственно будет равна

$$F^{\text{у}}_{\text{adm}} = \sigma^{\text{у}}_{\text{adm}} A = \varphi \sigma_{\text{adm}} A, \tag{7.7}$$

где A – площадь поперечного сечения сжатого стержня.

Между критической и допускаемой нагрузкой на устойчивость существует следующая связь

$$F_{cr} = K_{\text{у}} F^{\text{у}}_{\text{adm}}, \tag{7.8}$$

где $K_{\text{у}}$ – коэффициент запаса на устойчивость.

Таблица 7.1

Гибкость, λ	Значение коэффициента φ				
	Материал				
	Ст. 4, Ст. 3	Ст. 5	Ст. СПБ	чугун	дерево
0	1	1	1	1	1
10	0,99	0,98	0,97	0,97	0,99
20	0,96	0,95	0,95	0,95	0,97
30	0,94	0,92	0,91	0,81	0,93
40	0,92	0,89	0,87	0,69	0,87
50	0,89	0,86	0,83	0,57	0,8
60	0,86	0,82	0,79	0,44	0,71
70	0,81	0,76	0,72	0,34	0,6
80	0,75	0,7	0,65	0,26	0,48
90	0,69	0,62	0,55	0,2	0,38
100	0,6	0,51	0,43	0,16	0,31
110	0,52	0,43	0,35	–	0,25
120	0,45	0,36	0,3	–	0,22
130	0,4	0,33	0,26	–	0,18
140	0,36	0,29	0,23	–	0,16
150	0,32	0,26	0,21	–	0,14
160	0,29	0,24	0,19	–	0,12
170	0,26	0,21	0,17	–	0,11
180	0,23	0,19	0,15	–	0,1
190	0,21	0,17	0,14	–	0,09
200	0,19	0,16	0,13	–	0,08

В зависимости от исходных данных для расчета на устойчивость решение сводится к определению допускаемой нагрузки $F_{\text{adm}}^{\text{у}}$ из условий устойчивости сжатого стержня или к подбору площади поперечного сечения сжатого стержня.

Рассмотрим возможные варианты решения на устойчивость сжатых стержней с помощью коэффициента φ на следующих примерах.

Пример 7.1.

Определить допускаемую нагрузку для стойки, изготовленной из Ст. 3 в виде трубы с наружным диаметром $d_1 = 0{,}04$ м и внутренним $d_2 = 0{,}03$ м, длиной $l = 1$ м. Концы стойки защемлены. Допускаемое напряжение для материала стержня $\sigma_{\text{adm}} = 120$ МПа, предел пропорциональности материала $\sigma_{pr} = 200$ МПа. Коэффициент запаса на устойчивость $K_{\text{у}} = 2$. Модуль продольной упругости материала $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Решение.

Выявим возможность решения данной задачи с помощью формулы Эйлера. Для этого находим предельную гибкость для данного материала стойки

$$\lambda_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{pr}}} = \sqrt{\frac{3{,}14^2 \cdot 2 \cdot 10^{11}}{200 \cdot 10^6}} = 99{,}5.$$

Для определения действительной гибкости данной стойки находим минимальный момент инерции поперечного сечения

$$J_{\min} = \frac{\pi}{64}(d_1^4 - d_2^4) = \frac{3{,}14}{64}(0{,}04^4 - 0{,}03^4) = 8{,}586 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Площадь сечения

$$A = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2) = \frac{3{,}14}{4}(0{,}04^2 - 0{,}03^2) = 5{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Минимальный радиус инерции

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}} = \sqrt{\frac{8{,}586 \cdot 10^{-8}}{5{,}5 \cdot 10^{-4}}} = 1{,}25 \cdot 10^{-2} \text{м}.$$

Тогда гибкость стойки при $\mu = 0{,}5$

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} = \frac{0{,}5 \cdot 1}{1{,}25 \cdot 10^{-2}} = 40.$$

Сравнивая полученные значения гибкостей, приходим к выводу, что расчет с помощью формулы Эйлера в данном случае не применим, так как $\lambda < \lambda_{\text{кр}}$.

Расчет производим с помощью коэффициента φ. Для данной стальной стойки при $\lambda = 40$ коэффициент $\varphi = 0{,}92$.

Найдем допускаемое напряжение на устойчивость

$$\sigma_{\text{adm}}^{\text{у}} = \varphi\sigma_{\text{adm}} = 0{,}92 \cdot 120 = 110{,}4 \text{ МПа},$$

а допускаемая нагрузка на устойчивость

$$F_{\text{adm}}^{\text{у}} = \sigma_{\text{adm}}^{\text{у}} A = 110{,}4 \cdot 10^6 \cdot 5{,}5 \cdot 10^{-4} = 60{,}72 \cdot 10^3 \text{ Н} = 60{,}72 \text{ кН}.$$

Критическая нагрузка

$$F_{cr} = K_{\text{у}} F_{\text{adm}}^{\text{у}} = 2 \cdot 60{,}72 = 121{,}44 \text{ кН}.$$

Пример 7.2.

Подобрать двутавровое сечение стойки с одним защемленным, а другим свободным концом. Осевая сжимающая сила $F = 400$ кН, длина стойки $l = 1{,}5$ м. Основное допускаемое напряжение на сжатие $\sigma_{adm} = 160$ МПа.

Решение.

Решаем задачу методом последовательных приближений. Примем для первого приближения коэффициент $\varphi_1 = 0{,}5$. В этом случае необходимая площадь поперечного сечения стойки:

$$A_1 \geq \frac{F}{\varphi_1 \sigma_{adm}} = \frac{400 \cdot 10^3}{0{,}5 \cdot 160 \cdot 10^6} = 50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

По сортаменту выбираем двутавр № 33 (см. табл. П. 1) с площадью $A_2 = 53{,}8 \cdot 10^{-4}$ м^2 и минимальным радиусом инерции $i_{\min_1} = 2{,}79 \cdot 10^{-2}$ м.

Соответствующая гибкость стойки при коэффициенте $\mu = 2$

$$\lambda_1 = \frac{\mu l}{i_{\min_1}} = \frac{2 \cdot 1{,}5}{2{,}79 \cdot 10^{-2}} = 107.$$

С помощью линейной интерполяции находим коэффициент φ_2 между его значениями по табл. 7.1 при $\lambda = 100$ и при $\lambda = 110$. При $\lambda = 100$, $\varphi = 0{,}60$; при $\lambda = 110$, $\varphi = 0{,}52$, следовательно, $\Delta\lambda = 10$, $\Delta\varphi = 0{,}08$:

$$\varphi_2 = \varphi_{\lambda=100} - \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\left[(\lambda{=}107) - (\lambda{=}100)\right] = 0{,}544.$$

Следовательно, при $\lambda = 107$ коэффициент $\varphi_2 = 0{,}544$.

Проводим проверку по условию

$$F_{\text{расч}_1} = \varphi_2 A_2 \sigma_{adm} = F \pm 5\ \%,$$

в нашем случае $F_{\text{расч}_1} = 0{,}544 \cdot 53{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 160 \cdot 10^6 = 468270$ Н $= 468{,}27$ кН $> F$.

Находим величину расхождения между заданной и расчетной нагрузками

$$\delta = \frac{468{,}27 - 400}{400} 100 = 17\ \% > 5\ \%.$$

Делаем новый расчет (приближение)

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = \frac{0{,}5 + 0{,}544}{2} = 0{,}522 .$$

Необходимая площадь поперечного сечения

$$A_3 = \frac{F}{\varphi_3 \sigma_{adm}} = \frac{400 \cdot 10^3}{0{,}522 \cdot 160 \cdot 10^6} = 48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 .$$

По сортаменту проката найденной площади соответствует двутавр № 30а (см. табл. П. 1) площадью сечения $A_4 = 49{,}9 \cdot 10^{-4}$ м^2 и $i_{\min_2} = 2{,}95 \cdot 10^{-2}$ м. Тогда гибкость

$$\lambda_2 = \frac{\mu l}{i_{\min_2}} = \frac{2 \cdot 1{,}5}{2{,}95 \cdot 10^{-2}} = 101{,}7 \approx 102 .$$

После интерполяции получаем

$$\varphi_4 = 0{,}6 - \frac{0{,}08}{10}(102 - 100) = 0{,}584 .$$

Проводим проверку

$$F_{\text{расч}_2} = 0{,}584 \cdot 49{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 160 \cdot 10^6 = 466265 \text{ Н} = 466{,}265 \text{ кН} > F .$$

Величина расхождения между заданной и расчетной нагрузками составляет:

$$\delta = \frac{466{,}265 - 400}{400} 100 = 16{,}6 \text{ \%} > 5 \text{ \%} .$$

Проверяем двутавр № 30 площадью сечения $A_5 = 46{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^2, $i_{\min_3} = 2{,}69 \cdot 10^{-2}$ м.

Гибкость $\lambda_3 = \frac{2 \cdot 1{,}5}{2{,}69 \cdot 10^{-2}} \approx 112$.

Коэффициент φ_5 находим линейной интерполяцией между значениями $\lambda = 110$ и $\lambda = 120$. Получим $\varphi_5 = 0{,}506$.

Проверка

$F_{\text{расч}_3} = \varphi_5 A_5 \sigma_{adm} = 0{,}506 \cdot 46{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 160 \cdot 10^6 = 376500 \text{ Н} = 376{,}5 \text{ кН}.$

Величина расхождения между заданной и расчетной нагрузками составляет

$$\delta = \frac{400 - 376{,}5}{400} 100 = 5{,}87 \text{ \%} > 5 \text{ \%} .$$

Следовательно, из трех рассмотренных номеров двутавров к практическому применению необходимо принять двутавр № 30а с площадью поперечного сечения $A = 49{,}9 \cdot 10^{-4}$ м^2, так как нагрузка, которую воспринимает двутавр № 30 меньше заданной нагрузки более чем 5 %.

7.1. Задания для расчета стержней на устойчивость

Подобрать поперечное сечение заданного профиля гибкого стержня при действии осевой сжимающей силы. Решение выполнить методом последовательных приближений с помощью коэффициентов φ. Допускаемые напряжения для материалов стержней на сжатие принять: для стали $\sigma_{adm} = 160$ МПа; для чугуна $\sigma_{adm} = 130$ МПа; для дерева $\sigma_{adm} = 10$ МПа.

Данные для расчетов взять из рис. 7.1, табл. 7.2 и П. 1.

Примечания:

1. Для сечения прямоугольного профиля принять соотношение между размерами как $b:h = 1:2$.
2. Для кольцеобразного сечения принять соотношение между внутренним и наружным диаметрами как $d/D = 0{,}85$.

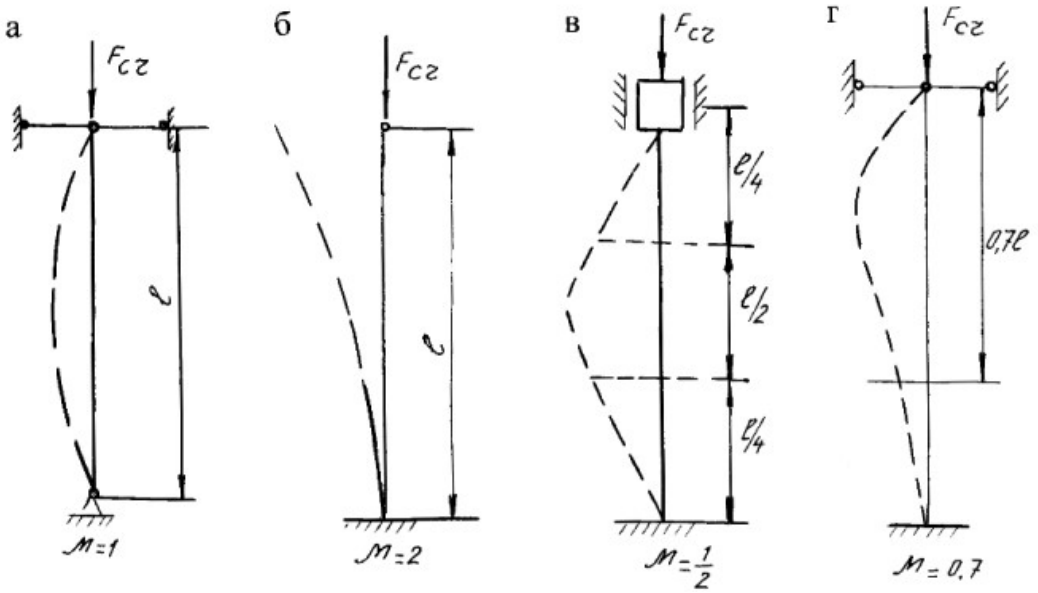
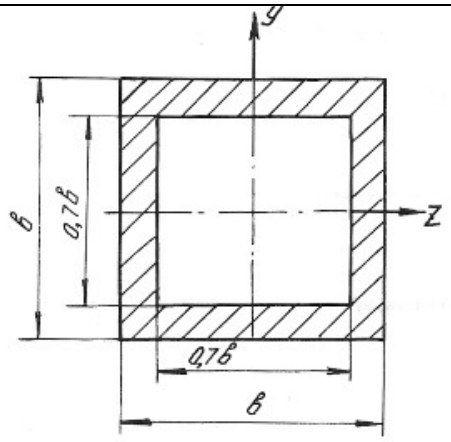
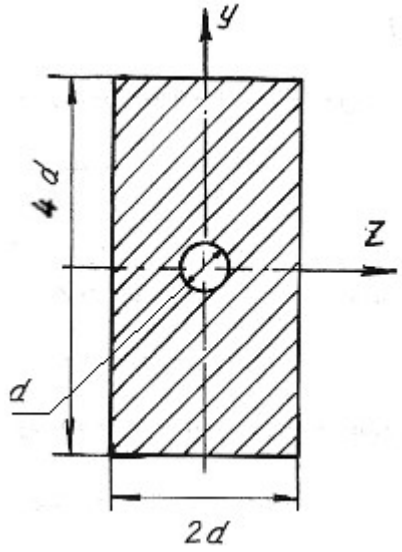
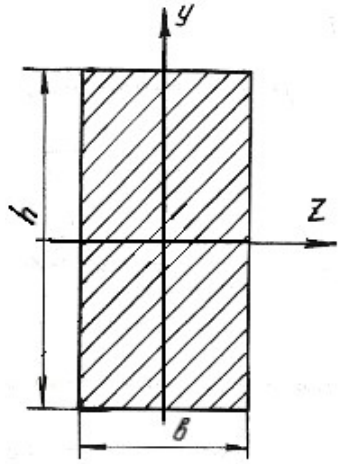
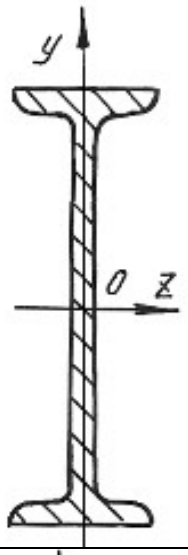
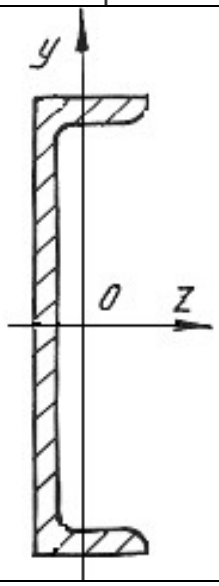


Рис. 7.1.

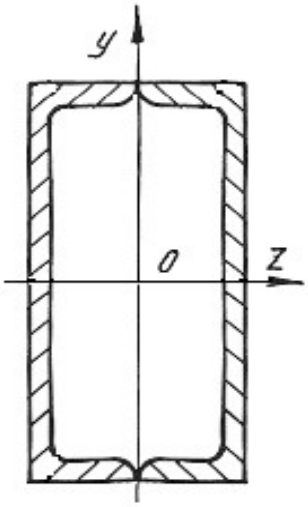
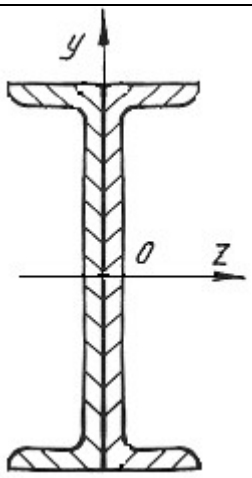
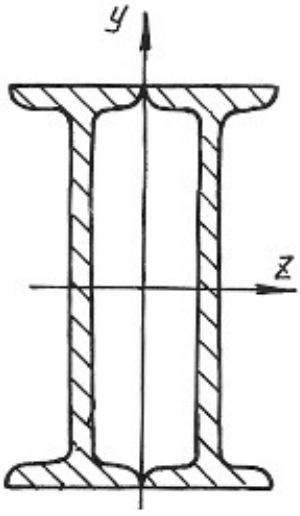
Таблица 7.2

Номер варианта	Схема поперечного сечения	Материал	Способ закрепления	Длина стержня, м	Сжимающая нагрузка, кН
1		Дерево	а б в г	3 4 4 1,6	90 120 150 60
2		Дерево	а б в г	3,6 5 5 2	140 250 400 180
3		Чугун	а б в г	5,2 4,8 4,5 2,8	600 800 900 700

Продолжение табл. 7.2

Номер варианта	Схема поперечного сечения	Материал	Способ закрепления	Длина стержня, м	Сжимающая нагрузка, кН
4		Чугун	а б в г	4,6 3,8 4,2 3,2	850 600 700 900
5		Сталь 5	а б в г	3,2 3,6 8 2,4	380 700 800 600
6		Сталь 3	а б в г	3,6 4,5 5 2,2	280 650 450 250

Окончание табл. 7.2

Номер варианта	Схема поперечного сечения	Материал	Способ закрепления	Длина стержня, м	Сжимающая нагрузка, кН
7		Сталь 3	а б в г	3 4 5,5 4,8	300 400 250 350
8		Сталь 3	а б в г	5,5 6,6 7 3,5	960 500 800 750
9		Сталь 3	а б в г	3 7 6 4	930 740 830 980

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по
учебно-методическому работе
_____В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ И ЗАДАНИЯ

Б1.О.21 ЭКОЛОГИЯ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Автор: Москвина О.А.

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией
Инженерной экологии	Горно-механический факультет
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Студенок Г.А.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 12.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Изучение дисциплины «Экология» реализуется в виде контактной работы обучающихся с преподавателями и самостоятельной работы.

Текущий контроль знаний, умений, владений как результат формирования компетенций осуществляется в ходе аудиторных занятий, проводимых по расписанию. Форма такого контроля (оценочные средства) – опрос, рабочая тетрадь, коллоквиум, тест. Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины проводится в форме курсовой работы и зачета.

Контактная работа обучающихся с преподавателями по дисциплине «Экология» осуществляется в форме лекционных и практических (семинарских) занятий, целью которых является оказание помощи студентам в изучении наиболее важных вопросов учебного курса, углубление и закрепление, систематизация соответствующих знаний по предмету.

При изучении дисциплины важную роль играет самостоятельная работа, которая заключается в организации систематического изучения тем курса учебной дисциплины, закреплении и углублении полученных знаний и навыков, подготовке к предстоящим занятиям, а также в формировании культуры умственного труда и самостоятельном поиске новых знаний.

Для успешного изучения дисциплины «Экология» и приобретения компетенций, предусмотренных рабочей программой дисциплины, обучающиеся должны реализовать следующие виды самостоятельной работы: изучение тем курса; подготовка к коллоквиуму (теоретическому опросу); рабочая тетрадь (подготовка к лекции); подготовка и написание курсовой работы (проекта); подготовка к зачету/экзамену (тестирование).

Перечень вопросов, подлежащий изучению, приведен в программе курса.

Литература, предлагаемая для изучения дисциплины, представлена в рабочей программе. Вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную. К основной относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия). Необходимость изучения дополнительной литературы диктуется прежде всего тем, что в учебниках зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражение изменения в законодательстве и тенденции практики. Поэтому дополнительная литература рекомендуется для более углубленного изучения программного материала.

Во время изучения литературы необходимо конспектировать и делать записи прочитанного. Такие записи способствуют лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал.

Теоретические знания, полученные в ходе изучения основной и дополнительной литературы, участие в практических занятиях (семинарских) позволяют студентам формировать всю полноту и объективность знаний.

Для самопроверки и самоконтроля студентам предлагается пройти тест, ответы на который после изучения отдельных тем курса и курса в целом, позволят студенту проверить полученные знания.

При постоянном, последовательном изучении всех тем дисциплины, активной контактной работе обучающихся с преподавателями и самостоятельной работе, студенту удается полностью освоить изучаемый предмет.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ВИДАМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа студента при освоении дисциплины «Экология» состоит из следующих видов работ:

- изучение тем курса;
- подготовка к коллоквиуму (теоретическому опросу);
- рабочая тетрадь (подготовка к лекции);
- подготовка и написание курсовой работы (проекта);
- подготовка к зачету/экзамену (тестирование).

Самостоятельное изучение тем курса предполагает чтение основной и дополнительной литературы по соответствующей теме, работу с Интернет-ресурсами, конспектирование изученного материала.

Подготовка к коллоквиуму заключается в изучении нормативных правовых актов, соответствующей учебной основной и дополнительной литературы по теме, записей по рекомендованным источникам.

Рабочая тетрадь – дидактический комплекс, предназначенный для самостоятельной работы обучающегося и позволяющий оценивать уровень усвоения им учебного материала.

Тестирование позволяет провести проверку знаний отдельных тем курса и всей дисциплины в целом.

Подготовка к зачету предполагает повторное прочтение всего пройденного материала, запоминание основных терминов и определений, разбор смысла и содержания основных понятий, подготовку (запись) вопросов, которые остались неясными, непонятными.

Конкретные виды заданий по дисциплине «Экология» указаны далее.

Раздел 1. История возникновения и развития экологии, какестественнонаучной дисциплины.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

- Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;
- Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 c. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

1. Определение «экологии» как науки.
2. Предмет, цель и задачи дисциплины.
3. Периоды развития науки.
4. Исходные теоретические концепции экологии.
5. Классификация и структура экологических дисциплин.
6. Связь экологии с другими дисциплинами.
7. Методы исследования в экологии.

Раздел 2. Адаптация живых организмов к экологическим факторам среды обитания.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

- Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;
- Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 с. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

Тема 2.1. Экологические факторы среды обитания, общие закономерности их воздействия на живые организмы.

1. Понятия «среда обитания» и «условия существования».
2. Экологические факторы среды.
3. Лимитирующие факторы.
4. Закономерности действия экологических факторов на организмы.
5. Закон минимума.
6. Закон толерантности.
7. Биотические факторы среды.
8. Абиотические факторы.
9. Антропогенные факторы.
10. Взаимодействие факторов среды.

Тема 2.2. Основные механизмы адаптации живых организмов к экологическим факторам среды обитания.

1. Приспособление организмов к неблагоприятным условиям среды
2. Наземно-воздушная среда жизни и ее особенности. Адаптации организмов к обитанию в наземно-воздушной среде
3. Водная среда жизни. Адаптации организмов к водной среде
4. Почвенная среда жизни. Почвенные организмы.
5. Живой организм как особая среда обитания. Средообразующая роль живых организмов.

Задания для тестирования:

*Инструкция***.** Внимательно прочитайте вопрос и варианты ответов. Из предложенных ответов правильными могут быть несколько или один.

На листе бумаги напишите тему, выпишите вопрос и правильный ответ.

.

Тема № 2

1. Как называют эволюционно возникшее приспособление организмов, органов и их функций к условиям среды?

а) экологический фактор;
б) адаптация;
в) среда обитания;
г) экологическая ниша.

2. Воздействия, вызывающие морфологические и анатомические изменения организмов, называются …

а) ограничивающими;
б) модификационными;
в) сигнальными;

г) раздражительными.

3. Изменения в строении организма в результате приспособления к среде обитания − это …
а) морфологические адаптации;
б) физиологические адаптации;
в) этологические адаптации;
г) морфометрические адаптации.

4. Экологическая толерантность организма – это …
а) зона угнетения;
б) оптимум;
в) субоптимальная зона;
г) зона между верхним и нижним пределами выносливости.

5. Экологический фактор, количественное значение которого выходит за пределы выносливости вида, называется …
а) лимитирующим;
б) основным;
в) фоновым;
г) витальным.

6. Как называется механизм терморегуляции, осуществляемой за счет изменения интенсивности обмена веществ?
а) химическая терморегуляция;
б) физическая терморегуляция;
в) этологическая терморегуляция.

7. Ритмы в организме, возникающие как реакция на периодические изменения среды (смену дня и ночи, сезонов, солнечной активности и т.п.), называются:
а) экзогенными;
б) эндогенными;
в) циркадными (околосуточными);
г) цирканными (окологодичными).

8. Реакции организмов на смену дня и ночи, проявляющиеся в колебаниях интенсивности физиологических процессов, называют …
а) фотопериодизмом;
в) цирканными ритмами;
г) анабиозом.

9. К абиотическим факторам окружающей среды относятся:
а) рельеф, климат, температура, свет, влажность, соленость воды;
б) растительный опад, минеральный состав почвы, влажность;
в) соленость воды, отмершие части водных растений и останки животных, свет;
г) газовый состав атмосферы, загрязнение почвы, воздуха и воды.

10. Изменение поведения организма в ответ на изменения факторов среды называется …
а) мимикрией;
б) физиологической адаптацией;
в) морфологической адаптацией;
г) этологической адаптацией.

Тема № 2

1. Как называются компоненты неживой природы, которые воздействуют на организмы?
а) абиотические факторы;
б) биотические факторы;

в) антропогенные факторы;
г) небиотические факторы.

2. Какой из перечисленных ниже факторов относится к биотическим?
а) антропогенный;
б) эдафический;
в) орографический;
г) комменсализм.

3. Виды организмов с широкой зоной валентности называются …
а) стенобионтными;
б) эврибионтными;
в) пластичными;
г) устойчивыми.

4. Для характеристики организмов, способных выдерживать незначительные колебания какого-либо экологического фактора, используют приставку:
а) ксеро-;
б) мезо-;
в) стено-;
г) эври-.

5. Растения, которые могут произрастать только в условиях хорошего освещения, называются
а) факультативными гелиофитами;
б) сциофитами;
в) гелиофитами;
г) умброфиты.

6. Организмы с непостоянной внутренней температурой тела, меняющейся в зависимости от температуры внешней среды, называются …
а) пойкилотермными;
б) гомойотермными;
в) гетеротермными;
г) нет правильного ответа.

7. Растения влажных местообитаний, целиком или большей своей частью погруженные в воду, называются …
а) ксерофиты;
б) гидрофиты;
в) гидатофиты;
г) мезофиты.

8. Растения, которые произрастают на слабокислых почвах, называются …
а) нейтрофилами;
б) ацидофилами;
в) базифилами;
г) индифферентными видами.

9. Растения, довольствующиеся малым содержанием зольных элементов в почве, называются
а) мезотрофами;
б) эвтрофами;
в) олиготрофами.

10. Как называются растения, почки возобновления которых находятся высоко над поверхностью земли (деревья и кустарники) по классификации К.Раункиера?
а) криптофитами;
б) хамефитами;
в) терофитами;

г) фанерофитами.

Раздел 3. Популяции видов растений и животных.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

- Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;
- Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 с. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

Тема 3.1. Популяция как элемент экосистемы.

1. Популяция как форма существования вида.
2. Общие характеристики популяций.
3. Типы популяций и их характеристики.

Тема 3.2. Биологическая структура популяций.

1. Общие признаки, формирующие структуру популяции.
2. Статические характеристики популяции.
3. Возрастная и половая структура популяции.
4. Пространственная и этологическая структура популяции.
5. Динамические характеристики популяции

Тема 3.3. Динамика изменения численности популяции. Гомеостаз популяции.

1. Основные популяционно-динамические процессы.
2. Динамика численности популяции.
3. Гомеостаз популяции.

Задания для тестирования:

*Инструкция***.** Внимательно прочитайте вопрос и варианты ответов. Из предложенных ответов правильными могут быть несколько или один.

На листе бумаги напишите тему, выпишите вопрос и правильный ответ.

.

Тема № 3

1. Совокупность способных к самовоспроизводству особей одного вида, которая длительно существует в определенной части ареала относительно обособлено от других совокупностей того же вида, называется …

а) популяцией;
б) сообществом;
в) содружеством;
г) группой.

2. Совокупность групп пространственно смежных экологических популяций называется …

а) элементарной популяцией;
б) локальной популяцией;
в) географической популяцией.

3. Как называются популяции, которые образованы особями с чередованием полового и бесполого размножения?

а) клонально-панмиктическая популяция;
б) клональная популяция;
в) панмиктическая популяция.

4. Гены организма (генотип) отвечают за синтез…

а) белков;
б) углеводов;
в) липидов.

5. Как называется источник возникновения новых аллелей при изменении генетической структуры популяции?

а) мутация;
б) миграция;
в) дрейф генов;
г) неслучайное скрещивание.

6. Какое значение имеет биотический потенциал (r) при увеличении численности популяции?

а) r = 0;
б) r > 0;
в) r < 0.

7. Какую характерную особенность имеют виды − «оппортунисты» (r −стратеги), по сравнению с равновесными видами (К − стратеги)?

а) расселяются медленно;
б) быстро размножаются;
в) крупные размеры особей;
г) большая продолжительность жизни особи.

8. Самоподдержание и саморегулирование определенной численности (плотности) популяции называется …

а) гомеостазом;
б) эмерджентностью;
в) элиминированием;
г) эмиссией.

9. Рост популяции, численность которой увеличивается лавинообразно, называют …

а) изменчивым;
б) логистическим;
в) экспоненциальным;
г) стабильным.

10. Возрастной структурой популяции называется …

а) количественное соотношение женских и мужских особей;
б) количество старых особей;
в) количество новорожденных особей;
г) количественное соотношение различных возрастных групп.

Тема № 3

1. Как называются виды растений и животных, представители которых встречаются на большей части обитаемых областей Земли?

а) убиквистами;
б) космополитами;
в) эндемиками.

2. Временное объединение животных, облегчающее выполнение какой-либо функции, называется

…

а) стадо;
б) колония;
в) семейный образ жизни;
г) стая.

3. Какая форма кривой выживания характерна для млекопитающих?
а) выпуклая;
б) прямая;
в) вогнутая.

4. Кривая выживания для мужчин в России по сравнению с кривой выживания для женщин имеет вид:
а) менее выпуклый;
б) более выпуклый;
в) кривые не имеют различий.

5. Искусственное расселение вида в новый район распространения – это …
а) реакклиматизация;
б) интродукция;
в) акклиматизация;
г) миграция.

6. Кривая выживания характеризует:
а) диапазон значений экологического фактора, за пределами которого становится невозможной нормальная жизнедеятельность особи;
б) число выживших особей во времени;
в) зависимость степени благоприятности экологического фактора от его интенсивности;
г) скорость, с которой живые организмы производят полезную химическую энергию.

7. Для популяции нехарактерны следующие свойства:
а) структурированность
б) интегрированность составных частей (целостность)
в) авторегуляция
г) вычленение морфологически отличающихся частей, в ее строении

8. Популяция может увеличивать свою численность экспоненциально (то есть численность популяции увеличивается с возрастающей скоростью):
а) когда ограничена только пища
б) при освоении новых мест обитания
в) только в случае отсутствия хищников
г) только в лабораторных условиях

9. Заяц-беляк и заяц-русак, обитающие в одном лесу, составляют:
а) одну популяцию одного вида
б) две популяции одного вида
в) две популяции двух видов
г) одну популяцию двух видов
д) две группировки в популяции

10. Число особей вида на единицу площади или на единицу объема жизненного пространства показывает:
а) видовое разнообразие
б) плодовитость
в) плотность популяции
г) обилие популяции

Раздел 4. Популяции видов растений и животных.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

- Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;
- Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 с. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

Тема 4.1. Биоценозы как природные системы надорганизменного уровня жизни.

1. Понятие «биоценоз».
2. Таксономический состав биоценозов.
3. Видовая структура биоценозов.
4. Пространственная структура биоценозов.

Тема 4.2. Отношения организмов в биоценозах.

1. Понятия «продуценты», «консументы», «редуценты».
2. Трофическая структура биоценозов.

Тема 4.3. Экологическая ниша в биоценозе. Динамика и стабильность биоценозов.

1. Экологическая ниша в биоценозе. Ниша фундаментальная и реализованная.
2. Влияние конкуренции на ширину экологической ниши. Прерывание ниш.
3. Ниши общие и специализированные.
4. Динамика и стабильность биоценозов, их способность к саморегуляции.

Тема № 4

1. Как называют совокупность популяций разных живых организмов (растений, животных и микроорганизмов) обитающих на определенной территории?
а) биоценоз;
б) фитоценоз;
в) зооценоз;
г) микробоценоз.

2. Увеличение видового разнообразия в экотоне называется …
а) краевым эффектом;
б) α − разнообразием;
в) β − разнообразием.

3. Ярусность и мозаичность распределения организмов разных видов − это…
а) экологическая структура;
б) пространственная структура;
в) видовая структура.

4. Структурная единица биоценоза, объединяющая автотрофные и гетеротрофные организмы на основе пространственных (топических) и пищевых (трофических) связей вокруг центрального члена (ядра) называется …
а) синузией;
б) консорцией;
в) парцеллой.

5. Условия внешней и внутренней среды, разрешающие осуществляться некоторым эволюционным факторам и событиям, называются …
а) гиперпространственной нишей;
б) местообитанием;
в) экологической лицензией;
г) экологической нишей.

6. Экологическая диверсификация − это разделение экологических ниш в результате …
а) дивергенции;
б) внутривидовой конкуренции;
в) межвидовой конкуренции;
г) интерференции.

7. Изменение условий обитания одного вида, вызванные жизнедеятельностью другого вида проявляются в ... связях.
а) форических;
б) трофических;
в) топических;
г) фабрических.

8. Среди перечисленных экосистем естественными биоценозами являются:
а) лес;
б) поле кормовых трав;
в) плантация;
г) парк.

9. Саморегуляция в биоценозе направлена на
а) уменьшение видового разнообразия
б) возвращения к норме
в) увеличение видового состава
г) верны все ответы

10. При формировании ярусности в лесном сообществе лимитирующим фактором является …
а) свет;
б) температура;
в) вода;
г) почва.

Тема № 4

1. Как называется взаимодействие между видами, которое полезно для обеих популяций, но не является облигатным?
а) аменсализм;
б) нейтрализм;
в) мутуализм;
г) протокооперация.

2. Пример целенаправленно созданного человеком сообщества – это …
а) биосфера;
б) биоценоз;
в) геобиоценоз;
г) агроценоз.

3. Примером биогеоценоза может служить:
а) аквариум с живущими в нем рыбами;
б) большой по площади участок леса
в) засохшее дерево;
г) космический корабль;

4. Типичной структурой биоценоза является структура, состоящая из
а) консументов и редуцентов
б) продуцентов и консументов
в) продуцентов, консументов и редуцентов
г) возможны разные варианты

5. Агроценоз отличается от естественного биогеоценоза
а) меньшим количеством популяций
б) необходимостью дополнительных затрат энергии
в) преобладанием искусственного отбора
г) верны все ответы

6. Взаимодействие растений и клубеньковых бактерий является примером
а) паразитизма
б) симбиоза
в) конкуренции
г) комменсализма

7. Наибольшую биомассу в биоценозе луга имеют:
а) зеленые растения
б) травоядные животные
в) плотоядные животные

г) бактерии гниения

8. Выделите тезис, с которым вы не согласны. Пищевые отношения в природе типа "хищник-жертва"
а) поддерживают целостность экологической системы
б) создают условия для круговорота веществ
в) помогают выработать приспособления к выживанию
г) регулируют численность обоих видов

9. К наиболее ярким проявлениям эвтрофикации водоемов не относится …
а) попадание в водоемы нефти;
б) увеличение концентрации биогенных элементов;
в) процессы вторичного загрязнения воды;
г) летнее цветение воды.

10. Для животных ресурсом не является:
а) вода
б) органические вещества
в) солнечная энергия
г) используются все эти ресурсы

Раздел 5. Экосистемы.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

– Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;

– Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 c. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

Тема 5.1. Составные компоненты экосистемы и основные факторы, обеспечивающие её существование.

1. Понятие «экосистема»
2. Основные характеристики экосистем.
3. Классификация экосистем.
4. Правила полноты составляющих.

Тема 5.2. Основные этапы использования вещества и энергии в экосистемах.

1. Пищевые цепи, пищевые сети.
2. Трофические уровни.
3. Экологические пирамиды.
4. Биологическая продуктивность экосистем.

Тема 5.3. Динамика развития экосистем.

1. Динамика экосистем.
2. Экологическая сукцессия.
3. Искусственные экосистемы.

Раздел 6. Биосфера Земли.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

- Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;
- Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 с. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

1. Общее представление о биосфере.
2. Границы биосферы.
3. Характеристика и функции живого вещества.
4. Принципы, положенные в основу учения о биосфере.
5. Понятие о биологическом круговороте.
6. Круговорот азота, кислорода, углерода.
7. Эволюция и охрана биосферы.

Раздел 7. Биосфера Земли.

Цель: накопление, систематизация и закрепление знаний по теме, приобретение навыков работы с литературой.

Задания

Самостоятельное изучение тем курса:

- Основы геоэкологии: учебник /Г. Н. Голубев. – 2-е изд., стер. – Москва: Кнорус, 2015.;
- Карпенков С.Х. Экология [Электронный ресурс]: учебник/ Карпенков С.Х. – Электрон. текстовые данные. – М.: Логос, 2014. – 400 с. – Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/21892.html . – ЭБС «IPRbooks»

Вопросы для проведения опроса:

Тема 7.1. Экологические проблемы обеспечения человечества энергией.

1. Энергетика. Современные проблемы
2. Основы энергосбережения

Тема 7.2. Экологические основы рационального использования минеральных и биологических ресурсов.

1. Понятие о природных ресурсах. Классификация природных ресурсов.
2. Минеральные ресурсы и их использование.
3. Биоресурсы, их компоненты, роль и охрана биоресурсов.
4. Понятие о биоразнообразии, его сохранение и использование.

Тема 7.3. Пищевые ресурсы человечества.

1. Роль питания в состоянии здоровья и работоспособности человека.
2. Извлечение и получение пищевых ресурсов
3. Проблемы питания и производства сельхозпродукции

Вопросы для коллоквиума:

1. Природные ресурсы и их классификация: биологические, минеральные, энергетические. Проблема истощения природных ресурсов.
2. Основные направления природопользования. Понятия о нерациональном и рациональном природопользовании. Основные задачи и принципы рационального природопользования.
3. Энергетика. Современные проблемы. Основы энергосбережения.
4. Минеральные ресурсы и их использование и воспроизводство.
5. Биоресурсы, их компоненты, роль и охрана биоресурсов.
6. Пищевые ресурсы человечества. Извлечение и получение. Проблемы питания и производства сельхозпродукции.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Оформление самостоятельной работы студента должно отвечать общим требованиям, установленным в университете Положением о требованиях к оформлению рефератов, отчетов по практике, контрольных, курсовых, дипломных работ и магистерских диссертаций.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методическому работе
_____В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.О.22 ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Автор: Соколова О.Г., к.э.н.

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией
Экономики и менеджмента	Горно-механического факультета
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Мочалова Л.А.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 02.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……3

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ……..…….6

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ…….8

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ……..…10

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ……14

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ……16

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……..….21

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 - лекционные, практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – дополнение лекционных материалов, подготовка к практическим занятиям, подготовка к решению кейс-задач, выполнение курсовых работ 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 «*Экономика и управление машиностроительным производством*» 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 *экзамена*.

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 «*Экономика и управление машиностроительным производством*» являются:

- повторение материала лекций;
- 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 домашнего письменного задания (практико-ориентированного задания);
- подготовка контрольной работы (реферата);
- подготовка к экзамену.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Тема 1. Предприятие как форма организации производства. Организационные формы машиностроительных предприятий

Приведите известную Вам классификацию предприятий.

Какие категории машиностроительных предприятий Вы знаете?

Перечислите основные показатели работы организаций добывающих производств России.

Тема 2. Основные фонды машиностроительных предприятий

Приведите классификацию основных фондов.

Какие виды оценки основных фондов Вы знаете?

Охарактеризуйте методы расчета амортизационных отчислений для различных групп машиностроительных предприятий.

Охарактеризуйте показатели оценки использования основных фондов.

Тема 3. Оборотные средства предприятия

Поясните экономическое содержание оборотных средств.

Опишите известные Вам методы расчета нормативов.

Перечислите показатели эффективности использования оборотных средств.

Как можно ускорить оборачиваемость оборотных средств?

Тема 4. Трудовые ресурсы машиностроительной промышленности. Оплата труда работников машиностроительных предприятий

Приведите классификацию кадров машиностроительной промышленности.

В чем отличие явочного и списочного состава работников?

Как рассчитывается производительность труда?

Охарактеризуйте основные формы и системы оплаты труда машиностроительного предприятия.

Тема 5. Себестоимость продукции машиностроительного предприятия

Перечислите виды себестоимости.

Перечислите известные Вам статьи затрат.

В чем особенность формирования затрат в машиностроительных отраслях?

Тема 6. Прибыль предприятия

Охарактеризуйте различные виды прибыли.

Охарактеризуйте особенности налогообложения прибыли.

Опишите порядок расчета чистой прибыли.

Как осуществляется распределение прибыли?

Тема 7. Инвестиционная деятельность машиностроительного предприятия

Охарактеризуйте различные виды инвестиций.

Охарактеризуйте составляющие инвестиционного проекта.

Как определяется эффективность инвестиционных проектов?

Перечислите показатели оценки коммерческой эффективности инвестиционных проектов.

Тема 8. Основные положения, понятия, определения в менеджменте машиностроительного предприятия

В чем отличие менеджмента и управления?

Охарактеризуйте управление как процесс.

В чем заключаются особенности управления машиностроительным предприятием?

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Предприятие как форма организации производства. Организационные формы машиностроительных предприятий

Предприятие
Машиностроительное предприятие
Объединение предприятий

Тема 2. Основные фонды машиностроительных предприятий

Основные фонды предприятия
Баланс движения основных фондов
Износ основных фондов
Амортизация основных фондов

Тема 3. Оборотные средства предприятия

Оборотные средства
Нормирование оборотных средств
Норматив
Оборачиваемость оборотных средств

Тема 4. Трудовые ресурсы машиностроительной промышленности. Оплата труда работников машиностроительных предприятий

Кадры предприятия
Явочный состав работников
Списочный состав работников
Производительность труда
Выработка
Трудоемкость
Заработная плата
Система оплаты труда

Тема 5. Себестоимость продукции машиностроительного предприятия

Себестоимость продукции (работ, услуг)
Калькуляция
Расходы на подготовительные работы
Расходы на добычу руды.
Расчет затрат на переработку руды
Прибыль (убыток) от реализации продукции

Тема 6. Прибыль предприятия

Прибыль
Экономическая прибыль
Порядок расчета чистой прибыли

Рентабельность производства
Рентабельность продукции
Рентабельность активов
Рентабельность продаж

Тема 7. Инвестиционная деятельность машиностроительного предприятия

Инвестиции
Инвестиции в реальные активы
Инвестиционный проект
Жизненный цикл проекта
ТЭО проекта
Коммерческая эффективность инвестиционных проектов

Тема 8. Основные положения, понятия, определения в менеджменте машиностроительного предприятия

Менеджмент
Управление
Планирование
Организация
Мотивация
Контроль

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 (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• 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 и руководителями ВКР, 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

Тема 2. Основные фонды машиностроительных предприятий

Задание 1.

Оптовая цена оборудования 35 млн руб. Транспортные затраты 2,5%, затраты на монтаж 7% от его оптовой цены, срок фактической эксплуатации – 3 года. Для данной группы объектов определен срок полезного использования 10 лет.

Необходимо определить:

1. Коэффициент износа оборудования.
2. Остаточную стоимость оборудования.
3. Годовую сумму амортизационных отчислений (амортизация начисляется линейным способом).

Задание 2.

Оптовая цена оборудования 25 млн руб. Транспортные затраты 1,5%, затраты на монтаж 4% от его оптовой цены, срок фактической эксплуатации – 7 лет. Для данной группы объектов определен срок полезного использования 15 лет.

Необходимо определить:

1. Коэффициент износа оборудования.
2. Остаточную стоимость оборудования.
3. Годовую сумму амортизационных отчислений (амортизация начисляется линейным способом).

Задание 3.

На начало года стоимость ОПФ составляла 260 млн руб. В феврале предприятие приобрело оборудования на сумму 56 млн руб., а в июле было ликвидировано оборудования на сумму 24 млн руб. Норма амортизации – 10 %. За год предприятие выпустило продукции на сумму 346 млн. руб. Среднесписочная численность промышленно-производственного персонала 155 чел.

Необходимо определить:

1. Среднегодовую стоимость основных производственных фондов предприятия.
2. Сумму амортизационных отчислений за год (линейным методом).
3. Показатели эффективности использования основных фондов предприятия: фондоотдачу, фондоемкость и фондовооруженность.

Задание 4.

На начало года стоимость ОПФ составляла 180 млн руб. В марте предприятие приобрело оборудования на сумму 46 млн руб., а в августе было ликвидировано оборудования на сумму 34 млн руб. Норма амортизации – 10

%. За год предприятие выпустило продукции на сумму 256 млн. руб. Среднесписочная численность промышленно-производственного персонала 80 чел.

Необходимо определить:

1. Среднегодовую стоимость основных производственных фондов предприятия.

2. Сумму амортизационных отчислений за год (линейным методом).

3. Показатели эффективности использования основных фондов предприятия: фондоотдачу, фондоемкость и фондовооруженность.

Задание 5. Первоначальная стоимость группы объектов на 1 января составляла 2500 тыс. руб., срок фактической эксплуатации – 4 года. Срок полезного использования для данной группы объектов составляет 10 лет

Рассчитайте остаточную стоимость и коэффициент износа на ту же дату, если амортизация начисляется:

а) линейным способом;

б) способом уменьшаемого остатка (коэффициент ускорения равен 2);

в) способом суммы чисел лет срока полезного использования.

Задание 6. Информация об основных средствах предприятия в соответствии с классификацией по вещественно-натуральному составу на 1 января приведена в таблице:

Группы основных средств	Стоимость, млн. руб.
Здания	25
Сооружения	8
Машины и оборудование	58
Транспортные средства	7
Инвентарь производственный и хозяйственный	5
Прочие основные средства	3

В конце феврале текущего года было сдано в эксплуатацию здание цеха стоимостью 15 млн. руб.; в начале мая закуплено оборудование общей стоимостью 20 млн. руб.; в конце сентябре списано морально и физически устаревшее оборудование на сумму 4млн руб.

Необходимо определить:

1.структуру основных средств на начало и на конец года,

2. долю активной и пассивной части основных фондов на начало и конец года,

3. значения коэффициентов выбытия и обновления основных средств.

Тема 3. Оборотные средства предприятия

Задание 1. Годовой план реализации продукции установлен в сумме 15200 тыс. руб. Норматив оборотных средств запланирован в сумме 360 тыс. руб. В результате проведения организационно-технических мероприятий длительность оборота сократилась на 3 дня. Необходимо определить:

1. Плановую и фактическую длительность одного оборота.
2. Величину абсолютного и относительного высвобождения оборотных средств в результате сокращения длительности оборота оборотных средств.

Задание 2. Определите и проанализируйте структуру оборотных средств предприятий по следующим данным:

Элементы оборотных средств	Сумма, млн. руб.	
	Предприятие 1	Предприятие 2
Производственные запасы	94,70	94,92
Незавершенное производство	16,15	27,64
Расходы будущих периодов	134,15	5,32
Готовая продукция	17,65	30,02
Прочие	87,35	62,1

Задание 3. Рассчитайте среднеквартальные и среднегодовые остатки оборотных средств, а также оборачиваемость оборотных средств (длительность оборота) и коэффициент оборачиваемости за год, используя следующие данные:

Остатки оборотных средств		Объем реализованной продукции	
Дата	Сумма, тыс. руб.	квартал	Сумма, тыс. руб.
1 января 2019 г.	2 500	I	3 200
1 апреля 2019 г.	2 600	II	3 700
1 июля 2019 г.	2 400	III	3 100
1 октября 2019 г.	2 400	IV	3 300
1 января 2020 г.	2 500		

Тема 4. Трудовые ресурсы машиностроительной промышленности. Оплата труда работников машиностроительных предприятий

Задание 1.В 2 квартале предприятие выпустило продукции на 300 тыс. руб., выработка продукции на одного работника составила 5 тыс. руб./чел. В 3 квартале предприятие планирует выпустить продукции больше на 12% и одновременно снизить численность работников на 4 чел. Определить выработку на одного работника в 3 квартале и планируемый прирост производительности труда в процентах.

Задание 2. Выявить зависимость между нормой времени и нормой выработки, если норма времени на единицу изделия при базовых условиях равна 20 мин. В плановом периоде предусматривается ее снижение на 15%. Как при этом изменится норма выработки? Продолжительность смены 8 часов.

Задание 3. В базовом году на шахте работало 1200 чел. Объем добычи составил 750 тыс. т/год. В плановом году намечено увеличить добычу руды на 7 %, а число работников сократить на 12%. Определить**:** 1) трудоемкость добычи в базовом и плановом годах; 2) изменение трудоемкости работ в плановом году по сравнению с базовым годом.

Задание 4. Определить среднесписочную численность работников за сутки на основе следующих данных. Сменное производственное задание – 80 штук изделий. Норма времени на изготовление одного изделия – 20 мин. Режим работы предприятия: количество смен - 3, продолжительность рабочей смены – 8часов. Коэффициент списочного состава – 1,32.

Задание 5. Определить сдельную и повременную годовую заработную плату бригады из 6 чел за год. Тарифная ставка каждого рабочего – 170 руб./час. Отработано каждым рабочим за год - 1780 час. Всем рабочим выплачивается премия в размере 25 % от тарифного заработка. Районный коэффициент – 1,15. Норма выработки одного рабочего 5 т/час. Объем работы на одного человека в год – 2,2 тыс. т.

Тема 5. Себестоимость продукции машиностроительного предприятия

Задание 1. В цехе произведено 250 шт. изделия А и 350 шт. изделия Б. Исходные данные по затратам приведены в таблице:

Показатели	Всего, тыс. руб.	В том числе:	
		изделие А	изделие Б
1. Заработная плата производственных рабочих	220	130	90
2. Основные материалы	150	85	65
3. Зарплата административно-управленческого персонала	80	–	–
4. Заработная плата вспомогательных рабочих	80	–	–
5. Амортизация здания	70	–	–
6. Электрическая энергия на технологические цели	110	50	60
7. Электрическая энергия на освещение цеха	40	–	–
8. Амортизация оборудования	180	–	–
9. Прочие затраты	200	–	–

Составьте смету затрат на производство по цеху и калькуляцию себестоимости каждого вида продукции.

Задание 2. При производстве 150 единиц продукции постоянные затраты составляют 25000 руб., переменные затраты 200 руб. цена за единицу продукции составляет 500 руб.

Необходимо определить точку безубыточности в стоимостном и натуральном выражении. Построить график безубыточности. Сделать вывод.

Тема 8. Основные положения, понятия, определения в менеджменте машиностроительного предприятия

Задание 1. Руководству предприятия представлены 2 проекта организации производства товара «А». Показатели по проектам представлены в таблице:

Показатели	**Проект 1**	**Проект 2**
Объем спроса, шт./год	1200	5000
Цена, руб/шт	10000	10000
Постоянные затраты, руб. в том числе:		
- затраты на НИОКР	2 000 000	4 500 000
- обслуживание и ремонт	500 000	1 000 000
- общезаводские накладные расходы	1 000 000	2 500 000
- прочие постоянные расходы	1 000 000	2 000 000
Переменные затраты на ед. продукции, руб/шт. в том числе:		
- сырье, основные материалы	2000	2500
- вспомогательные материалы	1000	800
- заработная плата рабочих	3700	3000
- энергия на технологические нужды	500	400

Сравнить и выбрать наиболее эффективный вариант производства продукции «А». Для оценки эффективности использовать метод расчета точки безубыточности.

Задание 2. Используя матрицу БКГ, сформируйте товарную стратегию предприятия по продуктам А, В и С. Данные для расчетов приведены в таблице:

Продукт	Объём продаж предприятия, млн. руб.		Емкость рынка в 2019 г., млн руб.	Объем продаж конкурента в 2019 г., млн руб.
	2018 г.	2019 г.		
A	3,5	3,15	8,54	2,25
B	0,7	0,95	2,7	0,64
C	0,12	0,23	2,35	0,3

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *экзамену* по дисциплине «*Экономика и управление машиностроительным производством*» 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 «*Экономика и управление машиностроительным производством*».

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 *экзамене* 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 *экзамене* (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 *экзамену* 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»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

ЗАДАНИЯ
К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Б1.О.23 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией факультета
Инженерной графики	Горно-механический
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Шангина Е.И.	Осипов П.А
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 26.08.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

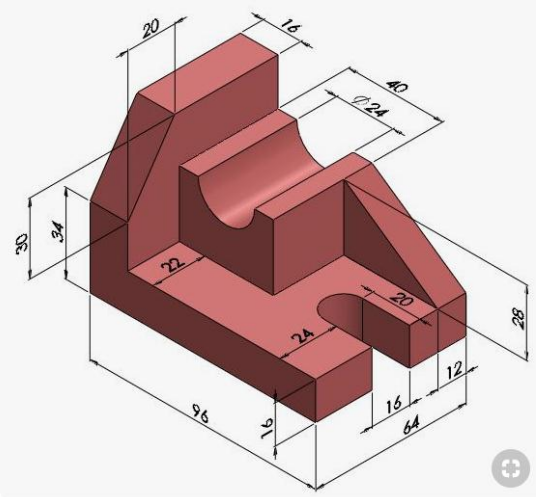
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

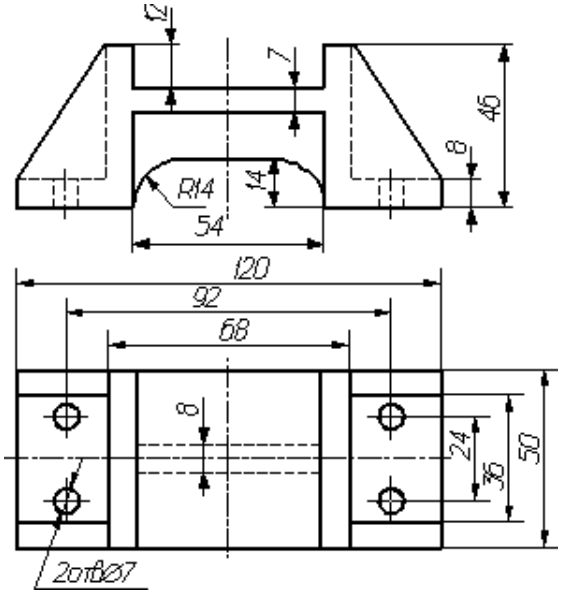
ВАРИАНТ № 1

1. Что такое жизненный цикл изделия (ЖЦИ)? Назовите этапы ЖЦИ.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





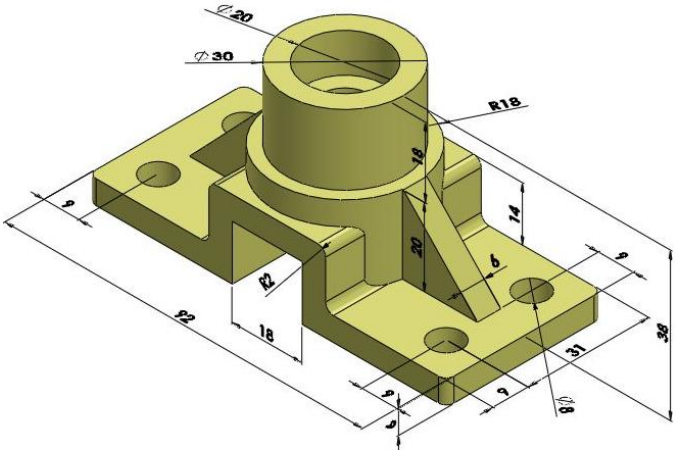
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

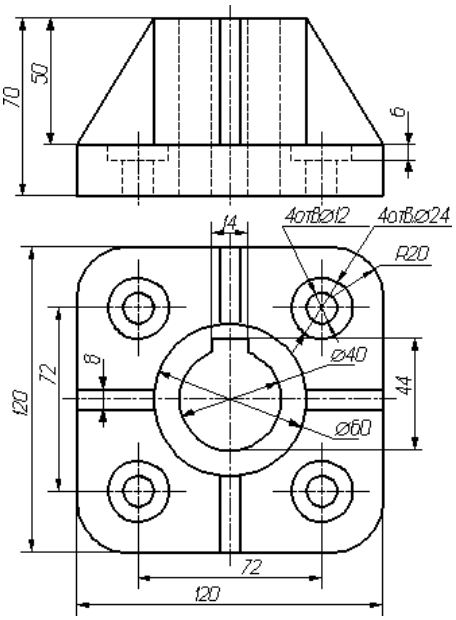
ВАРИАНТ № 2

1. Что такое геометрическая модель? Назовите основателей компьютерной графики. История развития компьютерной графики. Что такое векторная и растровая графика? Приведите примеры изобразительной, научной антропогенной графики.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





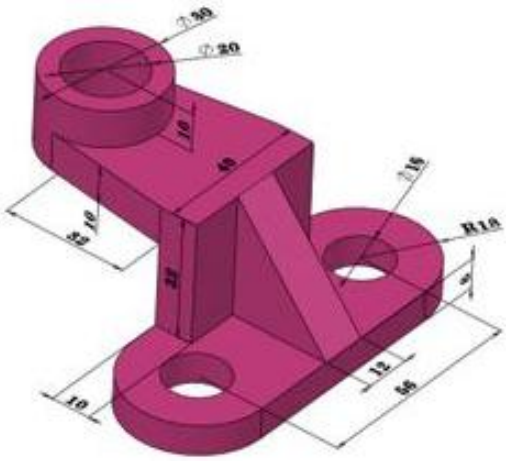
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

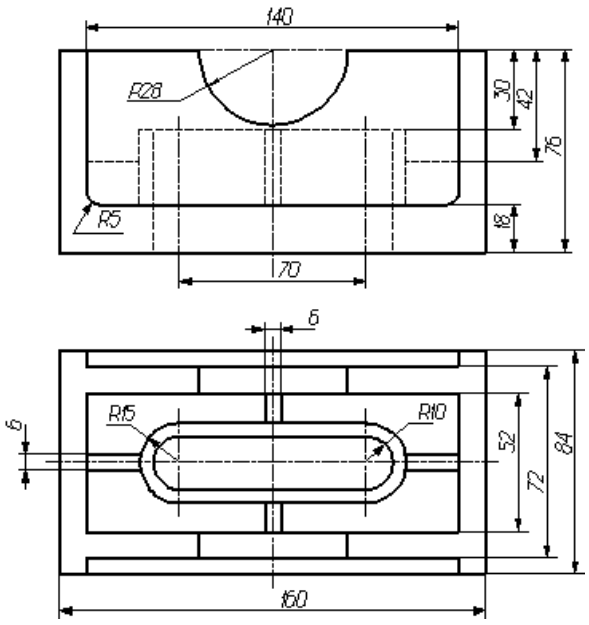
ВАРИАНТ № 3

1. Назовите области применения систем конструкторско-технологической подготовки производства. История развития САПР. Роль САПР в производстве изделий. Укажите основные принципы САПР. Укажите основные признаки классификации САПР.

2.По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





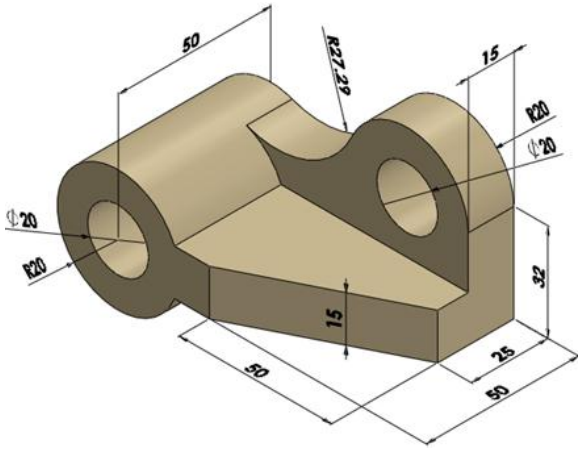
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

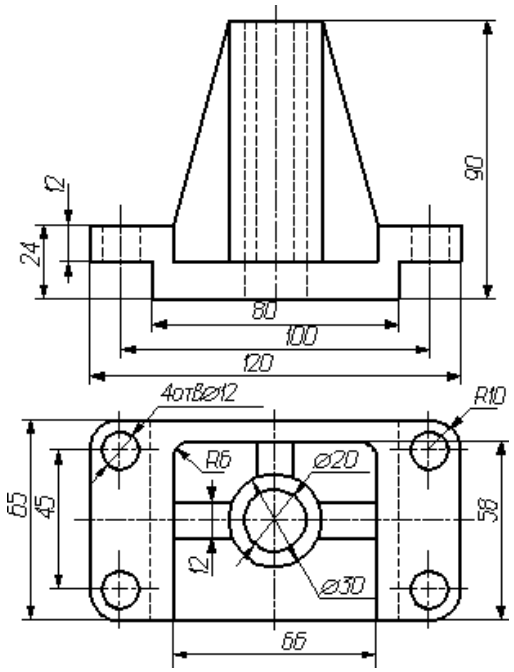
ВАРИАНТ № 4

1. Что называют жизненным циклом изделия (ЖЦИ)? Назовите его основные этапы. Перечислите основные системы автоматизации, использующиеся на различных этапах ЖЦИ. Каковы основные функции каждой из них?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





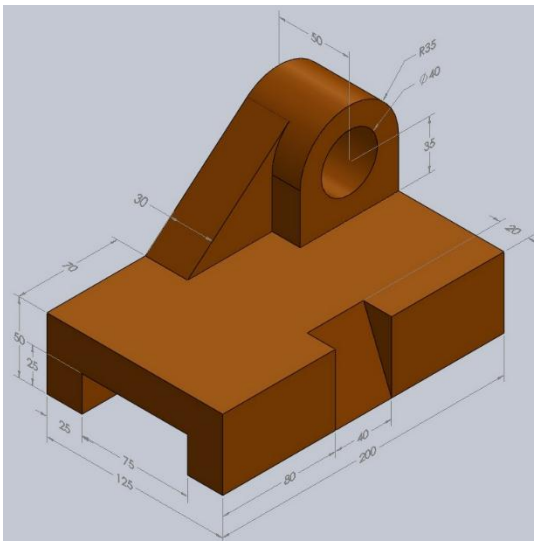
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

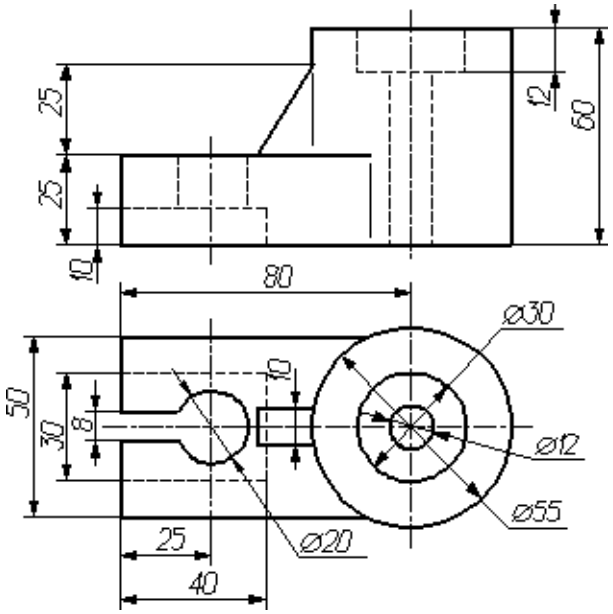
ВАРИАНТ № 5

1. Что такое CALS-технологии. Укажите основной стандарт CALS-технологий. Что он определяет?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





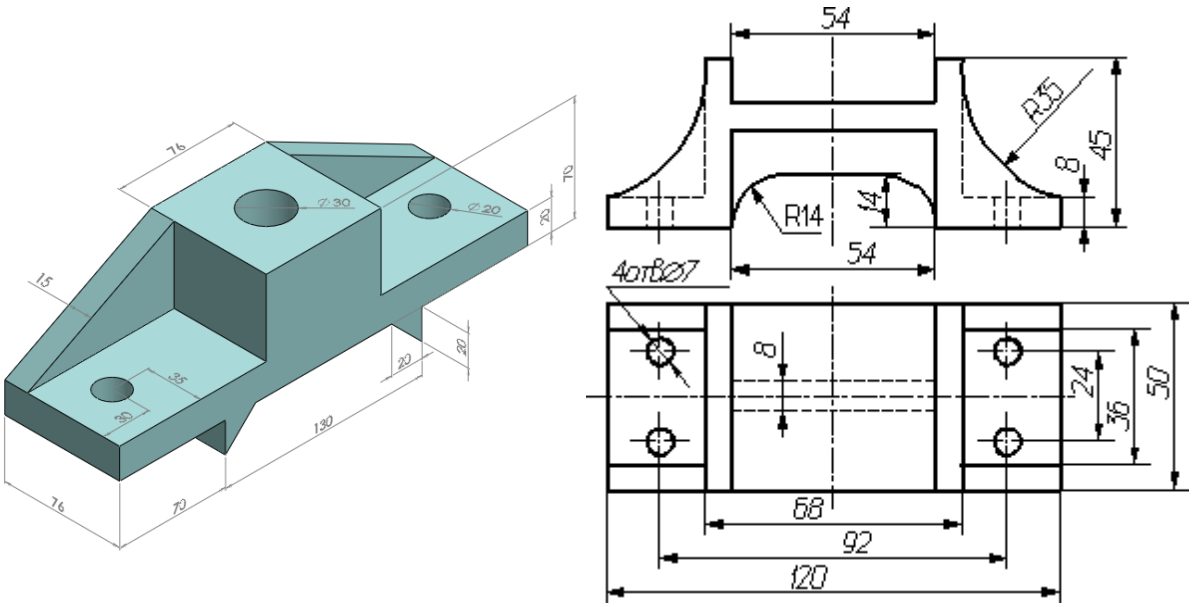
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

ВАРИАНТ № 6

1. Перечислите виды обеспечения САПР и дайте их краткую характеристику. Охарактеризуйте классы САПР: высшего, среднего, низшего уровня. Приведите примеры.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.



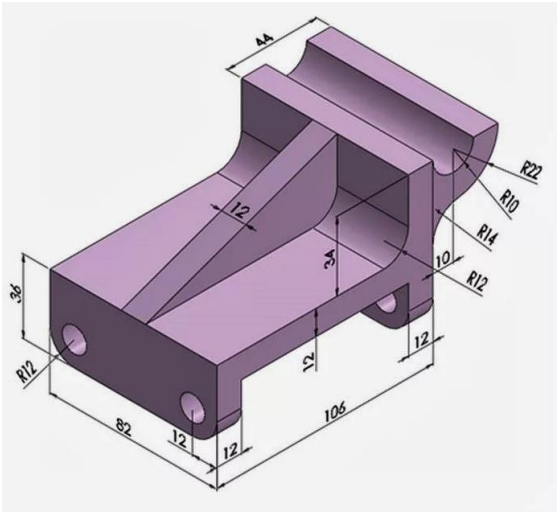
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

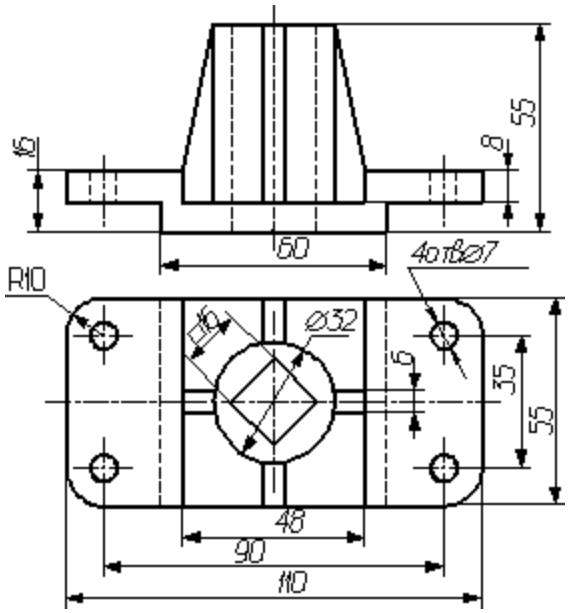
ВАРИАНТ № 7

1. Интегрированные САПР. Преимущества внедрения. Примеры. Что такое САПР ТП? Какие функции они выполняют? С решением какой научной проблемы связано основное направление совершенствования САПР ТП?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





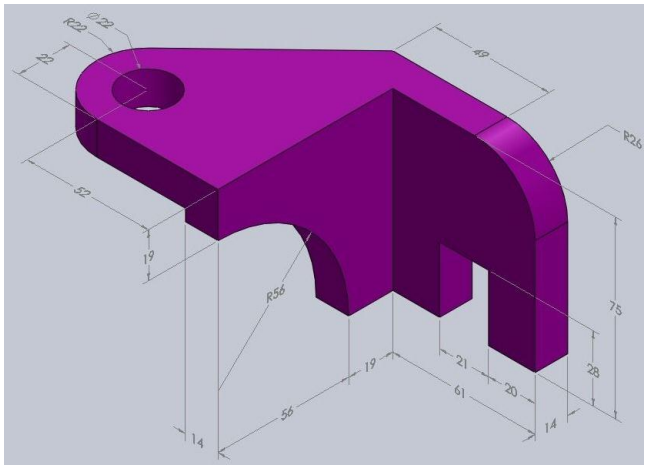
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

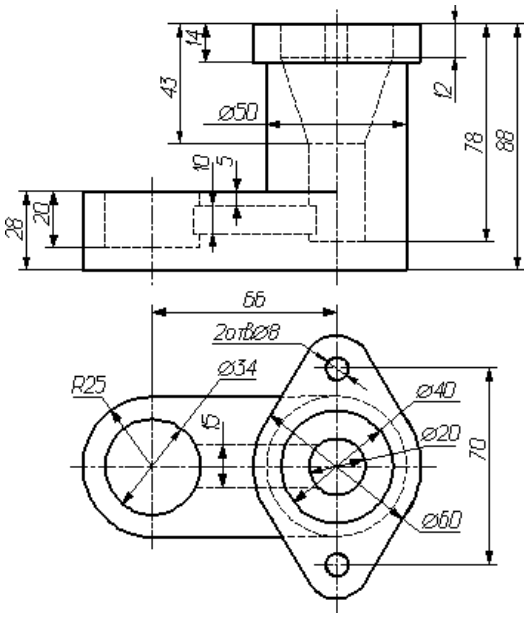
ВАРИАНТ № 8

1. По каким основным признакам классифицируются САПР ТП? Каковы общесистемные принципы построения САПР ТП? Что включает в себя программно-методический комплекс САПР ТП? Каковы базовые методологии построения САПР ТП изделий машиностроения? Укажите методы автоматизированного проектирования ТП? Дайте их краткую характеристику.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





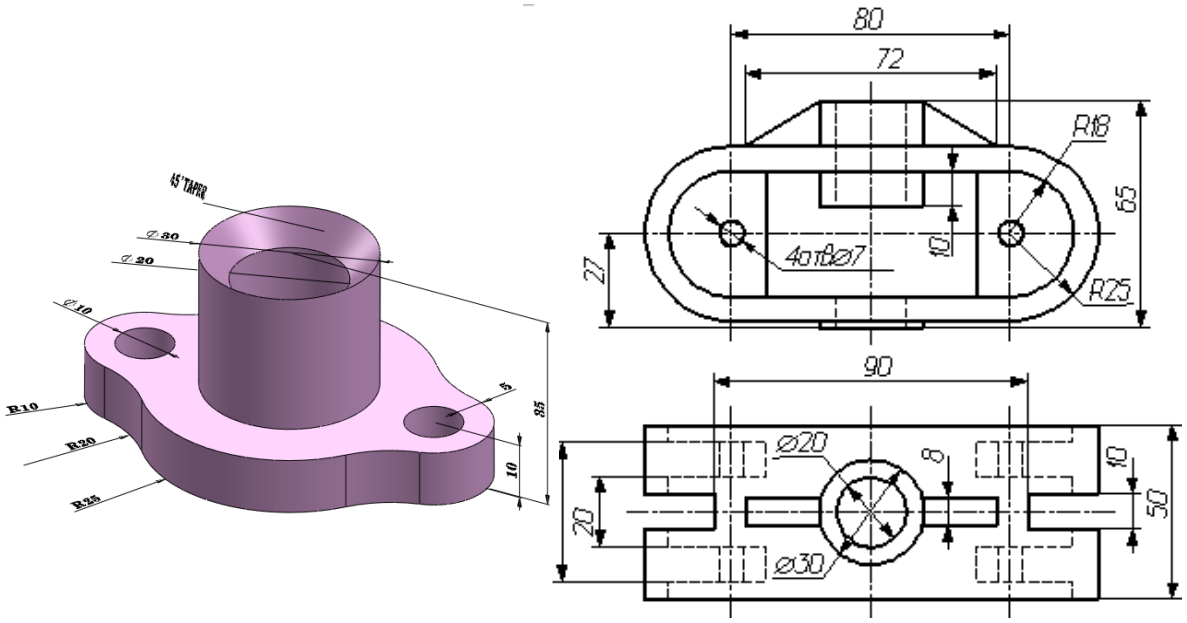
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

ВАРИАНТ № 9

1. Что понимается под цветовыми моделями? Компьютерная графика в конструкторско-технологической подготовке производства. Области применения.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.



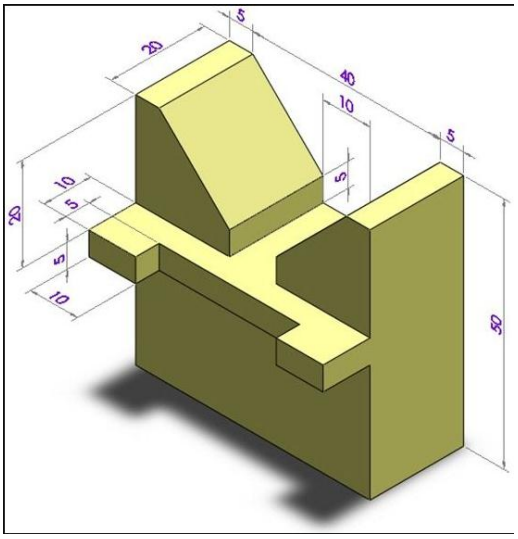
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

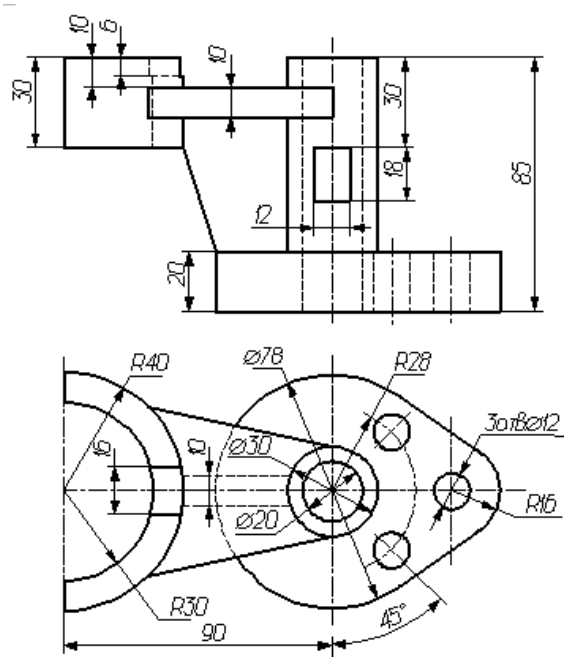
ВАРИАНТ № 10

1. Перечислить основные стадии ЖЦ сложных технических объектов. Перечислить основные классы информации, сопровождающей изделие на этапах ЖЦ. В чем суть стратегии CALS? Расшифровать понятие «CAD-системы». Расшифровать понятие «CAM-системы». Расшифровать понятие «CAE-системы». Расшифровать понятие «PDM-системы». Расшифровать понятие «CAPP -системы».

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





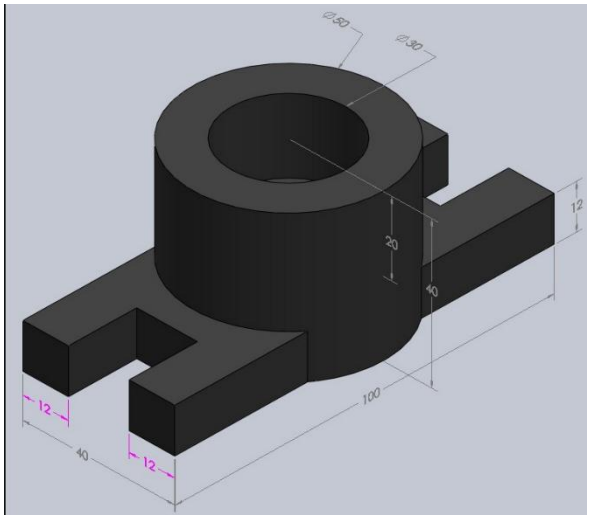
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

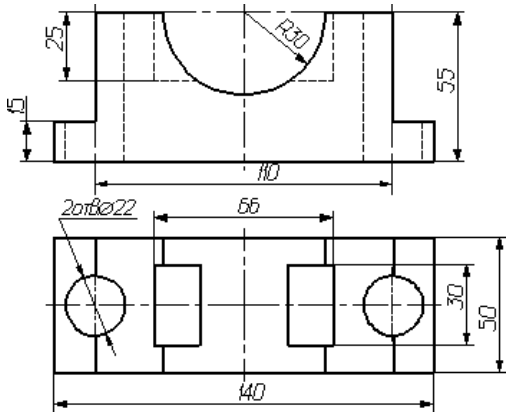
ВАРИАНТ № 11

1. Что входит в состав проектирующих подсистем в структуре САПР? Что входит в состав обслуживающих подсистем в структуре САПР? Перечислить виды обеспечения САПР. Основные требования и принципы, предъявляемые к современным САПР (не менее 5-ти из описанных в лекциях).

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





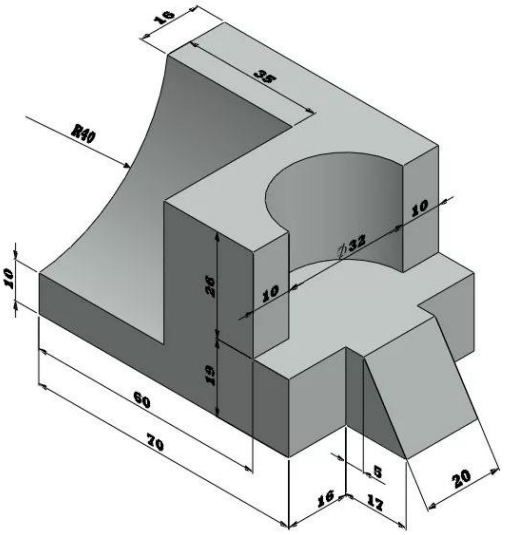
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

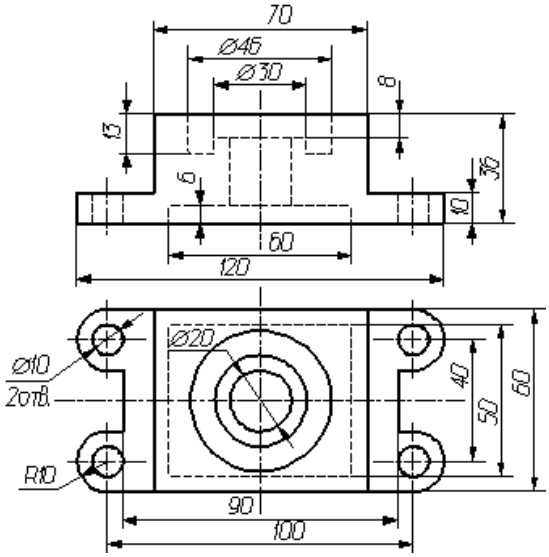
ВАРИАНТ № 12

1. Классификационные признаки и разновидности САПР по программным характеристикам.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





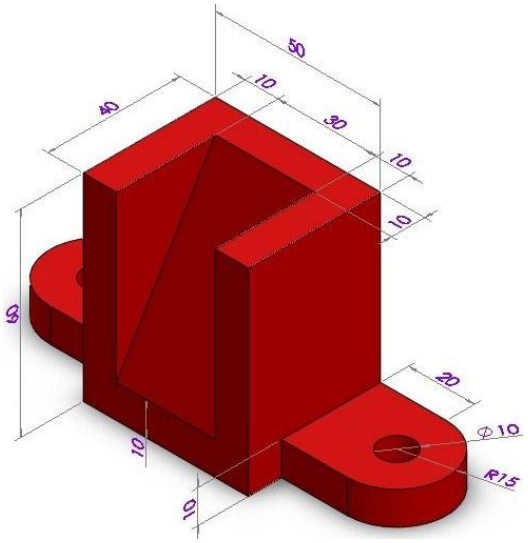
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

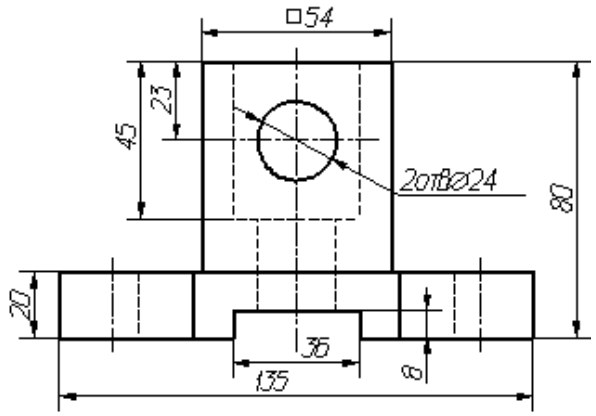
ВАРИАНТ № 13

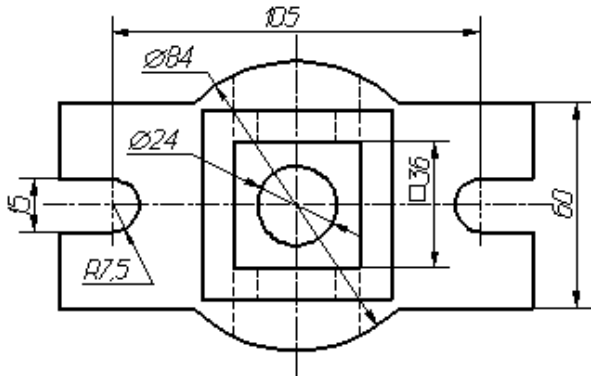
1. Что такое геометрическая модель детали (изделия)? Что может входить в состав технологических атрибутов геометрической модели? Основные процедуры, выполняемые в подсистемах геом. моделирования и машинной графики. Виды 3D моделей. Основные подходы к построению твердотельной модели детали.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.







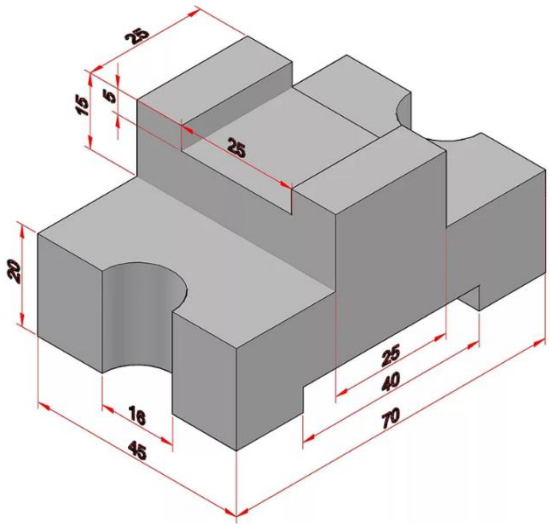
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

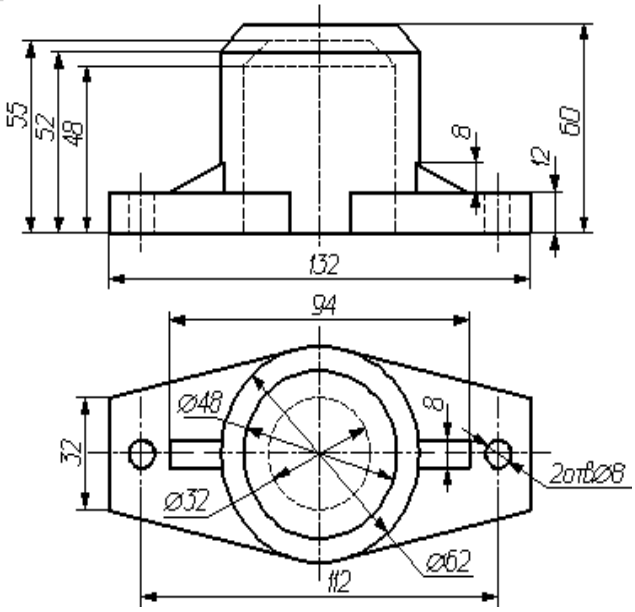
ВАРИАНТ № 14

1. Что такое параметрическое моделирование? Основные достоинства и возможности параметрического моделирования. В чем принцип ассоциативности в геометрическом моделировании. Привести примеры.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





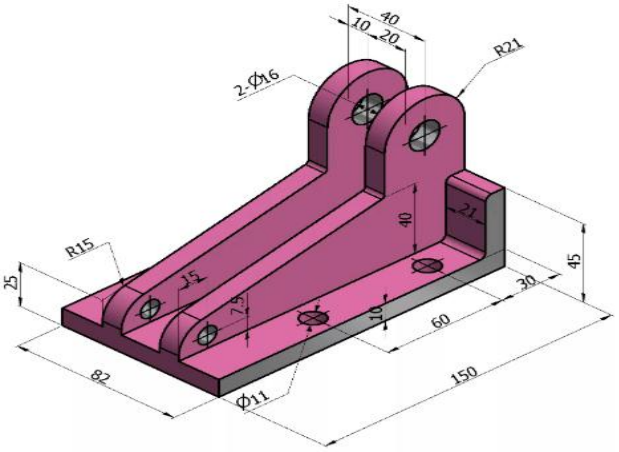
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

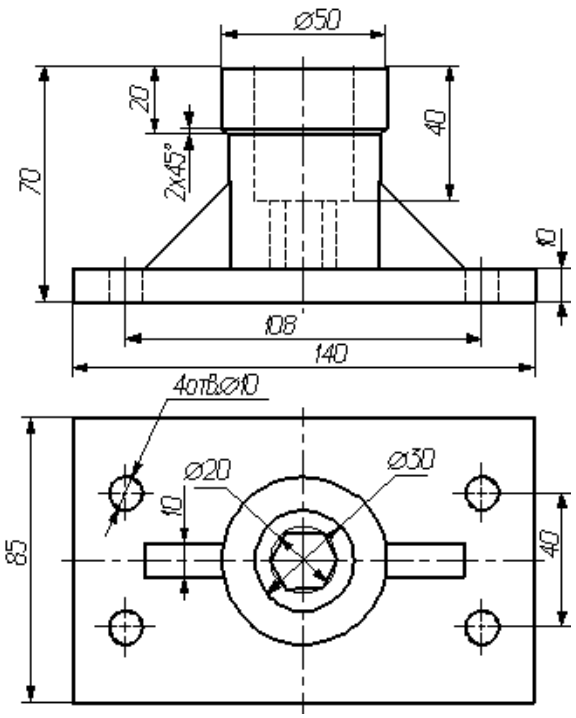
ВАРИАНТ № 15

1. Объяснить понятие «Большая сборка». Основные функции подсистемы анализа «больших сборок». Этапы подготовки чертежной документации. Этапы по проектирования технических объектов. Методы проектирования «сверху-вниз» и «снизу-вверх».

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





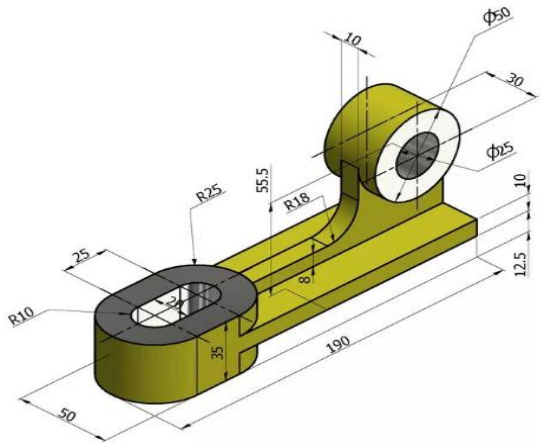
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

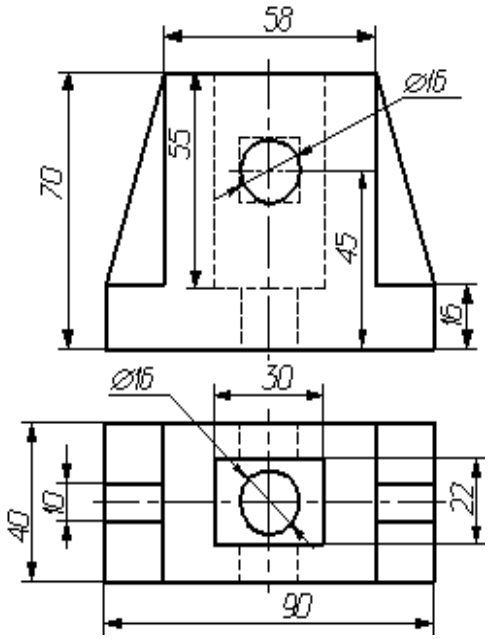
ВАРИАНТ № 16

1. Цели и способы автоматизации конструкторско-технологических работ. Классификация САПР. Стандарты обмена информацией. Преимущества и недостатки каркасной и полигональной аппроксимации трехмерной геометрии. Прямое моделирование и моделирование на основе истории построения.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





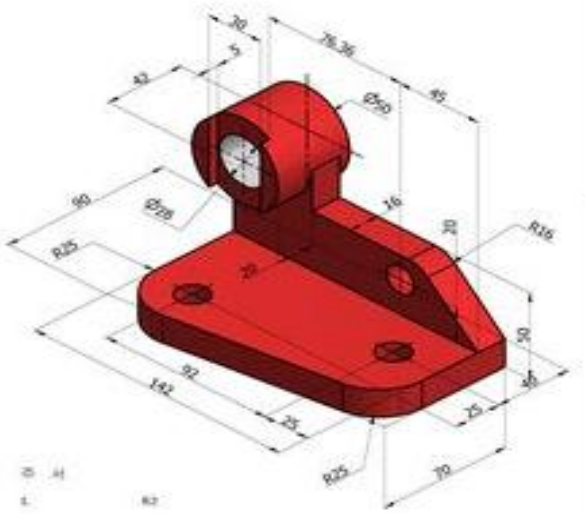
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

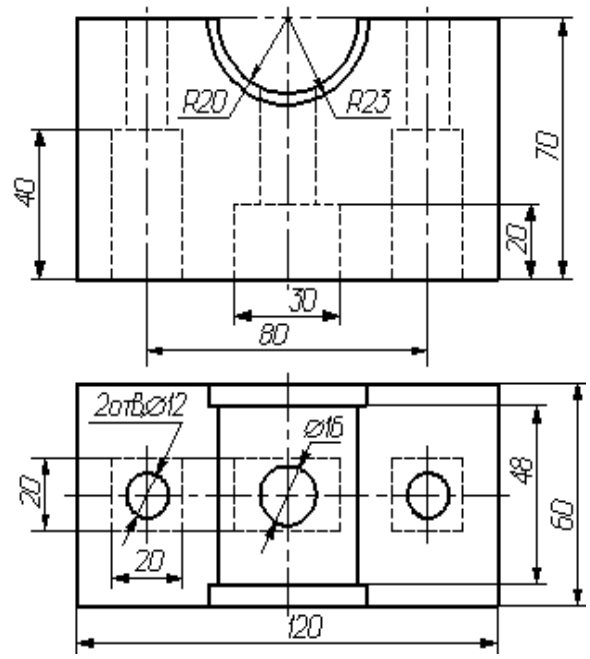
ВАРИАНТ № 17

1. Перечислите основные модели представления технологических знаний. Какие модели наиболее часто используют при разработке САПР ТП? Что такое база знаний? В состав каких компонент САПР ТП она входит? Какую функцию выполняют экспертные компоненты САПР ТП?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





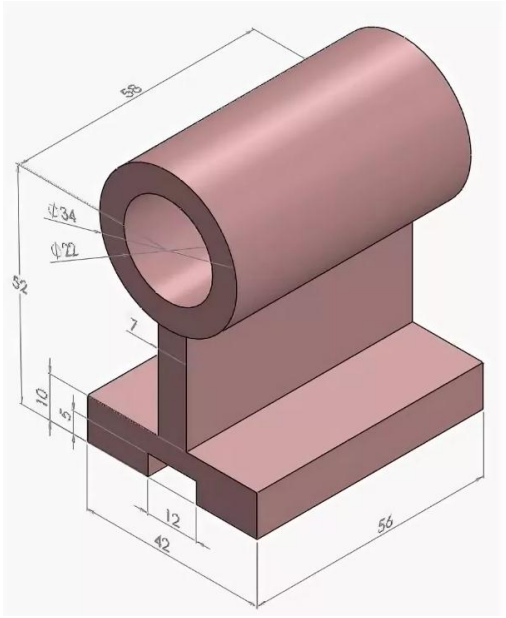
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

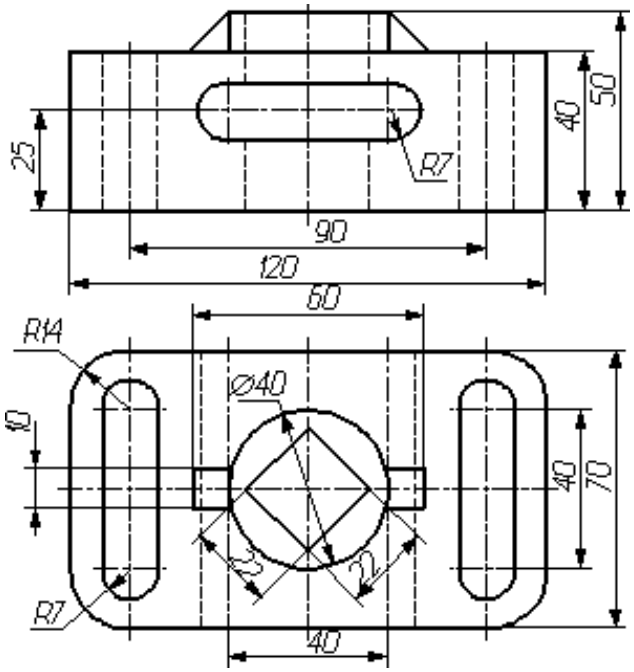
ВАРИАНТ № 18

1. Что включает в себя математическое обеспечение САПР ТП? Для чего используют структурно-логические модели? Какие виды структурно-логических моделей вы знаете? Что такое геометрически-технологическая модель предмета производства?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





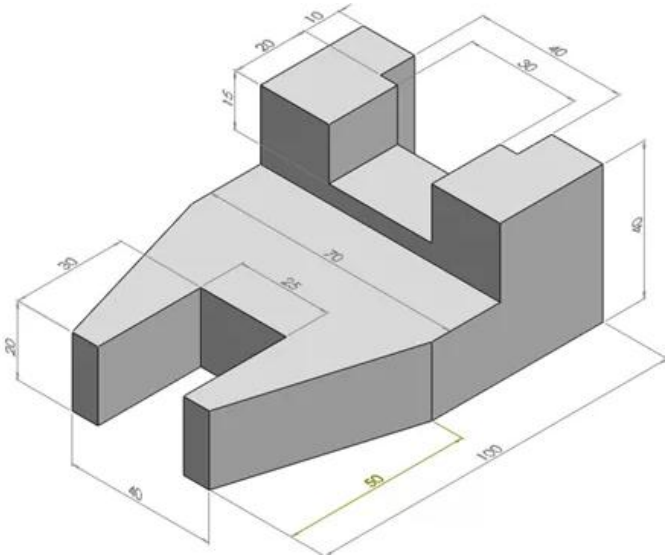
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

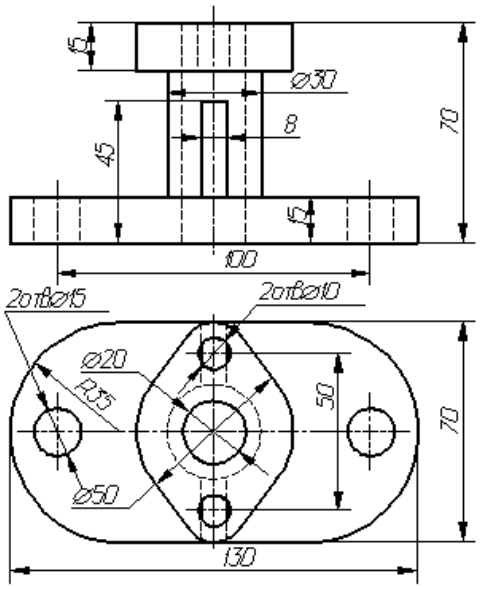
ВАРИАНТ № 19

1. Подходы к автоматизированной технологической подготовке производства. В чем суть проектирования методами «сверху вниз» и «снизу-вверх»? Какой этап предшествует техническому проектированию?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





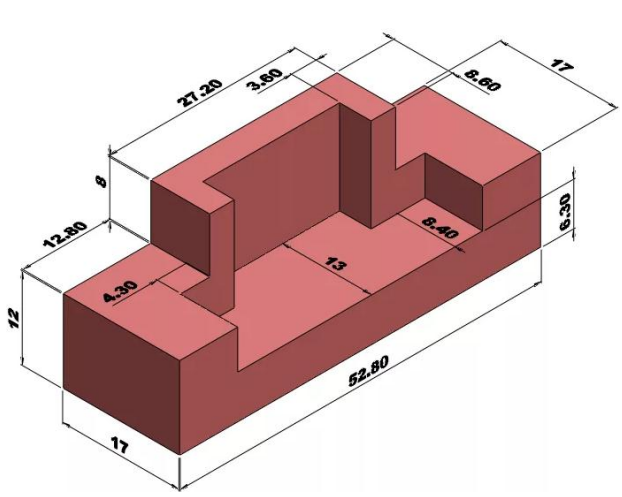
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

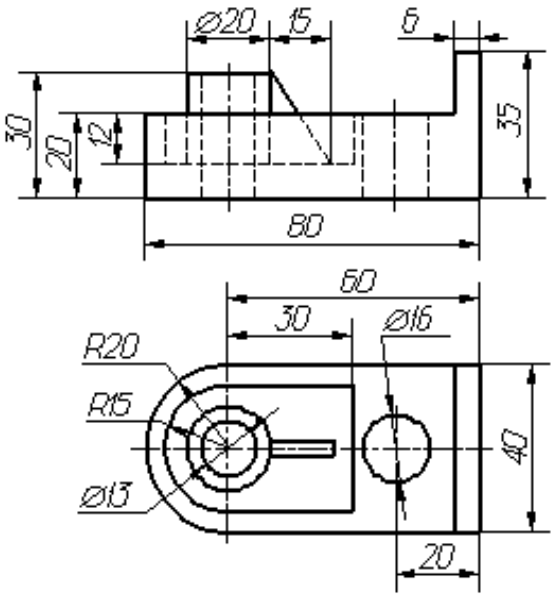
ВАРИАНТ № 20

1. Назовите основные этапы опытно-конструкторских работ. Перечислите основные цели автоматизации проектирования. Назовите основные методы уменьшения трудоемкости инженерного труда. Какими методами достигается улучшение качества проектирования?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





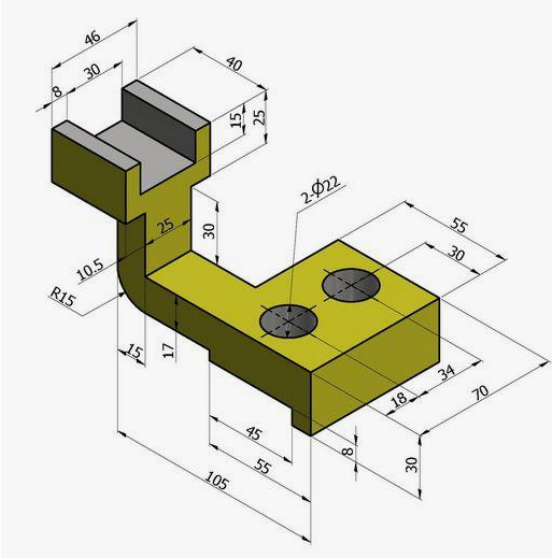
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

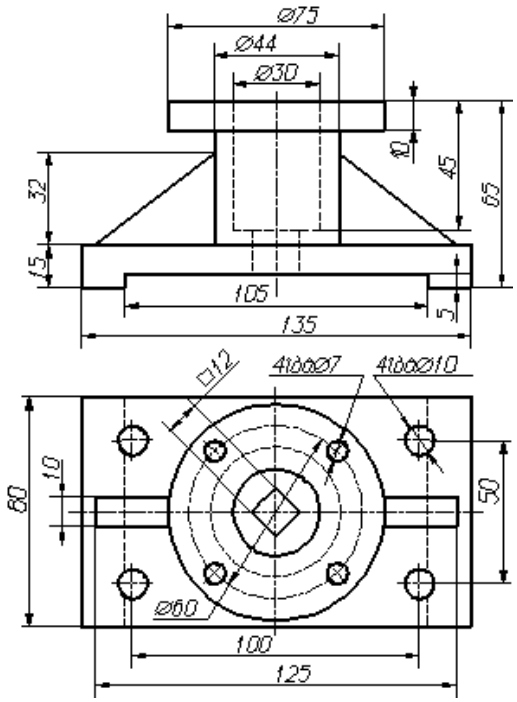
ВАРИАНТ № 21

1. Какие из перечисленных методов используются для сокращения трудоемкости проектных работ: автоматизация оформления проектной документации; совмещенное (параллельное) проектирование; вариативное проектирование и оптимизация.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





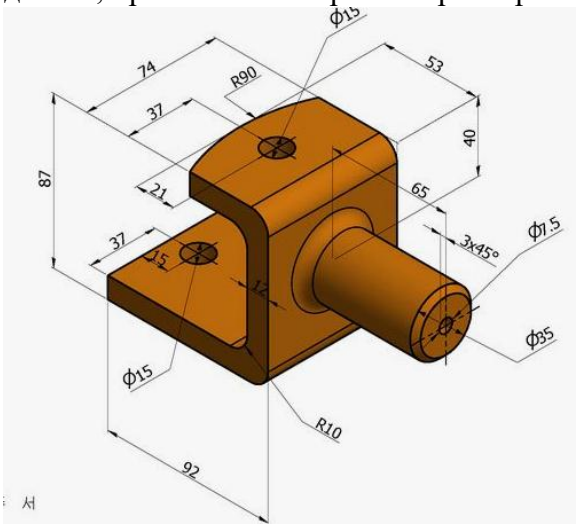
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

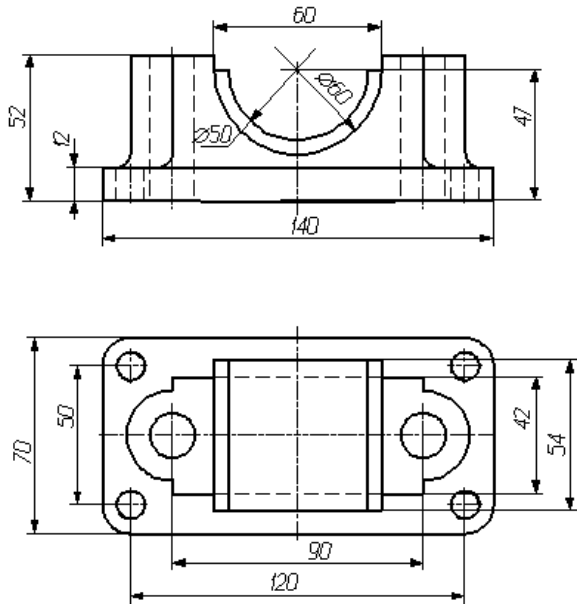
ВАРИАНТ № 22

1. На какие группы можно условно разделить системы автоматизированного проектирования? Какие задачи решают системы подготовки технической документации, САПР конструкций, технологической подготовки программ для станков с ЧПУ?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





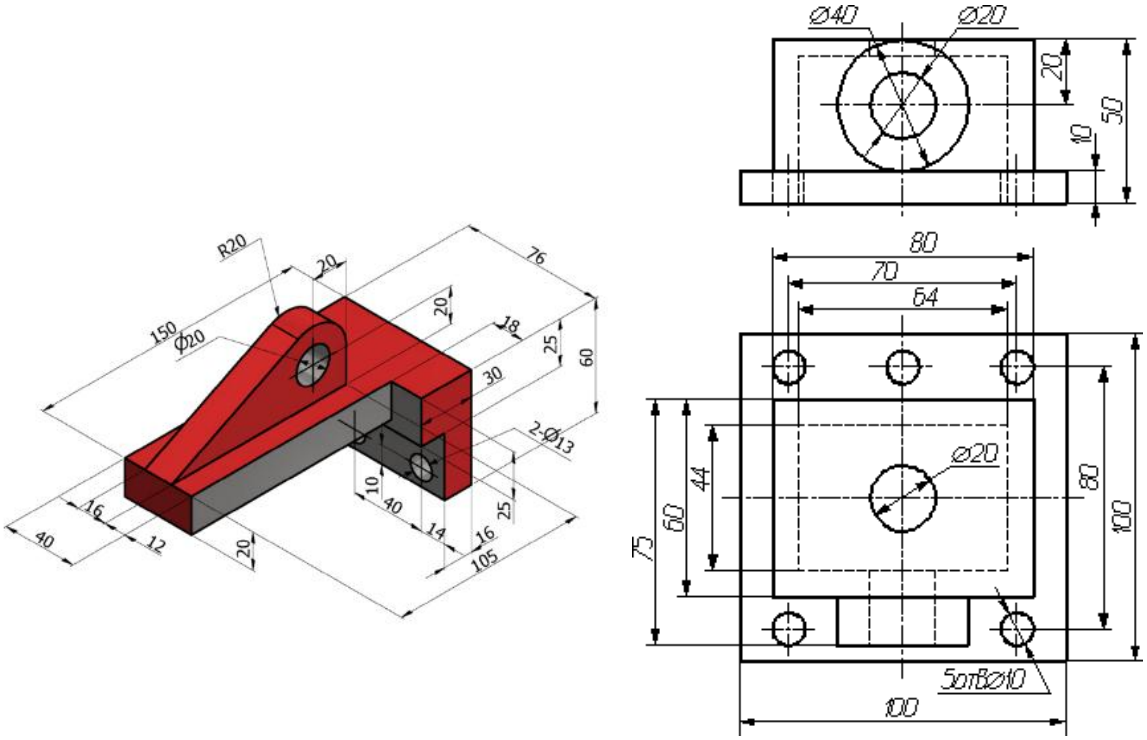
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

ВАРИАНТ № 23

1. Где используются CAD/CAM/CAE/CAPP - системы? Назовите несколько программных продуктов для разных уровней CAD/CAM/CAE - систем? какое место занимает система КОМПАС 3D/AutoCAD среди этих систем?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.



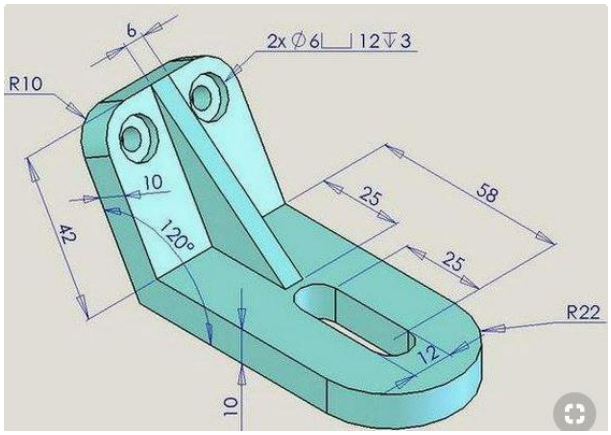
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

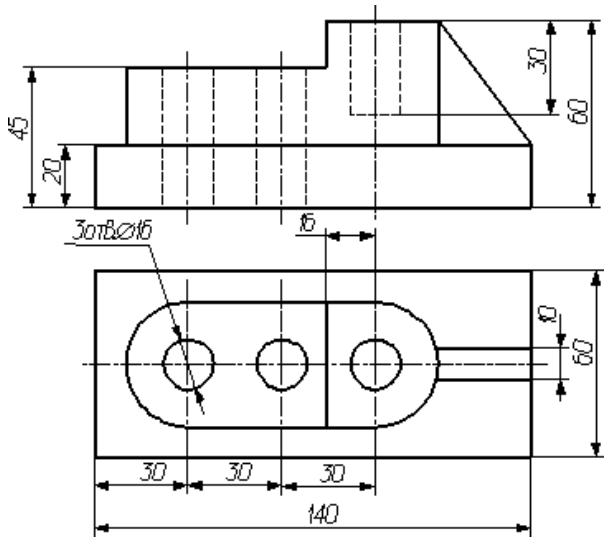
ВАРИАНТ № 24

1. Назовите функциональные возможности изученных систем конструкторско-технологической подготовки производства? Какие требования к оборудованию предъявляют системы конструкторско-технологической подготовки производства?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





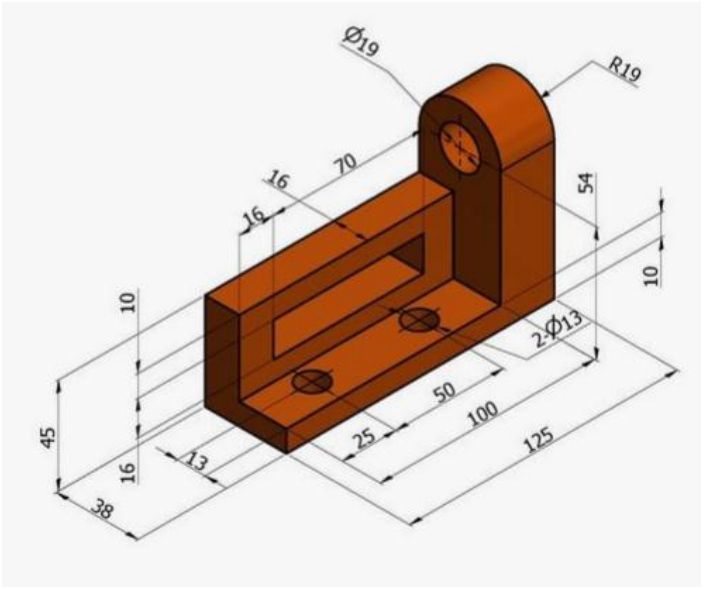
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

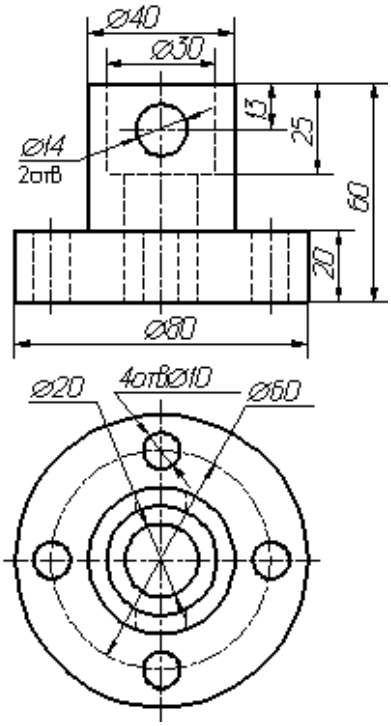
ВАРИАНТ № 25

1. В чем состоит отличие использования системы координат в документах трехмерных моделей от документов: чертеж, фрагмент? Перечислите команды управления изображением в документах детали и сборки. Укажите порядок действий при создании детали.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





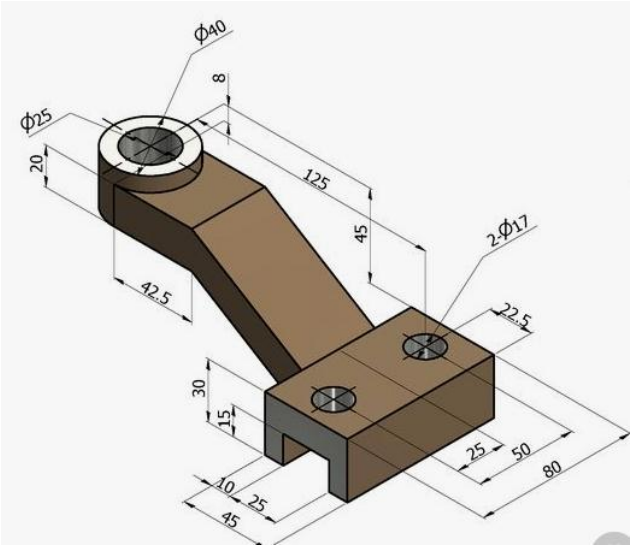
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

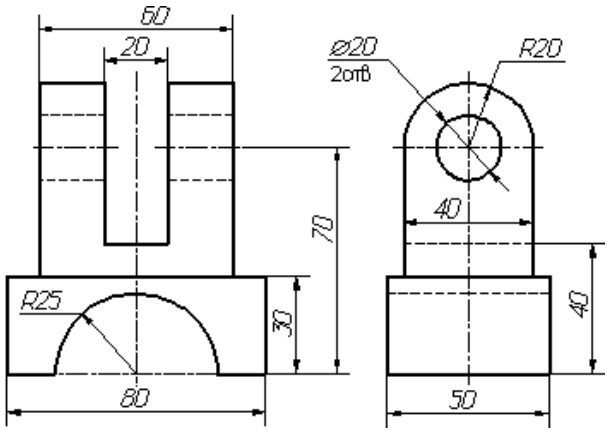
ВАРИАНТ № 26

1. Какие виды систем координат используется в системах конструкторско-технологической подготовки производства? Перечислите основные команды управления изображением. Каким образом реализована функция обмена данными между системами конструкторско-технологической подготовки производства?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





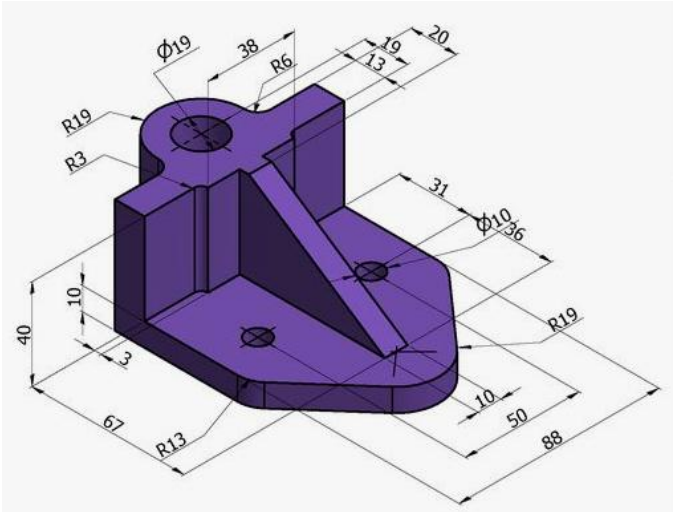
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

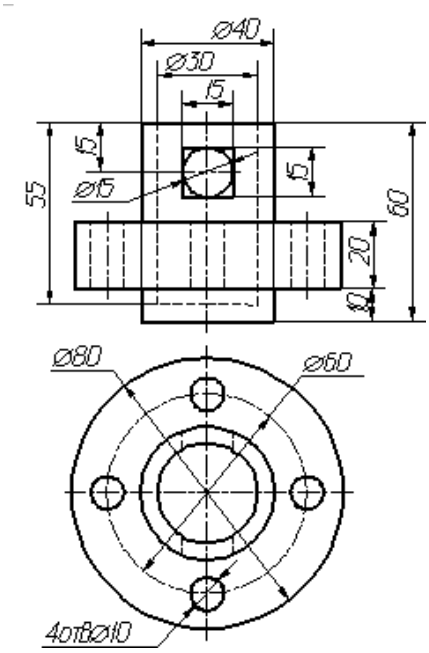
ВАРИАНТ № 27

1. В чем преимущества и недостатки каркасной и полигональной аппроксимации трехмерной геометрии? Раскройте суть истории метода построения геометрической модели. Какое представление геометрии наиболее оптимально?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





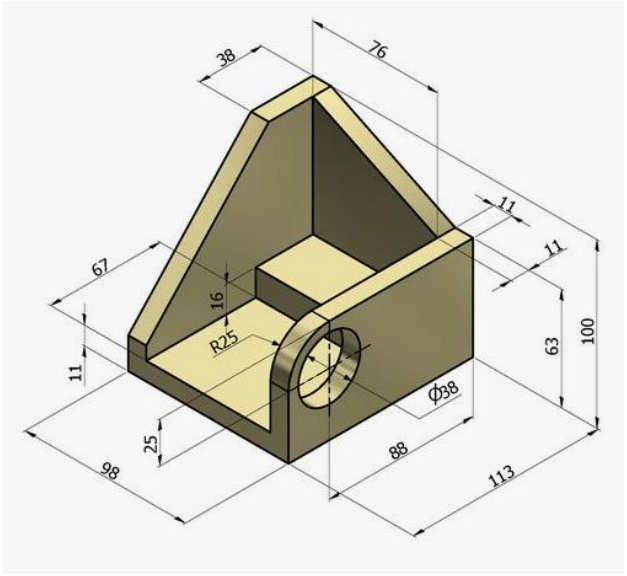
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

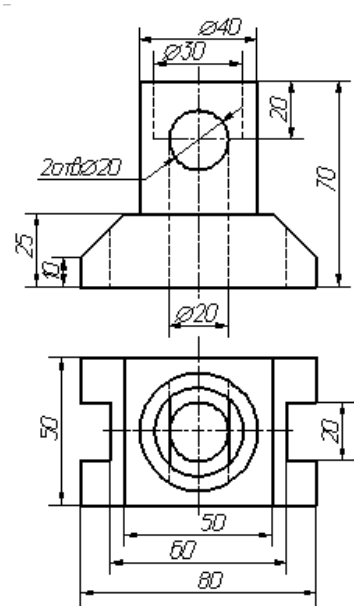
ВАРИАНТ № 28

1. Какие преимущества при создании интерактивной документации дает использование PDM? Какие данные хранятся в PDM-системах? Назовите основные функции PDM.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





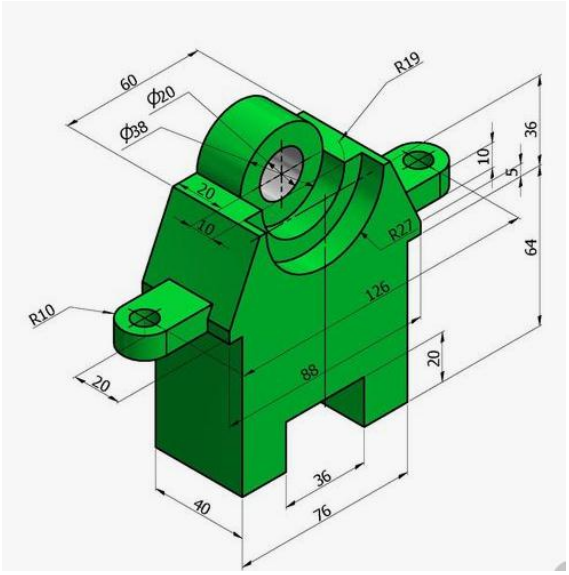
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

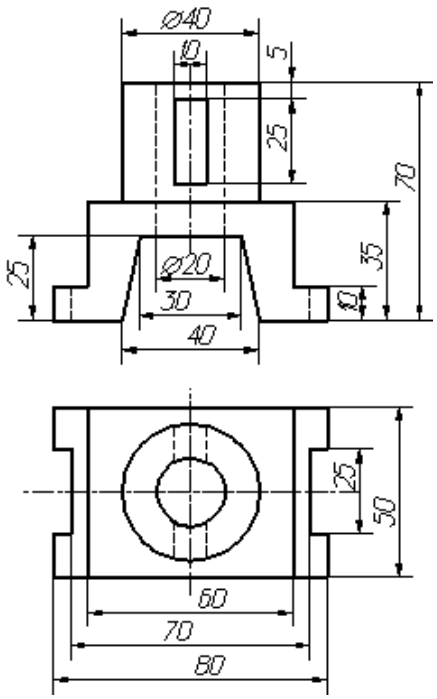
ВАРИАНТ № 29

1. Что называют техническим обеспечением САПР ТП? Назовите его компоненты. Какие основные функции выполняют в САПР ТП принтеры, плоттеры, сканеры, терминальные многофункциональные устройства, графические станции?

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





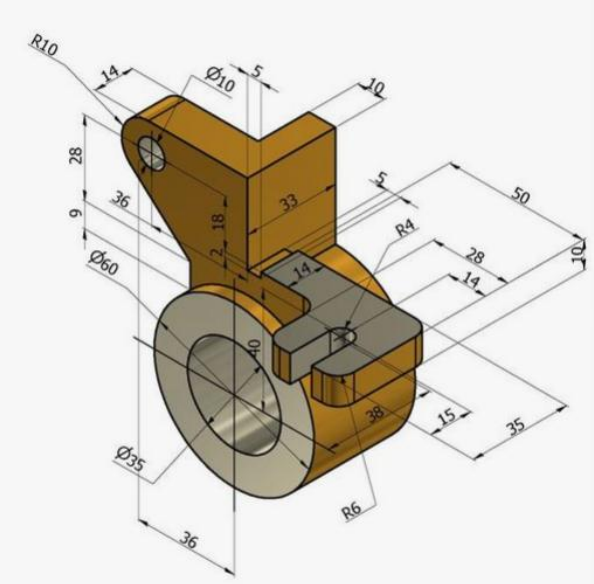
ДИСЦИПЛИНА «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА»

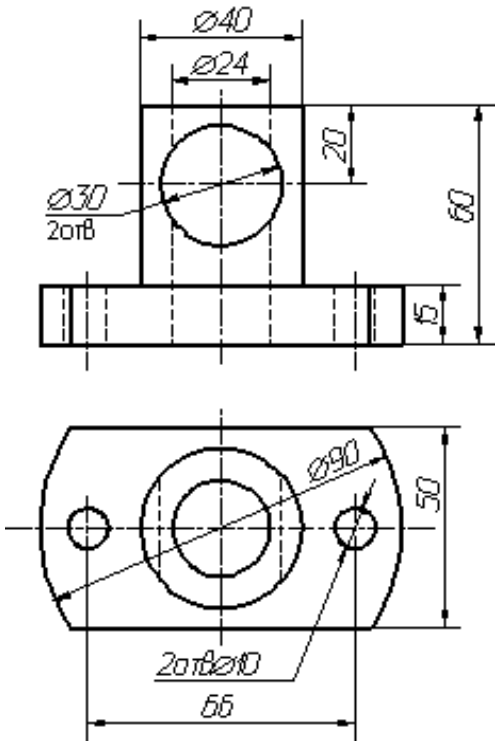
ВАРИАНТ № 30

1. Что называют организационным, а что — методическим обеспечением САПР ТП? В чем их различие? Что регламентируют документы организационного обеспечения САПР ТП? Какие документы входят в состав методического обеспечения САПР ТП? Назовите новые методологии конструкторско-технологического проектирования, реализующиеся в современных САПР.

2. По предложенным изображениям на листах формата А3 в рамках программной системы AutoCAD построить 3D модель, по которой выполнить три вида детали, сделать необходимые разрезы по ГОСТ2.305, проставить размеры по ГОСТ2.307.

3. По заданным проекциям детали в рамках программной системы AutoCAD на отдельном листе выполнить аксонометрическое изображение вырезом одной четверти детали, проставить габаритные размеры и выполнить штриховку.





МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

Лабораторный практикум

Б1.О.23 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией факультета
Инженерной графики	Горно-механический
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Шангина Е.И.	Осипов П.А
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 26.08.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА 1

5. СОЗДАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ ПО АКСОНОМЕТРИЧЕСКОМУ ЧЕРТЕЖУ

Задание. По заданному аксонометрическому чертежу (рис. 10) выполнить твердотельную модель детали.

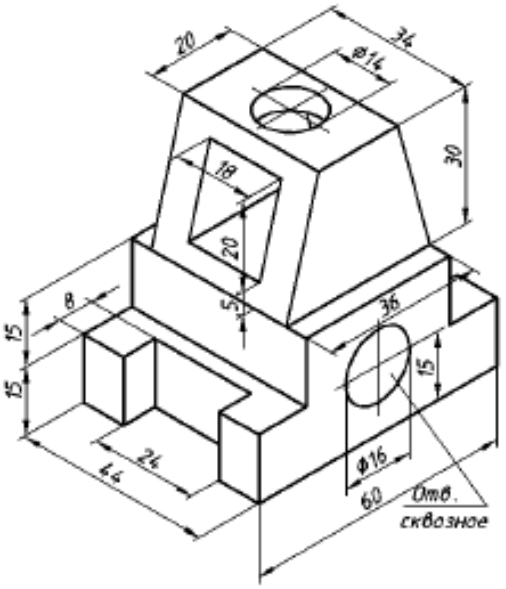


Рис. 10

Общие настройки

1. Включить панели инструментов для моделирования: Вид, Визуальные стили, Моделирование, Объектная привязка, ПСК или активизировать рабочее пространство «*3D* моделирование».
2. Настроить следующие режимы: шаг привязки по *x*, *y* -1; шаг сетки по *x*, *y* - 5; объектная привязка - Конточка, Центр.
   Включить следующие режимы: Шаг, Орто, Привязка.
3. Создать и установить текущим слой: Модель, цвет – зеленый.
4. Задаем лимиты, соответствующие (с некоторым запасом) габаритным размерам детали: ФОРМАТ → ЛИМИТЫ ЧЕРТЕЖА: Левый нижний угол ⟨0,0⟩: ↵
   Правый верхний угол: 100,80 ↵
   Разворачиваем рабочую область на весь экран: ВИД→ЗУММИРОВАНИЕ→Все
5. Создать два видовых экрана: ВИД→ ВИДОВЫЕ ЭКРАНЫ→ Новые ВЭ
   В диалоговом окне задать: конфигурация - Два вертикально; режим - *3D*; на левом экране – вид сверху, визуальный стиль - *2D* каркас; на правом – ЮЗ изометрия, визуальный стиль Реалистичный.

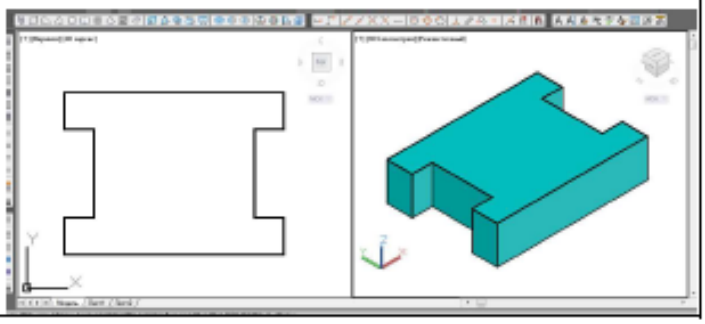
Построение твердотельной модели

Таблица 1

Шаг 1. Моделируем основание детали.

- На виде сверху полилинией строим замкнутый контур основания.
- Выдавливаем контур на высоту 15 мм:
  МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫДАВИТЬ

Указать на: контур ↵
Высота выдавливания: **15** ↵



◇□

Шаг 2. Моделируем среднюю часть детали.

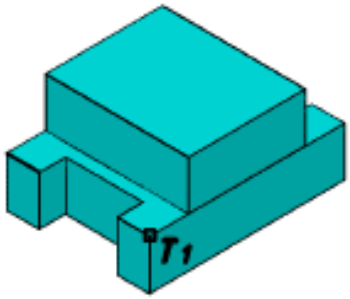
МОДЕЛИРОВАНИЕ → ЯЩИК

Первый угол: привязка Смещение

Базовая точка: указать **Т1** (конточка)

Величина смещения: **@12,0,0** ↵

Другой угол: **@36,44,15**



Шаг 3. Моделируем верхнюю часть детали.

♦ ПСК привязываем к вертикальной передней стенке.

ПСК → 3 точки

Новое начало координат: **К1**

Точка на положительном луче оси X: **К2**

Точка на положительном луче оси Y: **К3**

Плоскость построения проходит через первую указанную точку параллельно текущей ПСК.

♦ Строим замкнутый контур верхней части.

РИСОВАНИЕ → ПЛИНИЯ

Начальная точка: привязка Смещение

Базовая точка: **Т2**

Величина смещения: **@0,0,-5** ↵

Следующая точка: **@8,30** ↵

Следующая точка: **@20,0** ↵

Следующая точка: **@8,-30** ↵

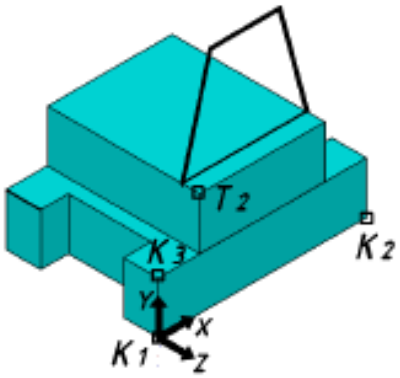
Опция: **З**амкнуть

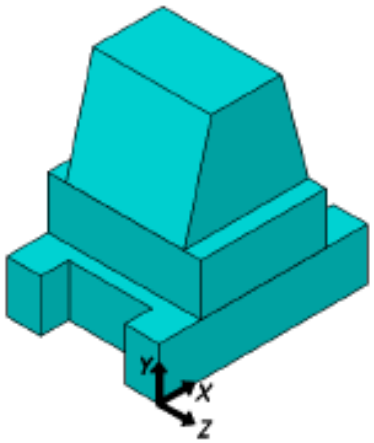
♦ Выдавливаем контур на высоту -34 мм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫДАВИТЬ

Указать на: контур ↵

Высота выдавливания: **-34** ↵





Шаг 4. Объединяем созданные тела.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ОБЪЕДИНЕНИЕ

Указать на: созданные тела

Шаг 5. Моделируем цилиндрическое горизонтальное отверстие.

♦ Создаем цилиндр.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ЦИЛИНДР

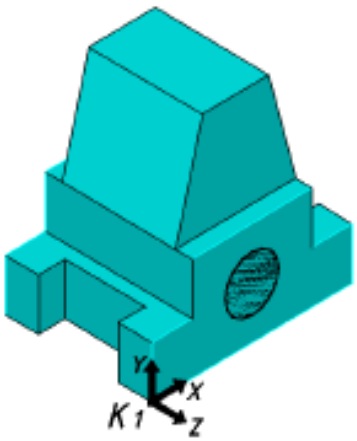
Центр основания: привязка Смещение

Базовая точка: **К1**

Величина смещения: **@30,15,0** ↵

Радиус основания: **8** ↵

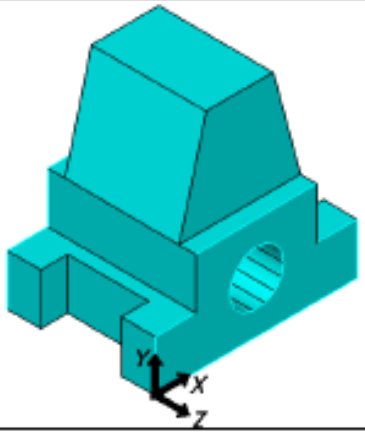
Высота: **-44** ↵



♦ Из основного объема вычитаем цилиндр.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫЧИТАНИЕ

Указать на: тело, из которого вычитают
Нажать ↵
Указать на: цилиндр ↵

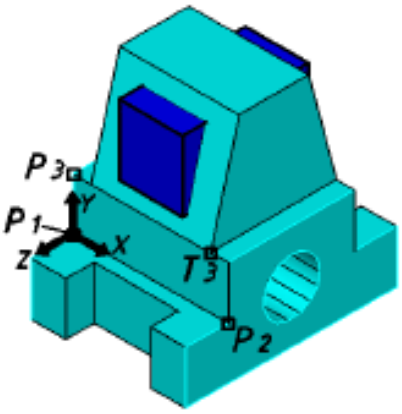


Шаг 6. Моделируем прямоугольное отверстие.

♦ ПСК по трем точкам привязываем к боковой стенке.

ПСК → 3 точки

Новое начало координат: **P1**
Точка на положительном луче оси X: **P2**
Точка на положительном луче оси Y: **P3**



♦ Создаем модель отверстия.

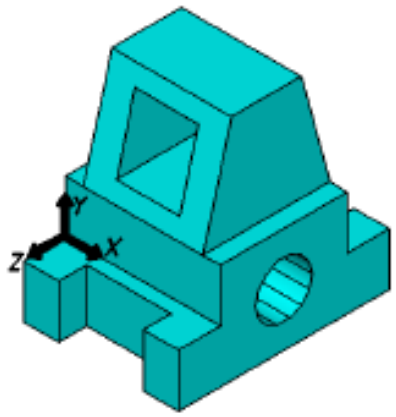
МОДЕЛИРОВАНИЕ → ЯЩИК

Первый угол: привязка Смещение
Базовая точка: **T3**
Величина смещения: **@-8,5,0** ↵
Другой угол: **@-18,20,-36** ↵ -размер ящика

♦ Из основного объема вычитаем параллелепипед.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫЧИТАНИЕ

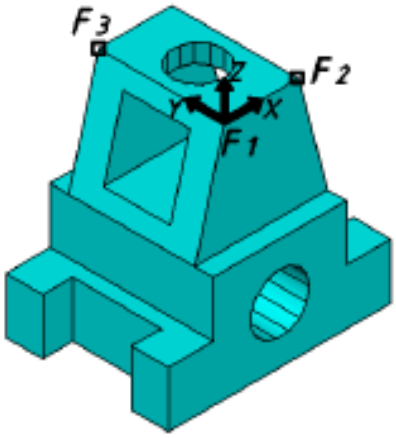
Указать на: тело, из которого вычитают
Нажать ↵
Указать на: параллелепипед ↵



Шаг 7. Моделируем цилиндрическое отверстие в верхней части.

♦ ПСК по трем точкам привязываем к верхней плоскости.

ПСК → 3 точки: указать **F1, F2, F3**

♦ Создаем цилиндр. МОДЕЛИРОВАНИЕ → ЦИЛИНДР *Центр основания:* привязка Смещение *Базовая точка:* указать **F1** *Величина смещения:* **@10,17,0** ↵ *Радиус основания:* **7** ↵ *Высота:* **-15** ↵ - указано с запасом ♦ Из основного тела вычитаем цилиндр. МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫЧИТАНИЕ	

Лабораторная работа 2

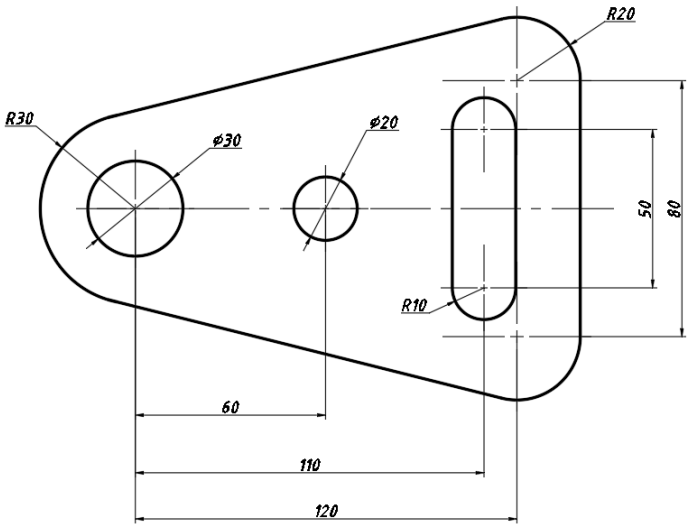
СОЗДАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХМОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПО ЗАДАННЫМ ПРОЕКЦИЯМ

Задание: По заданным проекциям деталей создать их твердотельные модели.

Общие настройки

1. Открыть файл **Модели по проекциям.** *dwg* (или создать проекции деталей).
2. Активизировать рабочее пространство «**3D моделирование**».
3. Настроить режим ПРИВЯЗКА: Конечная, Центр, Пересечение.
   Включить следующие режимы: ОРТО, СЕТКА, ПРИВЯЗКА.
4. Установить текущим слой Модель, слой Контур – блокировать.
5. Создать два видовых экрана: ВИД→ ВИДОВЫЕ ЭКРАНЫ→ Новые ВЭ
   В диалоговом окне задать: конфигурация - Два вертикально; режим - 3D; на левом экране – Вид сверху, визуальный стиль - 2D каркас; на правом – Ю3 изометрия, визуальный стиль Реалистичный.

Построение твердотельной модели детали 1



Деталь 1 представляет собой пластину толщиной 4 мм (рис.11).

Слой оси – заморозить.

Слой модель текущий.

Через буфер обмена скопировать деталь из текста лабораторной работы в масштабе 1:1.

Толщина выдавливания 4мм.

Шаг 1. На виде сверху создаем один наружный замкнутый контур и три внутренних контура (рис. 12).

РИСОВАНИЕ→ КОНТУР

Указать ЛКМ точку внутри контура пластины

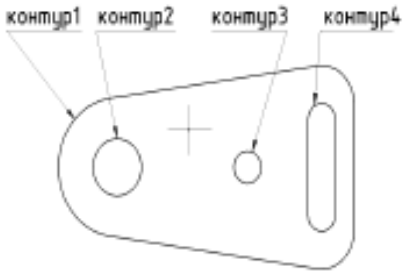


Рис. 12

Шаг 2. Выдавливаем созданные четыре контура на высоту 4мм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫДАВИТЬ

Указать на: контура 1…4 ↵

Высота выдавливания: **4** ↵

Шаг 3. Создаем отверстия (рис.13).

РЕДАКТИР.ТЕЛО →ВЫЧИТАНИЕ

Указать на: пластину

Нажать ↵

Указать: тела для вычитания ↵

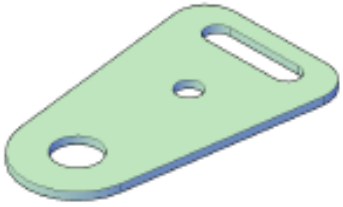
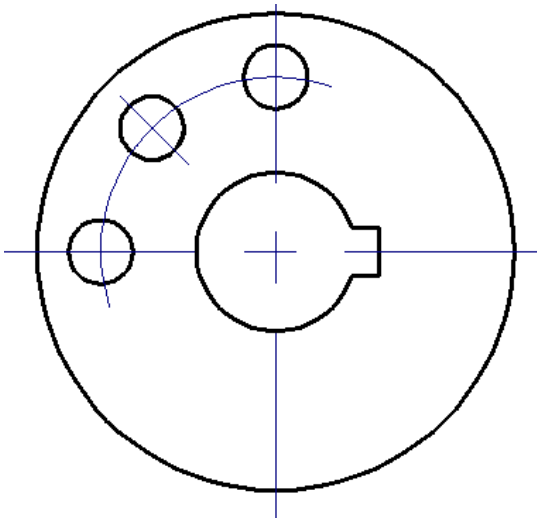


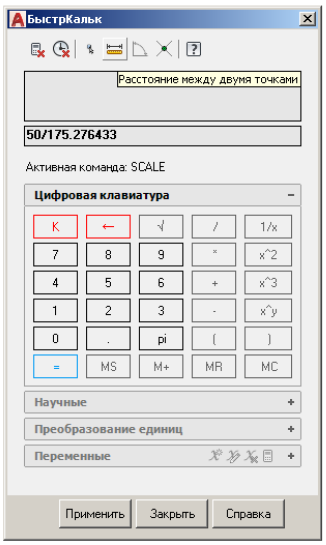
Рис. 13

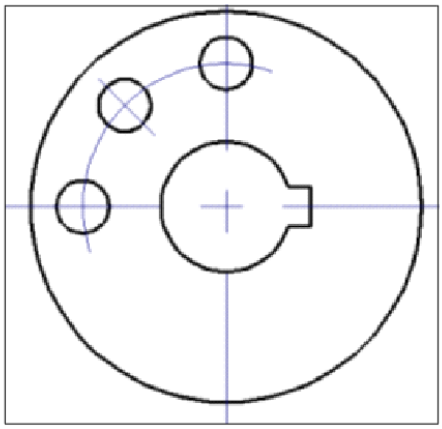
Построение твердотельной модели детали 2



Через буфер обмена скопировать деталь из текста лабораторной работы в масштабе 1:1. Далее масштабировать следующим образом:

1. Построить отрезок длиной 50 мм по отношению, к которому будем масштабировать (т.е. диаметр окружности зададим 50 мм).
2. Выбрать команду ***Масштабирование*** в инструментальной панели ***Редактирование***.





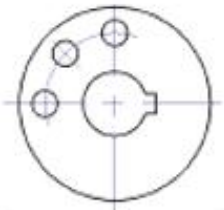
3.Выделить картинку, которую скопировали и нажать кнопку Enter.

4. Выбрать любую базовую точку на картинке и ***ПКМ*** в открывшемся меню нажать на ***Быстрый калькулятор***, для определения коэффициента масштабирования (***Очистить журнал***, если уже есть какие-то расчеты).

5. Выбрать утилиту Расстояние между двумя точками и последовательно показать расстояние на отрезке прямой, равный 50мм поставить знак деления «/», затем снова выбрать эту же утилиту и щелкнуть ЛКМ две точки диаметра окружности на картинке. Данная операция автоматически рассчитает коэффициент масштабирования.

6. Нажать кнопку ***Применить*** и ***Enter***.

Кто не понял ссылка https://youtu.be/WzShcfkF1uc



Толщина детали 3 мм

Рис. 14

Деталь 2 представляет собой пластину толщиной 3мм (рис. 14).

Слой ОСИ – заморозить.

Слой МОДЕЛЬ – текущий

МОДЕЛИРОВАНИЕ →ВЫТЯГИВАНИЕ (рис. 15)

Вытягивание

Указать: точку внутри контура пластины

Задать высоту вытягивания: **3** ↵

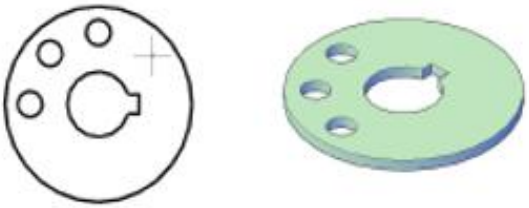
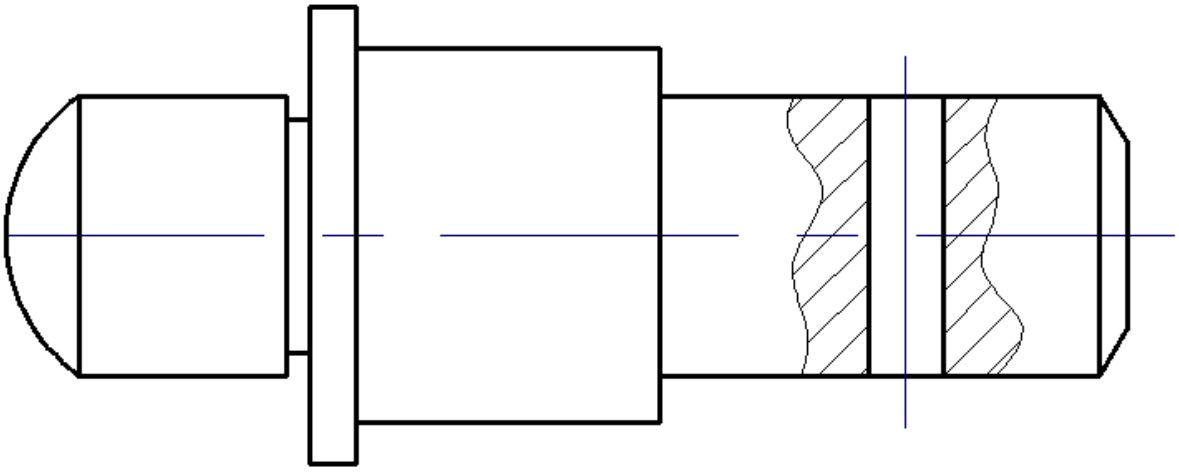


Рис. 15

Построение твердотельной модели детали 3



Длина оси 200мм (масштабирование выполнить как в предыдущем примере)

Деталь 3 представляет собой тело вращения, состоящее из цилиндров, конусов и сферы (рис. 16).

Слой ОСИ – разморозить.

Слой МОДЕЛЬ – текущий.

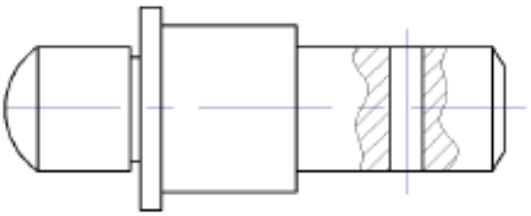


Рис. 16

Шаг 1. На виде сверху Полилинией создаем замкнутые контур1 и контур2. Контуры не пересекают оси вращения (рис. 17).

РИСОВАНИЕ → ПЛИНИЯ: *Начальная точка*: точка **1**

Следующая точка: точка **2**

Опция: **Д**уга

Опция: **В**торая - вторая точка дуги

Указать: точку **3** (Ближайшая)

Конечная точка дуги: точка **4**

Опция: **Л**инейный

Следующая точка: указать точки **5…15**

Опция: **З**амкни

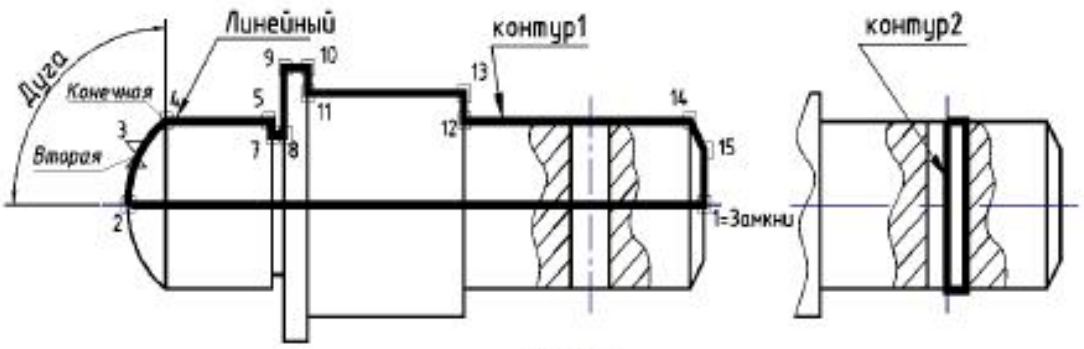
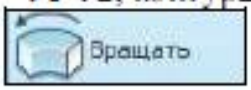


Рис. 17

РИСОВАНИЕ → ПЛИНИЯ: указать точки для создания контура 2.

Шаг 2.

Вращаем контур1 вокруг оси Т1-Т2, контур2 – вокруг оси Т3-Т4 (рис. 18).

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ 

Указать на: контур1 ↵

Начальная точка оси вращения: **Т1**

Конечная точка оси: **Т2**

Угол вращения <360>: ↵

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ

Указать на: контур 2 ↵

Начальная точка оси вращения: **Т3**

Конечная точка оси: **Т4**

Угол вращения <360>: ↵

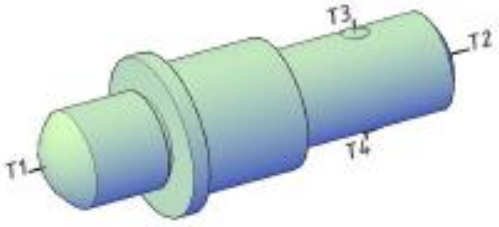


Рис. 18

Шаг 3. Создаем отверстие (рис. 19).

РЕДАКТИР.ТЕЛО→ВЫЧИТАНИЕ

Указать на: наружный объем

Нажать ↵

Указать на: внутренний цилиндр ↵

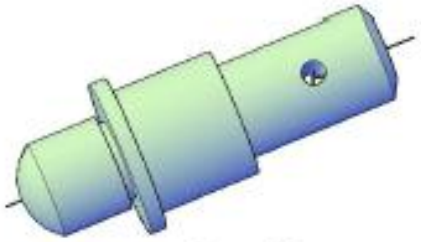


Рис. 19

Построение твердотельной модели детали 4

Деталь **4** представляет собой комбинацию тел, полученных выдавливанием и вращением: боковой фланец – шестигранная призма, наружный цилиндр с цилиндрической проточкой и фаской, внутреннее отверстие — цилиндр и усеченный конус (рис. 20).

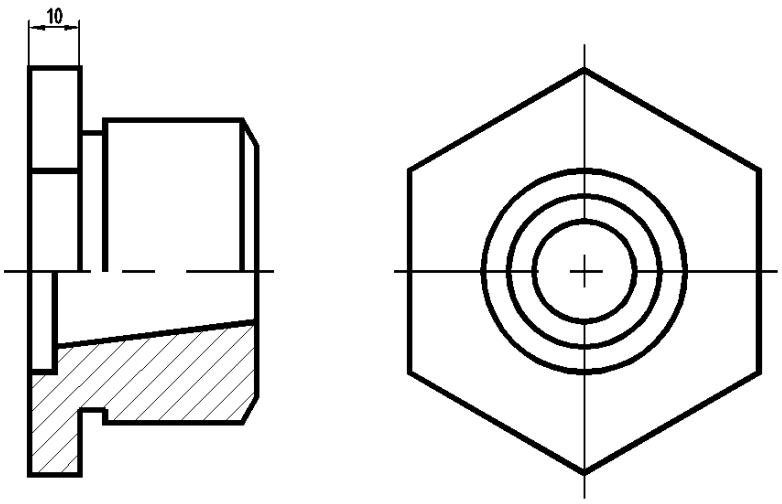
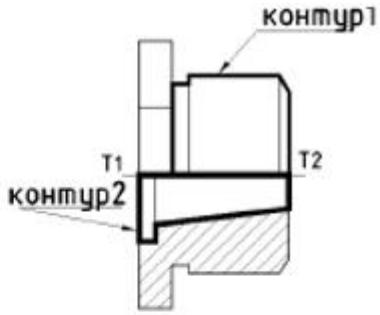
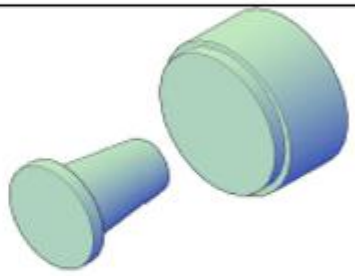
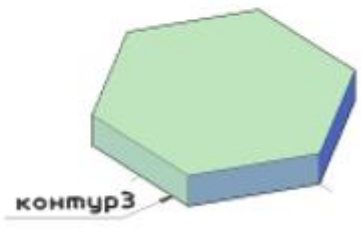


Рис. 20

Последовательность построения модели

Текущий слой Модель. **Шаг 1.** На главном виде полилинией создаем два замкнутых контура для наружной и внутренней форм. РИСОВАНИЕ → ПЛИНИЯ	
Шаг 2. Вращаем контуры 1, 2 вокруг оси T1-T2. МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ Для наглядности созданные тела разнесены на некоторое расстояние.	
Шаг 3. На виде слева создаем замкнутый контур 3 –основание шестигранной призмы. РИСОВАНИЕ→ПЛИНИЯ **Шаг 4.** Выдавливаем контур на 10 мм МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫДАВИТЬ *Указать на* контур 3 ↵ *Высота выдавливания*: **10** ↵	

Шаг 5. Поворачиваем призму вокруг оси Т4-Т5 на угол 90° .

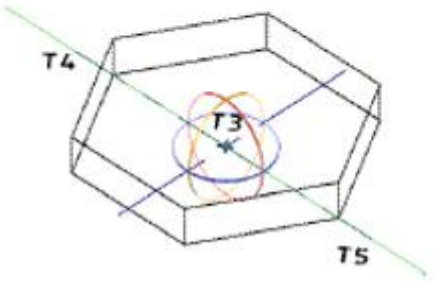
РЕДАКТИРОВАНИЕ → 3D ПОВОРОТ

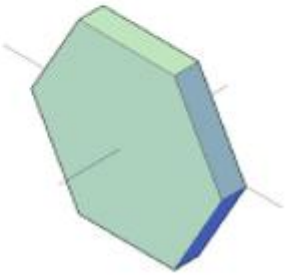
Указать на: призму ↵

Базовая точка: указать точку пересечения осей **Т3**,
появляются три рукоятки осей

Ось вращения: указать на рукоятку **Р** (она стала желтой)
и подсветиться ось поворота совпадающая с **Т4 – Т5**

Задать угол поворота: **90** ↵





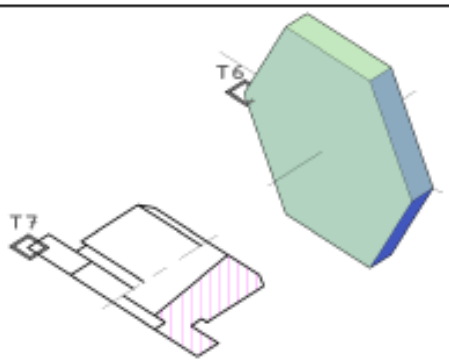
Шаг 6. Переносим шестигранную призму к ранее созданным объектам.

РЕДАКТИРОВАНИЕ → ПЕРЕНЕСИ

Указать на: шестигранную призму ↵

Базовая точка: **Т6**

Вторая точка: **Т7**



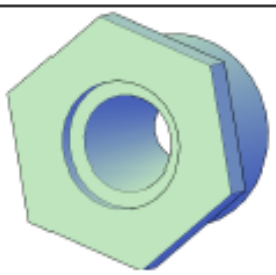
Шаг 7. Создаем отверстие

МОДЕЛТРОВАНИЕ→ВЫЧИТАНИЕ

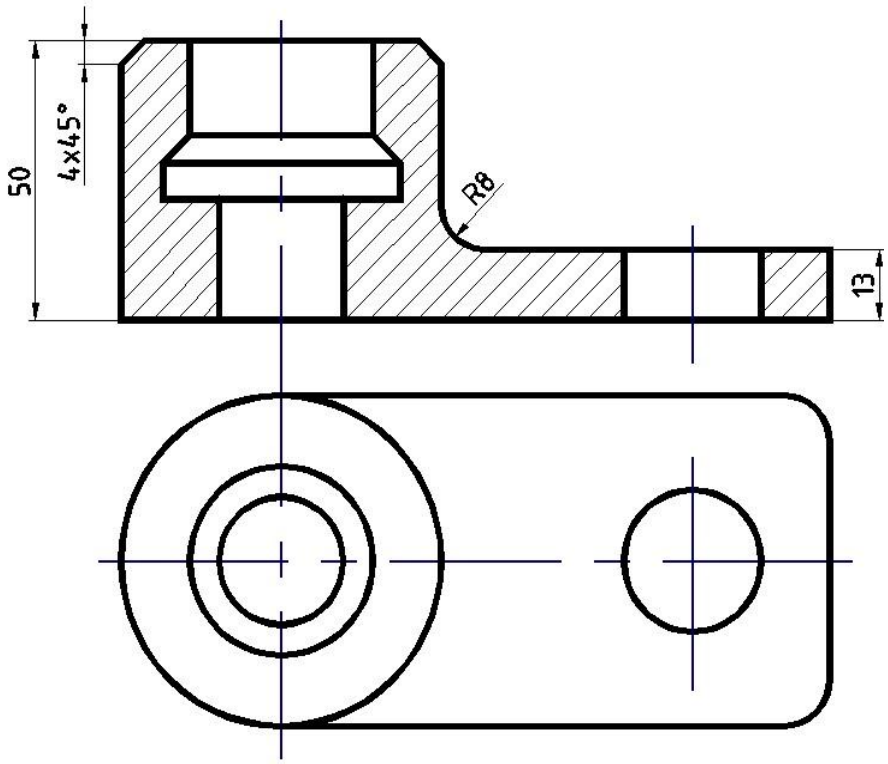
Указать на: шестигранную призму
и наружные цилиндры

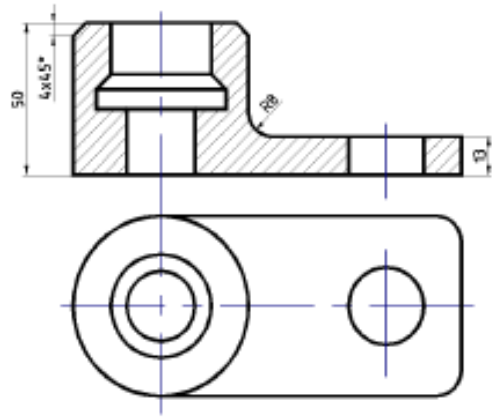
Нажать ↵

Тела для вычитания: внутренний
объем ↵



Построение твердотельной модели детали 5





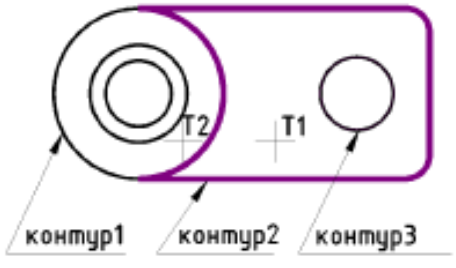
Деталь 5 представляет собой комбинацию тел, полученных выдавливанием и вращением: призматическое основание со скругленными боковыми ребрами и цилиндрическим отверстием (высота 13 мм), цилиндр (высота 50 мм) со скошенной кромкой 4x45°, внутренние цилиндрические и коническое отверстия

Слои ОСИ и ШТРИХОВКА – заморозить.

Шаг 1. На виде сверху создаем контуры 1, 2, 3.

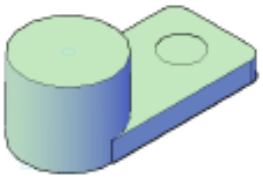
РИСОВАНИЕ→ КОНТУР

Указать ЛКМ точки Т1, Т2 внутри основания и внутри большого цилиндра

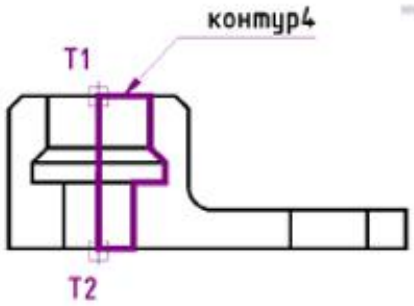


Шаг 2. Выдавливаем контур 1 на высоту 50 мм, контуры 2 и 3 на высоту 13 мм.

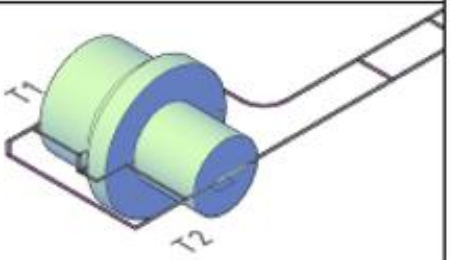
РЕДАКТИР.ТЕЛО →ВЫДАВИТЬ



Шаг 3. Создаем контур для внутренних соосных отверстий.
На главном виде полилинией создать замкнутый контур 4.
Контур не пересекает ось вращения.
РИСОВАНИЕ → ПЛИНИЯ



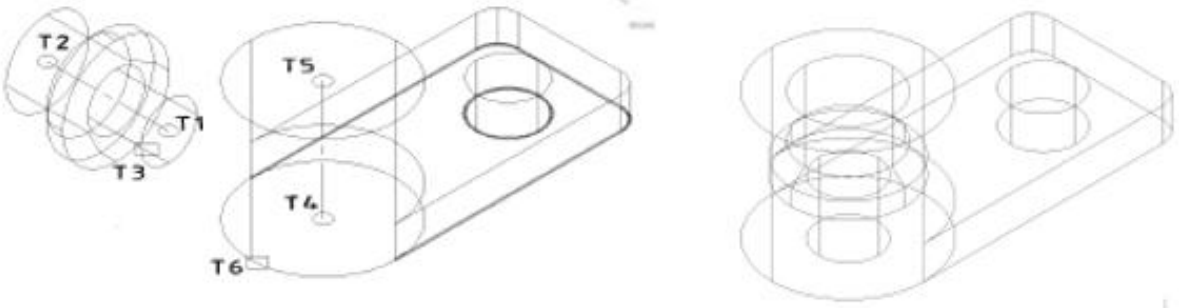
Шаг 4. Вращаем контур 4 вокруг оси T1-T2.
МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ



Шаг 5. Совмещаем модель отверстия с основной моделью по трем исходным и трем целевым точкам.

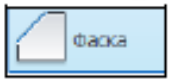
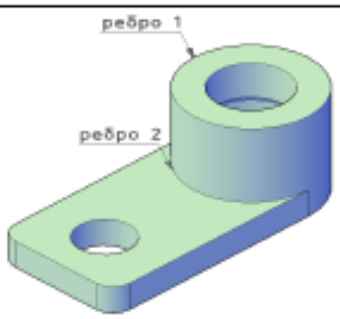
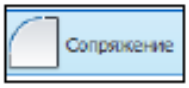
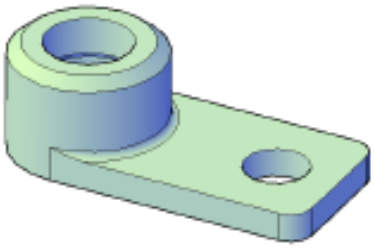
РЕДАКТИРОВАНИЕ→3D ВЫРАВНИВАНИЕ

Выберите объекты: указать на модель внутреннего отверстия
Базовая точка: **T1** (Центр)
Вторая точка: **T2** (Центр)
Третья точка: **T3** (Квадрант)
Первая целевая точка: **T4**(Центр)
Вторая целевая точка: **T5** (Центр)
Третья целевая точка: **T6** (Квадрант).

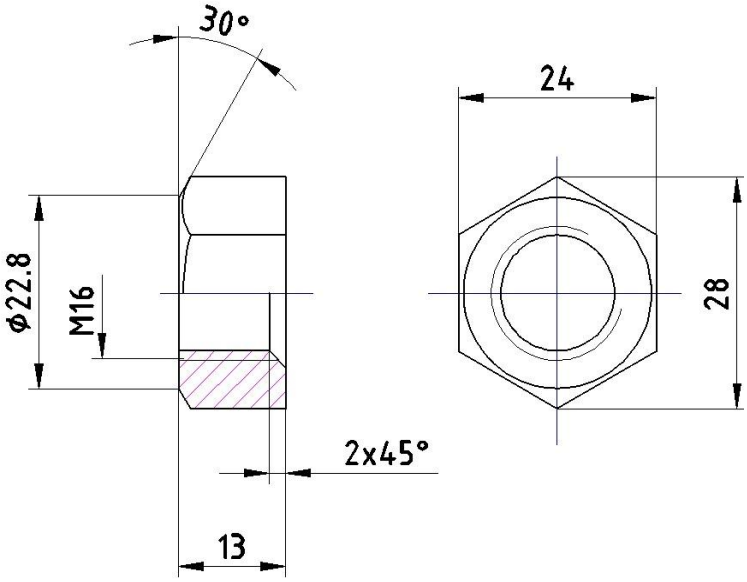


Шаг 6. Создаем отверстие.
РЕДАКТИР.ТЕЛО → ВЫЧИТАНИЕ

Указать на: основание и цилиндр
Нажать ↵
Указать тела для вычитания: комбинация внутренних отверстий ↵

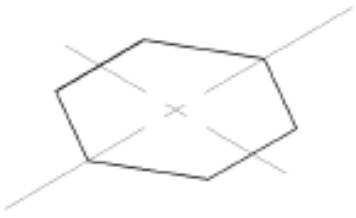
Шаг 7. Создаем фаску 4х45°на цилиндре РЕДАКТИРОВАНИЕ → ФАСКА  *Указать на:* ребро 1 ↵ *Длина фаски для базовой поверхности:* **4** ↵ *Длина фаски для другой поверхности<4>:* ↵ *Указать на*: ребро 1 ↵	
Шаг 8. Создаем сопряжение цилиндра с основанием. РЕДАКТИРОВАТЬ → СОПРЯЖЕНИЕ  *Указать на:* ребро 2 *Радиус сопряжения:* **3**↵ *Нажать* ↵	

ПОСТРОЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ШЕСТИГРАННОЙ ГАЙКИ



Задание.
Создать модель гайки 2М16 ГОСТ 5915-70 (высота 13 мм, размер под ключ 24 мм) (рис. 20).
Гайка представляет собой шестигранную призму с конической фаской и внутренним цилиндрическим отверстием (резьба упрощенно).

Последовательность построения модели гайки

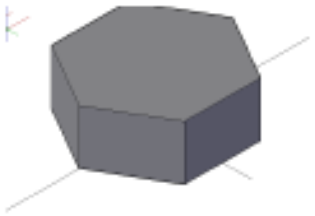
♦ Устанавливаем точку зрения Ю-З Изометрия. ♦ Создаем шестиугольник. РИСОВАНИЕ→МНОГОУГОЛЬНИК *Число сторон:* 6 ↵ *Центр многоугольника:* указать точку пересечения осей *Опция:* **О**писанный вокруг окружности *Радиус окружности:* 12 ↵	

♦ Строим призму.

МОДЕЛИРОВАНИЕ →ВЫДАВИТЬ

Указать на: контур ↵

Высота выдавливания: 13 ↵



♦ Переносим систему координат на верхнюю грань.

СЕРВИС→ НОВАЯ ПСК→ НАЧАЛО

Новое начало координат: указать точку на верхней грани

♦ Отрисуем (или копируем) оси.

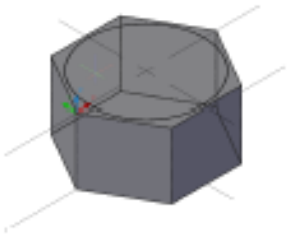
♦ Строим окружность верхнего основания усеченного конуса (*D* =0, 95*S*)

РИСОВАНИЕ→ КРУГ

Центр круга: точка пересечения осей

Опция: Диаметр

Диаметр круга: **22.8** ↵



♦ Создаем усеченный конус.

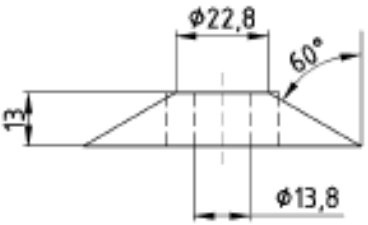
МОДЕЛИРОВАНИЕ →ВЫДАВИТЬ

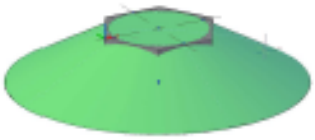
Указать на: окружность ↵

Опция: Угол

Угол сужения: - **60** ↵

Высота выдавливания: **-13** ↵

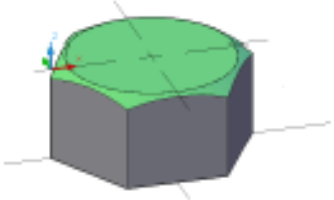


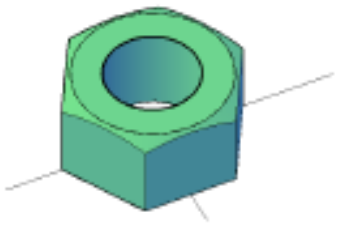


♦ Для формирования конической фаски найдем пересечение созданных тел.

РЕДАКТИР.ТЕЛО → ПЕРЕСЕЧЕНИЕ

Указать на: призму и конус ↵

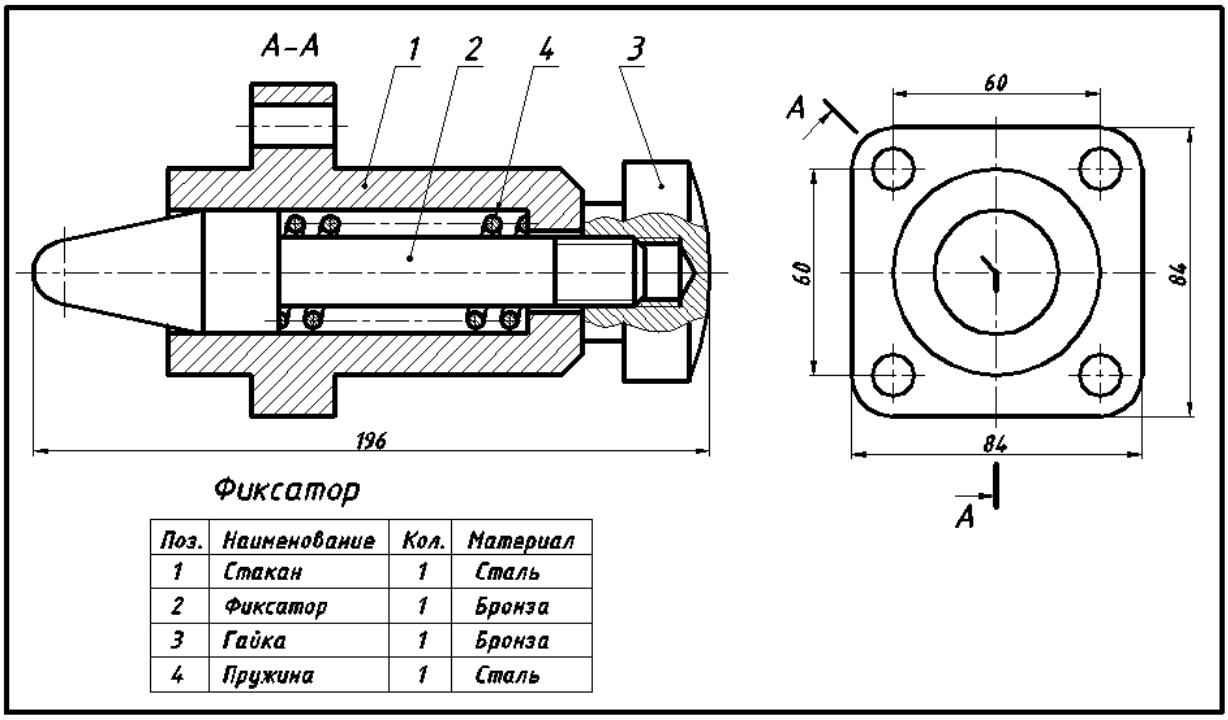


♦ Для создания отверстия строим на верхнем основании призмы окружность равную диаметру внутренней резьбы -13,8 мм. МОДЕЛИРОВАНИЕ →ВЫТЯГИВАНИЕ Нажмите левую кнопку мыши в внутри окружности и укажите направление вытягивания.	

Лабораторная работа 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ «ФИКСАТОР»

Задание. По электронному сборочному чертежу изделия «Фиксатор» (рис. 21) выполнить твердотельные модели деталей; сборку с вырезом одной четверти. Загрузить чертеж. Выполнить масштабирование с использованием утилиты Быстрый калькулятор.



Фиксатор

Поз.	Наименование	Кол.	Материал
1	Стакан	1	Сталь
2	Фиксатор	1	Бронза
3	Гайка	1	Бронза
4	Пружина	1	Сталь

Общие настройки

1. Включить панели инструментов для моделирования: Вид, Визуальные стили, Моделирование, Объектная привязка, Орбита.
2. Создать слои для выполнения моделей деталей:

Имя	Цвет	Тип линий
Стакан	Зеленый	Continuous
Фиксатор	Синий	Continuous
Гайка	Красный	Continuous
Пружина	Фиолетовый	Continuous

Выключить слои Размеры, Штриховка, заблокировать слой Контур.

3. Выключить Вес.
4. Создать два видовых экрана.

ВИД→ ВИДОВЫЕ ЭКРАНЫ → 2 ВЭкран \⟨ Вертикально ⟩: ↵

На левом видовом экране: вид сверху, визуальный стиль – 2D каркас, на правом видовом экране установить ЮЗ изометрию, визуальный стиль – Реалистичный.

Модель стакана

Шаг 1. Моделируем цилиндрическую часть стакана.

- Устанавливаем текущим слой Стакан.
- **Полилинией** строим контура для вращения: контур 2 - определяет наружную форму; контур 3 - определяет форму отверстия (рис. 22).
- Вращаем контура 2,3 вокруг оси Т1-Т2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ

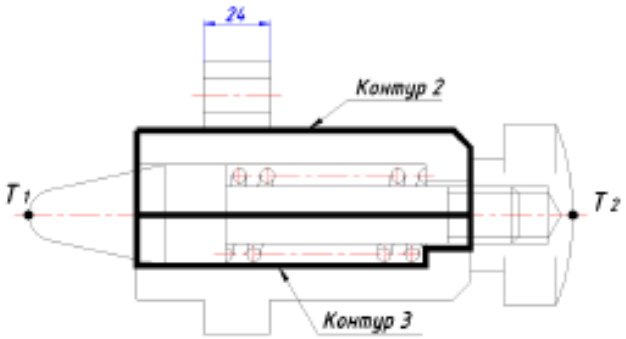


Рис. 22

Шаг 2. Моделируем фланец с отверстиями.

- Выключаем слой Оси.
- Создаем замкнутые контуры для выдавливания (рис. 23) РИСОВАНИЕ→ КОНТУР→ указать **Т3** внутри контура.
- Выдавливаем наружный контур фланца **К4** и контура отверстий **К5** на 24 мм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫДАВИТЬ

Объекты для выдавливания: **К4, К5** ↵
Высота выдавливания: **24** ↵

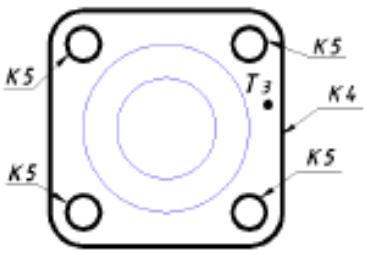


Рис. 23

- Формируем отверстия на фланце (рис. 24).

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫЧИТАНИЕ

Указать на: тело, из которого вычитают
Нажать ↵
Указать на: четыре цилиндра для отверстий ↵

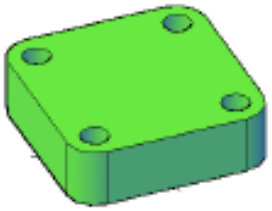


Рис. 24.

Шаг 3. Собираем модель стакана.

- Включаем слой Оси.
- Поворачиваем фланец на 90° (рис. 25).

МОДЕЛИРОВАНИЕ→ 3D ПОВОРОТ

Указать на: фланец ↵
Задать точку на оси поворота: **Т4** (Середина)
Выбрать ось вращения: указать на рукоятку **Р** - подсветится ось **О**
Задать угол поворота: **90** ↵

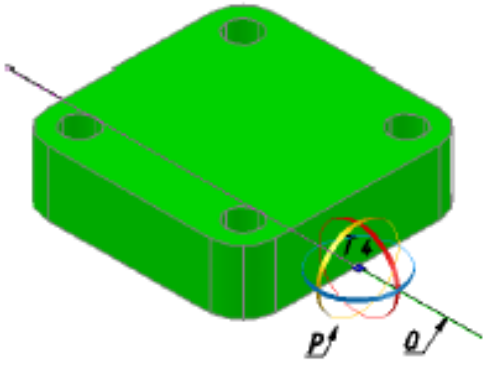


Рис. 25

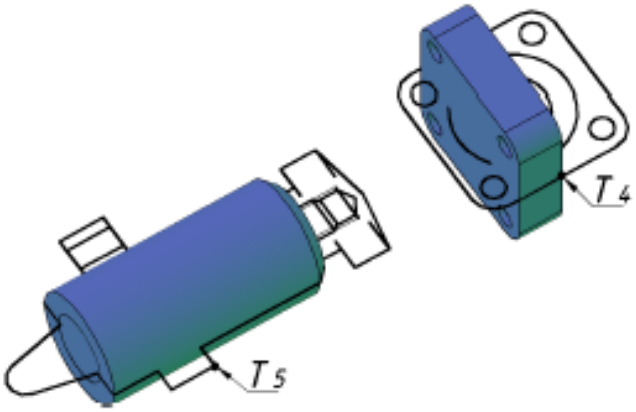


Рис. 26

♦ Переносим фланец к цилиндру (рис. 26).

РЕДАКТИТОВАТЬ → ПЕРЕНЕСТИ

Указать на: фланец ↵
Базовая точка: **Т4** (Середина)
Вторая точка: **Т5** (Пересечение)

♦ Объединяем наружный цилиндра с фланцем и вычитаем модель отверстия (рис 27).

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВЫЧИТАНИЕ

Указать на: фланец и цилиндр - тела объединяются
Нажать ↵
Указать на: модель отверстия ↵

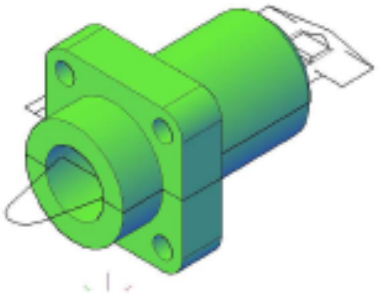


Рис. 27.

Модель фиксатора (без резьбы)

♦ Выключаем слой Стакан.
Установим текущим слой Фиксатор.
♦ Полилинией строим контур для вращения К1 (рис. 28): контур не должен пересекать ось и должен быть замкнутым.
♦ Вращаем контур К1 вокруг оси Т1-Т2 (рис.29).

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ

Объекты для вращения: контур **К1** ↵
Начальная точка оси вращения: **Т1**
Конечная точка оси: **Т2**
Угол вращения<360>: ↵

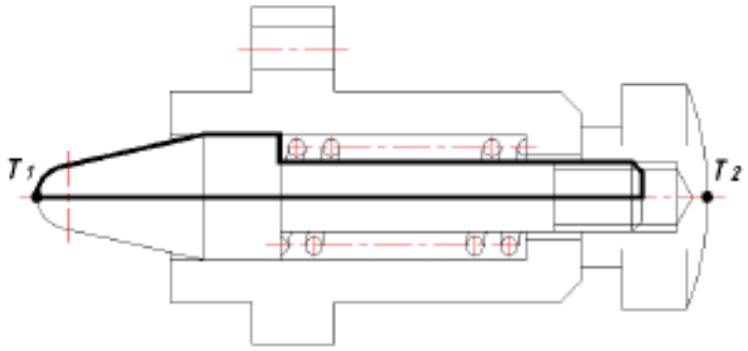


Рис. 28

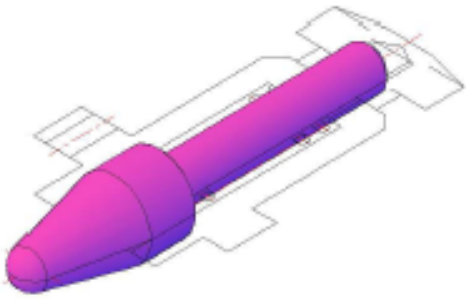


Рис. 29

Модель гайки (без резьбы)

- Выключаем слой Фиксатор. Устанавливаем текущим слой Гайка.
- Полилинией строим замкнутый контур для вращения К6 (рис. 30).
- Вращаем контур К6 вокруг оси (Т1-Т2) (рис.31).

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ

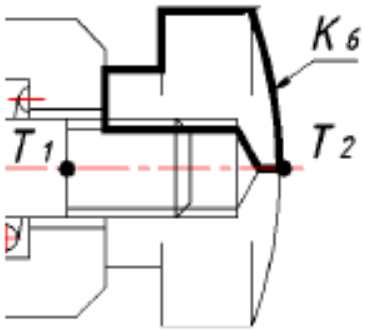


Рис. 30

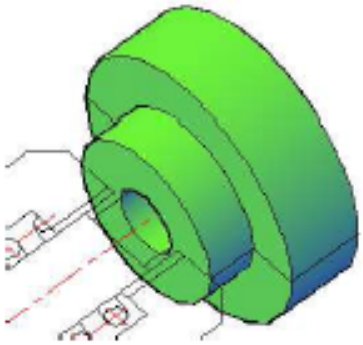


Рис. 31

Модель пружины

Шаг 1. Строим спираль (рис. 32).

- Выключить слой Гайка. Установить текущим слой Пружина.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ → СПИРАЛЬ

Центральная точка основания: **Т1**
Радиус основания: **Т2**
Радиус верхнего основания <14.0000>: ↵
Опция: вы**С**ота витка
Расстояние между витками: **10** ↵
Опция: **К**онечная точка оси
Конечная точка оси: **Т3** -указана с запасом

Шаг 2. Строим контур сечения пружины- круг **К** (рис. 32)

РИСОВАНИЕ → КРУГ

Центр круга: **Т2**

Радиус круга: **Т4**

Шаг 3. Создаем пружину путем сдвига контура вдоль направляющей- спирали.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → СДВИГ

Объекты для сдвига: круг **К**

Траектория сдвига: спираль

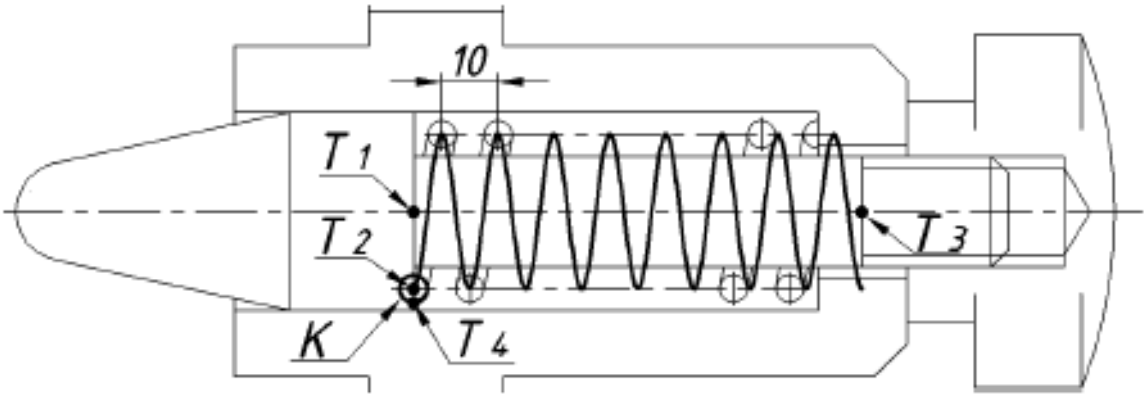


Рис. 32

Шаг 4. Подрезаем пружину по размеру полости.

- Строим вспомогательный прямоугольник (рис. 33).

  РИСОВАНИЕ → ПРЯМОУГОЛЬНИК

  Первый угол: **Т1**

  Второй угол: **Т5**

- Вращаем прямоугольник вокруг оси **Т1 -Т3**.

  МОДЕЛИРОВАНИЕ → ВРАЩАТЬ

- Удаляем выступающую часть пружины (рис. 34):

  МОДЕЛИРОВАНИЕ → ПЕРЕСЕЧЕНИЕ

  Указать на цилиндр и пружину

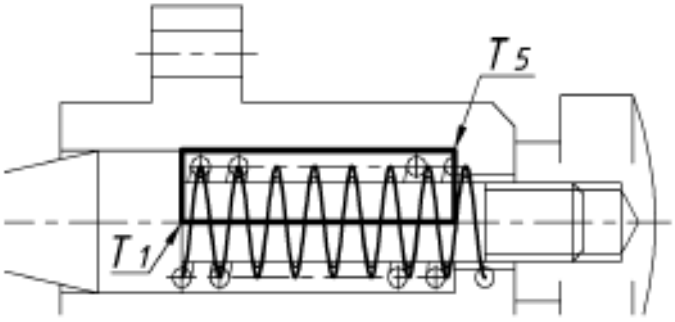


Рис. 33.

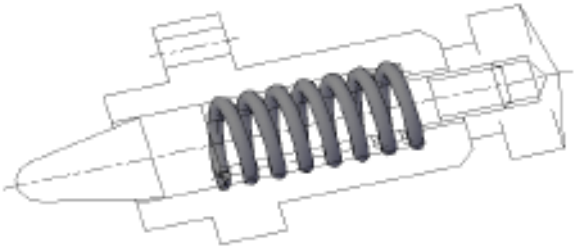


Рис. 34.

Моделирование резьбы

На стержне фиксатора и в отверстии гайки нарезана метрическая резьба М20 с крупным шагом 2,5 мм.

Резьба получается при перемещении образующего профиля вдоль винтовой линии - направляющей.

Моделирование наружной и внутренней резьбы на соединяемых деталях изделия рекомендуется выполнять совместно, что обеспечит правильное положение моделей в сборке.

В файле задания находится блок «Резьба М (шаг 1)», содержащий изображение профиля метрической резьбы с шагом 1 мм согласно ГОСТ 8724-2002 (рис. 35). Изображение блока приведено на рис. 36, где Пн - контур профиля наружной резьбы Пв- контур профиля внутренней резьбы, Тв - точка вставки блока.

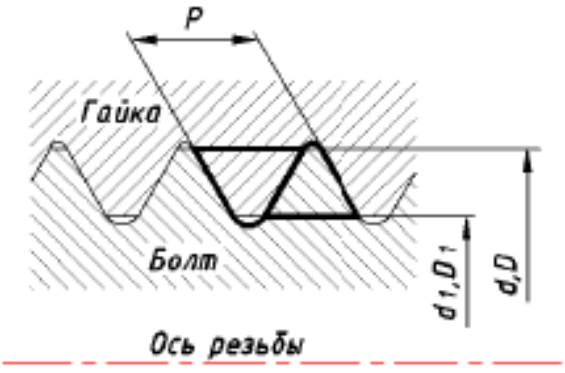


Рис. 35

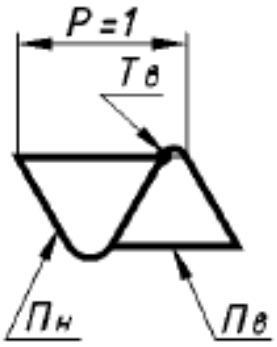


Рис. 36

Данный блок может быть использован для моделирования метрической резьбы с любым шагом, для этого при вставке блока следует установить масштабный коэффициент, равный шагу резьбы.

Шаг 1. Создаем замкнутые контура профилей наружной и внутренней метрической резьбы с шагом 2,5 мм.

- Выключите слой Пружина. Установите текущим слой 0.
- Вставьте блок «Резьба М (шаг 1)»; масштаб 2,5; точка вставки – Тв (рис. 37).
  Меню ВСТАВКА→ БЛОК
- Расчлените блок, он распадется на два замкнутых контура профилей наружной и внутренней резьбы.
  РЕДАКТИРОВАТЬ→ РАСЧЛЕНИ

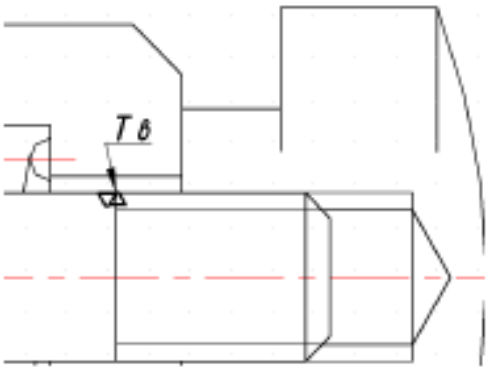


Рис. 37

Шаг 2. Корректируем размер отверстия в гайке.

При создании модели гайки размер отверстия определялся линией внутреннего диаметра резьбы, которая на чертежах проводится условно. Вставленный профиль резьбы позволяет точно определить диаметр отверстия.

♦ Постройте прямоугольник (рис.38).
РИСОВАНИЕ→ ПРЯМОУГОЛЬНИК
Первый угол: **Н1**
Второй угол: **Н2**

♦ Вращайте прямоугольник вокруг оси
МОДЕЛИРОВАНИЕ →ВРАЩАТЬ

♦ Включите слой Гайка и выполните вычитание созданного цилиндра из модели гайки.

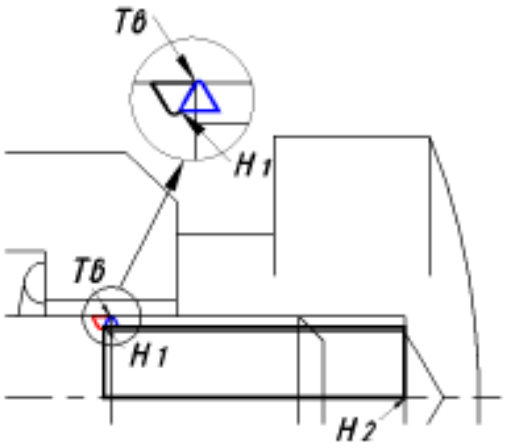


Рис. 38

Шаг 3. Строим направляющую винтовую линию.
В глухом отверстии гайки следует предусмотреть недорез резьбы b, принять величину недореза b=0,25d= 0,25х20=5 мм.

♦ Постройте вспомогательный отрезок К3-К2 (b= 5 мм) (рис. 39).

♦ Создайте направляющую винтовую линию:
МОДЕЛИРОВАНИЕ → СПИРАЛЬ
Центральная точка основания: **К1**
Радиус основания: **Тв** (рис. 38)
Радиус верхнего основания <10>: ↵
Опция: вы**С**ота витка
Расстояние между витками: **2.5**↵-шаг резьбы
Опция: **К**онечная точка оси
Конечная точка оси: **К2**

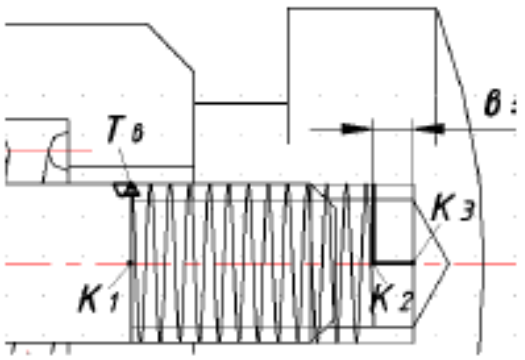


Рис. 39

Шаг 4. Формируем впадины для наружной и внутренней резьбы

♦ Выполните сдвиг профилей вдоль спирали – моделируются впадины наружной и внутренней резьбы (рис. 40).

МОДЕЛИРОВАНИЕ→СДВИГ
Объекты для сдвига: профили Пн и Пв ↵
Опция: вЫравнивание
Опция: Нет
Траектория сдвига: спираль

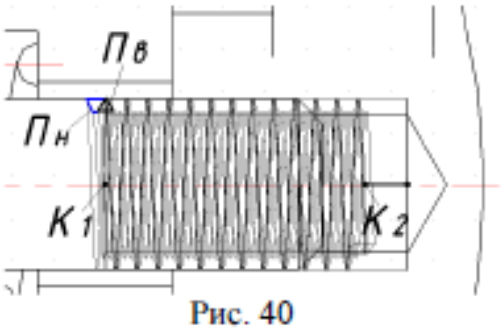


Рис. 40

Шаг 5. Вычитаем впадины из соответствующих деталей.

♦ Включите слои Фиксатор, Гайка.

♦ Произведите вычитание впадины наружной резьбы (по профилю Пн) из модели фиксатора:
МОДЕЛИРОВАНИЕ→ВЫЧИТАНИЕ

♦ Произведите вычитание впадины внутренней резьбы (по профилю Пв) из модели гайки: МОДЕЛИРОВАНИЕ→ВЫЧИТАНИЕ

Выполнение выреза четверти

- Включаем слои: Стакан, Фиксатор, Гайка, Пружина (другие слои выключить). Блокируем слои Фиксатор, Пружина (на этих деталях вырез не выполняют).
- Выполняем разрез вертикальной плоскостью (рис. 41).

РЕДАКТИРОВАТЬ → 3D ОПЕРАЦИИ → СЕЧЕНИЕ

Указать на цилиндр и гайку ↵
Начальная точка режущей плоскости <3точки>: ↵
Первая точка на плоскости: **Т1** (Квадрант)
Вторая точка на плоскости: **Т2** (Середина)
Третья точка на плоскости: **Т3** (Середина)
*Укажите точку с нужной стороны <**О**бе>:*↵ –сохраняем обе стороны

- Выполняем разрез горизонтальной плоскостью (рис. 41).

РЕДАКТИРОВАТЬ → 3D ОПЕРАЦИИ → СЕЧЕНИЕ

Указать на: половины стакана и гайки ↵
Опция <3точки>: ↵
3 точки плоскости: **Т4** (Квадрант), **Т5** (Середина), **Т6**(Середина)
*Опция <**О**бе>:* ↵ – сохраняем обе стороны

- Удаляем четвертинки стакана и гайки (СТЕРЕТЬ) (рис. 42).
- Оставшиеся части стакана и гайки соответственно объединяем.

МОДЕЛИРОВАНИЕ → ОБЪЕДИНЕНИЕ

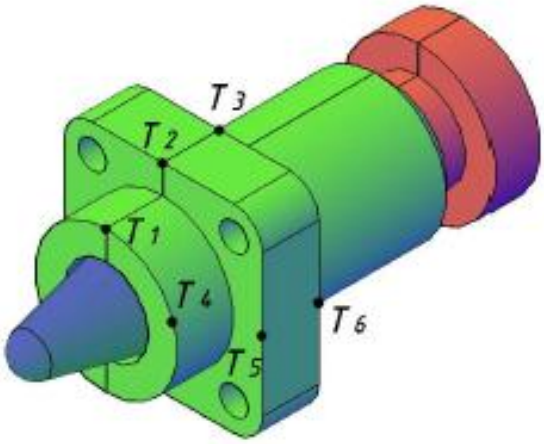


Рис. 41

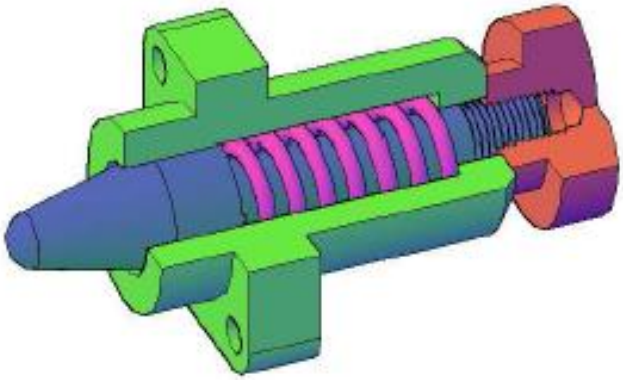


Рис. 42

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Уральский государственный горный университет»

Е.И. Шангина

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Конспект лекций

по курсу «Конструкторско-технологическая информатика»

Екатеринбург 2020

УДК 621.9
ББК 34.56

Шангина Е.И.

Ш-38 Конструкторско-технологическая информатика: учеб. пособие / Е.И. Шангина. Екатеринбург: Екатер. гос. горный. ун-т, 2018. 190 с.

Учебное пособие предназначено для изучения основ CALS/ИПИ-технологий – методов информационной поддержки процессов жизненного цикла изделий (ЖЦИ). Даны основные понятия и определения ИПИ, рассмотрена роль CALS/ИПИ-технологий в современном наукоемком промышленном производстве. Приведены основные характеристики PLM-решений, используемых на этапах проектирования и подготовки производства новых изделий; характеристики средств класса MRP II / ERP, используемых в сфере управления производством и предприятием; характеристики средств интегрированной логистической поддержки изделий, используемые на постпроизводственных стадиях ЖЦИ. Рассмотрены основы конструкторско-технологической информатики, включающие техническое, математическое и программное обеспечение процедур анализа и синтеза проектных решений. Изложены общие подходы к построению математических и геометро-графических моделей сложных технических систем. Рассмотрены вопросы автоматизации конструирования и технологической подготовки производства.

Для студентов направления 552900 и специальности 151002 при изучении курсов «Конструкторско-технологическая информатика», «Оборудование и технологии повышения износостойкости и восстановления деталей машин и аппаратов», а также магистрантов и аспирантов.

© Уральский государственный горный университет, 2020
© Шангина Е.И., 2020

ВВЕДЕНИЕ

Появление ЭВМ положило начало кибернетическому направлению применения технических средств для повышения эффективности труда. Автоматизация явилась закономерным, но не простым продолжением механизации. Если механизация охватывает процессы получения, передачи, преобразования и использования энергии, то автоматизация - процессы получения, передачи, преобразования и использования информации. Говоря образно, если орудия труда выступают продолжением человеческой руки, то ЭВМ - продолжение человеческого мозга.

Первоначально автоматизация охватывала только управление техникой и оружием. С развитием вычислительной техники и методов математики автоматизация распространилась на управление объектами социальной природы.

Совокупность средств обработки информации и персонала, объединенных для достижения определенных целей, образует *информационную систему* (ИС). С точки зрения автоматизации информационные системы можно классифицировать на: автоматизированные, ручные и автоматические. Наиболее распространены на современных предприятия и в организациях автоматизированные системы.

Под автоматизированной информационной системой понимается организационно-техническая система, использующая автоматизированные информационные технологии в целях обучения, информационно-аналитического обеспечения научно-инженерных работ и процессов управления (computer-aided information system). Основными компонентами автоматизированной информационной системы являются вычислительная техника, программное обеспечение и персонал. Информационная технология также является неотъемлемой частью автоматизированной информационной системы.

Под информационной технологией понимают процесс преобразования данных или исходной информации в информационный продукт. Для выполнения таких преобразований автоматизированная информационная технология должна содержать необходимые инструменты: технические средства (средства вычислительной техники и телекоммуникационных систем) и программные средства, объединяющие в себе базовое и прикладное программное обеспечение.

В настоящее время наиболее популярны у пользователей, а значит – наиболее применимы, следующие виды автоматизированных информационных технологий: *информационная технология обработки данных*, основными компонентами которой являются база данных, СУБД, которая предназначена для решения хорошо структурированных задач; *информационная технология управления,* основными компонентами которой также являются базы данных, на их основе технология формирует для руководителей всех уровней различные отчёты, помогающие принятию управленческого решения, анализу хозяйственной деятельности;

информационная технология автоматизации офиса – представляет набор технических и программных средств, повышающих эффективность документооборота любой организации, делает возможным создание в ней электронного офиса; *информационная технология поддержки принятия решения* - представляет сплав экономико - математических методов и моделей, а также прикладных программ, ориентированных на решение плохо формализованных задач, основными компонентами которой являются база данных и база моделей различных ситуаций, помогает пользователю вырабатывать управленческое решение; *информационная технология экспертных систем* - представляет технические и программные средства, основанные на знаниях, полученных от специалистов в конкретной (довольно узкой) предметной области, решает те же проблемы, экспертами в которых являются специалисты, предоставившие знания, применяется также для поддержки процесса принятия решения.

Если раньше каждый пользователь должен был сам программировать алгоритмы в своей профессиональной деятельности, то сегодня "кустарное" программирование стало ненужным. Его заменяет знание и умение пользоваться существующими информационными технологиями в каждой профессиональной области. И это в первую очередь касается специалистов в области машиностроения и металлообработки. В ней созданы системы автоматического проектирования (CAD), системы автоматизированного проектирования технологических процессов (CAM), технологии обеспечения жизненного цикла изделия от маркетинга до утилизации отслужившего свой срок изделия или детали (CALS) и др.

До изобретения компьютеров все проектирование новых изделий велось по так называемой бумажной технологии. Любое конструкторское бюро представляло собой зал с рядами чертежных столов - кульманов, за которыми конструкторы разрабатывали чертежи нового изделия на бумаге. Далее эти чертежи копировали на кальку и затем размножали их. Вся документация хранилась на бумаге. Все инженерные расчеты производились с помощью арифмометров и логарифмических линеек. При изготовлении опытных образцов изделий и их серийном производстве наладка станков производилась вручную. Далее производились натурные испытания изготовленных опытных образцов. По их результатам вносились необходимые изменения в конструкцию, корректировались чертежи и начиналась подготовка к серийному выпуску изделия.

С изобретением компьютеров многие этапы создания новых изделий подверглись коренным изменениям. Стало возможным перейти на безбумажную технологию. Компьютер, оснащенный соответствующими программами, совместно с принтером, плоттером и графическим планшетом (дигитайзером) заменил собой кульман, бумагу, карандаш, арифмометр и логарифмическую линейку. При этом компьютер позволил автоматизировать и значительно ускорить инженерные расчеты.

Использование современных компьютерных технологий позволяет существенно сократить длительность проектно-конструкторских работ, по-

новому реализовать проектные процедуры и в результате получить более эффективные технические решения.

Аппаратное обеспечение автоматизированных рабочих мест (АРМ) для работников самых различных профессий мало отличается друг от друга. Его основой является профессиональный компьютер. Главное различие состоит в их программном обеспечении, которое и отличает, например, АРМ инженера-проектировщика от АРМ инженера-технолога.

Новейшие компьютерные технологии позволяют организовать автоматизированное рабочее место конструктора-проектировщика. Базовыми программными продуктами АРМ конструктора-проектировщика для примера могут являться операционная система Microsoft Windows и универсальная графическая платформа AutoCAD фирмы Autodesk. AutoCAD - это графическое ядро систем автоматизированного проектирования (САПР). Функциональные возможности, широкие возможности программирования, связь с базами данных, большой выбор совместимых периферийных графических устройств фактически сделали графический пакет AutoCAD мировым промышленным стандартом в своей области. Выпускаются версии программы для различных платформ и под различные операционные системы. Программа совместима со всеми выпускаемыми видами принтеров и плоттеров.

Системы автоматизированного проектирования (САПР), называемые в английском переводе CAD-системами (Computer Aided Design), применяются для решения разнообразных инженерных и конструкторских задач. Применение САПР-технологий позволяет сократить время на выполнение проекта и выпуск изделий, уменьшить возможные ошибки, повысить качество конструкторской документации, а при использовании программно-управляемого оборудования - готовить необходимые для этого данные в нужном формате. Полный спектр задач, решаемых с помощью САПР, чрезвычайно богат, и программ, предназначенных для этого, разработано достаточно много.

Для эффективной работы с программами САПР лучше применять монитор с большим размером экрана. Для получения твердой копии результатов работы (чертежи, схемы) обычно используются плоттеры, позволяющие работать с большими форматами бумаги.

При создании новых инженерных конструкций может применяться математическое моделирование (машинный эксперимент) - моделирование реально существующих объектов, осуществляемое средствами языка математики и логики с помощью компьютера.

Математическое моделирование основано на создании и исследовании на компьютере математической модели реальной системы - совокупности математических соотношений (уравнений), описывающих эту систему. Уравнения (математическая модель) вместе с программой их решения вводят в компьютер и, имитируя различные значения входных (по отношению к исследуемой системе) сигналов и условий работы системы, определяют величины, характеризующие поведение системы.

Математическое моделирование, в отличие от материального (экспериментального, предметного), является теоретическим, происходящим только в компьютере, а не в реальности. Оно позволяет обойтись без сложного, дорогого или опасного эксперимента, например, при создании автомобилей, самолетов, локомотивов.

Математическое моделирование процесса или явления не может дать полного знания о нем. Это особенно существенно в том случае, когда предметом математического моделирования являются сложные системы, поведение которых зависит от значительного числа взаимосвязанных факторов различной природы. Поэтому иногда математическое моделирование дополняют созданием натуральной модели.

Система трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС предназначена для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства. Задача, решаемая системой, - моделирование изделий с целью существенного сокращения периода проектирования и скорейшего их запуска в производство. Чертежный редактор "КОМПАС-График" предоставляет широчайшие возможности автоматизации проектно-конструкторских работ в различных отраслях промышленности. Он успешно используется в машиностроительном проектировании, при проектно-строительных работах, составлении различных планов и схем.

На смену информационной поддержке отдельных этапов создания инженерных конструкций в конце 20-го века пришла идеология ведения бизнеса CALS (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла) или ИПИ – аббревиатура от слов «Информационная Поддержка процессов жизненного цикла Изделий» – является русскоязычным аналогом термина CALS.

Лекция 1. ИПИ-технологии в современной промышленности

Методология информационной поддержки процессов жизненного цикла изделий CALS зародилась в США в середине 80-х годов. Эта аббревиатура расшифровывалась как Компьютеризированная Поддержка Логистических Систем (Computer-Aided Acquisition and Logistics Support) (рис. 1.1).

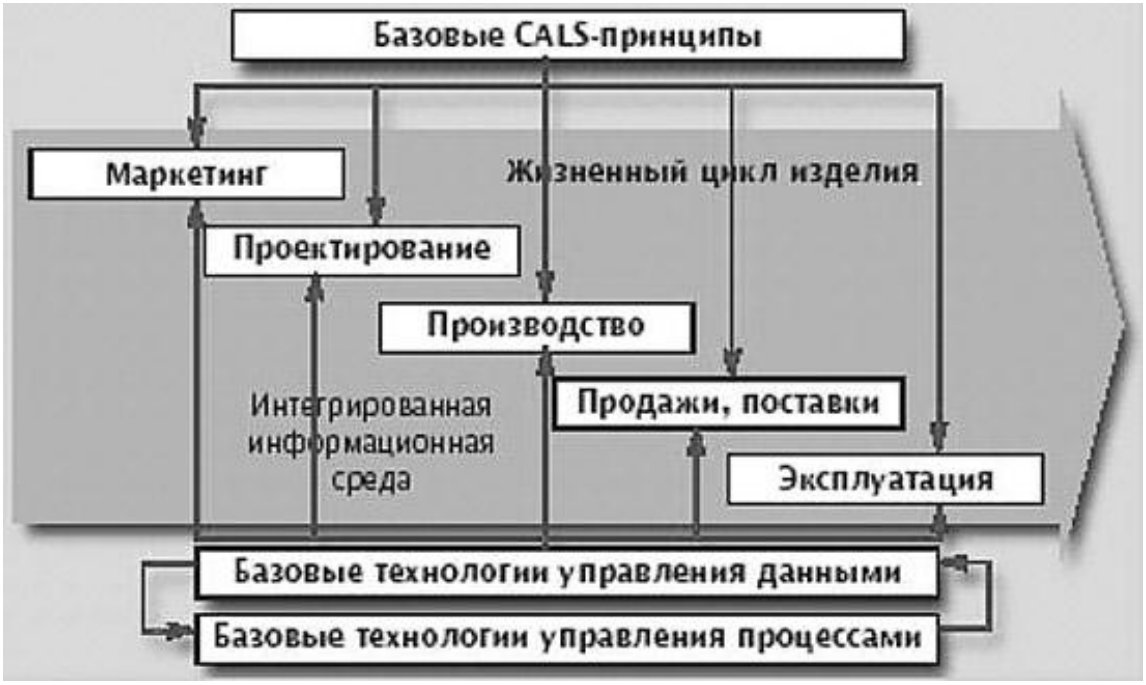


Рис. 1.1. Структура концепции CALS

В 1988 году в смысловом содержании с CALS были сняты военные ограничения, и она стала называться «Компьютеризированные Поставки и Поддержка» (Computer-Aided Acquisition and Support). В этом варианте названия была усилена организационная направленность CALS. В 1993 году CALS стала называться: «Поддержка Непрерывных Поставок и Жизненного Цикла» (Computer-Aided Acquisition and Lifecycle Support). Новое название акцентировало внимание на методологии параллельного проектирования, интегрированной логистической поддержке, управлении конфигурацией и управлении документооборотом. Это позволило интегрировать процессы на всем протяжении жизненного цикла изделий от выражения потребности в изделии (фазы анализа) до его утилизации. Позднее, под влиянием американского военно-промышленного комплекса, CALS иногда стали называть «Бизнесом в Высоком Темпе» (Commerce At Light Speed).

В отечественной литературе при употреблении термина CALS обычно имеется в виду расшифровка Computer-Aided Acquisition and Lifecycle Support. Как отмечено выше, русскоязычным аналогом CALS является

равнозначный термин ИПИ (Информационная Поддержка процессов жизненного цикла Изделий).

Компьютерная поддержка этапов ЖЦИ получила свое оформление в методологии и стандартах ИПИ/CALS. Согласно концептуальным положениям ИПИ/CALS, реальные бизнес-процессы отображаются на виртуальную информационную среду, в которой определение продукта представлено в виде полного электронного описания изделия, а среда его создания и среда эксплуатации – в виде систем моделирования процессов и их реализации. Все три составляющие (определение продукта, среды его создания и

CALS-технология или, в более современном изложении, PLM (Product Lifecycle Management) означает следующее. За термином "жизненный цикл" ("Lifecycle") стоят два понятия - "маркетинговый жизненный цикл" (МЖЦ) и "функциональный жизненный цикл" (ФЖЦ). В соответствии с определением CIMdata, известного в мире независимого эксперта по проблемам PLM, “PLM – это стратегический подход к ведению бизнеса, который использует набор совместимых решений для поддержки общего (collaborative) представления информации о продукте в процессе его создания, реализации и эксплуатации, в среде расширенного (extended) предприятия, начиная от концепции создания продукта до его утилизации – при интеграции людских ресурсов, процессов и информации”.

МЖЦ имеет отношение к поведению определенного вида продукции на рынке и завершается моральным износом и снятием с производства, а ФЖЦ связан с функциональным предназначением изделия и завершается физическим износом и утилизацией. Примером могут служить персональные компьютеры. Маркетинговый жизненный цикл систем на базе Pentium II закончился, но физически их успешно продолжают эксплуатировать во многих организациях.

Понятие "жизненный цикл" включает в себя этапы, показанные на рис. 1.2. и представляет собой именно цикл (от англ. «circle» - круг). Примером применения понятия "жизненного цикла" в нашей стране может служить его использование в крупнейшем авиастроительном комплексе "Сухой". Он охватывает четыре основных этапа: проектирование, производство, послепродажное обслуживание и утилизация.

Можно выделить три основных требования к PLM-решениям:

- возможность универсального, безопасного и управляемого способа доступа и использования информации, определяющей изделия;
- поддержание целостности информации, определяющей изделие, на протяжении всего жизненного цикла изделия;
- управление и поддержка бизнес-процессов, используемых при создании, распределении и использовании информации.

Сегодня производство сложных машинотехнических изделий стало невозможным без обеспечения информационной поддержки на всех стадиях их жизненного цикла. Информационная поддержка - это целый комплекс

вопросов, включающий автоматизацию процессов проектирования, обеспечение технологических процессов производства, автоматизацию управленческой деятельности предприятий, создание электронной эксплуатационной документации, внедрение автоматизированных систем заказа запасных частей и т. д.

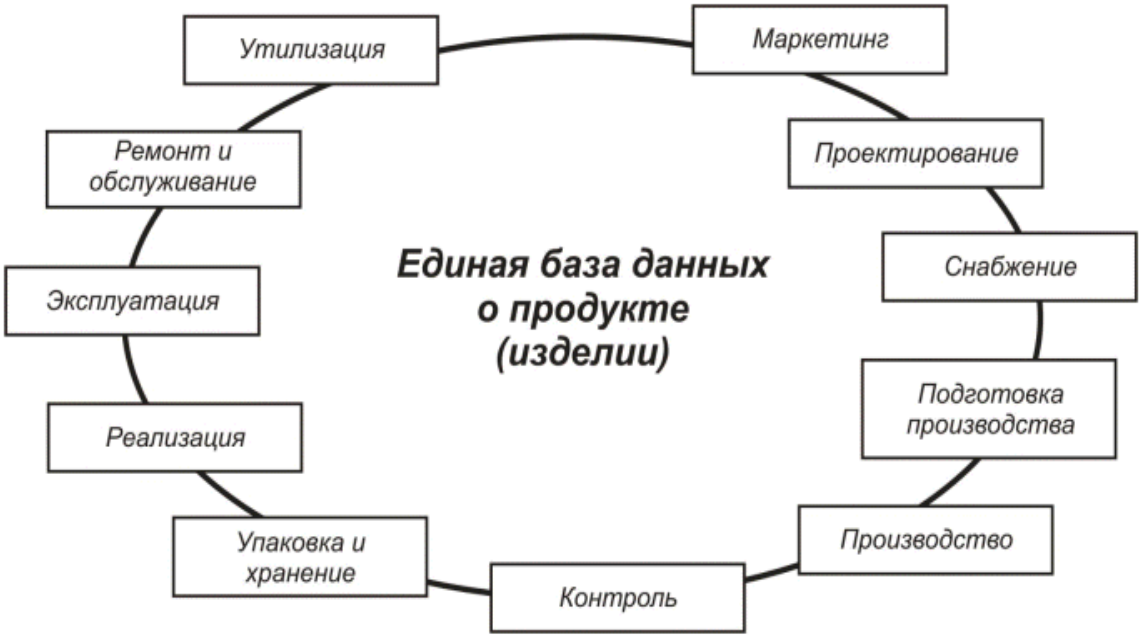


Рис. 1.2. Современная структура концепции CALS

Первой в мире концепцию PLM взяла на вооружение компания IBM/Dassault Systemes – один из лидеров в области разработки PLM-решений. В основу технических требований к системе поддержки жизненного цикла были положены следующие принципы системной методологии.

Интеграция промышленного бизнеса. Все виды деятельности и компоненты жизненного цикла изделия, должны обрести универсальное ядро, обеспечивающее единое представление промышленного бизнеса как систему продуктов, процессов и ресурсов. Все эти три компонента должны основываться на единой схеме описания (специфицирования).

Ассоциативность. Между всеми компонентами жизненного цикла изделия должны поддерживаться устойчивые и управляемые причинно-следственные связи. Любой элемент описания продукта, процесса или ресурса должен хранить при себе свое происхождение и условия существования. Это основная радикальная мера для сокращения затрат на выпуск новых, конкурентоспособных товаров.

Сертифицируемость. Электронная модель изделия должна обладать свойствами контролепригодности. Инструкция контроля – это вид процесса, специфицируемый по тем же законам, что и продукт, и являющийся неотъемлемой частью виртуального проекта изделия. Она должна существовать и действовать на всех этапах жизненного цикла. Данные об

изделии должны существовать и развиваться вместе с приложенными к ним процедурами контроля.

Условная инвариантность. Большинство изделий машиностроения (приборостроения) имеют множество версий, модификаций, вариантов исполнения, зависимых от определенных условий. Например, прибор может иметь различную комплектацию для работы в различных климатических условиях. Это делает проект многовариантным, добавляя такую категорию как *конфигурация*. При этом каждая из конфигураций должна обладать всеми свойствами целого проекта.

У всех видов конечного продукта есть общее свойство – они опираются на определенное условие, то есть, «если». Это условие является «включателем» для множества логических правил, которые должны быть исполнены во всех дисциплинах, относящихся к производству продукта. Для этого требуется мощное средство, обладающее возможностью создавать, контролировать и исполнять правила.

Многообразие способов представления данных проекта. Так как содержательная часть проекта изделия в электронном виде растет и покрывает все больше отраслей знаний, то и представление его должно быть селективным, то есть выборочным по определенному критерию. Соответственно, структура данных должна иметь признаки (атрибуты) роли, задачи и уровня допуска пользователя. Например, если к проекту обращается представитель эксплуатирующей организации, то откликаться должны только те объекты и элементы их спецификаций, которые относятся к процессу обслуживания. При этом инженерные расчеты, сборочную оснастку и зоны, не доступные для обслуживания, должны оставаться недоступными до тех пор, пока они не попадут в критерий запроса.

Так как существуют устойчивые (стандартные) роли пользователей, то должны быть предусмотрены соответствующие стандартные формы представления проекта: инженерное – для разработчиков; презентационное – для посетителей; эксплуатационное – для операторов; маркетинговое – для публикаций и продаж и другие. Программные приложения, работающие над электронным проектом, должны быть чувствительны к роли, в которой находится пользователь.

В относительно устоявшейся классификации систем, обеспечивающих информационную поддержку различных этапов ЖЦИ, можно выделить системы классов CAD/CAM, CAE, PDM, MRP I, MRP-II, ERP, SCM, CRM и CPC. Следует отметить, что этот перечень и терминология имеют определенную тенденцию к изменению. Так, наряду с термином PDM распространение получают термины cPDM (collaborative Product Data Management) и cPDm (collaborative Product Definition management).

Важную роль в жизненном цикле играет маркетинг (англ. marketing, от market - рынок) - система управления, основанная на комплексном анализе производственно-сбытовой деятельности и воздействия на нее с целью получения прибыли.

Маркетинг возник как вид управленческой деятельности во второй половине XX века. Но если вначале он применялся исключительно в целях сбыта произведенной продукции, то со второй половины 1970-х гг. он становится элементом стратегического управления фирмой, философией бизнеса. Отсюда новая концепция маркетинг-менеджмента, то есть построения всей управленческой деятельности фирмы.

Маркетинг включает товарную, ценовую политику, а также политику продвижения товара и продаж.

Основными принципами современного маркетинга являются: производство продукции, основанное на точном знании потребностей покупателя, рыночной ситуации и реальных возможностей фирмы; эффективное решение проблем потребителя; нацеленность фирмы на долгосрочный коммерческий успех; активное воздействие на формирование потребностей на рынке.

Базовыми системами, обеспечивающими реализацию стратегии PLM, являются системы классов CAD/CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing – компьютерное проектирование и изготовление), CAE (Computer Aided Engineering – компьютерный инженерный анализ) и PDM (Product Data Management – управление данными о продукте). В соответствии с концепцией IBM/Dassault Systemes, системы классов MRP I (Material requirements planning – Планирование потребности в материалах), MRP II (Manufacturing Resource Planning – планирование производственных ресурсов), ERP (Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия), SCM (Supply Chain Management – управление цепочками поставок) и CRM (Customer Relationship Management – управление взаимоотношениями с заказчиками) не относятся к средствам поддержки PLM-решений.

На других этапах ЖЦИ (т.е. помимо проектирования и подготовки производства) информационная поддержка обеспечивается как перечисленными выше системами (ERP, SCM и др.), так и некоторыми другими. Например, на этапе обслуживания и ремонта изделий применяются системы класса ILS (Integrated Logistic Support – интегрированная логистическая поддержка). Краткая характеристика ряда перечисленных выше систем приводится в последующих разделах данного пособия.

Проектирование и производство неразрывно связаны между собой. Конструктор разрабатывает геометрию изделия, устанавливает технические требования и оформляет конструкторскую документацию, а технолог обеспечивает изготовление изделия с учетом специфики производства, технических процессов и оборудования.

Электронное описание изделия дает исчерпывающее описание спроектированного изделия и фактически заменяет бумажную конструкторскую документацию. На его основе появляется возможность автоматизировать планирование технологических процессов. Таким образом, выполняется еще один принцип CALS - принцип безбумажного представления информации.

В фирме "Сухой" ОКБ "Сухой" находится в Москве, а основные заводы-производители в Комсомольске-на-Амуре, Иркутске и Новосибирске. При такой географической удаленности друг от друга их согласованная работа обеспечивается средствами сети Интернет и защиты информации.

Организация технологического процесса изготовления опытных образцов и серийного производства изделий осуществляется с помощью систем автоматизированного проектирования технологических процессов, так называемых CAM-систем (Computer Aided Manufacturing). Они обеспечивают наиболее рациональный выбор станочного оборудования, инструментов и режимов обработки деталей.

Комплексные решения при этом базируются на передовых технологиях гибридного моделирования, интегрированных средствах электронного документооборота, а также на широком спектре специализированных модулей, среди которых важное место занимают программы для виртуального моделирования процессов механической и электроэррозионной обработки с выходом на станки с числовым программным управлением (ЧПУ).

Современные металлообрабатывающие станки и многооперационные обрабатывающие центры оснащены числовым программным управлением (ЧПУ). Это управление обработкой заготовки на станке по программе, заданной в цифровой форме. Устройство ЧПУ выдает управляющие воздействия на исполнительные органы станка в соответствии с программой и информацией о состоянии управляемого объекта. Станки с ЧПУ сочетают высокую производительность, присущую станкам-автоматам, с гибкостью, быстротой переналаживания на другие режимы работы, что характерно для универсальных станков. Обрабатывающий центр оснащен инструментальным магазином большой емкости и устройствами для автоматической смены инструмента. Станок позволяет вести комплексную механическую обработку большого числа поверхностей заготовки различными способами - точением, фрезерованием, сверлением и др.

В современном машиностроении и приборостроении происходит усложнение выпускаемой продукции, номенклатура ее увеличивается, а серийность производства уменьшается. Это ведет к значительному увеличению объемов и сроков выполнения работ в сфере конструкторско-технологической подготовки производства. Требования рыночной экономики заставляют предприятия постоянно улучшать потребительские свойства и качество изделий, а сроки их выпуска максимально сокращать.

Это вызвало к жизни концепцию сквозного цикла проектирования и производства "от идеи до металла". Суть ее состоит в том, что компьютерные системы и оборудование должны рассматриваться как единый информационный технологический процесс на всем протяжении от проектирования до изготовления изделий. Сквозной цикл состоит из блоков CAD/CAM/CAE/PDM. Эти системы являются частью более общей концепции предприятия.

Кроме трехмерных (виртуальных) моделей на экране монитора компьютера современные информационные и лазерные технологии дают

возможность создавать "твердые" модели отдельных деталей из светочувствительного пластика. Эта технология носит название "лазерная стереолитография". Она основана на использовании фотополимеризации лазерным излучением.

Сначала по проекту конструктора создается компьютерная (виртуальная) модель, которая через минимальное время может быть воплощена в виде реальной модели. Производятся все детали для сборки. Собранную модель можно покрасить, проверить возможность установки и размещения электронных компонентов, оптики, эргономику, предъявить для утверждения дизайна заказчиком и т.д.

Пластиковая модель легко поддается обработке, покраске, металлизации. Модель может быть использована для проверки идей конструктора, использоваться на презентациях, в маркетинговых акциях и т.п.

Области применения лазерной стереолитографии:

- изготовление оснастки для разных видов литья;
- точное литье по сплошным выжигаемым моделям.

Лазерная стереолитография позволяет создавать детали самой сложной формы с максимальными размерами 250x250x250 мм.

Сначала объемный виртуальный образ делят на набор послойных изображений тонких сечений (0,1-0,2 мм). В ванну, наполненную фотополимеризующейся жидкостью, помещают плоскую подставку, на которой впоследствии появится объект, так, чтобы она была погружена на толщину формируемого слоя (те самые 0,1-0,2 мм). Затем поверхность жидкости обрабатывают лучом лазера, и в тех местах, которые он облучает, образуются твердые участки. Так возникает нижний слой модели. Платформу чуть притапливают и формируют второй слой. Операцию повторяют до тех пор, пока модель не будет целиком готова.

Важную роль в машиностроении играет логистика (от англ. logistics - материально-техническое снабжение) - контроль за всеми видами деятельности, связанными с закупкой ресурсов для производства и доставкой готовой продукции покупателю, включая необходимое информационное обеспечение этих процессов. Логистика также координирует взаимоотношения всех членов системы снабжения и распределения. К непосредственным функциям логистики относятся: транспортировка, складирование, сбор заказов, распределение продукции, упаковка, сервисное обслуживание.

Система логистики включает логистику на входе и логистику на выходе. Первая управляет всеми операциями с сырьем и материалами, начиная с выбора поставщика и заканчивая возвратом некачественного сырья; вторая контролирует распределение готовой продукции, включая ее доставку конечному потребителю.

Логистика используется участниками каналов товародвижения для снижения издержек, повышения качества обслуживания покупателей и поддержания объема запасов на складе на минимальном необходимом уровне.

Так информационные технологии в машиностроении и металлообработке из важного, но вспомогательного средства сегодня превратились в главную организующую силу - реальную сквозную автоматизацию производственных процессов.

Лекция 2. Применение системного подхода в проектировании

Понятие инженерного проектирования. Проектирование технического объекта – создание, преобразование и представление в принятой форме образа этого еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека как результат творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. В любом случае инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности общества в некоторых технических объектах, которыми могут быть объекты строительства, промышленные изделия или процессы. Проектирование включает в себя разработку технического предложения и (или) технического задания (ТЗ), отражающих эти потребности, и реализацию ТЗ в виде проектной документации.

Обычно ТЗ представляют в виде некоторых документов, и оно становится исходным (первичным) описанием объекта. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть проект, точнее, окончательное описание объекта. Таким образом, проектирование – процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Преобразование исходного описания в окончательное порождает ряд промежуточных описаний, подводящих итоги решения некоторых задач и используемых при обсуждении и принятии проектных решений для окончания или продолжения процесса проектирования.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека и ЭВМ, называют автоматизированным в отличие от ручного (без использования ЭВМ) или автоматического (без участия человека на промежуточных этапах). Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой систему автоматизированного проектирования – САПР (в англоязычном написании CADS – Computer Aided Design System).

Принципы системного подхода. Основные идеи и принципы проектирования сложных систем выражены в системном подходе. Для специалиста в области системотехники они считаются очевидными и естественными, однако их соблюдение и реализация зачастую сопряжены с определенными трудностями, обусловливаемыми особенностями

проектирования. Как и большинство образованных людей, правильно использующих родной язык без постоянного привлечения правил грамматики, инженеры применяют системный подход без обращения к пособиям по системному анализу. Однако интуитивный подход без применения правил системного анализа может оказаться недостаточным для решения все более усложняющихся задач инженерной деятельности.

Основной общий принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей явления или сложной системы с учетом их взаимодействия. Системный подход включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение атрибутов, анализ влияния внешней среды. Системный подход рассматривают как направление научного познания и социальной политики. Он является базой для обобщающей дисциплины «Теория систем», в которой конкретизируются положения системного подхода; она посвящена исследованию и проектированию сложных экономических, социальных, технических систем, чаще всего слабоструктурированных. Характерными примерами таких систем будут производственные системы. При проектировании систем цели достигаются в многошаговых процессах принятия решений. Методы принятия решений часто выделяют в самостоятельную дисциплину, называемую «Теория принятия решений».

В технике дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы, их проектирование и которая аналогична теории систем, чаще называют системотехникой. Предметом системотехники становятся, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, во-вторых, методы и принципы их проектирования и исследования. В системотехнике важно уметь сформулировать цели системы и организовать ее рассмотрение с позиций поставленных целей. Тогда можно отбросить лишние и малозначимые части при проектировании и моделировании и перейти к постановке оптимизационных задач.

Системы автоматизированного проектирования и управления относят к числу наиболее сложных современных искусственных систем. Их проектирование и сопровождение невозможны без системного подхода. Поэтому идеи и положения системотехники входят составной частью в дисциплины, посвященные изучению современных автоматизированных систем и технологий их применения.

Интерпретация и конкретизация системного подхода имеют место в ряде известных подходов с другими названиями, которые также можно рассматривать как компоненты системотехники. Таковы структурный, блочно-иерархический, объектно-ориентированный подходы.

При структурном подходе, как разновидности системного, требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции сложных описаний объектов и соответственно

средств их создания на иерархические уровни и аспекты, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

Ряд важных структурных принципов, используемых при разработке информационных систем и, прежде всего, их программного обеспечения (ПО), выражен в объектно-ориентированном подходе к проектированию. Такой подход имеет следующие преимущества в решении проблем управления сложностью и интеграции ПО:

1) Вносит в модели приложений большую структурную определенность, распределяя представленные в приложении данные и процедуры между классами объектов;
2) Сокращает объем спецификаций благодаря введению в описания иерархии объектов и отношений наследования между свойствами объектов разных уровней иерархии;
3) уменьшает вероятность искажения данных вследствие ошибочных действий за счет ограничения доступа к определенным категориям данных в объектах.

Описание в каждом классе объектов допустимых обращений к ним и принятых форматов сообщений облегчает согласование и интеграцию ПО.

Для всех подходов к проектированию сложных систем характерны также следующие особенности:

- структуризация процесса проектирования, выражаемая декомпозицией проектных задач и документации, выделением стадий, этапов, проектных процедур. Эта структуризация является сущностью блочно-иерархического подхода к проектированию;
- итерационный характер проектирования;
- типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

Основные понятия системотехники. В теории систем и системотехнике введен ряд терминов, среди них к базовым относят следующие понятия.

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, иерархичности, многоаспектности, многопараметричности. Очевидно, что современные автоматизированные информационные системы, в частности САПР, будут 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 – элементы системы и их взаимосвязи; понятие структуры отличается от понятия самой системы 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 внутренние, выходные и внешние, выражающие свойства элементов системы, самой системы и внешней среды соответственно. Векторы внутренних, выходных и внешних параметров далее обозначены $\mathbf{X} = (x_1, x_2, ..., x_n)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, ..., y_m)$, $\mathbf{E} = (e_1, e_2, ..., e_k)$ соответственно.

Фазовая переменная – величина, характеризующая энергетическое или информационное наполнение элемента или подсистемы.

Состояние – совокупность значений фазовых переменных, зафиксированных в одной временной точке процесса функционирования.

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 в виде последовательности точек в пространстве состояний.

К характеристикам сложных систем и их моделей 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 параметров 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.

Составные части системотехники:

- иерархическая структура систем, организация их проектирования;
- анализ и моделирование систем;
- синтез и оптимизация систем.

Моделирование имеет две четко различимые задачи:

1. Создание моделей сложных систем (в англоязычном написании – modeling);
2. Анализ свойств систем на основе исследования их моделей (simulation).

Синтез также подразделяют на две задачи:

1. Синтез структуры проектируемых систем (структурный синтез);
2. Выбор численных значений параметров элементов систем (параметрический синтез).

Эти задачи относят к области принятия проектных решений. Если синтез выполняется с целью получения экстремального значения некоторой функции, характеризующей качество проектного решения, то синтез называют оптимизацией. Моделирование и оптимизацию желательно выполнять с учетом статистической природы систем.

Детерминированность – лишь частный случай. При проектировании характерны нехватка достоверных исходных данных, неопределенность условий принятия решений. Учет статистического характера данных при моделировании в значительной мере основан на методе статистических испытаний (методе Монте-Карло), а принятие решений – на использовании нечетких множеств, экспертных систем, эволюционных вычислений.

Лекция 3. Структура процесса проектирования

Стадии проектирования

При использовании блочно-иерархического подхода к проектированию представления о проектируемой системе расчленяют на иерархические уровни. На верхнем уровне используют наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень подробности описания возрастает, при этом рассматривают уже отдельные блоки системы, но с учетом воздействий на каждый из них его соседей. Такой подход позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности, поддающиеся решению с помощью имеющихся средств проектирования. Разбиение на уровни должно быть таким, чтобы

документация на блок любого уровня была обозрима и воспринимаема о-ним человеком.

В каждом приложении число и название иерархических уровней проектирования могут быть различными, но для большинства приложений возможно следующее укрупненное выделение уровней:

- системный уровень, на котором решают наиболее общие задачи проектирования систем, машин и процессов; результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования, диаграмм потоков данных и т. п.;
- макроуровень, на котором проектируют отдельные устройства, узлы машин и приборов; результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. п.;
- микроуровень, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В каждом приложении число выделяемых уровней и их наименования могут быть различными. Так, в радиоэлектронике микроуровень часто называют компонентным, макроуровень – схемотехническим. Между схемотехническим и системным уровнями вводят уровень, называемый функционально-логическим. В вычислительной технике системный уровень подразделяют на уровни проектирования ЭВМ (вычислительных систем) и вычислительных сетей. В машиностроении имеются уровни деталей, узлов, машин, комплексов.

В зависимости от последовательности решения задач иерархических уровней различают нисходящее, восходящее и смешанное проектирование (стили проектирования). Последовательность решения задач от нижних уровней к верхним характеризует восходящее проектирование, обратная последовательность приводит к нисходящему проектированию, в смешанном стиле имеются элементы как восходящего, так и нисходящего проектирования. В большинстве случаев для сложных систем предпочитают нисходящее проектирование. Однако, при наличии заранее спроектированных составных блоков (устройств) можно говорить о смешанном проектировании. Неопределенность и нечеткость исходных данных при нисходящем проектировании (так как еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при восходящем проектировании (поскольку ТЗ 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).

Стадии проектирования – наиболее крупные части проектирования как процесса, развивающегося во времени. В общем случае выделяют 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, и 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 декомпозировать или расчленить на более мелкие компоненты, называемые проектными операциями, например, при анализе прочности детали сеточными методами операциями могут быть построение сетки, 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.

Иногда разработку ТЗ на проектирование называют внешним проектированием, а реализацию ТЗ – внутренним проектированием.

Классификация моделей

В автоматизированных проектных процедурах вместо еще не существующего проектируемого объекта оперируют некоторым квазиобъектом ((от лат. quasi - якобы - как будто), приставка, означающая: «мнимый», «ненастоящий» (напр., квазиученый), «почти», «близко») – моделью, которая отражает некоторые интересующие исследователя свойства объекта. Модель может быть физическим объектом (макет, стенд) или спецификацией. Среди моделей-спецификаций различают упомянутые выше функциональные, поведенческие, информационные, структурные модели (описания). Эти модели называют математическими, если они формализованы средствами аппарата и языка математики.

В свою очередь, математические модели могут быть геометрическими, топологическими, динамическими, логическими и т. п., если они отражают соответствующие свойства объектов.

Наряду с математическими моделями при проектировании используют функциональные ***EDEF***-модели, информационные модели в виде диаграмм сущность – отношение, геометрические модели-чертежи. В дальнейшем, если нет специальной оговорки, под словом «модель» будем подразумевать математическую модель.

Математическая функциональная модель в общем случае представляет собой алгоритм вычисления вектора выходных параметров **Y** при заданных векторах параметров элементов **X** и внешних параметров **E**.

Математические модели могут быть символическими и численными. При использовании символических моделей оперируют не значениями величин, а их символическими обозначениями (идентификаторами). Численные модели могут быть аналитическими, т. е. их можно представить в виде явно выраженных зависимостей выходных параметров **Y** от параметров внутренних **X** и внешних **E** или алгоритмическими, в которых связь **Y, X** и **E** задана неявно в виде алгоритма моделирования. Важнейший частный случай алгоритмических моделей – имитационные, они отображают процессы в системе при наличии внешних воздействий на систему. Другими словами, имитационная модель – это алгоритмическая модель.

Классификацию математических моделей выполняют также по ряду других признаков. Так, в зависимости от принадлежности к тому или иному иерархическому уровню выделяют модели уровней системного, функционально-логического, макроуровня (сосредоточенного) и микроуровня (распределенного).

По характеру используемого для описания математического аппарата различают модели лингвистические, теоретико-множественные, абстрактно-алгебраические, нечеткие, автоматные и т. п.

Например, на системном уровне преимущественно применяют модели систем массового обслуживания и сети Петри, на функционально-логическом уровне – автоматные модели на основе аппарата передаточных функций или конечных автоматов, на макроуровне – системы алгебраических и дифференциальных уравнений, на микроуровне – дифференциальные уравнения в частных производных. Особое место занимают геометрические модели, используемые в системах конструирования.

Кроме того, введены понятия полных моделей и макромоделей, моделей статических и динамических, детерминированных и стохастических, аналоговых и дискретных, символических и численных.

Полная модель объекта в отличие от макромодели описывает не только процессы на внешних выводах моделируемого объекта, но и внутренние для объекта процессы. Статические модели описывают статические состояния, в них не присутствует время в качестве независимой переменной. Динамические модели отражают поведение системы, т. е. в них обязательно используется время. Стохастические и детерминированные модели различают в зависимости от учета или неучета случайных факторов.

В аналоговых моделях фазовые переменные – непрерывные величины, в дискретных – дискретные, в частном случае дискретные модели являются логическими (булевыми), в них состояние системы и ее

элементов описывается булевыми величинами. В ряде случаев полезно применение смешанных моделей, в которых одна часть подсистем характеризуется аналоговыми моделями, другая – логическими.

Информационные модели относят к информационной страте автоматизированных систем, их используют прежде всего при инфологическом проектировании баз данных для описания связей между единицами информации.

Наибольшие трудности возникают при создании моделей слабоструктурированных систем, что характерно, прежде всего, для системного уровня проектирования. Здесь значительное внимание уделяется экспертным методам. В теории систем сформулированы общие рекомендации по подбору экспертов при разработке модели, организации экспертизы, по
обработке полученных результатов. Достаточно общий подход к построению моделей сложных слабоструктурированных систем выражен в методиках IDEF.

Формальную модель объекта можно представить в виде множества величин, описывающих процесс функционирования реальной системы и образующих в общем случае следующие подмножества:
совокупность входных воздействий на

$$\text{систему } \overline{x_i \in X},$$

$$i = \overline{1,\ n_x},$$

совокупность воздействий внешней среды

$$\nu_l \in X, \quad \overline{l = 1,\ n_\nu},$$

совокупность внутренних (собственных) параметров

$$\text{системы } \overline{h_k \in H}, \quad k = \overline{1,\ n_H},$$

совокупность выходных характеристик

$$\text{системы } \overline{y_j \in Y},$$

$$j = \overline{1,\ n_Y}.$$

В перечисленных подмножествах можно выделить управляемые и неуправляемые переменные. В общем случае x_i, ν_l, h_k, y_j будут элементами непересекающихся подмножеств и содержат как детерминированные, так и стохастические составляющие.

При моделировании системы **S** входные воздействия, воздействия внешней среды **E** и внутренние параметры системы являются независимыми (экзогенными) переменными, которые в векторной форме имеют соответственно вид:

$$\vec{x}(t) = (x_1(t),\ x_2(t)...x_{nX}(t)),\ \vec{\nu}(t) = (\nu_1(t),\ \nu_2(t)...\nu_{nV}(t)),\ \vec{h}(t) = (h_1(t),\ h_2(t)...h_{nH}(t)),$$

а выходные характеристики системы являются зависимыми (эндогенными) переменными и в векторной форме имеют вид $\vec{y}(t) = (y_1(t),\ y_2(t)...y_{nY}(t))$.

Процесс функционирования системы **S** описывают во времени оператором F, который в общем случае преобразует экзогенные переменные в эндогенные соотношениями вида:

$$\vec{y}(t) = F(\vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t). \qquad (1.1)$$

Совокупность зависимостей выходных характеристик системы от времени $y_j(t)$ для всех видов $j = \overline{1, n_Y}$ называют выходной траекторией *y(t)*. Зависимость (1.1) есть закон функционирования системы F. В общем случае закон функционирования системы F может быть задан в виде функции, функционала, логических условий, в алгоритмической и табличной формах или в виде словесного правила соответствия.

Весьма важным для описания и исследования системы считается понятие алгоритма функционирования A, под которым понимают метод получения выходных характеристик с учетом входных воздействий *x(t)*, воздействий внешней среды *v(t)* и собственных параметров системы *h(t)*. Очевидно, что один и тот же закон функционирования F системы **S** может быть реализован различными способами, т. е. с помощью множества различных алгоритмов функционирования A.

Соотношения (1.1) служат математическим описанием поведения объекта (системы) моделирования во времени *t*, т. е. отражают его динамические свойства. Поэтому математические модели такого вида принято называть динамическими моделями.

Для статических моделей математическая модель (1.1) представляет собой отображение между двумя подмножествами свойств моделируемого объекта **Y** и (**X**, **V**, **H**), что в векторной форме может быть записано:

$$\vec{y}(t) = f(\vec{x}, \vec{v}, \vec{h}). \qquad (1.2)$$

Соотношения (1.1) и (1.2) могут быть заданы различными способами: аналитически (с помощью формул), графически, таблично и т. д. Такие соотношения в ряде случаев могут быть получены через свойства системы **S** в конкретные моменты времени, называемые состояниями. Состояние системы **S** характеризуется векторами:

$$\vec{z}' = (z_1', z_2'(t)..., z_k') \quad \vec{z}'' = (z_1'', z_2''(t)..., z_k'')$$

где $z_1' = z_1(t')$, $z_2' = z_2(t')$, …, $z_k' = z_k(t')$ в момент $t'' \in (t_0, T)$, $z_1'' = z_1(t'')$, $z_2'' = z_2(t'')$, …, $z_k'' = z_k(t'')$ в момент $t'' \in (t_0, T)$ и т. д., $k = \overline{1, n_z}$.

Если рассматривать процесс функционирования системы **S** как последовательную смену состояний $z_1(t)$, $z_2(t)$, …, $z_k(t)$, то они могут быть интерпретированы как координаты точки в *k*-мерном фазовом пространстве, причем каждой реализации процесса будет соответствовать некоторая фазовая траектория. Совокупность всех возможных значений состояний $\{z\}$

называют пространством состояний объекта моделирования Z, причем $z_k \in Z$.

Состояния системы **S** в момент времени $0 t_0 < t^* \le T 0$ полностью определяются начальными условиями $z^0 = (z_1, z_2^0(t)..., z_k)$, где $z_1 = z_1(t_0)$, $z_2 = z_2(t_0)$, …, $z_k = z_k(t_0)$, входными воздействиями $x(t)$ внутренними параметрами $h(t)$ и воздействиями внешней среды $v(t)$, которые имели место за промежуток времени $t^* - t_0$ с помощью двух векторных уравнений:

$$z(t) = \Phi(\vec{z}^0, \vec{x}, \vec{\nu}, h, t), \qquad (1.3)$$

$$z(t) = \vec{F}(z, t). \qquad (1.4)$$

Первое уравнение по начальному состоянию z° и экзогенным переменным *x, v, h* определяет вектор-функцию *z(t)*, а второе по полученному значению состояний *z(t)* – эндогенные переменные на выходе системы *y(t)*. Таким образом, цепочка уравнений объекта «вход – состояния – выход» позволяет определить характеристики системы:

$$\vec{y}(t) = F[\overrightarrow{\Phi(\vec{z}^0, \vec{x}, \vec{\nu}, h, t)}]. \qquad (1.5)$$

В общем случае время в модели системы **S** может рассматриваться на интервале моделирования (0, T) как непрерывное, так и дискретное, т. е. квантованное на отрезки длиной Δt временных единиц каждый, когда $T = m\Delta t$, где $m = \overline{1, m_T}$ – число интервалов дискретизации.

Если математическое описание объекта моделирования не содержит элементов случайности или они не учитываются, т. е. если можно считать, что в этом случае стохастические воздействия внешней среды $\vec{\nu}(t)$ и стохастические внутренние параметры $h(t)$ отсутствуют, то модель называют детерминированной в том смысле, что ее характеристики однозначно определяются детерминированными входными воздействиями:

$$\vec{y}(t) = f(\vec{x}, t). \qquad (1.6)$$

Очевидно, что детерминированная модель представляет собой частный случай стохастической модели.

Типовые проектные процедуры

Создать проект объекта (изделия или процесса) означает выбрать структуру объекта, определить значения всех его параметров и представить результаты в установленной форме. Результаты (проектная документация) могут быть выражены в виде чертежей, схем, пояснительных записок, программ для программно-управляемого технологического оборудования и других документов на бумаге или на машинных носителях информации.

Структурный синтез. Разработка (или выбор) структуры объекта есть проектная процедура, называемая структурным синтезом, а расчет (или выбор) значений параметров элементов **X** – процедура параметрического синтеза.

Задача структурного синтеза формулируется в системотехнике как ***задача принятия решений*** (***ЗПР***). Ее суть заключается в определении цели, множества возможных решений и ограничивающих условий.

Классификацию ЗПР осуществляют по ряду признаков. По числу критериев различают задачи одно- и многокритериальные. По степени неопределенности различают ЗПР детерминированные, ЗПР в условиях риска (при наличии в формулировке задачи случайных параметров), ЗПР в условиях неопределенности, т. е. при неполноте или недостоверности исходной информации. Реальные задачи проектирования, как правило, являются многокритериальными. Одна из основных проблем постановки многокритериальных задач – установление правил предпочтения вариантов. Способы сведения многокритериальных задач к однокритериальным и последующие пути решения изучаются в дисциплинах, посвященных методам оптимизации и математическому программированию.

Наличие случайных факторов усложняет решение ЗПР. Основные подходы к решению ЗПР в условиях риска заключаются или в решении «для наихудшего случая», или в учете в целевой функции математического ожидания и дисперсии выходных параметров. В первом случае задачу решают как детерминированную при завышенных требованиях к качеству решения, что является главным недостатком подхода. Во втором случае достоверность результатов решения намного выше, но возникают трудности с оценкой целевой функции. Применение метода Монте-Карло в случае алгоритмических моделей становится единственной альтернативой и, следовательно, для решения требуются значительные вычислительные ресурсы.

Существуют две группы ЗПР в условиях неопределенности. Одна из них решается при наличии противодействия разумного противника. Такие задачи изучаются в теории игр, для задач проектирования в технике они не характерны. Во второй группе противодействие достижению цели оказывают силы природы. Для их решения полезно использовать теорию и методы нечетких множеств.

Например, при синтезе структуры автоматизированной системы постановка задачи должна включать в качестве исходных данных следующие сведения:

- множество выполняемых системой функций (другими словами, множество работ, каждая из которых может состоять из одной или более операций); возможно, что в этом множестве имеется частичная упорядоченность работ, которая может быть представлена в виде ориентированного графа, где вершины соответствуют работам, а дуги – отношениям порядка;
- типы допустимых для использования серверов (машин), выполняющих функции системы;
- множество внешних источников и потребителей информации;
- во многих случаях задается также некоторая исходная структура системы в виде взаимосвязанной совокупности серверов определенных

типов; эта структура может рассматриваться как обобщенная избыточная или как вариант первого приближения;

- различного рода ограничения, в частности ограничения на затраты материальных ресурсов и (или) на времена выполнения функций системы.

Задача заключается в синтезе (или коррекции) структуры, определении типов серверов (программно-аппаратных средств), распределении функций по серверам таким образом, чтобы достигался экстремум целевой функции при выполнении заданных ограничений.

Конструирование, разработка технологических процессов, оформление проектной документации – частные случаи структурного синтеза.

Процедуры анализа. Следующая после синтеза группа проектных процедур – процедуры анализа. Цель анализа – получение информации о характере функционирования и значениях выходных параметров **Y** при заданных структуре объекта, сведениях о параметрах внешней среды **E** и параметрах элементов **X** (параметры внешней среды и параметры элементов называют также внешними и внутренними параметрами соответственно). Если заданы фиксированные значения параметров **X** и **E**, то имеет место процедура одновариантного анализа, которая сводится к решению уравнений математической модели, и вычислению вектора выходных параметров **Y**. Если заданы статистические сведения о параметрах **X** и нужно получить оценки числовых характеристик распределений выходных параметров (например, оценки математических ожиданий и дисперсий), то это процедура статистического анализа. Если требуется рассчитать матрицы абсолютной **A** и (или) относительной **B** чувствительности, то имеет место задача анализа чувствительности.

В процедурах многовариантного анализа определяется влияние внешних параметров, разброса и нестабильности параметров элементов на выходные параметры. Процедуры статистического анализа и анализа чувствительности – характерные примеры процедур многовариантного анализа.

Лекция 4. Системы автоматизированного проектирования

САПР (Система Автоматизации Проектных Работ) — автоматизированная система, реализующая информационную технологию выполнения функций проектирования, представляет собой организационно-техническую систему, предназначенную для автоматизации процесса проектирования, состоящую из персонала и комплекса технических, программных и других средств автоматизации его деятельности (Материал из Википедии — свободной энциклопедии).

Для перевода **САПР** на английский язык используется термин **CAD** (англ. *computer-aided de-sign*), подразумевающий использование компьютерных технологий в проектировании. В ГОСТ 15971-90 термин «*Computer-aided*

design» приводится как стандартизированный англоязычный эквивалент термина «автоматизированное проектирование». Понятие **CAD** может обозначать как программные и аппаратные средства, так и аппаратно-программные комплексы автоматизации проектирования. Понятие **CAD** не является полным эквивалентом **САПР**, как организационно-технической системы.

За русским термином САПР скрывается несколько классов программных систем, имеющих отношение к автоматизации труда инженеров, конструкторов и технологов. Каждый из классов имеет устоявшуюся трехбуквенную английскую аббревиатуру:

- двумерное черчение и трехмерное геометрическое проектирование (**CAD**);
- инженерный анализ (**CAE**);
- технологическая подготовка производства (**CAPP**);
- автоматизация производства (**CAM**);
- управление данными об изделии (**PDM**);
- управление жизненным циклом изделия (**PLM**).

1.3.1. Цели создания и задачи САПР

В рамках жизненного цикла промышленных изделий, САПР решает задачи автоматизации стадий проектирования и подготовки производства.

Основная цель создания САПР — повышение эффективности труда инженеров, включая:

- сокращения трудоёмкости проектирования и планирования;
- сокращения сроков проектирования;
- сокращения себестоимости проектирования и изготовления, уменьшение затрат на эксплуатацию;
- повышения качества и технико-экономического уровня результатов проектирования;
- сокращения затрат на натурное моделирование и испытания.

Достижение целей создания САПР обеспечивается путем:

- автоматизации оформления документации;
- информационной поддержки и автоматизации принятия решений;
- использования технологий параллельного проектирования;
- унификации проектных решений и процессов проектирования;
- повторного использования проектных решений, данных и наработок;
- стратегического проектирования;
- замены натурных испытаний и макетирования математическим моделированием на ЭВМ;
- повышения качества управления проектированием;
- применения методов вариантного проектирования и оптимизации.

- уменьшение объёма испытаний и доводки опытных образцов в результате повышения уровня достоверности проектных решений и, следовательно, снижение временных затрат.

1.3.2. Структура САПР

Как и любая сложная система, САПР состоит из подсистем. Различают подсистемы проектирующие и обслуживающие.

Рис. 1.3

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 сре-дой (или оболочкой) САПР. Типичными обслуживающими подсистемами будут подсистемы управления проектными данными PDM (Product Data Management), 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 (ПО), представляемое компьютерными программами САПР (рис.1.3)
- 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 (БД) 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.

1.3.3. Разновидности САПР

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 следует считать следующие группы САПР.

1. **Машиностроительные САПР** (**MCAD** англ. *mechanical computer-aided design*) — автоматизированное проектирование механических устройств. Их часто называют машиностроительными САПР или системами MCAD (Mechanical CAD). Применяются в автомобилестроение, судостроении, авиакосмической промышленности, при создании нефтегазового оборудования для добычи, транспортировки, хранения и переработки, при производстве товаров народного потребления и т.д., включают в себя разработку деталей и сборок (механизмов) с использованием параметрического проектирования на основе конструктивных элементов, технологий поверхностного и объемного моделирования. Инструментальные средства проектирования в машиностроении - это CAD/CAE/CAM системы. Они предназначены для комплексной автоматизации проектирования, конструирования и изготовления продукции машиностроения;

2. **САПР для радиоэлектроники**: системы ECAD (Electronic CAD) или EDA (Electronic Design Automation). Их используют для проектирования радиоэлектронных средств, интегральных схем, печатных плат и т. п.

3. **САПР в области архитектуры и строительства** *(AEC CAD (*англ. *architecture, engineering and construction computer-aided design*) или *CAAD* (англ. *computer-aided architectural design*)). Используются для проектирования зданий, промышленных объектов, дорог, мостов и проч.

- *EDA* (англ. *electronic design automation*)*;*
- *ECAD* (англ. *electronic computer-aided design*)*.*

Кроме того, известно большое число специализированных САПР или выделяемых в указанных группах, или представляющих самостоятельную ветвь в классификации. Примерами таких систем будут САПР больших интегральных схем (БИС); САПР летательных аппаратов; САПР электрических машин и т. п.

Классификация САПР по целевому назначению и их функции

ГОСТ 23501.108-85 устанавливает следующие признаки классификации САПР: тип объекта проектирования, разновидность объекта проектирования, сложность объекта проектирования, уровень автоматизации проектирования, комплексность автоматизации проектирования, характер выпускаемых документов, количество выпускаемых документов, количество уровней в структуре технического обеспечения. По целевому назначению различают САПР или подсистемы САПР, обеспечивающие разные аспекты (страты) проектирования. Так, в составе MCAD появляются CAD/CAM/CAE-системы.

По целевому назначению различают подсистемы САПР, которые обеспечивают различные аспекты проектирования.

- **CAD** — средства автоматизированного проектирования, в контексте указанной классификации термин обозначает средства САПР предназначенные для автоматизации двумерного и/или трехмерного геометрического проектирования, создания конструкторской и/или технологической документации, САПР общего назначения. Для обозначения данного класса средств САПР используется также термин CADD (англ. computer-aided design and drafting) — автоматизированное проектирование и создание чертежей.

Функции CAD-систем в машиностроении подразделяют на функции двухмерного (2D) и трехмерного (3D) проектирования. К функциям 2D относятся черчение, оформление конструкторской документации; к функциям 3D — получение трехмерных моделей, параметрические расчеты, реалистичная визуализация, взаимное преобразование 2D и 3D моделей.

Для современных CAD-систем характерен модульный принцип построения. Базовые модули конструкторского проектирования предназначены для твердотельного и поверхностного моделирования, синтеза конструкций из базовых элементов формы, поддерживают параметризацию и ассоциативность, проекционное черчение, выполняют разработку чертежей с простановкой размеров и допусков. Пользователь может пополнять библиотеку оригинальными моделями. Синтез трехмерных моделей 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.

Основными MCAD системами являются CATIA (Dassault Systemes), UNIGRAPHICS NX (Siemens PLM Software), Pro/ENGINEER (PTC), AutoCAD Inventor Professional.

Дополнительные модули конструкторского проектирования имеют более конкретную, но узкую специализацию. Примерами таких модулей могут служить модули конструирования панелей из композитных материалов, разработки штампов и литейных пресс-форм, трубопроводных систем, сварных конструкций, разводки электрических кабелей и жгутов.

CAE — средства автоматизации инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов, осуществляют динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий. Системы инженерного анализа предназначены для изучения поведения продукта с использованием его геометрической модели - как правило, такая модель создается в системе CAD. Благодаря развитым CAE-системам, первые же собранные в реальном цехе изделия демонстрируют все заложенные его проектировщиками характеристики и могут тут же поставляется заказчику.

Наиболее распространены CAE-системы, использующие решение систем дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов (**МКЭ**). Они делятся на универсальные системы анализа с использованием МКЭ и специализированные.

Функции систем инженерного анализа (**CAE**) довольно разнообразны, так как связаны с проектными процедурами анализа, моделирования, оптимизации проектных решений. В состав машиностроительных CAE-систем прежде всего включают программы для следующих процедур:

- анализ кинематики и динамики изделия с определением траекторий движущихся частей и действующих сил в процессе работы;
- моделирование упруго-напряженного, деформированного, теплового состояния, колебаний конструкции, определения критических нагрузок. Чаще всего выполняется в соответствии с методом конечных элементов (МКЭ);
- стационарного и нестационарного газодинамического и теплового моделирования с учетом вязкости, турбулентных явлений, пограничного слоя и т.п.;
- расчет состояний и переходных процессов на макроуровне;
- имитационного моделирования сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Примеры CAE систем моделирования полей физических величин в соответствии с МКЭ: Ansys, MSC Nastran, NX Nastran, Cosmos/M, Nisa, Moldflow, ABAQUS, LS-DYNA, MSC.ADAMS, MSC, T-FLEX Анализ.

Специализированные системы МКЭ ориентированы на конкретные виды анализа. Примерами таких систем могут служить пакеты Flotran, Fluid, предназначенные для моделирования гидро-газодинамических процессов, OPTRIS - для моделирования деформаций и др.

- **CAM** — средства технологической подготовки производства изделий, обеспечивают автоматизацию программирования и управления оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) или ГАПС (Гибких Автоматизированных Производственных Систем). Русским аналогом термина является АСТПП — автоматизированная система технологической подготовки производства. Сюда входит и задача САПР ТП - разработка технологической документации (маршрутной, операционной), доводимой до рабочих мест и регламентирующей процесс изготовления детали.

Основные **функции** систем технологической подготовки производства (**CAM**): разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с числовым программным управлением (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 (NC — Numerical Control), расчет норм времени обработки.

Примеры CAM. ***NX CAM*** — система автоматизированной разработки управляющих про-грамм для станков с ЧПУ от компании Siemens PLM Software. ***SprutCAM*** —единственная российская CAM-система, и одна из немногих среди зарубежных, поддерживающая разработку УП для многокоординатного, электроэрозионного и токарно-фрезерного оборудования с учетом полной кинематической 3D-модели всех узлов в том числе. ***ADEM*** (англ. Automated Design Engineering Manufacturing) — российская интегрированная CAD/CAM/CAPP система, предназначенная для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). Пакет ***EdgeCAM*** от компании Pathtrace. ***PowerMill*** – продукт компании Delcam. Функционал CAM-системы Delcam, начиная с 2011-й версии, интегрируется в среду проектирования CAD-системы SolidWorks, разрабатываемого корпорацией Dassault Systèmes SolidWorks Corp. ***Mastercam*** – программное обеспечение для фрезерной, токарной, электроэрозионной и деревообработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Разработчик - известная американская компания CNC Software Inc., уже более 25 лет создает и совершенствует систему и является одним из мировых лидеров в CAM индустрии. Mastercam интегрирован в программные продукты фирмы АСКОН.

- **CAPP** (англ. computer-aided process planning - автоматизированная система технологической подготовки производства) — средства автоматизации планирования технологических процессов, применяемые на стыке систем CAD и CAM.

Это программные продукты, помогающие автоматизировать процесс подготовки производства, а именно планирование (написание) технологических процессов. В основном такие программы работают с базой данных технологических планов предприятия. Задача CAPP следующая: по

заданной модели изделия, выполненной в CAD-системе, составить план его производства — маршрут изготовления. В этот маршрут входят сведения о последовательности технологических операций изготовления детали, а также сборочных операциях (если таковые имеются); оборудование, используемое на каждой операции, и инструмент, при помощи которого на операциях производится обработка. Обычно технологическая подготовка производства осуществляется в написании технологических процессов на новые изделия, или разработка техпроцессов по уже имеющейся базе типовых технологических процессов. Если говорить о автоматизации написании технологических процессов, то существует два подхода: модифицированный и генеративный.

Примеры **CAPP**. ***Tecnomatix*** — пакет решений для трехмерного моделирования, анализа и автоматизированной подготовки производства от компании Siemens PLM Software. ***Vertical*** - система автоматизации технологической подготовки производства от компании Ascon. Техно Про и TechnologiCS – отечественных разработок.

PDM (Системы управления данными об изделии или PDM-системы) используются на всех этапах проектирования, позволяя осуществлять режим коллективного проектирования, автоматизируя функции управления, связанные с этим режимом: назначение и обеспечение квалитета ответственности, прав доступа, ведение базы данных проекта и т.д. В первую очередь системы PDM упрощают передачу данных между отделами предприятия и доступ к информации, необходимой для работы в разных программных системах. Использование этих систем на предприятии улучшает взаимодействие подразделений, уменьшает бумажный документооборот, повышает эффективность управления.

PDM-система управляет всеми связанными с изделием информационными процессами (в первую очередь, проектированием изделия и технологией его производства), а также всей информацией об изделии - его составом и структурой, геометрическими данными, чертежами, планами проектирования и производства, нормативными документами, программами для станков с ЧПУ, результатами анализа, корреспонденцией, данными о партиях и отдельных экземплярах изделия и многим другим.

PDM-система выступает в качестве средства интеграции множества используемых на предприятии прикладных автоматизированных систем (CAD/CAM/CAE/CAPP/ERP/MRP) за счет сбора поступающей из них информации в логически единую модель на основе стандартных интерфейсов взаимодействия.

Пользователями PDM-системы могут быть все сотрудники всех предприятий-участников жизненного цикла изделия: конструкторы, технологи, работники технического архива, а также сотрудники, работающие

в других предметных областях (сбыт, маркетинг, снабжение, финансы, сервис, эксплуатация и т. п.).

Наиболее **типичные задачи**, решаемые при помощи PDM-систем:

- -электронный архив документации (конструкторской, технологической, организационно-распорядительной, проектной, нормативно-технической);
- -электронный документооборот (согласование данных и документов, контроль исполнения);
- управление разработкой данных и документации (совместная работа в рабочей группе, управление составами и конфигурацией изделий);
- компьютерная система менеджмента качества;
- электронные справочники (материалы, ПКИ, стандартные изделия и т.д.).

Примеры PDM. В настоящее время наиболее известными PDM-системами являются ENOVIA и SmarTeam (Dessault Systemes), Teamcenter (Siemens PLM Software), Windchill (PTC), mySAP PLM (SAP), BaanPDM (BAAN) и российские системы Лоцман: PLM (Аскон), PDM StepSuite (НПО "При-кладная логистика"), Party Plus (Лоция Софт). Основные разработчики САПР в машиностроении считают целесообразным предлагать комплексные системы PLM, в состав которых входят как модули CAD/CAM/CAE, так и PDM.

С помощью CAD-средств создаётся геометрическая модель изделия, которая используется в качестве входных данных в системах CAM, и на основе которой, в системах CAE, формируется требуемая для инженерного анализа модель исследуемого процесса.

Многие системы автоматизированного проектирования совмещают в себе решение задач, относящихся к различным аспектам проектирования CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM. Такие системы называют комплексными или интегрированными.

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) обеспечений.

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.

2. САПР на базе СУБД. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах перерабатывается 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 относят 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 будут CAD/CAM/CAE-системы в машиностроении или САПР сверхбольших интегральных схем (СБИС). Так, САПР БИС включает в себя СУБД и под системы проектирования компонентов, принципиальных, логических и функциональных схем, топологии кристаллов, тестов для проверки годности изделий. Для управления столь сложными системами применяют специализированные системные среды.

Лекция 5. Основы автоматизированного проектирования

Основные принципы проектирования

Кратко, процесс *проектирования* рассматривается как начальный этап создания нового изделия и заключается в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Проектирование, при котором проектные решения получают путем взаимодействия человека, ЭВМ и комплекса программных и других средств автоматизации его деятельности, называют **автоматизированным** (также бывает: ручное – реализуется без участия ЭВМ; автоматическое – без участия человека). Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой систему автоматизированного проектирования (САПР).

Проектирование сложных объектов основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде теорий и подходов. Наиболее общим подходом является *системный подход*, идеями которого пронизаны различные методики проектирования сложных систем.

Основной общий принцип *системного подхода* заключается в рассмотрении частей явления или сложной системы с учетом их взаимодействия. *Системный подход* включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение атрибутов, анализ влияния внешней среды, учитывает социально-экономические и экологические последствия их функционирования.

В технике дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы, их проектирование, и аналогичную теории систем, чаще называют *системотехникой*. Предметом *системотехники* являются, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, во-вторых, методы и принципы их проектирования и исследования. В *системотехнике* важно уметь сформулировать цели системы и организовать ее рассмотрение с позиций поставленных целей. Тогда можно отбросить лишние и малозначимые части при проектировании и моделировании, перейти к постановке оптимизационных задач.

Системы автоматизированного проектирования относятся к числу наиболее сложных современных искусственных систем. Их проектирование и сопровождение невозможны без *системного подхода*. Поэтому идеи и положения *системотехники* входят составной частью в дисциплины, посвященные изучению современных автоматизированных систем и технологий их применения. Например, системный подход к моделированию подразумевает возможность повторного использования информации и наработок в ходе проектирования сложных машиностроительных конструкций.

Другие компоненты *системотехники*, такие как: структурный, блочно-иерархический, объектно-ориентированный подходы включают в себя основные положения *системного подхода*.

При *структурном подходе*, как разновидности системного, требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции сложных описаний объектов и соответственно средств их создания на иерархические уровни и аспекты, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

Объектно-ориентированный подход к проектированию (ООП) используется в основном при разработке информационных систем и прежде всего их программного обеспечения (ПО). Данный подход имеет следующие преимущества в решении проблем управления сложностью и интеграции ПО:

- вносит в модели приложений большую структурную определенность, распределяя представленные в приложении данные и процедуры между классами объектов;

- сокращает объем спецификаций, благодаря введению в описания иерархии объектов и отношений исследования между свойствами объектов разных уровней иерархии;
- уменьшает вероятность искажения данных вследствие ошибочных действий за счет ограничения доступа к определенным категориям данных в объектах. Описание в каждом классе объектов допустимых обращений к ним и принятых форматов сообщений облегчает согласование и интеграцию ПО.

Для всех подходов к проектированию сложных систем характерны также следующие особенности.

1. *Структуризация* процесса проектирования, выражаемая декомпозицией проектных задач и документации, выделением стадий, этапов, проектных процедур. Эта структуризация является сущностью блочно-иерархического подхода к проектированию.
2. *Итерационный* характер проектирования.
3. *Типизация и унификация* проектных решений и средств проектирования.

Проектирование и конструирование

Разработка нового объекта осуществляется не только путем проектирования, но и путем конструирования. Проектирование и конструирование являются взаимосвязанными процессами, дополняющими друг друга. Проектирование принято рассматривать как процесс построения общей схемы установки, агрегата, их узлов и систем, а конструирование – как более детальную про-работку этой схемы с учетом технологии изготовления.

Конструкционная форма объекта уточняется применением методов проектирования – произведением расчетов параметров, прочностных расчетов, оптимизации и др.

Применительно к объектам нефтегазового оборудования **конструкция** – это устройство, взаимное расположение частей и элементов установки, определяющееся его назначением. Конструкция предусматривает способ соединения, взаимодействие частей, а также материал, из которого должны быть изготовлены отдельные части (элементы).

В свою очередь проектирование возможно только при предварительно принятых вариантах конструкционного исполнения. Проектирование предшествует конструированию и представляет собой поиск научно обоснованных, технически осуществимых и экономически целесообразных инженерных решений.

Результатом проектирования является проект разрабатываемой установки.

В результате конструирования создается конкретная, однозначная конструкция изделия.

В процессе *конструирования* выполняется:

- формирование технических требования к изделию и его частям;

- создание моделей, изображений, видов изделия;
- расчет комплекса размеров с допускаемыми отклонениями;
- формирование требований к поверхностям;
- создание технической документации.

Конструирование опирается на результаты проектирования и уточняет все инженерные решения, принятые при проектировании. Создаваемая в процессе конструирования техническая документация должна обеспечить перенос всей конструкторской информации на изготавливаемое устройство и его рациональную эксплуатацию.

Цель проектирования и конструирования – разработка нового изделия, которое не существует или существует в другой форме и имеет иные размеры и параметры (в виде прототипа).

Проектирование и конструирование – виды интеллектуальной деятельности, при которой у разработчика формируется конкретный образ, техническое решение, которое подвергается мысленным изменениям, эффект внесения которых всесторонне оценивается, оптимизируется и впоследствии принимает окончательный, технически обоснованный вид.

В технической литературе часто используется термин «*разработка*». По сути – это более широкое понятие, чем проектирование и конструирование. В разработку входят не только два эти вида инженерного творчества, но и ведение научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ.

Стадии проектирования

Стадии проектирования — наиболее крупные части проектирования, как процесса, разви-вающегося во времени. В общем случае выделяют стадии научно-исследовательских работ (НИР), эскизного проекта или опытно-конструкторских работ (ОКР), технического, рабочего проектов, испытаний опытных образцов или опытных партий. Стадию НИР иногда называют предпроектны-ми исследованиями или стадией технического предложения. Очевидно, что по мере перехода от стадии к стадии степень подробности и тщательность проработки проекта возрастают, и рабочий проект уже должен быть вполне достаточным для изготовления опытных или серийных образцов. Близким к определению стадии, но менее четко оговоренным понятием, является понятие этапа проектирования.

Техническое задание (ТЗ) является первичным, основополагающим документом. ТЗ отражает технические, технико-экономические характеристики будущего изделия, определяет основные характеристики конструкции и принципы работы. Требования ТЗ основываются на современных достижениях науки и техники, на выполнении научно-исследовательских и экспериментальных работах.

Техническое предложение – начальный этап проектирования. Основная задача этого этапа – проверка совместимости требований ТЗ с возможностями

реализации технических решений. Техническое предложение содержит анализ возможных вариантов технических решений и обоснование предлагаемого варианта решения.

Эскизный проект – конструкторская проработка оптимального варианта изделия до уровня принципиальных конструкторских решений, дающих общее представление об устройстве и принципах работы изделия. В эскизном проекте закладываются основы применения типовых, стандартизованных и унифицированных составных частей разработки, формируются требования к специальным комплектующим.

Технический проект выполняют на основе согласованного и утвержденного эскизного проекта, а в тех случаях, когда последний не разрабатывается, - на основе согласованного и утвержденного технического задания (утвержденного технического предложения). Технический проект должен полностью определять проектируемую конструкцию и содержать окончательный технико-экономический расчет. Технический проект содержит технические решения и данные, достаточные для полного представления об устройстве и принципах работы устройства. В техническом проекте должны быть решены все вопросы, обеспечивающие высокий технический уровень нового изделия как в процессе изготовления, сборки, испытания, так и в процессе эксплуатации. Все расчеты технического проекта выполняются в окончательном виде, не требующем проверки или уточнения на этапе разработки рабочей документации.

Разработка рабочей документации составляет заключительный этап проектирования, задачей которого является полная детализация проектных решений, обеспечивающая возможность осуществления всех производственных операций, связанных с реализацией этих решений и созданием изделия.

На всех этапах проектирования и конструирования инженер разработчик даже при создании новых, ранее не существовавших установок использует накопленный опыт предшествующих разработок аналогичных объектов. Такой опыт представляется ему в виде технической документации, созданной при разработке объектов, в виде результатов их эксплуатации, опубликованных в различных литературных источниках, в виде патентно-информационных материалов.

Стадии (этапы) проектирования подразделяют на составные части, называемые проектными процедурами. Примерами проектных процедур могут служить подготовка трех мерных моделей и 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, например, при анализе прочности детали сеточными методами. Операциями могут быть построение сетки, 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.

Компоненты и обеспечение САПР

Каждая *подсистема*, в свою очередь состоит из *компонентов*, обеспечивающих функционирование подсистемы. *Компонент* выполняет определенную функцию в подсистеме и представляет собой наименьший (неделимый) самостоятельно разрабатываемый или покупной элемент САПР (программа, файл модели детали, графический дисплей, инструкция и т. п.). Совокупность однотипных компонентов образует **средство обеспечения САПР**. Выделяют следующие виды обеспечения САПР:

1. **Техническое обеспечение (ТО)** — совокупность связанных и взаимодействующих технических средств, обеспечивающих работу САПР, включающая различные аппаратные средства (ЭВМ, периферийные устройства, сетевое оборудование, линии связи, измерительные средства).
2. **Математическое обеспечение (МО),** объединяющее математические методы, модели и алгоритмы, используемые для решения задач автоматизированного проектирования. МО по назначению и способам реализации делят на две части:
    - математические методы и построенные на их основе математические модели объектов проектирования или их части;
    - формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

Подсистемы машинной графики и геометрического моделирования (МГиГМ) занимают центральное место в машиностроительных САПР. Конструирование изделий в них, как правило, проводится в интерактивном режиме при оперировании геометрическими моделями, т.е. математическими объектами, отображающими форму деталей, состав сборочных узлов и возможно некоторые дополнительные параметры (масса, момент инерции, цвета поверхности и т.п.).

В подсистемах МГиГМ типичный маршрут обработки данных включает в себя получение проектного решения в прикладной программе, его представление в виде геометрической модели (геометрическое моделирование), подготовку проектного решения к визуализации, собственно визуализацию в аппаратуре рабочей станции и при необходимости корректировку решения в интерактивном режиме. Две последние операции реализуются на базе аппаратных средств машинной графики. Когда говорят о математическом обеспечении МГиГМ, имеют в виду прежде всего модели, методы и алгоритмы для геометрического моделирования и подготовки к визуализации. При этом часто именно математическое обеспечение

подготовки к визуализации называют математическим обеспечением машинной графики.

Различают математическое обеспечение двумерного (2D) и трехмерного (3D) моделирования. Основные применения 2D графики — подготовка чертежной документации в машиностроительных САПР.

В 3D моделировании различают модели *каркасные* (проволочные), *поверхностные*, *объемные* (твердотельные).

- *Каркасная* модель представляет форму детали в виде конечного множества линий, лежащих на поверхностях детали. Для каждой линии известны координаты концевых точек и указана их инцидентность ребрам или поверхностям. Оперировать каркасной моделью на дальнейших операциях маршрутов проектирования неудобно, и поэтому каркасные модели в настоящее время используют редко.
- *Поверхностная* модель отображает форму детали с помощью задания ограничивающих ее поверхностей, например, в виде совокупности данных о гранях, ребрах и вершинах. Особое место занимают модели деталей с поверхностями сложной формы, так называемыми скульптурными поверхностями. К таким деталям относятся корпуса многих транспортных средств (например, судов, автомобилей), детали, обтекаемые потоками жидкостей и газов (лопатки турбин, крылья самолетов), и др.
- *Объемные* модели отличаются тем, что в них в явной форме содержатся сведения о принадлежности элементов внутреннему или внешнему по отношению к детали пространству.

3. **Программное обеспечение (ПО)**, представляемое компьютерными программами необходимыми для осуществления процесса проектирования. ПО САПР подразделяется на **общесистемное** и **прикладное**:

- общесистемное ПО предназначено для управления компонентами технического обеспечения и обеспечения функционирования прикладных программ. Примером компонента общесистемного ПО является операционная система.
- прикладное ПО реализует математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур включает программы пакеты прикладных программ, предназначенные для обслуживания определенных этапов проектирования или групп однотипных задач внутри различных этапов (модуль проектирования трубопроводов, пакет схемотехнического моделирования, геометрический решатель САПР).

4. **Информационное обеспечение (ИО)** — совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования, состоит из описания стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, комплектующих изделий и их моделей, правил и норм проектирования. Основная часть ИО САПР — базы данных и системы управления базами данных.

5. **Лингвистическое обеспечение (ЛО)** — совокупность языков, используемых в САПР для представления информации о проектируемых объектах, процессе и средствах проектирования, а также для осуществления диалога проектировщик-ЭВМ и обмена данными между техническими средствами САПР, включает термины, определения, правила формализации естественного языка, методы сжатия и развертывания. В ЛО выделяют класс различного типа языков проектирования и моделирования (VHDL, VERILOG, UML, GPSS).

6. **Методическое обеспечение (МетО)** — описание технологии функционирования САПР, методов выбора и применения пользователями технологических приемов для получения конкретных результатов, включающее в себя теорию процессов, происходящих в проектируемых объектах, методы анализа, синтеза систем и их составных частей, различные методики проектирования, иногда к МетО относят также МО и ЛО.

7. **Организационное обеспечение (ОО)** — совокупность документов, определяющих состав проектной организации, связь между подразделениями, организационную структуру объекта и системы автоматизации, деятельность в условиях функционирования системы, форму представления результатов проектирования. В ОО входят штатные расписания, должностные инструкции, правила эксплуатации, приказы, положения и т. п.

В САПР как проектируемой системе, выделяют также *эргономическое* и *правовое* обеспечения.

1. **Эргономическое** обеспечение объединяет взаимосвязанные требования, направленные на согласование психологических, психофизиологических, антропометрических характеристик и возможностей человека с техническими характеристиками средств автоматизации и параметрами рабочей среды на рабочем месте.
2. **Правовое** обеспечение состоит из правовых норм, регламентирующих правоотношения при функционировании САПР, и юридический статус результатов ее функционирования.

Лекция 6. CALS-технологии

CALS-технологии призваны служить средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы в единую многофункциональную систему. Целью интеграции автоматизированных систем проектирования и управления является повышение эффективности создания и использования сложной техники.

Повышение эффективности заключается в следующем.

Во-первых, повышается 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 ЛПР (лицо, принимающее решение) и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных

других автоматизированных систем (САПР, АСТПП и АСУТП) и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т.п. При этом под оперативным доступом следует понимать не просто возможность считывания данных из БД, 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. Этого 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 продукции. 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-технологии. 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, существенно снижаются затраты на эксплуатацию, благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки. Существенно облегчается решение проблем ремонтопригодности, интеграции продукции в различные рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т.п. [2].

Эти преимущества интеграции данных достигаются применением современных CALS-технологий.

Промышленные автоматизированные системы могут работать автономно, и в настоящее время так 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 в рамках как отдельных предприятий, так и, что более важно, в рамках объединения предприятий. 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.

Унификация содержания, понимаемая как однозначная правильная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла, обеспечивается разработкой онтологий (метаописаний) приложений, закрепляемых в прикладных протоколах CALS.

Унификация перечней и наименований сущностей, атрибутов и отношений в определенных предметных областях является основой для единого электронного описания изделия в CALS-пространстве [2, 6].

Этапы жизненного цикла изделий машиностроительного производства и промышленные автоматизированные системы

Жизненный цикл изделий (ЖЦИ) включает ряд этапов, начиная от зарождения идеи нового продукта до его утилизации по окончании срока использования. К ним относятся этапы маркетинговых исследований, проектирования, технологической подготовки производства (ТПП), собственно производства, послепродажного обслуживания и эксплуатации продукции, утилизации.

Основные этапы жизненного цикла промышленных изделий представлены на рис. 5.1. Там же указаны основные типы автоматизированных систем, используемых в жизненном цикле изделий.

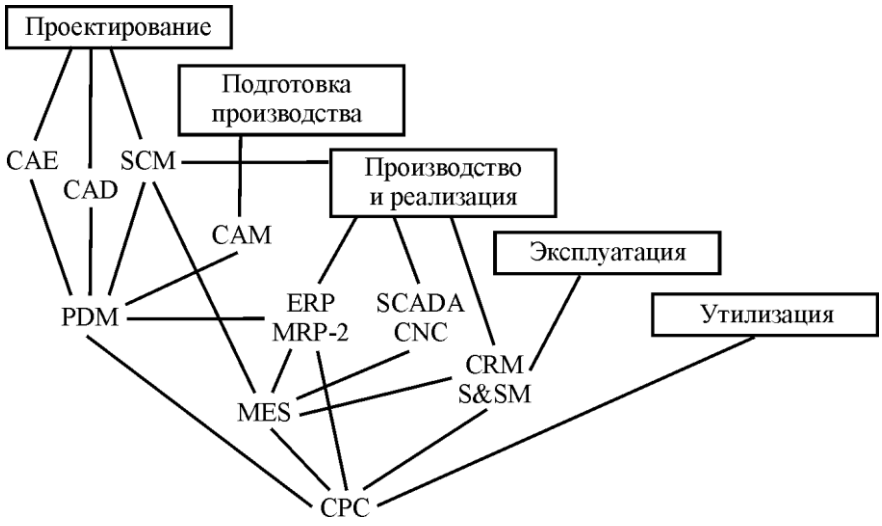


Рис. 5.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

Системы, указанные на рис. 5.1, поддерживают следующие этапы и процедуры в жизненном цикле изделий (более подробное описание см. ниже):

- CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);
- CAD – Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);
- CAM – Computer 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 – Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);
- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);
- CNC – Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление);
- S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);
- CPC – Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес).

На всех этапах жизненного цикла имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. Например, на этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение требований, предъявляемых к производимому продукту, при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики.

Современные САПР (или системы 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.

Автоматизированные системы технологической подготовки производства (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 системы 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 автоматизированные системы управления предприятием (АСУП), классифицируемые как системы ERP или MRP-2.

Наиболее развитые 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, занятые вопросами 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.

Функции некоторых автоматизированных систем часто перекрываются. В частности, это относится к системам MRP 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 важное значение придается оптимизации этих решений с учетом текущей информации о состоянии оборудования и процессов.

Достижение поставленных целей на современных предприятиях, выпускающих сложные технические (высокотехнологичные) 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.

Рассмотрим содержание основных этапов ЖЦИ для изделий машиностроения.

На этапе проектирования выполняются проектные процедуры — формирование принципиального решения, разработка геометрических моделей и чертежей, расчеты, моделирование процессов, оптимизация и т.п. Этап проектирования включает все необходимые стадии, начиная с внешнего проектирования, выработки концепции (облика) изделия и кончая испытаниями пробного образца или партии изделий. Внешнее проектирование обычно включает разработку технического и коммерческого предложений и формирование технического задания (ТЗ) на основе результатов маркетинговых исследований и/или требований, предъявленных заказчиком.

На этапе подготовки производства разрабатываются маршрутная и операционная технологии изготовления деталей, реализуемые в программах для станков ЧПУ; технология сборки и монтажа изделий; технология контроля и испытаний.

На этапе производства осуществляются: календарное и оперативное планирование; приобретение материалов и комплектующих с их входным контролем; механообработки и другие требуемые виды обработки; контроль результатов обработки; сборка; испытания и итоговый контроль.

На постпроизводственных этапах выполняются консервация, упаковка, транспортировка; монтаж у потребителя; эксплуатация, обслуживание, ремонт; утилизация.

Автоматизация проектирования осуществляется САПР. В САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять системы функционального, конструкторского и технологического проектирования. Первые из них называют системами расчетов и инженерного анализа или системами CAE (Computer Aided Engineering). Системы конструкторского проектирования называют системами CAD (Computer Aided Design).

Проектирование технологических процессов выполняется в автоматизированных системах технологической подготовки производства (АСТПП), входящих как составная часть в системы CAM (Computer Aided Manufacturing) [3].

Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения, координации работы систем CAE/CAD/CAM, управления проектными данными и проектированием разрабатываются системы, получившие название систем управления проектными данными PDM (Product Data Management). Системы PDM либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

На большинстве этапов жизненного цикла, начиная с определения предприятий-поставщиков исходных материалов и компонентов и кончая реализацией продукции, требуются услуги системы управления цепочками поставок — Supply Chain Management (SCM). Цепь поставок обычно определяют как совокупность стадий увеличения добавленной стоимости продукции при ее движении от компаний-поставщиков к компаниям-потребителям. Управление цепью поставок подразумевает продвижение материального потока с минимальными издержками. При планировании производства система SCM управляет стратегией позиционирования продукции. Если время производственного цикла меньше времени ожидания заказчика на получение готовой продукции, то можно применять стратегию "изготовление на заказ". Иначе приходится использовать стратегию "изготовление на склад". При этом во время производственного цикла должно входить время на размещение и исполнение заказов на необходимые материалы и комплектующие на предприятиях-поставщиках.

В последнее время усилия многих компаний, производящих программно-аппаратные средства автоматизированных систем, направлены на создание систем электронного бизнеса (E-commerce). Задачи, решаемые системами E-commerce, сводятся не только к организации на сайтах Internet витрин товаров и услуг. Они объединяют в едином информационном пространстве запросы заказчиков и данные о возможностях множества организаций, специализирующихся на предоставлении различных услуг и выполнении тех или иных процедур и операций по проектированию, изготовлению, поставкам заказанных изделий. Проектирование непосредственно под заказ позволяет добиться наилучших параметров создаваемой продукции, а оптимальный выбор исполнителей и цепочек поставок ведет к минимизации времени и стоимости выполнения заказа. Координация работы многих предприятий-партнеров с использованием технологий Internet возлагается на системы E-commerce, называемые системами управления данными в интегрированном информационном пространстве CPC (Collaborative Product Commerce) [7].

Управление в промышленности, как и в любых сложных системах, имеет иерархическую структуру. В общей структуре управления выделяют несколько иерархических уровней, в соответствии с рис. 4.

Рис. 4 – Общая структура управления

Автоматизация управления на различных уровнях реализуется с помощью автоматизированных систем управления (АСУ).

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется автоматизированными системами управления предприятием (АСУП) и автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП).

К АСУП относятся системы планирования и управления предприятием ERP (Enterprise Resource Planning), планирования производства и требований к материалам MRP-2 (Manufacturing Requirement Planning) и упомянутые выше системы SCM. Наиболее развитые 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. В некоторых случаях системы SCM и MRP-2 входят как подсистемы в ERP, в последнее время их чаще рассматривают как самостоятельные системы.

Промежуточное положение между АСУП и АСУТП занимает производственная исполнительная система MES (Manufacturing Execution Systems), предназначенная для решения оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом.

В состав АСУТП входит система SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), выполняющая диспетчерские функции (сбор и обработка данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и помогающая разрабатывать ПО для встроенного оборудования. Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы CNC (Computer Numerical Control) на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), которые

встроены в технологическое оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ). Системы CNC называют также встроенными компьютерными системами.

Система CRM используется на этапах маркетинговых исследований и реализации продукции, с ее помощью выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые изделия.

Функции обучения обслуживающего персонала выполняют интерактивные электронные технические руководства IETM (Interactive Electronic Technical Manuals). С их помощью выполняются диагностические операции, поиск отказавших компонентов, заказ дополнительных запасных деталей и некоторые другие операции на этапе эксплуатации систем.

Управление данными в едином информационном пространстве на протяжении всех этапов жизненного цикла изделий возлагается на систему PLM (Product Lifecycle Management). Под PLM понимают процесс управления информацией об изделии на протяжении всего его жизненного цикла. Отметим, что понятие PLM-система трактуется двояко: либо как интегрированная совокупность автоматизированных систем CAE/CAD/CAM/PDM и ERP/CRM/SCM, либо как совокупность только средств информационной поддержки изделия и интегрирования автоматизированных систем предприятия, что практически совпадает с определением понятия CALS. Характерная особенность PLM — возможность поддержки взаимодействия различных автоматизированных систем многих предприятий, т.е. технологии PLM являются основой, интегрирующей информационное пространство, в котором функционируют САПР, ERP, PDM, SCM, CRM и другие автоматизированные системы многих предприятий.

Лекция 7. Возникновение концепции CALS и ее эволюция

В течение двух последних десятилетий во многих странах мира широкое распространение получили системы управления жизненным циклом изделий. Эта концепция имеет большую популярность, а сегмент рынка информационных систем, реализующих ее, имеет наибольший темп роста среди систем управления предприятием. В рамках нее используются разнообразные термины, связи и различия между которыми зачастую сложно понять. Из них наиболее часто встречаются следующие: ***CALS, ИПИ, ИЛП, PLM, PDM*** (рис. 1).

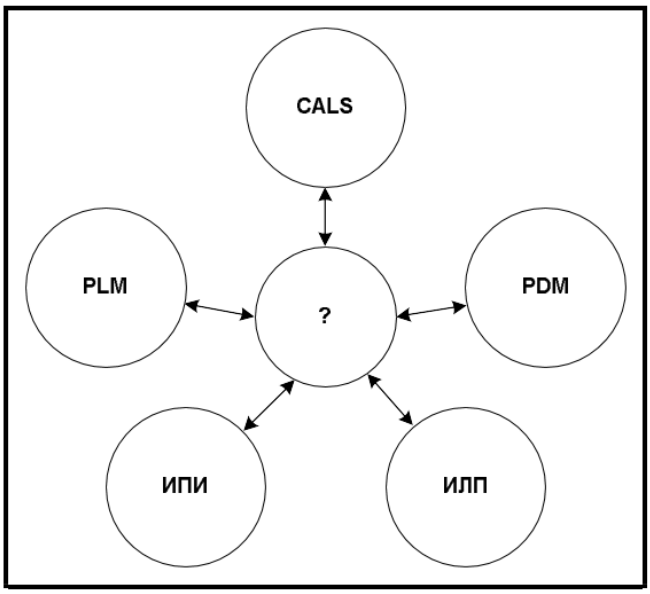


Рис.1. Термины, относящиеся к системам управления жизненным циклом изделия

Впервые работы по созданию интегрированных систем, поддерживающих жизненный цикл продукции, были начаты в 80-х годах в оборонном комплексе США. Новая концепция была востребована жизнью как инструмент совершенствования управления материально-техническим обеспечением армии США. Предполагалось, что реализации новой концепции, получившей обозначение CALS (Computer Aided Logistic Support – компьютерная поддержка процесса поставок), позволит сократить затраты на организацию информационного взаимодействия государственных учреждений с частными фирмами в процессах формализации требований, заказа, поставок и эксплуатации военной техники (ВТ). Появилась реальная потребность в организации ИИС, обеспечивающей обмен данными между заказчиком, производителями и потребителями ВТ, а также повышение управляемости, сокращение бумажного документооборота и связанных с ним затрат.

Движущей силой явилась естественная потребность в организации «единого информационного пространства», обеспечивающего оперативный обмен данными между заказчиком (федеральными и органами), производителями и потребителя- ми военной техники. Данная концепция изначально базировалась на идеологии ЖЦ продукта и охватывала фазы производства и эксплуатации.

Предметом ***CALS*** являлась безбумажная технология взаимодействия между организациями, заказывающими, производящими и эксплуатирующими военную технику, а также формат представления соответствующих данных.

CALS базировалась на результатах реализации программы Integrated computer – aided manufacturing (***ICAM***) – программы интегрированной

компьютеризации производства, реализованной в Министерстве обороны США. Цель этой программы состояла в повышении эффективности производства посредством применения компьютерных информационных технологий. Комплексное применение этих технологий в рамках программы ***ICAM потребовало*** унификации и стандартизации методов описания и анализа организационных и производственных систем.

На основе уже имевшихся технологий структурного анализа и проектирования систем SADT (structural analisis and design technology) было разработано семейство (более десяти) методов ***IDEF (***Integrated DEFinition), ряд из которых был принят в качестве федеральных стандартов, а метод функционального моделирования IDEF0 принят в качестве стандарта CALS.

Доказав свою эффективность, концепция последовательно совершенствовалась, дополнялась и, сохранив существующую аббревиатуру (CALS), получила более широкую трактовку – Continuous Acqusition and Life cycle Support – непрерывные поставки и информационная поддержка жизненного цикла продукции.

- Первая часть – Continuous Acqusition (непрерывные поставки) означает непрерывность информационного взаимодействия с заказчиком в ходе формализации его потребностей, формирования заказа, процесса поставки и т.д.
- Вторая часть – Life Cycle Support (поддержка жизненного цикла изделия) – означает системность подхода к информационной поддержке всех процессов жизненного цикла изделия, в том числе процессов эксплуатации, обслуживания, ремонта и утилизации и т.д.

В руководстве по применению CALS в НАТО CALS определяется как "…совместная стратегия государства и промышленности, направленная на совершенствование существующих процессов в промышленности, путем их преобразования в информационно-интегрированную систему управления жизненным циклом изделий". Русскоязычное наименование этой концепции и стратегии – ИПИ (Информационная Поддержка жизненного цикла Изделий).

В период 1990-2000гг. в мире был выполнен ряд проектов, направленных на апробацию и внедрение принципов CALS в различных отраслях промышленности.

Поскольку термин CALS всегда носил военный оттенок, в гражданской сфере широкое распространение получили термины Product Life Cycle Support (PLCS) или Product Life Management (PLM) – "поддержка жизненного цикла изделия" или "управление жизненным циклом изделия".

Таким образом, идея, связанная только с поддержкой логистических систем, превратилась в глобальную бизнес-стратегию перехода на безбумажную электронную технологию и повышения эффективности бизнес-процессов за счет информационной интеграции и совместного использования информации на всех этапах жизненного цикла продукции. В настоящее время в мире действуют более 25 национальных организаций, координирующих

вопросы развития CALS-технологий, в том числе в США, Канаде, Японии, Великобритании, Германии, Швеции, Норвегии, Австралии, а также в НАТО.

Развитие концепций CALS и ЕИП обусловили появление новой организационной формы выполнения масштабных проектов, связанных с разработкой, производством и эксплуатацией сложной продукции – "виртуального предприятия" (ВП) – формы объединения на контрактной основе предприятий и организаций, участвующих в поддержке ЖЦ [6].

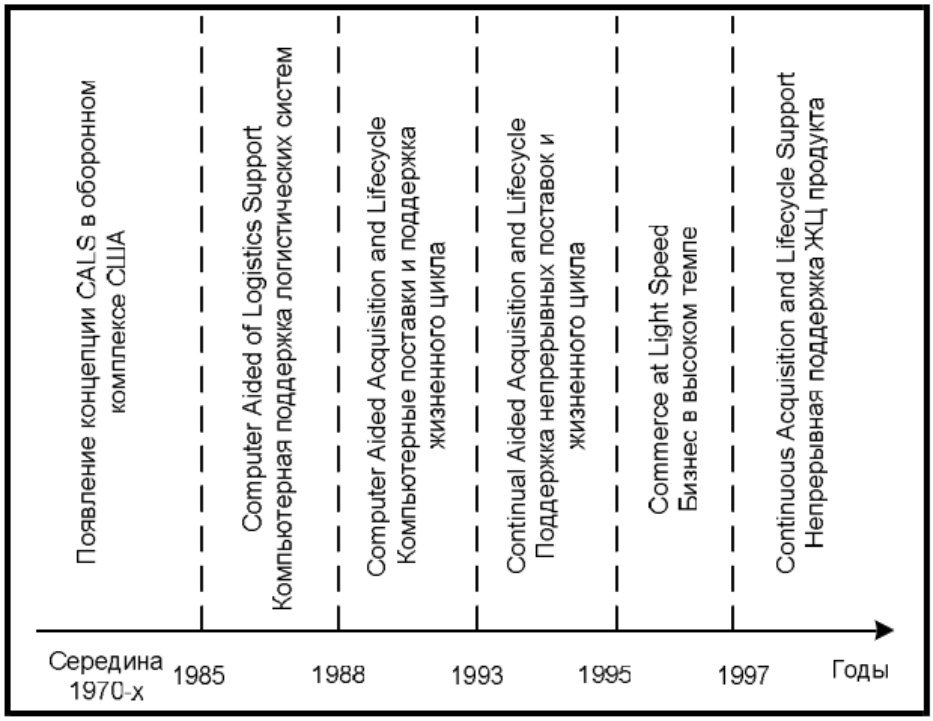


Рис. Изменение расшифровки аббревиатуры CALS во времени

В РФ термин CALS заменяется термином ИПИ (информационная поддержка изделий).

В некоторых источниках встречается понятие КСПИ (Компьютерное сопровождение и поддержка изделий).

В других источниках упоминается и понятие ИЛП. Это понятие относится к числу базовых инвариантных понятий концепции и стратегии CALS (Continuous acquisition and life cycle support) или ИПИ (Информационная поддержка ЖЦ изделий).

Система PDM (Product data management) – программно-технический комплекс, обеспечивающий аккумулирование и хранение:

- структурированных данных о конструкции изделия и его составных частей, их свойствах (характеристиках);
- документов, относящихся к изделию и его составным частям;
- данных о технологических процессах и ресурсах;
- данных о конкретных экземплярах изделия и его составных частей, включая данные измерений и контроля (данные о качестве).

PDM-системы - системы управления данными об изделии, выполняющие следующие функции:

- управление справочниками;
- управление документами;
- управление составом изделия;
- управление изменениями;
- управление потоками работ;
- управление проектами.

PLM-системы состоят из PDM- систем и такой функции, как поддержка эксплуатации изделий.

Если с понятиями ИПИ и ИЛП все ясно и понятно, то с определением термина PLM возникают большие проблемы, так как существует множество мнений по этому вопросу.

Так, например, на сайте Государственного научного центра «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ ЦНИИ РТК), говорится: «сейчас широко распространена и концепция PLM (Product lifecycle management – управление жизненным циклом изделия), которая, по своей сути, является аналогом концепции CALS

Понятие PLM-система трактуется двояко:

- либо как интегрированная совокупность автоматизированных систем CAE/CAD/CAM/PDM и ERP/CRM/SCM,
- либо как совокупность только средств информационной поддержки изделия и интегрирования автоматизированных систем предприятия, что практически совпадает с определением понятия CALS».

В широком смысле слова CALS – это методология создания единого информационного пространства промышленной продукции, обеспечивающего взаимодействие всех промышленных автоматизированных систем (АС). В этом смысле предметом CALS являются методы и средства как взаимодействия разных АС и их подсистем, так и сами АС с учетом всех видов их обеспечения. Практически синонимом CALS в этом смысле становится термин PLM.

PLM интегрирует следующие системы:

CAE (Computer-aided engineering) – общее название для программ или программных пакетов, предназначенных для инженерных расчетов, анализа и симуляции физических процессов. Расчетная часть пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений [25].

CAD (Computer-aided design) – система автоматизации проектных работ – программный пакет, предназначенный для создания чертежей, конструкторской и (или) технологической документации и (или) 3D моделей [18].

CAM (Computer-aided manufacturing) – подготовка технологического процесса производства изделий, ориентированная на использование ЭВМ. Под термином понимаются как сам процесс компьютеризированной подготовки производства, так и программно-вычислительные комплексы, используемые инженерами-технологами.

В русском языке есть термин САПР, который подразумевает совокупность систем CAD/CAM/CAE.

ERP (Enterprise resource planning) – управление ресурсами предприятия. Это – информационная система для идентификации и планирования всех ресурсов предприятия, которые необходимы для осуществления продаж, производства, закупок и учета в процессе выполнения клиентских заказов.

CRM (Customer relationship management system) – система управления взаимодействием с клиентами – корпоративная информационная система, предназначенная для повышения уровня продаж, оптимизации маркетинга и улучшения обслуживания клиентов путём сохранения информации о клиентах (контрагентах) и истории взаимоотношений с ними, установления и улучшения бизнес- процедур и последующего анализа результатов.

SCM (Supply chain management) – системы управления цепями поставок. Предназначены для автоматизации и управления всеми этапами снабжения предприятия и для контроля всего товародвижения на предприятии. Позволяет значительно лучше удовлетворить спрос на продукцию компании и значительно снизить затраты на логисти- ку и закупки.

CNC (Computer numeric control) – компьютерное числовое управление – система управления технологическим оборудованием, применяемая при автоматизации промышленного производства, или числовое программное управление (ЧПУ).

CPC- (Collaborative Product Commerce) система управления данными в интегрированном информационном пространстве или технология интегрированного информационного пространства и управления данными. Технология взаимодействия производителей, поставщиков и покупателей на различных этапах ЖЦИ, направленная на оптимальное удовлетворение потребностей заказчиков в продукции и услугах. Системы CPC интегрируют функции таких систем, как SCM, CRM, а также часть функций систем PDM, CAD/CAM и ERP. Координация работы многих предприятий-партнеров с использованием технологий Intrenet возлагается на эти системы E – commerce (другое их название).

IETM- (Interactive Electronic Technical Manuals) – интерактивные электронные технические руководства выполняют функции обучения обслуживающего персонала выполняют. С их помощью выполняются диагностические операции, поиск отказавших компонентов, заказ дополнительных запасных деталей и некоторые другие операции на этапе эксплуатации систем.

Итак, мы рассмотрели все понятия, которые относят к системам управления ЖЦ изделий, а именно CALS, ИПИ, ИЛП, PLM, PDM. Теперь необходимо сделать окончательные выводы о их взаимосвязи.

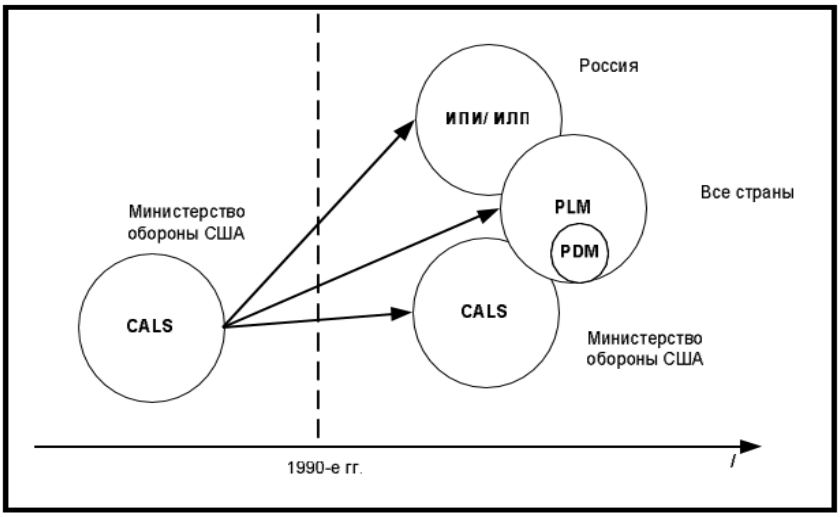


Рис. 5. Схема интегрированных информационных систем поддержки жизненного цикла изделия

Так как нельзя прийти к однозначным выводам в отношении всех взаимосвязей данных систем, условимся в данной работе основываться на следующем (рис. 5):

- системы ИПИ и ИЛП считать равнозначными;
- ИПИ/ИЛП – это развитие CALS-систем в РФ;
- CALS-системы относить преимущественно к Министерству обороны США;
- современное воплощение CALS-систем – PLM-системы;
- PDM-системы – лишь одна из частей PLM-систем.

Концептуальная модель CALS

Основное содержание концепции CALS, принципиально отличающее ее от других, составляют инвариантные понятия, которые реализуются (полностью или частично) в течение жизненного цикла (ЖЦ) изделия, в соответствии с рис. 5.

Эти инвариантные понятия условно делятся на три группы:

- базовые принципы CALS;
- базовые управленческие технологии;
- базовые технологии управления данными.

Рис. 5 – Общее содержание концепции CALS

К числу первых относятся:

- системная информационная поддержка ЖЦ изделия на основе использования интегрированной информационной среды (ИИС), обеспечивающая минимизацию затрат в ходе ЖЦ;
- информационная интеграция за счет стандартизации информационного описания объектов управления;
- разделение программ и данных на основе стандартизации структур данных и интерфейсов доступа к ним, ориентация на готовые коммерческие программно-технические решения (Commercial Of The Shelf – COTS), соответствующие требованиям стандартов;
- безбумажное представление информации, использование электронно-цифровой подписи;
- параллельный инжиниринг (Concurrent Engineering);
- непрерывное совершенствование бизнес-процессов (Business Processes Reengineering).

К числу вторых относятся технологии управления процессами, инвариантные по отношению к объекту (продукции):

- управление проектами и заданиями (Project Management/Workflow Management);
- управление ресурсами (Manufacturing Resource Planning);
- управление качеством (Quality Management);
- интегрированная логистическая поддержка (Integrated Logistic Support).

К числу третьих относятся технологии управления данными об изделии, процессах, ресурсах и среде [3].

Базовые принципы CALS

Интегрированная информационная среда

Как следует из вышеизложенного, системная информационная поддержка и сопровождение ЖЦ изделия осуществляется в интегрированной информационной среде (ИИС). Терминологический словарь [1] определяет ИИС как "совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных тем субъектам производственно-хозяйственной деятельности, участвующим в осуществлении ЖЦ изделия, кому это необходимо и разрешено. Все сведения (данные) в ИИС хранятся в виде информационных объектов".

ИИС, в соответствии с концепцией CALS, представляет собой модульную систему, в которой реализуются следующие базовые принципы CALS:

- прикладные программные средства отделены от данных;
- структуры данных и интерфейс доступа к ним стандартизованы;
- данные об изделии, процессах и ресурсах не дублируются, число ошибок в них минимизируется, обеспечивается полнота и целостность информации;
- прикладные средства работы с данными представляют собой, как правило, типовые коммерческие решения различных производителей, что обеспечивает возможность дальнейшего развития ИИС.

Безбумажное представление информации, применение электронно-цифровой подписи. Все процессы информационного обмена посредством ИИС имеют своей конечной целью максимально возможное исключение из деловой практики традиционных бумажных документов и переход к прямому безбумажному обмену данными. Преимущества и технико-экономическая эффективность такого перехода очевидны. Тем не менее, на переходном периоде нужно обеспечить сосуществование и совместное использование как бумажной, так и электронной форм представления информации и гармонизировать применяемые понятия.

Информация может быть представлена в форме базы данных, в форме электронного конструкторского документа, или в форме, пригодной для восприятия человеком – бумажной или экранной.

Представление информации в форме базы данных используется при необходимости логического структурирования больших объемов информации. При этом данные определенным образом распределяются между таблицами базы данных, записями в таблицах, полями в записях (при использовании реляционной СУБД) и (или) отдельными файлами и таблицами (при использовании объектно-ориентированной СУБД). Используемые структуры данных ориентированы на специфику решаемых задач.

Другой формой представления информации является электронный документ – структурированный набор данных, включающий в себя заголовок, содержательную часть и электронно-цифровую подпись. Обобщенная структура электронного документа приведена на рис.3. Электронный документ используется в качестве формы представления результатов работы, предназначенной для передачи из одной автоматизированной системы в другую или последующей визуализации.

Обе формы представления информации – в форме базы данных (внутреннее представление информации в компьютерной системе) и в форме электронного документа – не пригодны для восприятия человеком и требуют для специальных программных средств визуализации, т.е. преобразования данных в бумажный документ или в экранную форму.

Существующие стандарты, регламентирующие конструкторско-технологическую деятельность, такие как ЕСКД, ЕСТД, СРПП и им подобные, касаются только визуальной формы представления информации. Поэтому одной из первоочередных практических задач внедрения CALS является развитие стандартов ЕСКД и выработка новых стандартов и спецификаций, регламентирующих электронную форму представления и обращения данных.

Ключевым вопросом использования и обращения информации в электронной форме является вопрос ее авторизации, решаемый при помощи электронно-цифровой подписи (ЭЦП). Процедура ЭЦП основана на математических принципах так называемых "систем с открытым ключом". В формирования подписи используется индивидуальное число (закрытый ключ) пользователя, которое порождается при помощи генератора случайных чисел и сохраняется пользователем в секрете все время его действия. Для проверки подлинности цифровой подписи применяется другое число, так называемый "открытый ключ проверки цифровой подписи" (или кратко – "открытый ключ"), который по известному алгоритму вычисляется из индивидуального закрытого ключа и предоставляется всем, кому это необходимо для проверки подлинности цифровой подписи.

ЭЦП представляет собой математическую функцию (hash) от содержимого подписываемых данных (data) и секретного ключа автора (secret_key), вычисляемую по стандартизованному алгоритму ГОСТ 34.10-2002: Sign = h (data, secret_key)

В результате вычисления хэш-функции формируется пара чисел – префикс и суффикс электронно-цифровой подписи ГОСТ 34.10-2002. Байтовые представления полученных чисел, записанные друг за другом, объявляются цифровой подписью.

Для проверки подлинности подписей должны использоваться открытые ключи, которыми участники процесса совместной работы с данными должны обменяться друг с другом. Однако при большом числе участников такая процедура может оказаться организационно и технически сложной. Одним из возможных решений является использование сертификатов ключа.

Для этой цели некое доверенное лицо принимает на себя функции центра сертификации ключей. Это означает, что доверенное лицо формирует для

каждого открытого ключа пакет данных, содержащий собственно открытый ключ и данные о его владельце (имя, должность и т.д.) и подписывает его собственной ЭЦП. Такой пакет данных называется сертификатом ключа. В свою очередь, открытый ключ центра сертификации может быть заверен центром сертификации более высокого уровня. В результате образуется цепочка сертификатов от ключа проверки подписи конечного пользователя до самого верхнего (главного) центра сертификации (ЦС), в которой авторство подписи на предшествующем сертификате удостоверяется последующим сертификатом. Сертификаты не содержат в себе никакой конфиденциальной информации, могут распространяться в открытом виде по сетям передачи данных или присоединяться к подписываемым данным.

Процедура проверки подлинности подписи включает в себя следующую последовательность шагов. Сначала из ЭЦП подписи выделяются ее префикс и суффикс. Затем с использованием процедуры хэширования и открытого ключа вычисляется значение, которое должно быть префиксом ЭЦП. Затем оба полученных значения сравниваются. Если они совпадают, то данные считаются подлинными. Если полученные значения не совпадают, подпись считается недействительной.

Таким образом, для проверки подписи необходим открытый ключ или его сертификат. Использование сертификата предпочтительнее, поскольку он содержит не только открытый ключ, но и данные об авторе.

Как уже отмечалось выше, ЭЦП может быть вычислена как для файла (формируемого электронного документа), так и для любого фрагмента базы данных. Технологии использования ЭЦП для этих случаев имеют различия.

При использовании в качестве формы представления информации электронного документа в него помимо ЭЦП необходимо включить сертификат, поскольку в противном случае идентификация автора будет затруднена. Соответственно, корректно оформленный электронный документ должен содержать, помимо содержательной части, заголовок, одну или несколько ЭЦП и соответствующее число сертификатов. Последняя обеспечивает целостность и юридически доказательное подтверждение подлинности электронных данных. Она позволяет не только убедиться в достоверности данных, но и доказать это любой третьей стороне, в частности, в суде.

Эффективность интеграции данных в промышленных изделиях

CALS-технологии призваны служить средством, интегрирующим

промышленные АС в единую многофункциональную систему. Целью интеграции АС проектирования и управления является повышение эффективности создания и использования сложной техники.

В чем выражается повышение эффективности?

Во-первых, повышается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих

решений. Так, обоснованность решений, принимаемых в АСУП, будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие про- граммы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к БД других автоматизированных систем (САПР, АСТПП и АСУТП) и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п. При этом под оперативным доступом следует понимать не просто возможность считывания данных из БД, 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. Этого не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными АС.

Во-вторых, сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление продукции. 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 БД 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, существенно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки. Существенно облегчается решение проблем ремонтопригодности, интеграции продукции в различные рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т. п.

Перечисленные преимущества интеграции данных достигаются применением современных CALS-технологий.

Промышленные АС могут работать автономно, и в настоящее время так 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 АС требуется создание единого информационного пространства в рамках как отдельных предприятий, так и, что более важно, в рамках объединения предприятий. 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. Унификация содержания, понимаемая как однозначная правильная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла, обеспечивается разработкой онтологии (метаописаний) приложений, закрепляемых в прикладных протоколах CALS. Унификация перечней и наименований сущностей, атрибутов и отношений в определенных предметных областях является основой для единого электронного описания изделия в CALS-пространстве.

Обзор CALS-стандартов

Центральное место в системе CALS-стандартов занимают стандарты, разработанные под эгидой Международной организации стандартизации ISO и получившие название STEP (Standard for Exchange of Product data) и номер 10303. Стандарты ISO 10303 определяют средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех стадиях жизненного цикла.

Единообразная форма описаний данных о промышленной продукции обеспечивается введением в STEP языка Express, инвариантного к приложениям. В стандартах STEP использован ряд идей, ранее воплощенных в методиках информационного IDEF1X и функционального IDEF0 проектирования. Но роль стандартов STEP не ограничивается введением только грамматики единого языка обмена данными. В рамках STEP предпринята попытка создания единых информационных моделей (онтологии) целого ряда приложений. Эти модели получили название прикладных протоколов. Стандарт ISO 10303 состоит из ряда документов (томов), в которых описываются основные принципы STEP, правила языка Express, даны методы его реализации, модели, ресурсы, как общие для приложений, так и некоторые специальные (например, геометрические и топологические модели, описание материалов, процедуры черчения, конечно-элементного анализа и т. п.), прикладные протоколы, отражающие специфику моделей в конкретных предметных областях, методы тестирования моделей и объектов.

Удовлетворению требований создания открытых систем в STEP уделяется основное внимание; специальный раздел посвящен правилам написания файлов обмена данными между разными системами, созданными в рамках STEP-технологии. Представление библиотечных моделей дается на языке Express. Для описания структуры частей, вводимых определений и других текстовых фрагментов используется язык SGML. Поведенческие модели электронных компонентов могут быть выражены на языке VHDL.

Оформление технической документации на создаваемые изделия в CALS-технологиях должно выполняться на основе языков разметки SGML или XML (extensible Markup Language). Язык SGML входит в семейство стандартов ISO 8879 и предназначен для унификации представления текстовой информации в АС.

Стандарты управления качеством промышленной продукции

Международные стандарты серии ISO 9000 разработаны для управления качеством продукции, их дополняют стандарты серии ISO 14000, отражающие экологические требования к производству и промышленной продукции. Хотя эти стандарты непосредственно не связаны с CALS- стандартами, их цели – совершенствование промышленного производства, повышение его эффективности – совпадают.

Очевидно, что управление качеством тесно связано с его контролем. Контроль качества традиционно основан на измерении показателей качества продукции на специальных технологических операциях контроля и выбраковке негодных изделий. Однако есть и другой подход к управлению качеством, основанный на контроле качественных показателей не самих изделий, а проектных процедур и технологических процессов, используемых при создании этих изделий.

Такой подход во многих случаях более эффективен. Он требует меньше затрат, поскольку позволяет обойтись без 100 %-го контроля продукции и благодаря предупреждению появления брака снижает производственные издержки. Именно этот подход положен в основу стандартов ISO 9000, принятых ISO в 1987 г. и проходящих корректировку приблизительно каждые пять лет.

Таким образом, методической основой для управления качеством являются международные стандарты серии ISO 9000. Они определяют и регламентируют инвариантные вопросы создания, развития, применения и сертификации систем качества в промышленности. В них устанавливается форма требований к системе качества в целях демонстрации поставщиком своих возможностей и оценки этих возможностей внешними сторонами.

Основными причинами появления стандартов ISO 9000 были потребности в общем для всех участников международного рынка базисе для контроля и управления качеством товаров. Американское общество контроля качества определило цели ISO 9000 как помощь в развитии международного обмена товарами и услугами и кооперации в сфере интеллектуальной, научной, технологической и деловой активности.

В стандартах ISO 9000 используется определение качества из стандарта ISO 8402, в котором под качеством продукции подразумевается своевременное удовлетворение требований заказчика по приемлемой цене. Вводится понятие системы качества (QS – Quality System), под которой понимают документальную систему с руководствами и описаниями процедур достижения качества. Другими словами, система качества есть совокупность организационной структуры, ответственности, процедур, процессов и ресурсов, обеспечивающая осуществление общего руководства качеством.

ISO предлагает следующие внешние стандарты:

• ISO 9001 – модель качества, достигаемого при проектировании, производстве, обслуживании;

• ISO 9002 – сокращенная по сравнению с ISO 9001 модель (без процессов проектирования);

• ISO 9003 – модель качества при финальном тестировании продукции. Вторичные стандарты включают в себя:

• ISO 9000 – основные понятия, руководство по применению ISO 9001;

• ISO 9004 – элементы систем управления качеством.

В настоящее время разработана новая версия стандартов серии ISO 9000 под названием ISO 9000:2000 Quality management systems (Системы управления качеством), в которую включены документы:

• ISO 9000:2000. Fundamentals and vocabulary (Основы и терминология);

• ISO 9001:2000. Requirements (Требования);

• ISO 9004:2000. Guidelines for performance improvement (Руководство по развитию).

Лекция 8. Системные среды автоматизированных систем. Назначение системных сред

Системы автоматизированного проектирования относятся к наиболее сложным и наукоемким АС. Проектные данные используются в разных подсистемах САПР. Они отличаются разнообразием форм представления, характеризуют как текущее состояние проектов, так и их предыдущие версии. Наряду с выполнением собственно проектных процедур необходимо автоматизировать также управление проектированием, поскольку сам процесс проектирования становится все более сложным и зачастую приобретает распределенный характер. Большой объем данных, необходимость поддержания их целостности (достоверности и полноты), сложность управления проектированием привели к созданию в составе современных САПР специального ПО – системной среды САПР, называемой системой управления проектными данными PDM.

На крупных и средних предприятиях заметна тенденция к интеграции САПР с АСУП. Для управления столь сложными интегрированными системами, для обеспечения целостности данных и доступа к ним на любом этапе жизненного цикла изделий создаются системы управления жизненным циклом изделий PLM (Product Lifecycle Management).

История систем управления проектными данными непосредственно связана с развитием САПР. Появление системных сред в САПР ознаменовало переход от использования отдельных не связанных друг с другом программ, решающих частные проектные задачи, к применению интегрированной совокупности таких программ. Интегрирующим компонентом в 1970-е годы стала единая база данных САПР. Однако попытки использовать имевшиеся в то время СУБД не приводили к удовлетворительным результатам в силу разнообразия типов проектных данных, распределенного и параллельного характера процессов проектирования, с одной стороны, и недостаточной развитости баз данных – с другой.

Специализированные СУБД, ориентированные на САПР, были созданы в 80-е годы XX в. Однако они не учитывали или в недостаточной степени удовлетворяли требованиям обеспечения целостности данных, управления потоками проектных работ, многоаспектного доступа пользователей к данным. И лишь на рубеже 80-90-х годов XX в. появились системы управления проектными данными, названные в то время Framework или системными средами, сначала в САПР электронной промышленности, а позднее и в САПР машиностроения, где они и получили наименование PDM.

На протяжении 90-х годов роль системных сред неуклонно повышалась. Во-первых, из-за роста сложности проектируемых объектов и необходимости сокращать сроки проектирования. Во-вторых, вследствие необходимости интеграции систем проектирования с системами управления предприятием и технологическими процессами. Благодаря развитию Internet, Web- и CALS-технологий такая интеграция стала возможной в глобальном масштабе. Функции PDM стали распространяться на разные этапы жизненного цикла изделий (ЖЦИ). В результате в конце 1990-х годов системы управления данными на протяжении всего ЖЦИ стали называть системами PLM.

В настоящее время термином PLM чаще всего обозначают современную концепцию (методологию) информатизации ЖЦИ, а под средствами PLM понимают PDM вместе со средствами интеграции АС, часто включая в PLM, также средства самих АС проектирования и управления.

Современные системы управления проектными данными предназначены для информационного обеспечения проектирования и выполняют следующие основные функции:

- хранение проектных данных и доступ к ним, в том числе ведение распределенных архивов документов, их поиск, редактирование, маршрутизация;
- структурирование и визуализация данных;
- управление конфигурацией изделия, т. е. ведение версий проекта, управление внесением изменений;
- создание спецификаций;
- управление проектированием;
- защита информации;
- интеграция данных (поддержка типовых форматов, конвертирование данных).

Хранение данных – функция банка данных, который состоит из СУБД и БД. Обычно системы PDM интегрируются с независимо разработанными СУБД. Информационный обмен между программами САПР в значительной мере также реализуется с помощью банка данных.

Системы управления проектными данными PDM отличают легкость доступа к иерархически организованным данным, обслуживание запросов, выдача ответов не только в текстовой, но и в графической форме, привязанной к конструкции изделия. Поскольку взаимодействие внутри группы проектировщиков в основном осуществляется через обмен данными, то в

системе PDM часто совмещают функции управления данными и управления параллельным проектированием.

Системы управления базами данных

В большинстве автоматизированных информационных систем применяют СУБД, поддерживающие реляционные модели данных. Среди общих требований к СУБД можно отметить:

1) обеспечение целостности данных (их полноты и достоверности);
2) защиту данных от несанкционированного доступа и от искажений вследствие возникающих сбоев аппаратуры;
3) удобство пользовательского интерфейса;
4) возможность в большинстве случаев распределенной обработки в сетях ЭВМ.

Первые два требования обеспечиваются ограничением прав доступа, запрещением одновременного использования одних и тех же обрабатываемых данных (при возможности их модификации), введением контрольных точек (checkpoints) для защиты от сбоев и т. п.

Банк данных в САПР представляет собой важную обслуживающую подсистему, он выполняет функции информационного обеспечения и имеет ряд особенностей. В нем хранятся как редко изменяемые данные (архивы, справочные данные, типовые проектные решения), так и сведения о текущем состоянии различных версий выполняемых проектов. Как правило, банк данных работает в многопользовательском режиме, с его помощью осуществляется информационный интерфейс (взаимодействие) различных подсистем САПР. Построение банка данных САПР – сложная задача, что обусловлено следующими особенностями САПР.

1. Разнообразие проектных данных, фигурирующих в процессах обмена как по своей семантике (многоаспектность), так и по формам представления. В частности, значительна доля графических данных.

2. Нередко обмены должны производиться с высокой частотой, что предъявляет жесткие требования к быстродействию средств обмена (полагают, что СУБД должна работать со скоростью обработки нескольких тысяч сущностей в секунду).

3. В САПР проблема целостности данных оказывается более трудной для решения, чем в большинстве других систем, поскольку проектирование является процессом взаимодействия многих проектировщиков, которые не только считывают данные, но и изменяют их, причем в значительной мере работают параллельно. Из этого факта вытекают следствия: во-первых, итерационный характер проектирования обычно приводит к наличию по каждой части проекта нескольких версий, любая из них может быть принята в дальнейшем в качестве основной, поэтому нужно хранить все версии с возможностью возврата к любой из них; во-вторых, нельзя допускать использования неутвержденных данных, поэтому проектировщики должны иметь свое рабочее

пространство в памяти и работать в нем автономно, а моменты внесения изменений в общую БД должны быть согласованными и не должны порождать для других пользователей неопределенности данных.

4. Транзакции могут быть длительными и трудоемкими. Транзакцией называют последовательность операций по удовлетворению запроса. В САПР внесение изменений в некоторую часть проекта может вызвать довольно длинную и разветвленную сеть изменений в других его частях из-за существенной взаимозависимости компонентов проекта (многошаговость реализации запросов). В частности, транзакции могут включать в себя такие трудоемкие операции, как верификация проектного решения с помощью математического моделирования. В результате транзакции могут длиться весьма продолжительное время. Одна из трудностей заключается в отображении взаимозависимости (ассоциативности) данных. При хранении компонентов проекта во внешней памяти затраты времени на обработку запросов оказываются значительно выше, чем в большинстве других автоматизированных систем с менее выраженными взаимозависимостями данных.

5. Иерархическая структура проектных данных и, следовательно, отражение наследования в целях сокращения объема базы данных.

В определенной мере названные особенности учитываются в СУБД третьего поколения, в которых стали применяться черты объектно-ориентированных (объектных) СУБД. В них наборы данных, характеризующих состояние предметной области (состояние проекта в случае САПР), помещаются в отдельные файлы. Интерпретация семантики данных осуществляется с помощью специальных процедур (методов), сопровождающих наборы. Наследование свойств объектов предметной области выражается с помощью введения категорий класса, надкласса, подкласса. Информационные модели приложений для таких СУБД разрабатываются на основе методик с использованием языка UML.

Объектные базы данных выгодны тем, что, во-первых, данные по конкретным объектам проектирования не разбросаны по множеству таблиц, как это имеет место в реляционных базах данных, а сосредоточены в определенных местах. Во-вторых, для каждого объекта могут быть назначены свои типы данных. В результате проще решаются задачи управления и удовлетворения запросов.

Наряду с чисто объектными СУБД применяют СУБД объектно-реляционные. В последних происходит объединение свойств, реляционных и объектно-ориентированных СУБД: объектно-ориентированная СУБД снабжается непроцедурным языком запросов или в реляционную СУБД вводятся наследование свойств и классы. Непроцедурность входного языка обеспечивается использованием языка SQL. Его операторы непосредственно включаются в программы на языке С. Возможно написание дополнительных программ, интерпретирующих SQL-запросы.

Отличительные особенности СУБД третьего поколения:

- расширенный набор возможных типов данных (это абстрактные типы,

массивы, множества, записи, композиции разных типов, отображение величин со значениями разных типов);

- открытость (доступность из разных языков программирования, возможность обращения к прикладным системам из СУБД);
- непроцедурность языка (общепринятым становится язык запросов SQL);
- управление асинхронными параллельными процессами, состояние которых отражает база данных.

Рассмотренные особенности банка данных в САПР позволяют квалифицировать их как системы Data Warehouse (DW), т. е. хранилища данных. Для хранилищ данных характерен ряд особенностей, совпадающих с названными выше особенностями банка данных САПР:

1) длительное хранение информации, отражающей историю разработок;

2) частота операций чтения данных выше частоты операций обновления данных;

3) использование единых форматов для однотипных данных, полученных из различных источников (например, от разных программно-методических комплексов).

Эти особенности позволяют управлять конфигурацией проектов, что, в частности, означает хранение в САПР всех версий проекта и, возможно, данных по проектам предыдущих разработок, удовлетворение сложных запросов, для ответа на которые требуются извлечение и обработка данных из различных частей хранилища (так называемая многомерная обработка). Модели данных в DW отличаются от реляционных моделей (RM): в RM использованием нормальных форм стремятся максимально уменьшить избыточность данных, что приводит к увеличению числа таблиц, но уменьшенных размеров, при этом многомерный поиск во множестве таблиц затруднен. Поэтому в DW чаще используется модель данных «звезда», в которой имеется общая таблица фактов (Fact Table) и каждому факту ставится в соответствие несколько таблиц с необходимыми атрибутами. Целостность данных в DW обеспечивается проверкой и трансформацией данных, вводимых из внешних источников, наличием дисциплины обновления данных, централизованным хранением основной базы, при этом достаточное быстродействие поддерживается передачей копий определенных частей базы в локальные базы, называемые киосками данных (Data Mart) и ориентированные на отдельные группы пользователей.

Система хранения данных содержит следующие подсистемы и компоненты: устройства хранения (дисковые массивы), инфраструктуру доступа к устройствам хранения, подсистему резервного копирования и архивирования данных, ПО управления хранением, систему управления и мониторинга.

Известны следующие подходы к организации хранилищ данных: DAS (Direct Attached Storage), NAS (Network Attached Storage), SAN (Storage Area Networks). Подход DAS состоит в прямом подключении устройств хранения к

серверу. Недостатки такого решения в сегодняшней обстановке заключаются в том, что, во-первых, файлы не могут совместно использоваться несколькими серверами, а для добавления дисковых накопителей к сети серверы должны быть переведены в автономный режим, во- вторых, при росте требований к системам хранения усложняется инфраструктура.

Сетевое хранение данных NAS должно было реализовать три задачи: снизить затраты и сложность управления данными, уменьшить трафик локальных сетей, повысить общую производительность. Устройства NAS состоят из единого головного устройства, выполняющего обработку данных и осуществляющего сетевое соединение цепочки дисков. Устройства NAS позволяют использовать системы хранения в сетях Enternet даже, если клиентские системы работают под управлением разных ОС. Недостаток NAS – неспособность разделять свою емкость хранения между несколькими узлами.

Основное отличие SAN от NAS состоит в способе организации обмена данными между устройствами хранения и серверами. Архитектура SAN нацелена на решение задач интенсивного резервного копирования и обмена данными путем перенесения всей системы в выделенную подсеть. При этом может в широких пределах меняться емкость системы хранения данных и гарантируется более высокая пропускная способность в выделенной подсети. Сеть хранения не использует существующую локальную сеть для передачи данных между серверами и устройствами хранения, данные перемещаются по самой сети хранения. Однако при этом совместное использование файлов различными пользователями в общем случае невозможно.

Программное обеспечение CALS-технологий

Программное обеспечение CALS-технологий должно выполнять функции, обеспечивающие создание и поддержку интегрирующей информационной среды для промышленных АС:

- функции управления данными, разделяемыми разными АС и подсистемами на этапах ЖЦИ. Эти функции в настоящее время выполняют системы управления PLM. Внутри этапа проектирования управление проектными данными, разделяемыми разными подсистемами САПР, выполняют системы управления проектными данными PDM;
- функции управления данными и программами в распределенной сетевой среде, включая функции защиты информации. Эти функции реализуются в технологиях распределенных вычислений, таких как удаленный вы- зов процедур RPC, архитектура на основе посредников объектных запросов CORBA, объектная модель COM/DCOM, технология SOAP и др. Использование имеющихся систем распределенных вычислений позволяет разработчикам CALS-средств сконцентрировать усилия на решении специфичных задач и не тратить время на реализацию взаимодействия в сетевой среде;
- программные средства логистической поддержки изделий, обслуживания сложной техники и обучения обслуживающего персонала

правилам эксплуатации и ремонта изделий, представленные, в частности интерактивными электронными техническими руководствами (ИЭТР), создаваемыми в CALS-системах с помощью специальных инструментальных средств. Развитые ИЭТР не только служат целям обучения пользователей, но выполняют также функции автоматизированного заказа материалов и запасных частей, планирования и учета проведения регламентных работ, обмена данными между потребителем и поставщиком, диагностики оборудования и поиска неисправностей. Примерами инструментальных систем создания ИЭТР могут служить TG Builder (компания «Прикладная логистика») или Adobe frameMaker+ SGML (Adobe);

- к программному обеспечению CALS-технологий следует отнести многочисленные средства поддержки моделирования и обмена данными с использованием языка Express, которые можно объединить под названием STEP-средств (STEP Tools). К STEP-средствам относятся редакторы, компиляторы, визуализаторы, анализаторы, конверторы, связанные с языком Express. Редакторы помогают синтезировать и корректировать Express-модели. Анализаторы служат для синтаксического анализа и выявления ошибок, допущенных при написании модели. Анализатор входит в состав компилятора, который после анализа осуществляет трансляцию Express-моделей в ту или иную требуемую языковую форму. Визуализаторы генерируют графические представления моделей на языке Express-G. Конверторы используются для преобразования Express-моделей на основе языка Express-X;
- к программному обеспечению CALS-технологий можно отнести средства поддержки языков SGML, XML, EDIFACT.

Примерами STEP-средств являются продукты компаний STEP Tools, EPM Technology AS, TNO и др.

Технологии распределенных вычислений и их программное обеспечение используются, но не становятся специфичными в CALS-приложениях. Поэтому основными компонентами ПО CALS являются системы PLM, PDM и интерактивные электронные технические руководства (IETM – Interactive Electronic Technical Manual).

Системы PDM предназначены преимущественно для информационного обеспечения проектирования – упорядочения информации о проекте, управления соответствующими документами, включая спецификации и другие виды представления данных, обеспечения доступа к данным по различным атрибутам, навигации по иерархической структуре проекта. Системы, аналогичные PDM, но в большей мере ориентированные на управление информацией в системах ERP, часто называют системами EDM (Enterprise Data Management). В системах PLM поддерживаются информационные связи не только внутри САПР, с их помощью обеспечивается взаимодействие различных АС на протяжении всего ЖЦИ.

Технология интегрированного информационного пространства и управления данными – технология взаимодействия производителей, поставщиков и покупателей на различных этапах ЖЦИ, направленная на

оптимальное удовлетворение потребностей заказчиков в продукции и услугах. Благодаря более высокой степени специализации предприятий, проектированию под заказ, комплексному учету затрат на проектирование, изготовление, доставку продуктов можно минимизировать временные и финансовые затраты при высоком качестве изделий. Чтобы использовать эти возможности, требуются системы PLM, главное назначение которых – обеспечивать информационную согласованность действий всех участников процесса создания продукции. В PLM учитывается, что число участников в цепи поставок может быть весьма значительным, причем состав участников непостоянен, а определяется исходя из конкретных задач и условий. Для эффективного управления процессами на протяжении всего жизненного цикла продукции все участники должны пользоваться доступными для правильного восприятия, интерпретации и исчерпывающе полными данными. Именно системы PLM интегрируют данные, вырабатываемые и используемые системами CAD/CAM, ERP, SCM, CRM.

В большинстве АС для обменов данными внутри системы используют те или иные форматы, или не являющиеся унифицированными, или признанные в ряде систем лишь как стандарты де-факто. Языки типа Express используют для межсистемных обменов и представления часто встречающихся данных в общих БД, для выполнения роли внутренних форматов они неудобны. Поэтому в прикладные АС для связей с общей информационной CALS-средой должны быть включены конверторы для взаимных преобразований внутренних форматов данных в STEP-форматы. Такие конверторы также относят к программному обеспечению CALS- технологий.

Основные функции систем PDM

В системах PDM разнообразие типов проектных данных поддерживается их классификацией и соответствующим выделением групп с характерными множествами атрибутов. Такие группы данных – аспекты описания, т. е. описания изделий с различных точек зрения. Для большинства САПР машиностроения характерными аспектами будут свойства компонентов и сборок (эти сведения называют BOM – Bill of materials), модели и их документальное выражение (основными примерами могут служить чертежи, 3D-модели визуализации, сеточные представления для конечно- элементного анализа, текстовые описания), структура изделий, отражающая взаимосвязи между компонентами и сборками и их описаниями в разных группах.

В информационных моделях приложений фигурируют сущности (типы данных) и связи между ними. Установление сущностей, их атрибутов, связей и атрибутов связей означает структурирование проектных данных. Структура изделий обычно может быть представлена иерархически, в виде дерева. Иерархическая форма удобна при внесении и отслеживании изменений в модели, например, при добавлении и удалении сущностей, изменениях их атрибутов, введении новых связей. Поэтому одной из первоочередных функций систем PDM является поддержка интерактивной работы

пользователя при создании моделей изделий (процессов), структурирование описаний проектируемых объектов, предъявление пользователю этой иерархической структуры вместе с возможностями навигации по дереву и получению нужной информации по каждой указанной пользователем структурной компоненте.

Например, в системе PDM STEP Suite элементы дерева, представляющего структуру изделия, могут соответствовать сборочным узлам, агрегатам, блокам, отдельным деталям. Навигация по дереву позволяет просматривать относящиеся к структурным единицам документы, геометрические модели, чертежи и другие атрибуты.

Интерфейс с пользователем поддерживается визуализацией данных проекта одновременно в нескольких окнах. Для визуализации данных разных аспектов в системах PDM имеется ряд браузеров. Типичные изображения, создаваемые браузерами: дерево проекта или его фрагментов; различные виды, такие как 2D-чертеж или 3D-изображение; описания моделей; принципиальные схемы; атрибуты объекта (исполнитель, номер версии, дата утверждения и т. п.). Иногда для визуализации и редактирования данных в PDM конкретной фирмы привлекаются браузеры и редакторы других изготовителей.

Для примера на рис. 5.2 показан фрагмент дерева изделия. Обычно на экране дисплея рядом с названием компонента структуры высвечивается также присвоенный ему код. Выбор любого компонента (узла дерева) позволяет, во-первых, получить в появляющихся окнах требуемую информацию о компоненте, во-вторых, для компонента, являющегося сборкой, раскрыть следующий по иерархии фрагмент, в котором данный компонент будет представлен уже корневым узлом.

Управление версиями проекта и внесением изменений в проект должно обеспечивать целостность проектных данных. Если в проект нужно внести изменения, то создается новая версия проекта, основанная на первоначальном проекте, и изменения вносятся уже в эту новую версию. Исходный вариант проекта при этом сохраняется в прежнем виде. Одна версия каждого объекта является текущей или активной версией. Если имеется несколько версий объекта, то текущей будет та, которая последней подвергалась изменениям.

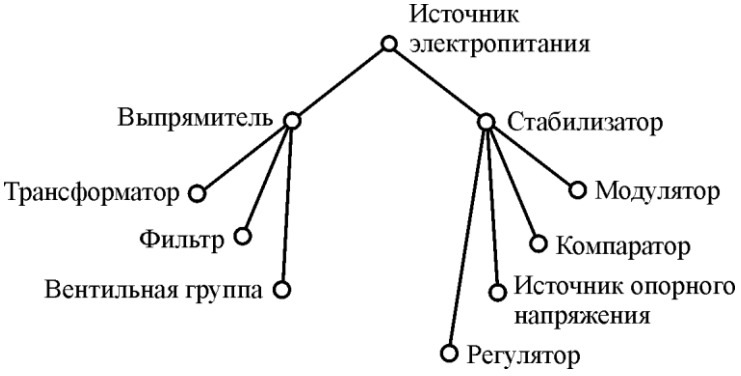


Рис. 5.2. Фрагмент дерева изделия

В системе NELSIS CAD Framework предусмотрены следующие статусы для версий документов: «рабочая» – версия с таким статусом находится в работе, ее можно модифицировать; «принятая» – версия с этим статусом является основной для взаимодействия частей проекта, она служит для обмена между объектами, ее модификации осуществляются через статус «рабочая»; «архивная» – статус, присваиваемый предыдущим сохраняемым версиям; «порождаемая» – статус зарезервирован для вновь создаваемых объектов, например при синтезе проектных решений. Разработчик сам изменяет статус объектов.

Аналогично в системе PDM STEP Suite одна из версий проекта является рабочей (активной), с ней работают пользователи. Но можно обращаться и к любой другой версии. В процессе коллективной работы хранимые в базе данных документ, чертеж или модель могут быть взяты для дальнейшей проработки. Тогда исходная версия документа помечается как находящаяся в процессе редактирования. После редактирования созданная новая версия хранится вместе с предыдущей. При этом для каждой версии документа можно определить породившую ее исходную версию.

Целостность данных поддерживается также тем, что нельзя одновременно изменять один и тот же объект разным разработчикам, каждый из них должен работать со своей рабочей версией. Другими словами, необходимо обеспечение синхронизации изменения данных, разделяемых многими пользователями. Для этого выполняется авторизация пользователей, и разрабатываются средства ведения многих версий проекта. Во-первых, пользователи делятся на классы (администрация системы, руководство проектом и частями проекта, группы исполнителей-проектировщиков) и для каждого класса вводят определенные ограничения, связанные с доступом к разделяемым данным; во-вторых, доступ регламентируется по типам разделяемых данных. Данным могут присваиваться различные значения статуса, например, «правильно», «необходимо перевычисление», «утверждено в качестве окончательного решения» и т. п. Собственно синхронизация выполняется с помощью механизмов типа рандеву или семафоров, которые подробно рассмотрены в пособиях по параллельным вычислениям.

Для подготовки, хранения и сопровождения необходимых документов, в том числе чертежей и схем, в PDM включают специализированные системы управления документами и документооборотом или адаптируют полнофункциональные системы делопроизводства, разработанные независимо от конкретных PDM. Часто используют программы Lotus Notes и Lotus Domino компании Lotus Development. Возможности управления чертежно-конструкторской документацией, подготовленной в AutoCAD и Microstation, имеются в продуктах DOCS Open (компания Hummingbird), CADLink, входящих в систему управления документами и бизнес- процессами Documentum, Search (белорусская компания Интермех) и ряде других.

В системе Search осуществляются хранение и поиск данных, доступ к ним, документооборот, разработка спецификаций, внесение изменений и др. Для этого имеются редактор извещений об изменениях в проекте, средства

обеспечения групповой работы над проектом, модуль доступа к документам, расположенным на других узлах сети. Редактирование и просмотр выполняются с помощью внешних редакторов.

Управление проектами (процессом проектирования) также входит в число функций PDM. Проектирование состоит из многих шагов, объединяемых в потоки работ (workflow). Управление потоком работ включает в себя большое число действий и условий, поддерживающих параллельную работу многих пользователей над общим проектом. Необходимо распределить работы, как между исполнителями, так и во времени, а также обеспечить контроль выполнения работ. Шаги заданного или динамически определяемого маршрута работ могут представлять собой выполнение проектных операций и процедур, пересылку документов и файлов другим пользователям, изменение статуса объекта, просмотр, контроль и утверждение инженерных проектов и внесения в них изменений и т. п. Между шагами перемещается пакет документов. На шагах маршрута документы проекта обрабатываются, видоизменяются, оцениваются, пакет автоматически пополняется и, в конечном счете, проектная документация выпускается в производство.

Управление потоком работ выполняется на основе моделей вычислительных процессов. Используются спецификации моделей, принятые в CASE-системах, например, диаграммы потоков данных, ориентированные графы, UML-диаграммы. Сначала модели составляют в терминах проектных заданий, а затем система осуществляет их покрытие имеющимися проектирующими программами и программными модулями. Применяют также описания на языках расширения или 4GL.

Интеграция данных на ранних этапах развития систем PDM связывалась только с организацией сквозного проектирования изделий в рамках конкретной САПР. В настоящее время в связи с развитием CALS- технологий основным содержанием проблемы интеграции стало обеспечение интерфейса САПР с другими АС. Проблема решается с помощью поддержки типовых форматов, например, путем конвертирования данных из общепринятых форматов во внутренние представления конкретных САПР. В CALS-технологиях взаимодействие систем основано на стандартах STEP, поэтому в ряде PDM имеются конверторы из предложенного в STEP языка Express. Среди других форматов данных обычно используют IGES, DXF, VRML, SAL, EDIF, текстовые и графические форматы и др. Предусматривается возможность адаптации САПР к конкретным условиям с по- мощью языков расширения. Язык расширения – язык программирования, позволяющий адаптировать и настраивать системную среду на выполнение новых проектов. Язык расширения должен обеспечивать доступ к различным компонентам системной среды, объединять возможности базового языка программирования и командного языка, включать средства процедурного программирования. Для большинства языков расширения базовыми являются Lisp или C.

В настоящее время основные разработчики САПР в машиностроении

считают целесообразным предлагать комплексные системы PLM, в состав которых входят как модули CAD/CAM/CAE, так и PDM. Так, компания Dessault Systemes создает систему ENOVIA на базе приобретенной PDM ProductManager. Система ENOVIA предназначена для моделирования и управления данными об изделиях, процессах и ресурсах на различных этапах жизненного цикла промышленной продукции от концептуального проектирования до эксплуатационного обслуживания. Это распределенная на базе Web-технологий система управления данными, способствующая интеграции систем проектирования, производства и управления внутри предприятия и позволяющая отдельным фирмам объединяться в виртуальные предприятия. Управление проектами и изменениями данных, их распределение, интерфейс с системами ERP – далеко не полный перечень функций этой системы.

Кроме системы ENOVIA IBM/Dessault развивает систему SmartTeam. В базовый комплект системы SmarTeam входят модуль создания и редактирования моделей, СУБД (Interbase или Oracle), визуализатор, модуль сопряжения с различными САПР (в список входят SolidWorks, Inventor, Microstation, Solid Edge, AutoCAD 14). Базовый комплект может расширяться путем добавления модулей документооборота, интеграции с ERP, SCM и CRM-системами, взаимодействия с партнерами через Internet и др. Состав системы SmarTeam и ее связи с CAD и ERP-системами иллюстрирует рис. 5.3.

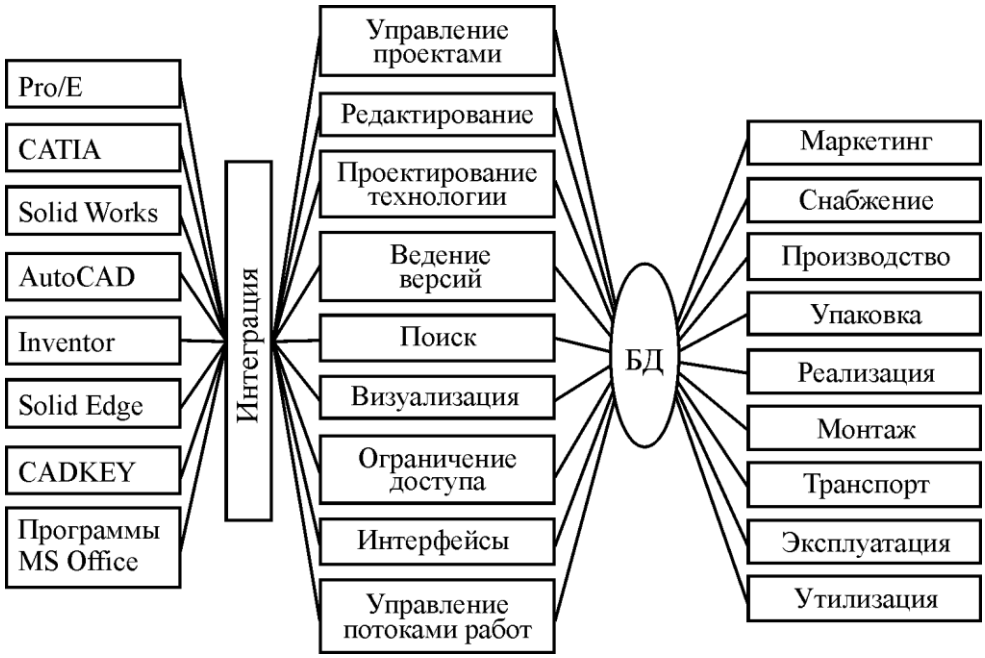


Рис. 5.3. Компоненты и связи системы SmarTeam

Создаваемая в среде SmarTeam информационная модель объекта состоит из двух частей. Одна часть служит для описания состава изделия (в виде дерева), его структуры (в виде файлов с данными о сборках), геометрии и материала деталей. Другая часть содержит данные о технологических

процессах изготовления объекта в виде дерева операций и переходов и автоматически формируемой технологической документации.

Компания Unigraphics Solution осуществляет преобразование систем iMAN и Metaphase в новую систему PDM Teamcenter. В этой PDM имеются подсистемы управления данными на стадиях проектирования и производства. В SolidWorks используется PDM/Works, в SolidEdge – заимствованная система управления документами SharePoint Portal Server.

Российская компания Аскон предлагает оригинальную PLM систему Лоцман, реализуемую в виде трехзвенной системы распределенных вычислений.

Лекция 9. Введение в инжиниринг бизнес-процессов

Бизнес-процесс

Бизнес-процесс – это повторяющийся, последовательный, взаимоувязанный набор мероприятий (операций, действий), который потребляет некие ресурсы, создает некую ценность и выдает результат потребителю.

Потребитель бизнес-процесса может быть, как внешним, так и внутренним по отношению к организации. Внешний потребитель – это потребитель, который не входит в состав данной организации, а внутренний – тот потребитель, который находится в рамках данной организации.

Бизнес-процессы разделяются на следующие классы:

- Основные процессы;
- Сопутствующие процессы;
- Вспомогательные процессы;
- Обеспечивающие процессы;
- Процессы управления;
- Процессы развития.

Основными бизнес-процессами являются процессы, ориентированные на производство товара или оказание услуги, являющиеся целевыми объектами создания предприятия и обеспечивающие получение дохода.

Сопутствующие процессы – процессы, ориентированные на производство товара или оказание услуги, являющиеся результатами сопутствующей основному производству производственной деятельности и также обеспечивающие получение дохода.

Вспомогательные бизнес-процессы – процессы, предназначенные для обеспечения выполнения основных бизнес-процессов.

Обеспечивающие бизнес-процессы – процессы, предназначенные для жизнеобеспечения всех остальных бизнес-процессов и ориентированные на поддержку их универсальных черт бизнеса.

Бизнес-процессы управления – это процессы, охватывающие весь комплекс функций управления на уровне каждого бизнес-процесса и бизнес-системы в целом.

Бизнес-процессы развития – это процессы совершенствования производимого товара или услуги, технологий, модификации оборудования.

Инжиниринг и параллельный инжиниринг(ПИ)

Инженерное дело, инженерия — область человеческой интеллектуальной деятельности, дисциплина, профессия, задачей которой является применение достижений науки, техники, использование законов и природных ресурсов для решения конкретных проблем, целей и задач человечества. В самом общем виде инжиниринг можно определить, как применение научных методов и средств для разработки, создания и использования искусственных систем или для вмешательства в развитие естественных систем в целях разрешения общественных проблем в различных предметных областях. В современной практике используют еще более конкретное определение:

Слово «Инжиниринг» заимствовано в английском языке в значении — предоставление услуг по доведению новых идей (НИОКР — научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок) до стадии производства. Время заимствования — 90-е годы XX века.

Современное использование понятия во многом определяется этимологией слова. Инжиниринг от французского *engin* машина, механизм и в тоже время — мастерство, умение, сноровка. Латинские истоки: *ingenium*— врожденные, природные качества, талант in- «*in*» +*gen-,* корень, источник *gignere*порождать, производить.

В настоящее время **инжиниринг**— сфера деятельности по проработке вопросов создания объектов промышленности, инфраструктуры и др., прежде всего в форме предоставления на коммерческой основе различных инженерно-консультационных услуг.

Инжиниринг – технические консультационные услуги, связанные с разработкой и подготовкой производственного процесса и обеспечением нормального хода процесса производства и реализации продукции.

Инжиниринг – (от англ. engineering, лат. ingenium - изобретательность, выдумка, знания) - одна из признанных форм повышения эффективности бизнеса, суть которой состоит в предоставлении услуг исследовательского, проектно-конструкторского, расчетно-аналитического, производственного характера, включая подготовку обоснований инвестиций, выработку рекомендаций в области организации производства и управления, а также реализации продукции. Соответственно, инжиниринговая компания специализируется на предоставлении инжиниринговых услуг, способна оказывать услуги в различных предметных областях и привлекать к выполнению работ необходимых участников.

Термин "инжиниринг" появился в европейских языках (первоначально в старом французском языке использовалось engin как "сообразительность,

смекалка", а также "машина, устройство"; затем это слово попало и в другие европейские языки) из латыни, где ingenerare, означало "создавать, творить" и первоначально использовалось для обозначения применения человеческих интеллектуальных способностей для решения каких-либо практических задач (в этой связи следует отметить, что "инжиниринг" является однокоренным словом не только традиционным "инженер" и "инженерия", но и "гений", "гениальность" и т.п.).

Как известно, человеческий разум всегда был настроен на истребление себе подобных в ходе различных военных конфликтов; именно поэтому в свое время были созданы различные хитроумные военные устройства, такие как катапульты, требюше, манготели, осадные башни, плавучие мосты. Специалиста, который отвечал за создание и эксплуатацию этих "безобидных машин" (ingine), называли "инженер" (engineer). Но вслед за периодом метания камней наступали периоды собирания камней, и военный инженер становился инженером гражданским (civil engineer), который применял свои интеллектуальные способности и доступные для него знания для строительства зданий, систем водоснабжения и канализации, градостроительства. Дальнейшее распространение "инжиниринга" в европейских и мировых языках в первую очередь связано с промышленной революцией, начавшейся на территории Великобритании и заключавшейся в создании машин и механизмов, использовавших естественные природные силы и ресурсы для замены физического труда людей и животных. По мере развития знаний и умений человечества по использованию естественных систем для своих целей расширялось как значение слова "инжиниринг", так и содержание этого понятия.

До последнего времени инжиниринг достаточно часто понимался в узком смысле как деятельность по разработке, производству и эксплуатации различных машин, механизмов, агрегатов и механизированных комплексов.

В настоящее время инжиниринг далеко перешагнул за границы этого узкого понимания, которое сегодня соотносится только лишь с деятельностью инженеров-механиков (mechanical engineering) и некоторых других видов инженерной деятельности. Как же соотносятся понятия "наука" и "инжиниринг"?

Основной функцией науки является познание, в то время как основной миссией инжиниринга является преобразование, практическая деятельность, базирующаяся на результатах научной деятельности. Ученый умножает и систематизирует знания о мире, инженер использует эти знания для решения практических проблем. Инжиниринг основан на применении знаний, сложившихся в различных областях, таких как физика, химия, математика, биология и других, а также прикладных частей этих дисциплин. В отличие от ученого инженер не свободен в выборе своих интересов. Он должен решать конкретные проблемы по мере их возникновения, причем решения этих проблем должны удовлетворять подчас противоречивые требования. Производительность всегда стоит дополнительных денег, безопасность увеличивает сложность, и так далее. Инжиниринг ставит целью выработку не

лучшего, а оптимального решения, которое, принимая во внимание все существующие ограничения и требования, является наиболее желательным. Это может быть наиболее надежное решение в рамках заданных ограничений на массу машины, наиболее простое с точки зрения безопасности или наиболее эффективное по экономическим показателям.

К основным видам инжиниринга относятся услуги:

1. **Предпроектного** (предварительное исследование, технико-экономические обоснования) характера**,**
2. **Проектного** (составления проектов, генплановых схем, рабочих чертежей и т.п.) **характера**
3. **Послепроектного** (подготовка контрактных материалов, торгов, инспекция строительных работ и т.п.) характера, а также рекомендательные услуги по эксплуатации, управлению, реализации выпускаемой продукции.

Можно выделить следующие черты инженерного подхода, которые наследует бизнес-инжиниринг:

- Моделирование,
- Системный подход — преобразование архитектуры предприятия,
- Решение практических проблем на основе научных знаний,
- Повторное использование знаний.

История инжиниринга

Деятельность, которая сегодня называется инжинирингом, имеет чрезвычайно глубокие корни. Одним из первых известных инжиниринговых проектов было строительство легендарной Вавилонской башни. Печальная судьба, постигшая данный проект, наложила отпечаток на все дальнейшее развитие инжиниринга, результаты которого, как и любые другие результаты рационального вмешательства человека в функционирование естественных, природных систем, были и остаются, мягко говоря, неоднозначными. Первым известным по имени инженером может быть назван Имхотеп, архитектор и руководитель проекта строительства пирамид в Древнем Египте. Последователи Имхотепа – египетские, ближневосточные, греческие и римские инженеры – подняли уровень инженерного искусства на небывалую высоту, используя при этом всё богатство человеческого знания того времени: арифметику, геометрию, физику. Семь чудес света, храм Иерусалима, римский Колизей, римские и парфянские дороги, акведуки и многие другие технически сложные системы являются тому подтверждением. Одним из первых фундаментальных трудов, посвященных инженерному знанию и его практическому применению, стала книга римского ученого Витрувия "Об архитектуре", появившаяся в первом столетии нашей эры и представлявшая собой 10-томное произведение, включавшее знания из таких областей, как строительные материалы, архитектура, строительные технологии, гидравлика, теория измерений, градостроительство. Средние века в Европе замечательны

созданием архитектурных шедевров готики, выработкой рациональных методов управления градостроительной деятельностью. Дневник французского инженера XIII века Вилларда де Хоннекурта свидетельствует о том, что в своей деятельности инженеры Средневековья опирались на знание математики, геометрии, физических наук и активно использовали черчение. В Азии инжиниринг развивался своими, но во многом сходными путями, с использованием, пожалуй, даже более сложных и изощренных методов строительства, гидравлики и металлургии. Древние сооружения Китая дают полное представление об инженерном гении цивилизаций Древнего Востока.

Инжиниринг как профессиональная деятельность и отдельная дисциплина практически полностью сложился в XVIII веке, когда появились первые профессиональные ассоциации и школы инженерного искусства. Гражданские инженеры того времени занимались созданием систем самого различного характера и назначения – систем водоснабжения и канализации, транспортных систем, планированием городов. Англия и Шотландия стали родиной инженерной механики, где были разработаны первые паровые машины, и которая стала неким технопарком европейской промышленной революции. Успехи в коммерциализации результатов труда инженеров послужили дальнейшим толчком для развития этой деятельности.

Научный прорыв в изучении электричества привел к рождению электротехники как очередного направления в инжиниринге. Создание Вольтом первой электрической батареи, опыты Фарадея, создание динамомашины и электрического мотора явились практическими результатами этого направления. Опыты Максвелла и Герца в конце XIX века стали провозвестниками рождения электроники, отметившейся такими достижениями, как изобретение телефона, транзистора, телевизора, стиральной машины и прочих полезных и нужных в хозяйстве вещей, без которых современная жизнь была бы очень неудобной.

Успехи химической науки привели к становлению химического инжиниринга, использованию различных химических процессов в самых различных отраслях хозяйственной деятельности – металлургии, пищевой промышленности, текстильной промышленности и т.д.

Функции инжиниринга

Инжиниринг практически всегда представляет собой решение конкретной проблемы или их совокупности. Это могут быть физические или экономические проблемы, они могут требовать приложения абстрактной математики или простого здравого смысла, они могут быть обусловлены как качественными, так и количественными факторами. Но в любом случае инжиниринг при решении проблем представляет собой процесс творческого анализа, синтеза и моделирования, взаимоувязки различных идей и концепций в целях создания нового, оптимального решения.

Хотя проблемы, решаемые с помощью инжиниринга, различаются по масштабу, сложности и предметной области, для их решения применяются

один и тот же, системный, подход. Первоначально осуществляется анализ ситуации и предварительный план действий. В соответствии с этим планом проблема, как правило, декомпозируется до более четких и детальном анализируемых вопросов. Если более подробно, к любой реальной проблеме необходимо изначально относится не как к отдельно взятой, а как к "клубку" взаимосвязанных проблем, который обычно обозначается термином "проблематика". В ходе анализа и декомпозиции из проблематики необходимо вычленить более четкие проблемы и вопросы. Каждая из сформулированных проблем затем решается с помощью доступного научного аппарата, системного анализа, который позволяет интегрировать разнородные знания для решения конкретной проблемы, и проектного управления, которое предоставляет инструменты управления этой междисциплинарной деятельностью. Полученная в ходе этой деятельности модель проверяется на научную точность, практическую адекватность, техническую реализуемость и экономическую целесообразность. И, наконец, результаты решения выделенных проблем затем интегрируются с целью разрешения изначально существующей проблематики.

В качестве ***функций инжиниринга*** как научного подхода для решения практических проблем можно выделить следующие функции:

– Исследования (Research). Исследование математических и общенаучных методов, средств и концепций, экспериментов и логических инструментов для первоначального изучения проблематики, поиска новых принципов и процессов.

– Разработка (Development). Применение результатов исследования для практических целей, творческое использование научных знаний для создания новых моделей в различных предметных областях - технологических процессов, производственного оборудования и предприятий в целом.

– Проектирование (Desing). Детальное (рабочее) проектирование продукции или производственной системы, определение методов и процессов производства и функционирования, определение используемых материалов, выработка решений по форме и структуре продукции или системы, определение технических характеристик и функций, необходимых для решения проблемы, обеспечения соответствия требованиям и удовлетворения потребностей и ожиданий.

– Определение стоимостных и финансовых параметров проекта (Costing, Budgeting & Financing). Данная функция предполагает разработку бюджетов и смет по проекту, подготовку и проведение конкурсов, а также создание новых финансовых инструментов и операционных схем.

– Строительство (Construction). Создание материальной инфраструктуры, необходимой для осуществления запроектированных процессов, в общем случае предполагающее освоение строительной площадки, создание строительной продукции, т. е. пассивных основных фондов, организацию контроля качества и подготовку продукции проекта к эксплуатации.

– Организация производства (Production). Определение плана размещения производственных процессов, выбор и приобретение необходимого оборудования, определение материалов, сырья, компонентов, необходимых для производства, и источников их поставки, интеграция всех производственных процессов, проведение тестирования, пуско-наладочных мероприятий и инспекций, подготовка персонала, организация опытного производства.

– Производство (Operation). Контроль за функционированием машин, процессов, фабрик и заводов, организация материального и энергетического обеспечения, организация транспорта и коммуникаций, определение процедур выполнения технологических процессов и их совершенствование, контроль за деятельностью персонала, развитие умений и способностей персонала по выполнению технологических процессов, управление качеством процессов и продукции.

С определенной долей условности функции инжиниринга увязываются в некоторую логико-временную последовательность, которая весьма сходна с моделью жизненного цикла проекта.

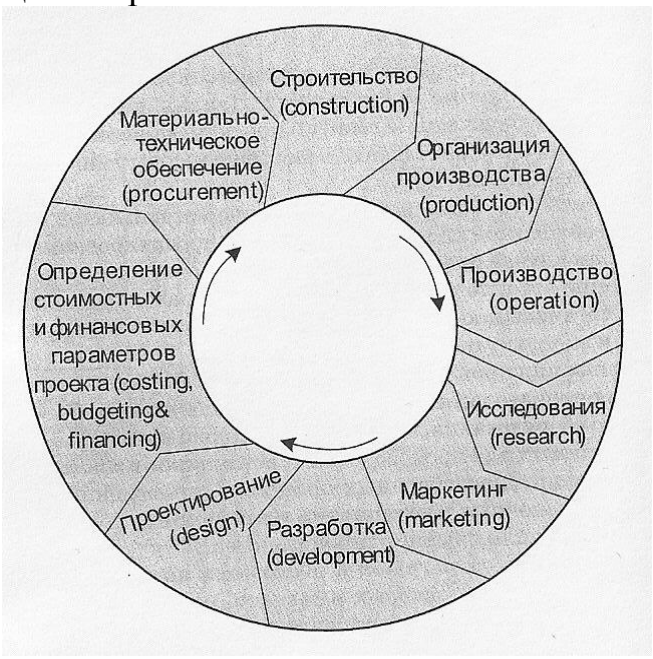


Рисунок 1 – Логико-временная связь функций инжиниринга

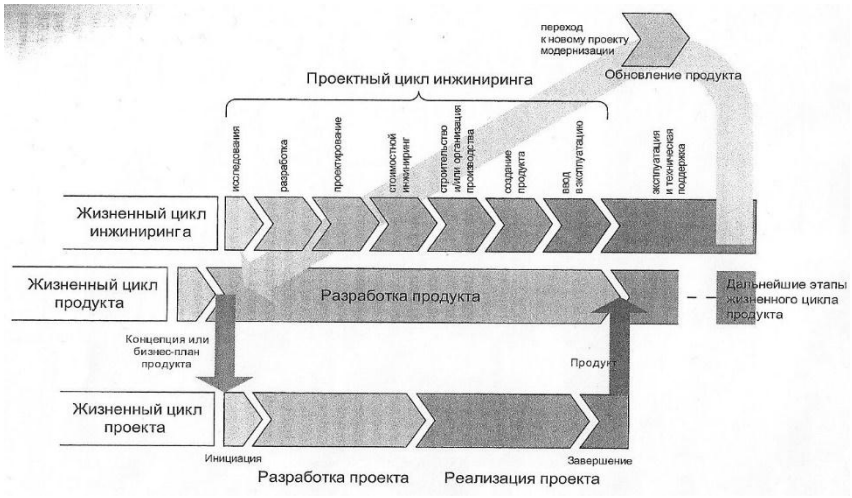


Рисунок 2 – Жизненный циклы проекта, продукта и инжиниринга

Это сходство связано с тем, что практическая инжиниринговая деятельность либо осуществляется в рамках инвестиционно-строительных проектов, либо оформляется в виде инжиниринговых проектов, а проектный менеджмент, таким образом, становится базовой управленческой методологией инжиниринга.

Функции инжиниринга тесно переплетаются с функциями менеджмента в первую очередь проектного менеджмента.

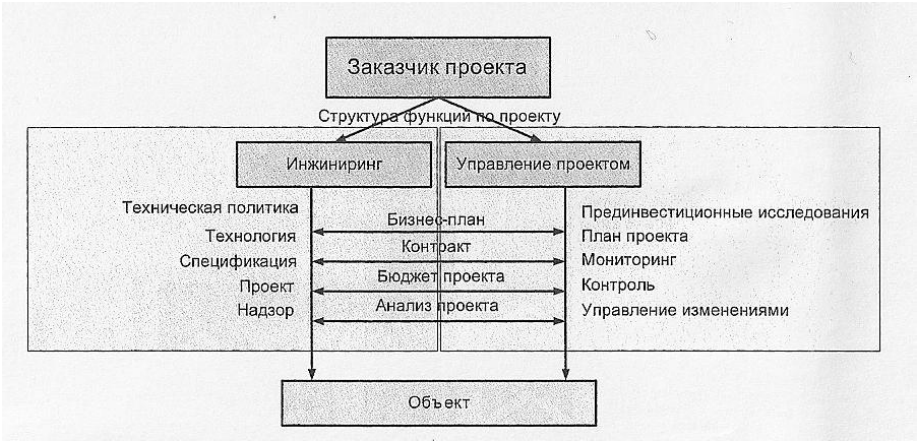


Рисунок 3 – Типичная структура функций инжиниринговой и управляющей структур

Это относится к таким задачам, как стратегическое управление технологическим развитием, анализ требований заказчиков и клиентов, контроль экономических результатов производственных процессов.

Соединение функций инжиниринга и управления особенно характерно для России, что отражает сложившуюся с советских времен линию на собственную понятийную базу и организацию инжиниринга. Так, традиционно сложилось, что главный инженер предприятия отвечал за технико-технологические аспекты деятельности предприятия (иначе говоря, инжиниринг), а первый руководитель - за управление предприятием, осуществлявшееся, ввиду отсутствия развитой системы подготовки

управленческих кадров, инженерами, в лучшем случае — инженерами-экономистами. То, что за рубежом относят к инжинирингу, в России определяют, как изыскания, проектирование, авторский надзор, опытно-промышленная эксплуатация, отраслевые НИОКР и пр.

В результате кризиса советской системы общемировые тенденции сейчас доминируют; менеджмент стал самостоятельной мультидисциплиной. Вместе с тем его тесные связи с инжинирингом сохранились. Современные заказчики, учитывая интегрирующую роль системы управления проектом, все чаще предпочитают единый контракт, включающий как инжиниринг (как правило, комплексный), так и управление проектом.

В настоящее время инжиниринг представляет собой, помимо прочего, достаточно большую и сложную структуру профессиональных сообществ и ассоциаций, объединяющих инженеров из различных стран в целях повышения уровня их знаний и эффективности их практических решений.

Основные принципы инжиниринга

Инженерное дело теснейшим образом связано с совокупностями объектов, которые принято называть сложными системами, которые характеризуются многочисленными и разнообразными по типу связями между отдельно существующими элементами системы и наличием у системы функции назначения, которой нет у составляющих ее частей. Каждая сложная система имеет уникальную организацию. Однако более детальное изучение способно выделить общее в системе, например, в процессах проектирования машины, самолета, здания или сооружения.

В теоретической основе реализации инжиниринговой технологии лежат три системных принципа: обратного проектирования; минимума функциональной полноты; экономической достаточности решения.

Принцип обратного проектирования устанавливает, что система введения новшеств не должна быть жестко связана с изготовляемым предметом, а связана с более общим разнообразием продукции, т.е. система должна обладать инвариантностью достаточной для производства заранее неизвестной номенклатуры изделий определенного класса (классов). Гораздо целесообразнее проектировать не ресурс под изделие (традиционный подход при создании специализированных «жестких» производств), а изделие под ресурс. Но для реализации такого подхода необходимо, чтобы созданный ресурс был бы достаточно универсальным.

Принцип минимальной функциональной полноты обеспечивает рациональность решений при: формировании очередности этапов запуска проекта; определении количественного состава и структуры оборудования системы; выборе ее организационно-управленческой структуры; планировании и формировании технологической подготовки производства.

Принцип экономической достаточности решения способствует коррекции технико-экономических показателей эффективности по результатам имитационного моделирования ее функционирования.

Принципы системного подхода — это положения общего характера, являющиеся обобщением опыта работы человека со сложными системами. Известно около двух десятков таких принципов, среди которых важно рассматривать:

– принцип целеобусловленности: абсолютный приоритет конечной цели;
– принцип относительности: одна и та же совокупность компонентов может рассматриваться самостоятельно, либо как управляемая часть подсистемы, либо как управляющая для подсистем;
– принцип управляемости: система должна быть способной изменять значения своих параметров под воздействием управления;
– принцип связности: система должна быть управляемой по отношению к надсистеме и управляющей по отношению к подсистеме и рассматриваться совместно с ее связями с окружением;
– принцип моделируемости: система должна содержать механизм прогнозирования и оптимизации ее поведения во времени;
– принцип иерархии: полезно введение иерархии элементов и(или) их ранжирование;
– принцип функциональности: совместное рассмотрение структуры и функции с приоритетом функции над структурой;
– принцип развития: учет изменяемости системы, ее способности к развитию, расширению, замене частей, накапливанию информации;
– принцип оперативности: реакция на изменение параметров функционирования должна происходить в реальном масштабе времени.

В случае реализации крупных проектов названные принципы системного проектирования трактуются следующим образом: создаваемые в каждой очереди реализации проекта технологический и инфраструктурный ресурсы должны обладать необходимым минимумом функциональной полноты, гарантирующим экономически эффективный выпуск продукции.

Бизнес-моделирование

Подобно тому, как инженер, занимающийся преобразованием технической системы, анализирует схему ее устройства, в бизнес-инжиниринге создается модель предприятия (или система моделей), которая является основой для принятия решений и проведения преобразований.

Модель — это система, исследование которой служит средством для получения информации о другой системе11; это упрощенное представление реального устройства и/или протекающих в нем процессов, явлений; это описание системы, отображающее определенную группу компонентов системы, их свойств и отношений, существенных для управления системой12.

С точки зрения характера описания (представления) моделируемого объекта классы моделей варьируются от вербальных описаний до формальных (математических) моделей.

Вербальные описания осуществляются с помощью методов типа «мозговой атаки», «сценариев», экспертных оценок, «дерева целей» и т. п. В свою очередь, развитие математики шло по пути расширения средств постановки и решения трудно формализуемых задач. Наряду с детерминированными, аналитическими методами классической математики возникли теория вероятностей и математическая статистика (как средство доказательства адекватности модели на основе представительной выборки и понятия вероятности правомерности использования модели и результатов моделирования). Для задач с большей степенью неопределенности стали привлекать теорию множеств, математическую логику, математическую лингвистику, теорию графов, что во многом стимулировало развитие этих направлений. Иными словами, математика стала постепенно накапливать средства работы с неопределенностью, со смыслом, который классическая математика исключала из объектов своего рассмотрения.

Таким образом, между неформальным, образным мышлением человека и формальными моделями классической математики сложился как бы «спектр» методов, которые помогают получать и уточнять (формализовать) вербальное описание проблемной ситуации, с одной стороны, и интерпретировать формальные модели, связывать их с реальной действительностью, с другой. Этот спектр условно представлен на рис. 6.

Рис. 6

Развитие методов моделирования, разумеется, шло не так последовательно, как показано на рисунке. Методы возникали и развивались параллельно. Существуют различные модификации сходных методов. Постоянно возникают новые методы моделирования как бы на «пересечении» уже сложившихся групп. Выбор класса модели из «спектра» подсказывается практическими соображениями, а именно, модель, как аналогичная система, за поведением которой мы собираемся наблюдать, должна быть проще исходной во всех своих аспектах, за исключением тех, которые определяют выполнение выбранного отношения эквивалентности. Первоначально исследователи, развивающие теорию систем, предлагали классификации систем и старались поставить им в соответствие определенные методы моделирования, позволяющие наилучшим образом отразить особенности того или иного класса. Такой подход к выбору методов моделирования подобен подходу прикладной математики. Однако в отличие от последней, в основу которой положены классы прикладных задач, системный анализ может один и

тот же объект или одну и ту же проблемную ситуацию (в зависимости от степени неопределенности и по мере познания) отображать разными классами систем и соответственно различными моделями, организуя таким образом, как бы процесс постепенной формализации задачи, т. е. «выращивание» ее формальной модели.

Существует и другая точка зрения. Если последовательно менять методы приведенного «спектра» (не обязательно используя все), то можно постепенно, ограничивая полноту описания проблемной ситуации (что неизбежно при формализации), но, сохраняя наиболее существенные с точки зрения цели (структуры целей) компоненты и связи между ними, перейти к формальной модели.

В то же время анализ процессов изобретательской деятельности, опыта формирования сложных моделей принятия решений показал, что практика не подчиняется такой логике, т. е. человек поступает иначе: он попеременно выбирает методы из левой и правой частей «спектра». Поэтому удобно как бы «переломить» этот «спектр» методов примерно в середине, где графические методы смыкаются с методами структуризации, т. е. разделить методы моделирования систем на два больших класса: *методы формализованного представления систем (МФПС)* и *методы, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов (МАИС)*. Классификации МАИС и МФПС могут быть разными, на рис. 7. приведена одна из возможных классификаций.

Рис. 7. Классификация методов моделирования и позиционирование инструментов бизнес-инжиниринга

Если обратиться к сложившейся в настоящий момент практике использования моделирования в бизнес-инжиниринге, то можно сказать, что «ядро» подходов и инструментов моделирования составляют методы структурирования, применение таблиц решений, графические, семиотические и в некоторых случаях теоретико-множественные методы. Остальные методы, как правило, носят характер либо вспомогательный (сбор первичной информации для наполнения модели), либо частный узкоспециализированный (статистическое моделирование для прогноза рынка), либо перспективно-инновационный (автоматизированный логический вывод на основе модели), см. рис. 7.

Для создания, анализа и использования моделей предприятия используются инструменты управления архитектурой предприятия (Enterprise Architecture Management / EAM Tools), развивающие идеи автоматизированного проектирования и инженерии (CAD / CAE – Computer-Aided Design / Engineering).

Системность и архитектурный подход

Зрелые инженерные дисциплины используют верхнеуровневые описания проектируемого объекта — нельзя отдельно проектировать детали, не имея чертежа общего вида, в котором все части и детали связаны вместе и который позволяет понять роль отдельной части в системе. *Система — совокупность взаимодействующих элементов, организованных для достижения одного или нескольких установленных назначений (ISO/IEC 15288:2008)*15. В бизнесе общий взгляд, который взаимоувязан частей в единое целое, производится с помощью понятия «архитектура предприятия», табл. 1.

Согласно ISO 15704 архитектура предприятия должна включать: роли людей, описание процессов (функции и поведение) и представление всех вспомогательных технологий на протяжении всего жизненного цикла предприятия.

Модель архитектуры предприятия используется для проектирования будущего состояния компании, для анализа существующего состояния, а также для представления альтернативных сценариев развития.

Почему же для решения задач оптимизации нужно исходить из целостного видения архитектуры предприятия? Все предприятия прилагают усилия по оптимизации деятельности в той или иной области за счет локальных изменений. Однако опыт показывает, что получение локального эффекта существенно зависит от способности адекватно представить целое. Не видя целое, невозможно не только найти оптимальное решение, отвечающее стратегическим интересам фирмы, но и грамотно сформировать требования к любым частным изменениям. Хороший пример последствий локальных «исследований» дан в притче о слоне[1], рис. 8:

[1] Ученый спор: Инд. басня («Слепцы, числом их было пять...») // Крокодил. 1940. № 12. С. 5.

Таблица 1

Определение архитектуры предприятия

Определение	Оригинальный вариант
Архитектура — фундаментальная организация системы, воплощенная в ее компонентах, их взаимосвязях друг с другом и со средой, а также руководящие принципы проектирование и развития системы (ISO/IEC 42010:2007). *описание (модель) основного устройства (структуры) и связей частей системы (физического или концептуального объекта или сущности).* *(ISO 15704:2000)*	**Architecture** — the fundamental organization of a system embodied in its components, their relationships to each other, and to the environment, and the principles guiding its design and evolution (ISO/IEC 42010:2007) *a description (model) of the basic arrangement and connectivity of parts of a system (either a physical or a conceptual object or entity)* *(ISO 15704:2000)*
Архитектура предприятия (АП) (1) Фундаментальная организация предприятия, либо как целого, либо вместе с партнерами, поставщиками и/или покупателями («расширенное предприятие»), либо части (например, бизнес-направление, департамент), а также (2) Руководящие принципы его проектирования и развития	**Enterprise architecture** (EA) (1) the fundamental organization of a government agency or a corporation, either as a whole, or together with partners, suppliers and / or customers («extended enterprise»), or in part (e.g. a division, a department, etc.) as well as (2) the principles governing its design and evolution (Opengroup, TOGAF 2003).

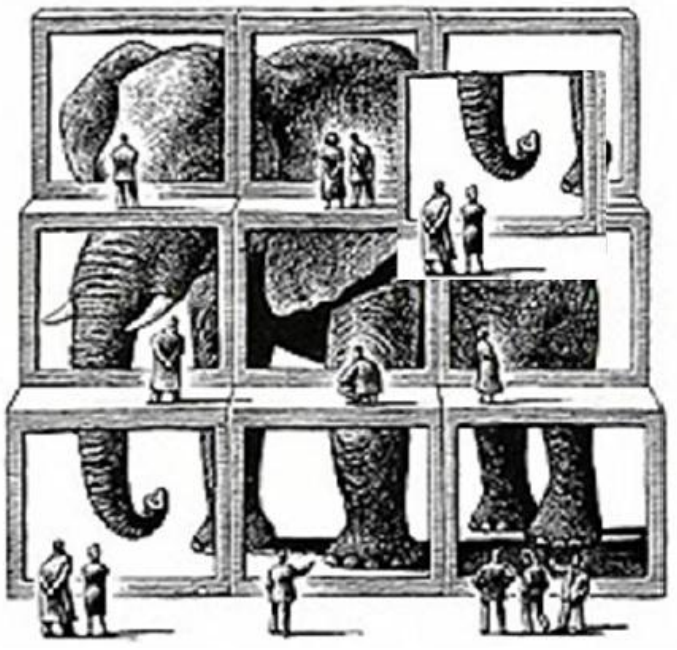


Рис. 8. Для решения частных задач необходимо видеть целое

Решение практических проблем на основе научных знаний

Инженерия основана на кодификации научных знаний о проблемной области в форме, которая полезна (напрямую) специалисту-практику и позволяет давать ответы на вопросы, которые часто возникают на практике. Благодаря этому среднестатистический инженер может применять эти знания и решать проблемы намного быстрее, чем раньше. Таким образом, инженерия делает доступными накопленный опыт вместо того, чтобы рассчитывать на уникальные виртуозные решения. Вклад бизнес-инжиниринга в науку (организационную, техническую) подобен вкладу техники строительства (*civil engineering*) в технические науки и вкладу инженерии программного обеспечения (*software engineering*) в компьютерные науки (*computer science*).

Существующая практика бизнес-инжиниринга подобна программной инженерии конца 80-х годов — знания об эффективно работающих техниках передаются в последующие проекты нерегулярно, не существует общедоступной базы проектных наработок, которую можно было бы использовать в справочных целях. Организационная наука создает некоторые актуальные теории, однако практика обычно существует независимо от этих знаний.

Бизнес-инжиниринг нацелен на создание полезных типовых решений для определенных проблем предприятий. Бизнес-инжиниринг устраняет разрыв между теоретическими знаниями организационной науки (а также применимыми наработками технических и компьютерных наук), с одной стороны, и актуальными конкретными проблемами предприятий, с другой. Данный разрыв существует потому, что теории позволяют хорошо объяснять существующие явления на предприятиях, но плохо применимы для создания решений проблем, то есть для поддержки инноваций и эволюции.

С научных позиций деятельность в рамках бизнес-инжиниринга может рассматриваться как управляемый итеративный поиск научно-обоснованных решений.

Чмилевитз[2] описывает различие между теорией и типовыми решениями в области социальных наук как различие между отношениями «причина-следствие» и «цель-средства». Он связывает отношение «причина-следствие» с теоретическими исследованиями, а отношение «цель-средство» с понятием технология. Если теоретические исследования стараются лучше понять и объяснить интересующий феномен, то бизнес-инжиниринг ищет и создает инновационные артефакты. Теоретические исследования и бизнес-инжиниринг преследует две принципиально разные цели: в одном случае причинно-следственные связи должны быть истинными, в другом — связи между целями и средствами должны быть полезными. С учетом этого, методологии исследований в каждой из этих областей будут свои. Соотношение науки и бизнес-инжиниринга представлено на рис. 9.

[2] *Chmielewicz K.* (1994) Forschungskonzeptionen der Wirtschaftswissenschaften, Stuttgart, Poeschel.

Типовые решения и повторное использование знаний

В инженерных дисциплинах разделяют инновационное и рутинное проектирование. Инновационное проектирование направлено насоздание при нципиально новых решений, а рутинное проектирование основано на повторном использовании готовых шаблонов или модулей для решения известных проблем.

Рутинное проектирование составляет существенную часть инженерной деятельности, тогда как инновационное требуется довольно редко. Для достижения максимальной эффективности процесса проектирования необходимо собирать, систематизировать и передавать все доступные (формализуемые) знания менее квалифицированным инженерам. Во всех областях найдены свои средства для такой работы со знаниями: методические материалы и справочники (*engineering handbooks)*, инструменты совместного проектирования, библиотеки типовых узлов/компонентов/модулей.

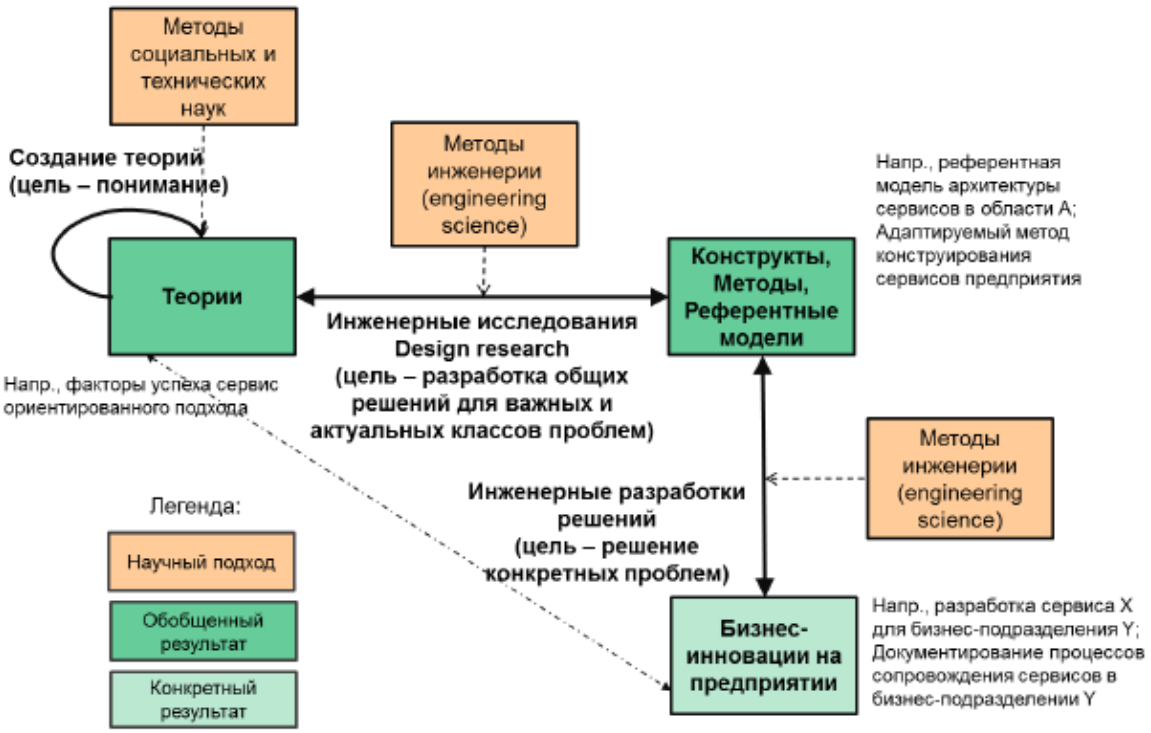


Рис. 9. Соотношение науки и бизнес-инжиниринга (Роберт Уинтер, 2009)

И рутинное, и инновационное проектирование важны для бизнес-инжиниринга. Разработка инновационных бизнес-моделей требует глубокого знания отрасли и креативности, однако большая часть задач в бизнес-инжиниринге строится на рутинах, например, объединение двух отделов в один, внедрение стандартного программного обеспечения и др.

Методы и инструменты бизнес-инжиниринга направлены на формализацию и информатизацию рутинной деятельности, а также на активизацию мышления в инновационных процессах.

Принцип параллельного инжиниринга (concurrent engineering) предполагает выполнение процессов разработки и проектирования одновременно с моделированием процессов изготовления и эксплуатации. Сюда же относится одновременное проектирование различных компонентов сложного изделия. При параллельном инжиниринге многие проблемы, которые могут возникнуть на более поздних стадиях ЖЦ, выявляются и решаются на стадии проектирования. Такой подход позволяет улучшить качество изделия, сократить время его вывода на рынок, сократить затраты.

Отличиями параллельного инжиниринга (ПИ) от традиционного подхода к организации процессов инженерной деятельности являются:

- ликвидация традиционных барьеров между функциями отдельных специалистов и организаций путем создания, а при необходимости – последующего преобразования, многопрофильных рабочих групп, в том числе территориально распределенных;
- итеративность процесса приближения к необходимому результату.

Многопрофильные рабочие группы (МПГ), как следует из их названия, включают специалистов разного профиля и создаются для решения конкретных задач. Например, представители эксплуатанта, генерального разработчика и поставщика комплектующих изделий, т.е. специалисты из разных организаций, могут быть собраны в одну МПГ для решения проблемы, возникающей в ходе эксплуатации.

ПИ предполагает замену традиционного последовательного подхода комплексом перекрывающихся во времени операций, направленных на систематическое улучшение разрабатываемого решения вплоть до достижения необходимого результата.

Исходное понимание задачи ведет к первой версии документированных требований, на основе которых разрабатывается первоначальное проектное решение. Оно порождает новые вопросы и позволяет уточнить постановку задачи. Поскольку жесткое требование завершить текущую фазу работы перед началом следующей отсутствует, последовательное проектирование заменяется "работой по спирали".

Эффективная реализация такого подхода невозможна вне ИИС. Возможность применения принципов ПИ возникает благодаря тому, что в ИИС все результаты работы представлены в электронном виде, являются актуальным, доступны всем участникам и легко могут быть скорректированы [1, 4].

Лекция 10. Реинжиниринг бизнес-процессов

Концепция CALS предполагает последовательное, непрерывное изменение и совершенствование бизнес-процессов разработки, проектирования, производства и эксплуатации изделия. Для этого используется набор разнообразных методов, в т.ч. реинжиниринг бизнес-процессов (business process reengineering), бенчмаркинг (benchmarking), непрерывное улучшение процессов (continuous process improvement) и т.д.

Реинжиниринг и усовершенствование бизнес-процессов

Реинжиниринг— это фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование деловых процессов для достижения резких, скачкообразных улучшений современных показателей деятельности компаний, таких как стоимость, качество, сервис и темпы.

Основополагающей целью реинжиниринга бизнес-процессов является гибкое и оперативное приспособление к ожидаемым изменениям запросов потребителей: соответствующее изменение стратегии, технологии, организации производства и управления на основе эффективной компьютеризации.

Результатом реинжиниринга является улучшение важнейших количественно измеряемых показателей. Реинжиниринг бывает успешным, только если он находится в тесной связи с организационным развитием организации.

Формально термин «реинжиниринг» определен Хаммером, Давенпортом и Шортом в двух статьях в 1990 году. Термин получил широкую известность в 1993 году после публикации книги Хаммера и Чампи «Реинжиниринг корпораций – манифест революции в бизнесе».

Реинжиниринг	**Усовершенствование**
Редко повторяющаяся операция	Постоянный процесс
Фундаментальные, качественные улучшения	Небольшие количественные улучшения
Глобальные улучшения	Локальные улучшения
Революционный процесс	Эволюционный процесс

По степени воздействия на организационную структуру различают эволюционный и революционный реинжиниринг бизнес-процессов.

При **эволюционном** реинжиниринге оптимизируется внутренняя интеграция различных бизнес-процессов, но не вносятся существенные изменения в функционирование организации.

При **революционном** реинжиниринге перепроектируются все бизнес-процессы и происходит переориентация организации на новый вид бизнеса.

Построению интегрированной системы информационной поддержки ЖЦ изделия должны предшествовать:

- анализ существующей ситуации;
- разработка комплекса функциональных моделей бизнес-процессов, описывающих текущее состояние среды, в которой реализуется ЖЦ изделия;
- выработка и сопоставление возможных альтернатив совершенствования как отдельных бизнес-процессов, так и системы в целом.

Результатами анализа являются:

- функциональные модели бизнес-процессов ЖЦ изделия "как есть сейчас";
- функциональные модели альтернативных вариантов усовершенствованных бизнес-процессов ЖЦ "как должно быть";
- оценка затрат и рисков для каждого варианта; – выбор предпочтительного варианта на основе взвешенного критерия минимума затрат и рисков;
- описание технической архитектуры ИИС для выбранного варианта;
- оценка технических характеристик ИИС для выбранного варианта;
- план действий по реализации выбранного варианта совершенствования бизнес-процессов ЖЦ и ИИС.

В настоящее время технология моделирования и анализа бизнес-процессов достаточно формализована. Для разработки функциональных моделей рекомендуется использовать методологию и нотацию SADT, регламентированную под названием IDEF0 федеральным стандартом США FIPS 183 и официально принятую в России [2].

Стандарты графического описания БП

В настоящее время широко используются и пользуются большой популярностью несколько стандартов моделирования бизнес-процессов:

1. Семейство стандартов IDEF (в частности, IDEF0, DFD, IDEF3);
2. Семейство стандартов ARIS (в частности, нотация eEPC);
3. Семейство стандартов UML (Usecase diagram, activity diagram).

Каждое из этих **семейств** стандартов представляет собой определенную методологию, и реализовано рядом программных продуктов (CASE-средств). Наиболее популярное ПО, реализующее ту или иную методологию, представлено в таблице ниже.

Методология	Программное обеспечение
IDEF	AllFussion Business Modeler (BPwin), MS Visio
ARIS	ARIS Toolset
UML	Rational Rose, MS Visio, ARIS Toolset
BPMN	MS Visio, Elma, BizAgi …

Оптимизация бизнес-процессов

Анализ модели бизнес-процесса

Для того, чтобы выявить «узкие места» в бизнес-процессе и оценить его эффективность, необходимо проанализировать его модель по ряду признаков, построив модель БП как она есть «as-is». Что это за признаки?

1. Удовлетворенность конечным результатом БП;
2. Оптимальность схемы бизнес-процесса;
3. Удовлетворенность промежуточными результатами БП;
4. Оптимальность промежуточных операций;
5. Оптимальность управления бизнес-процессом.

После проведения анализа модели бизнес-процесса необходимо выявить все «узкие места» и разработать модель процесса «как будет» (to-be).

Методы проектирования нового бизнес-процесса.

Для улучшения и устранения недостатков бизнес-процесса необходимо спроектировать его новый вариант, и затем внедрить его. Для разработки нового бизнес-процесса применяется ряд методов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки:

1. Быстрый анализ («мозговой штурм»);
2. Бенчмаркинг (сравнительный анализ);
3. Перепроектирование процесса (концентрированное улучшение);
4. Реинжиниринг (разработка нового процесса).

Быстрый анализ

Данный метод по своей сути мало отличим от давно известного метода «мозгового штурма», который широко применяется для решения различных научных и прикладных задач. Заключается метод в следующем. Собирается аналитическая группа, перед которой ставится задача разработать новую версию того или иного бизнес-процесса. Группа проводит одно-двухдневное совещание, в ходе которого формулирует решение по поставленной задаче. В аналитическую группу могут входить как специалисты Исполнителя, так и специалисты Заказчика, что окажется более эффективным. Аналитики высказывают свою точку зрения на решение, основываясь на своих знаниях и

опыте. Ключевым моментом является то, что по завершении совещания аналитическая группа докладывает свое решение руководству Заказчика, и оно должно либо принять данное предложение, либо обоснованно отвергнуть его.

Таким образом, решение по проблеме вырабатывается и принимается довольно быстро, что является достоинством этого метода. К недостаткам следует отнести то, что из-за ограниченности сроков крайне затруднительно проанализировать достаточно комплексную и обширную проблему, поэтому данный метод применяется для решения локальных единичных проблем в том или ином бизнес-процессе.

Бенчмаркинг

Идея данного метода – стара как мир, поскольку суть метода заключается в рациональном переносе «лучшей практики» в осуществлении того или иного бизнес-процесса на свое предприятие.

Основная сложность в осуществлении данного метода заключается в том, что крайне затруднительно собрать релевантные данные для сравнительного анализа. Как правило, информация о технологии выполнения того или иного процесса, особенно в производственной сфере, редко находится в открытом доступе. Чтобы добыть информацию для сравнительного анализа, применяют следующие подходы:

1. Запрос информации у дружественных предприятий данной отрасли (если таковые имеются;
2. Приобретение информации о лучшей практике у специализированных организаций (отраслевых консультантов, отраслевых ведомств);
3. Получение сведений из открытых информационных источников.

Получив необходимую информацию, аналитики сравнивают ее с аналогичными сведениями по собственному предприятию, и предлагают ряд мер по изменению бизнес-процессов организации.

Перепроектирование

Перепроектирование процесса – наиболее часто встречающийся на практике подход к оптимизации бизнес-процессов, когда в силу каких-либо причин нет возможности провести полную реорганизацию (реинжиниринг) БП.

Суть метода заключается в следующем. К модели исходного бизнес-процесса применяется ряд оптимизирующих приемов, после чего результаты оптимизации проверяются на имитационной модели нового процесса.

К оптимизирующим средствам, которые позволяют сделать процесс более эффективным, относится следующее:

1. Устранение дублирования работ;
2. Упрощения методов управления;
3. Сокращение длительности работ;

4. Анализ добавленных ценностей;
5. Устранение бюрократии;
6. Стандартизация;
7. Автоматизация, механизация, применение информационных технологий.

Реинжиниринг

Суть подхода заключается в следующем. Бизнес-процесс проектируется «с чистого листа», при этом игнорируются существующие процессы и организационная структура. Проектировщик задается вопросом: что необходимо, чтобы создать нужный результат процесса за минимальное время с минимальными ресурсами, и от этого выстраивает весь новый бизнес-процесс. При этом обязательно должна учитываться миссия и стратегия организации, и новые бизнес-процессы обязательно соответствуют стратегическим целям.

Внедрение нового бизнес-процесса.

Мало разработать оптимальный бизнес-процесс, важно внедрить его в организацию и заставить работать. Именно на стадии внедрения погибали многие проекты в области реорганизации бизнес-процессов.

Внедрение изменений должно включать в себя ряд мероприятий, а именно:

1. Внутренняя PR-компания, объясняющая сотрудникам преимущества перехода на новые бизнес-процессы;
2. Применение методов материального стимулирования персонала на работу по новому бизнес-процессу;
3. Обучение сотрудников новой технологии работы;
4. «Пилотное» внедрение нового бизнес-процесса в отдельных подразделениях или на отдельных рабочих местах;
5. Разработка регламента работы по новому бизнес-процессу;
6. Документарное, техническое и технологическое обеспечение нового бизнес-процесса, включая формы документов, производственное оборудование, программное обеспечение и т.п.

Внедрение нового бизнес-процесса следует рассматривать и, соответственно, планировать как отдельный проект, с установлением состава и последовательности работ, сроков их исполнения и назначением ответственных лиц.

Функциональная диагностика организационных структур

Цель, предмет и задачи функциональной диагностики

Функциональная диагностика организационной структуры организации служит для углубленного изучения структуры организации и функций, выполняемых подразделениями и сотрудниками.

Объектом функциональной диагностики является организационная структура и составляющие ее функциональные элементы, процедуры и их характеристики. Предмет функциональной диагностики - распределение отношений функциональных элементов, их свойств и процедур в процессе функционирования организации.

В связи с этим к важнейшим задачам функциональной диагностики организационных структур относятся:

1. Классификация субъектов функционирования (категорий и групп работников).
2. Классификация элементов процесса функционирования (действий, процедур).
3. Классификация направлений (решаемых проблем), целей функционирования.
4. Классификация элементов информационных потоков.
5. Проведение обследования деятельности персонала организации.
6. Исследование распределения (по времени и частоте) организационных характеристик: процедур, контактов персонала, направлений деятельности, элементов информационных потоков - по отдельности и в комбинациях друг с другом по категориям работников, видам процедур и их направлениям (согласно результатам и логике исследований).
7. Определение причин рассогласования декларируемой и реальной структуры организационных отношений.

Лекция 11. Основы функционально-стоимостного анализа

Функционально-стоимостной анализ (ФСА, Activity Based Costing, ABC) - метод определения стоимости и других характеристик продукции и услуг, в основе которого лежит использование функций и ресурсов, задействованных в бизнес-процессах организации, таких как: производство, маркетинг, продаж, доставка, техническая поддержка, оказание услуг, обслуживание клиентов, обеспечение качества.

Метод ФСА разработан как "операционно-ориентированная" альтернатива традиционным финансовым подходам. В частности, в отличии от традиционных финансовых подходов метод ФСА:

- предоставляет информацию в форме, понятной для персонала предприятия, непосредственно участвующего в бизнес-процессе;
- распределяет накладные расходы в соответствии с детальным просчетом использования ресурсов, подробным представлением о процессах и функциях их составляющих, а также их влиянием на себестоимость.

В основе применения метода ФСА лежит разработка и применение на практике ФСА-моделей. Цель – облегчить анализ процесса создания продукта и достичь улучшений в работе предприятий по показателям стоимости, трудоемкости и производительности. Как правило ФСА-информация

представляется в виде системы стоимостных и временных показателей, показателей трудоемкости и трудозатрат, а также относительных показателей, характеризующих эффективность деятельности центров ответственности на предприятии.

Систему показателей можно использовать как для текущего (оперативного) управления, так и для принятия стратегических решений.

Необходимость решения управленческих задач в условиях рыночных отношений обуславливает высокий уровень требований, предъявляемых к информационно- аналитическому обеспечению процесса управления. Одним из ведущих инструментов информационно- аналитического обеспечения процессов принятия стратегических управленческих решений является ФСА.

Основные понятие о ФСА начали зарождаться в 40- х гг. XX в. Разработчиками идеи одновременно выступили Ю. М. Соболев (СССР) и Л. Д. Майлз (США).

Юрий Михайлович Соболев представил всеобщему обозрению свою идею поэлементного анализа конструкций, в которую были заложены основные принципы реализации поэлементного анализа. Он предлагал использовать индивидуальный подход к каждому элементу конструкции и разделять элементы на основные и вспомогательные по принципу их вспомогательного назначения. Применив данный метод к отработке узла крепления микротелефона, Соболев смог добиться значительного уменьшения количества применяемых деталей на 73%, расхода материалов на 44%, трудоемкости на 70%. И самым важным результатом явилось уменьшение себестоимости в 1, 8 раза. В это же время Лоуренс Д. Майлз, инженер «General Electric», возглавил группу специалистов, перед которыми была поставлена задача поиска более экономичных способов осуществления функций изделий. Эти требования были сформулированы нехваткой ряда дефицитных ресурсов в период Второй мировой войны.

Новый метод Майлз назвал инженерно- стоимостным анализом и определил его как «прикладную философию»: «Анализ стоимости…- это творческий подход, цель которого - эффективная идентификации непроизводительных затрат или издержек, не обеспечивающих ни качества, ни полезности, ни долговечности, ни внешнего вида, ни других требований заказчика» [1].

Между российским и западным методами анализа существовало довольно- таки значительное отличие. В ходе детального анализа осуществлялся поиск более экономичных способов осуществлений функций изделия в рамках существующего конструкторского решения. Но Майлз же в основу разработанного анализа положил функцию и рассматривал первоначальную конструкцию лишь в качестве одного из вероятных вариантов исполнения функции.

В самом начале идеи и предложения Л. Д. Майлза не получили широкого признания и понимания. Но спустя время его идеи не только были приняты широкой массой, но и стали распространяться и применяться на практике. Так в 1959г. В США для координации работ по ФСА и обмена опытом между

компаниями было организовано Общество американских инженеров. В период 1960- 1962гг. президентом данного Общества был Л. Д. Майлз. [3].

В 1950- х гг. метод ФСА начал использоваться управлением по кораблестроению, которые входили в состав министерства обороны США. Данный метод получил название стоимостного инжиниринга.

В 60-е гг. XX в. с целью снижения издержек на производство военной техники министр обороны США Р. Макнамара предложил включать в контракты пункты, обязывающих к применению анализа стоимости. Спустя некоторое время многие предприятия, которые работали на министерство обороны США, и фирмы- субподрядчики начали использовать анализ стоимости. Это положило начало использованию анализа стоимости в системе госзаказов США. В период 1970г. анализ стоимости в США использовали уже 25% всех компаний. С 1976- 1977 гг. в США задачи ФСА были значительно расширены и главным образом ориентированы на значительное сокращение издержек в течение всего жизненного цикла изделия. [2].

В ходе исследования процесса возникновения и совершенствования ФСА в СССР и России можно выделить семь этапов его исторического развития.

Таблица 1.

№ п/п	Период	Исторические условия	Назначение ФСА, применяемые методы	Предприятия, применяющие ФСА
1	1941-1945гг.	Великая Отечественная война-потребность замены дефицитных материалов	Интуитивный подход, эмпирические методы.	Производственные предприятия на Востоке СССР, в основном в сфере военного производства.
2	1946-1959гг.	Восстановление экономики и конверсия военного производства, реорганизация системы управления экономикой.	Разработка теоретических основ ФСА.	Пермский телефонный завод.
3	1960-середина 1970-х гг.	В начале 60-х. наметились кризисные явления в экономике. К началу 70- х гг. экономика СССР находилась в состоянии стагнации, началось снижение основных экономических показателей.	Формирование основных методических положений, изучение зарубежных исследований в области ФСА, широкое распространение общественных бюро экономического анализа.	Свердловский машиностроительный завод им. Воровского, ВНИИэлектроаппарат (г. Харьков), Московское ПО «Электролуч», ПО Уралмаш, Чебоксарский электроаппаратный завод.

4	Вторая половина 1970-х гг.	Продолжение «застойного периода» Обострение холодной войны.	ФСА применяется в качестве ключевого фактора повышения эффективности производства и НТП.	Применение ФСА на уровне Министерства электротехнической промышленности, Министерства энергетического машиностроения.
5	80-е гг. XXв.	В качестве стратегии ставилась задача совершенствования социализма и ускорения социалистического развития.	Разработка межотраслевых положений проведения ФСА, интенсивное применение ФСА для нетехнических систем в организации и управлении производством.	«Электролуч» (г. Москва), «Светотехника» (г. Саранск), Алма-Атинский завод низковольтной аппаратуры и многие другие.
6	90-е XX в.	Экономические и социальные реформы, «шоковая терапия».	Достигнутые позиции в области применения ФСА полностью утеряны.	Значительное число лабораторий и групп по ФСА закрыто, с ликвидацией отраслевых министерств прекратили свое существование Советы по ФСА.
7	Начало XXI в.	Начало экономической модернизации. Вместе с тем продолжавшийся спад производства вызвал осложнение экономической ситуации в стране.	Теоретическое и методологическое возрождение и развитие ФСА.	ОАО « Красноярский завод холодильников «Бирюса», филиал ОАО «Пивоваренная компания «Балтика».

Первый этап являлся подготовительным и характеризовался спонтанно провидимыми исследованиями. В годы Великой Отечественной войны возникала необходимость экономической замены некоторых дефицитных материалов.

Второй этап – возникновение ФСА в СССР. Приемы ФСА довольно широко применялись конструкторами при отработке изделий на технологичность, т. е. на достижение их соответствия требованиям экономичной технологии изготовления. Тут также происходит развитие комплексного технико-экономического анализа производства. Главная цель при этом была определение влияния на работу предприятия уровня техники, технологии, организации производства и поиска резервов.

Третий этап характеризуется активным применением ФСА для снижения издержек. На данном этапе осуществлялось объединение бюро экономического анализа с целью выявления и мобилизации резервов повышения эффективности хозяйствования.

Четвертый этап связан с использованием ФСА элемента отраслевого управления эффективностью. С 1977г. в СССР ФСА стал применяться в рамках всей электротехнической промышленности.

Пятый этап был связан с расширением сфер применения ФСА, с совершенствованием и оптимизацией его методологического аппарата. Немаловажный вклад в развитие внес профессор Б.И. Майданчик. В 90-х гг. происходит резкий упадок экономики в стране, что привело к значительному сокращению количества публикаций по ФСА, прекратилось подготовка и переподготовка специалистов. В итоге ФСА практически перестали применять. Специалисты в данной области оказались невостребованными и многие из них уехали работать в США, Канаду, Израиль, Корею.

С начала XXI в. происходит увеличение интереса к ФСА в России- растет количество публикаций по ФСА в России, а некоторые предприятия применяют ФСА и в практической деятельности. Но большая часть исследований в области ФСА опирается на теоретические разработки советских экономистов. Новых исследований, к сожалению, немного.

За многолетнюю историю своего существования методология ФСА претерпела огромные изменения, в результате которых были ликвидированы недостатки субъективизма в определении функций и их взаимодействия. На сегодняшний день метод ФСА широко применяется экспертами ООН и многими всемирно известным компаниями, в числе которых Boeing, BP Amoco, DuPomt Co, Fiat, Ford, General Motors Corp., Mitsubishi, Motorola, Nissan Motor, United Technologies Corporation, Volkswagen.

Построение функционально-стоимостных моделей осуществляется на основе применения методологической и технологической взаимосвязи между IDEF0- и ФСА-моделями.

Практический подход к проведению ФСА

Функционально-стоимостной анализ может производиться с помощью различных подходов, один из которых описывается ниже.

Бизнес-процесс, который необходимо проанализировать, представляется в табличной форме. Таблица состоит из следующих столбцов:

1. Номер шага;
2. Описание процесса;
3. Ключевые показатели процедуры (время выполнения, расстояние между местами выполнения смежных процедур, либо иные характеристики);
4. Тип процедуры.

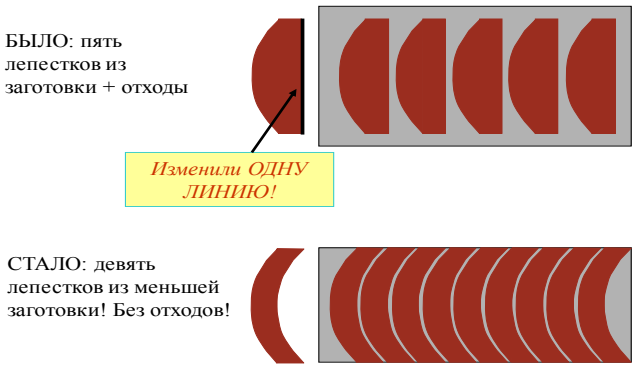


Рис. Пример производства изделия

Общая методика изменения бизнес-процессов в связи с внедрением CALS-технологий на предприятии включает в себя следующие этапы [4]:

1. Мотивация необходимости изменений.
2. Разработка плана изменений и его утверждение руководством. Создание организационной структуры (рабочей группы CALS), которая будет реализовывать разработанный план. На первых этапах эту структуру должен возглавлять руководитель организации.
3. Обучение членов группы CALS и другого персонала, причастного к проведению изменений.
4. Определение промежуточных (тактических) целей и способов оценки результатов (определение метрик).
5. Разработка рабочих планов для всех участников группы CALS.
6. Создание временных многофункциональных рабочих групп для решения тактических задач.
7. Реализация планов.
8. Оценка достигнутых результатов.

Задание. Привести примеры ФСА на машиностроительном производстве.

Приведем несколько примеров успешного реинжиниринга, которые помогут уяснить сущность и методы технологии BPR [3].

1. Опыт IBM Credit. IBM Credit Corporation является филиалом IBM и занимается кредитованием клиентов, которым IBM продает компьютеры, программы и предоставляет услуги. Проблема IBM Credit состояла в том, что при существующем технологическом цикле решение вопроса о кредитовании клиента занимало в среднем 7 дней, а в сложных случаях - до двух недель. Чрезмерная длительность принятия решений приводила к потере клиента, так как он за это время мог найти другой источник финансирования.

Длительность принятия решения по запросу клиента была вызвана тем, что обработка запроса осуществлялась в 5 шагов, выполняемых последовательно в пяти различных подразделениях компании. При этом передача запроса из одного подразделения в другое осуществлялось на бумажном носителе. Компания поручила двум старшим менеджерам самим

пройти с несколькими запросами клиентов все 5 шагов. При этом они просили исполнителей обрабатывать запросы без задержки. Эксперимент показал, что собственно на обработку запроса затрачивается всего 90 мин., а остальное время расходуется на передачу запроса из одного подразделения в другое. Таким образом, оказалось, что проблема заключена не в эффективности, с которой работают специалисты, а в структуре процесса обработки. Итак, для решения проблемы необходимо было изменить процесс, а не его отдельные шаги.

В основе используемого способа обработки лежало предположение, что каждый запрос является сложной задачей, требующей для ее решения участия экспертов разных специальностей. Анализ показал, что это предположение ошибочно, так как большинство запросов являются простыми и их обработка сводится к работе с базой данных, что может сделать обыкновенный клерк. В новом процессе всю обработку выполняет один специалист, снабженный информационной экспертной системой, обеспечивающей принятие решения и доступ ко всем необходимым данным и инструментариям. Теперь в большинстве случаев (более 90% запросов) один специалист обеспечивает решение задачи. В трудных случаях специалист обращается к экспертам.

В результате реинжиниринга IBM Credit радикально перепроектировала процесс обработки и достигла скачкообразного улучшения основных показателей деятельности компании: время обработки запроса **сокращено с 7 дней до 4-х часов**, количество обрабатываемых запросов **возросло в 100 раз** при уменьшении количества сотрудников.

2. Опыт Ford Motor. В начале 80-х г.г. компания Ford подобно многим другим компаниям Америки искала способы сокращения административных расходов. Было решено сократить расходы в отделении оплаты счетов, где работало более 500 человек. Руководство Ford узнало, что в компании Mazda оплатой счетов занимается всего 5 человек. Хотя Mazda меньше, чем Ford, но явно не в 100 раз. Сначала предполагалось, что сократить число сотрудников можно за счет автоматизации, но это могло дать только 20%-е сокращение. Тогда руководство Ford приняло решение переосмыслить весь процесс, в котором участвует отделение оплаты счетов.

Отделение счетов само по себе не могло быть подвергнуто реинжинирингу, так как это подразделение, а не процесс. Процесс в целом, называемый "поставки", начинается с того, что департамент заказов посылает продавцу товаров заказ на их приобретение. При этом копия заказа отправляется в отделение оплаты счетов. Когда продавец отправил товары, и они прибыли в компанию Ford, клерк из отдела получения товаров составляет документ получения и отправляет его в департамент оплаты счетов. Тем временем продавец посылает в отделение оплаты счетов накладную на товары. К этому времени в отделении оплаты счетов находятся 3 документа на эти товары: заказ на приобретение, документ получения и накладная. Если все три документа соответствуют друг другу (в большинстве случаев именно эта ситуация и имеет место), то клерк оплачивает счет. При несоответствии документов необходимо найти источник ошибки. Основное время в своей

работе клерк как раз и тратит на обработку именно таких ситуаций. На рис. 1.4 приведена схема описанного процесса.

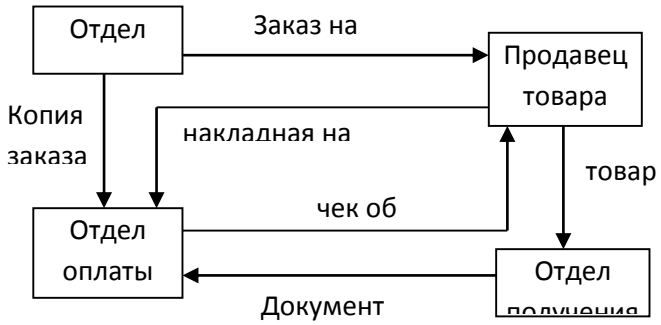


Рис. 1.4. Старая технология оплаты счетов

Новый процесс оплаты счетов, разработанный в компании Ford в ходе реинжиниринга, радикально отличается от старого. На рис 1.5 приведена схема нового процесса.

Отделение заказов посылает продавцу заказ и одновременно вводит этот заказ в базу данных. Затем продавец посылает заказанные товары в отдел получения. Когда товары поступают в отдел получения, клерк через компьютерный терминал проверяет соответствие присланных товаров товарам, перечисленным в заказе и хранящимся в базе данных. Если соответствие есть, то клерк принимает товары и вводит информацию об этом в базу данных. Компьютер, получив информацию о прибытии товаров, автоматически отправляет продавцу чек об оплате товаров. Если соответствия нет, то клерк отвергает груз и отправляет его обратно продавцу.

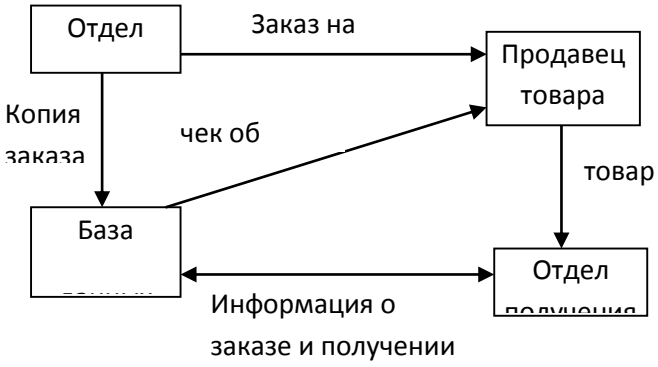


Рис. 1.5. Новая технология оплаты счетов в компании

Суть изменений, проведенных компанией Ford, состоит в авторизации оплаты, выполняемой в отделе получения. Фактически новый процесс устранил накладную и департамент оплаты счетов. Это привело к существенному сокращению количества сотрудников (125 человек вместо 500).

Процесс реинжиниринга отменил старое правило бизнеса: "Мы платим, когда получаем накладную" и заменил его на новое: "Мы платим, когда получаем товар".

3. Опыт Kodak. В 1987 г. основной конкурент Kodak компания Fuji объявила о выпуске новой 35-мм камеры. Компания Kodak не вела исследования в этом перспективном направлении. Традиционный для Kodak цикл от начала разработки нового изделия до его производства составлял 70 недель. Такое длительное отставание от Fuji позволило бы последней получить большие преимущества на новом перспективном рынке. Для того, чтобы сократить этот цикл, Kodak решила провести реинжиниринг процесса разработки нового продукта.

Разработка продукта может выполняться последовательно или параллельно. При последовательной разработке весь проект разбивается на шаги и переход к очередному шагу осуществляется только тогда, когда полностью завершен предыдущий. Очевидно, что при последовательном подходе время разработки больше, чем при параллельном, но при этом подходе меньше объем работ, так как не приходится устранять несоответствия между компонентами, разработанными на параллельно выполняемых шагах. Как правило, несоответствия неизбежны при параллельном подходе.

Чтобы ускорить выпуск нового изделия, компания Kodak решила провести реинжиниринг процесса разработки. Было принято решение использовать при разработке последовательно-параллельный подход (т.е. некоторые части камеры разрабатываются одновременно) с использованием технологии CAD/CAM (Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing). Эта технология позволяет проектировать изделия непосредственно на экране компьютера, не прибегая к чертежам на бумаге, что значительно ускоряет разработку.

Использование технологии CAD/CAM и интегрированной базы данных (БД), хранящей текущее состояние проекта, позволило применить параллельный подход. Каждый день в БД добавлялись результаты, полученные параллельно работающими группами. Каждый вечер группа проектировщиков инспектировала БД с целью поиска несоответствий между результатами работы параллельно работающих групп. Если несоответствия обнаруживались, то они тут же исправлялись. При используемой ранее технологии разработки несоответствия могли быть обнаружены только через недели или месяцы, когда параллельно разработанные части собирались вместе.

Новый процесс разработки, использованный компанией Kodak, называется ***одновременной инженерией***. Этот подход использовался раньше в космической индустрии. Новый процесс разработки позволил сократить срок выпуска нового продукта с 70 недель до 38 недель. Более того, так как новый процесс позволяет промоделировать сборку продукта до его изготовления, стало возможным выбирать те конструкции, которые проще и дешевле в производстве. Благодаря этому Kodak уменьшила стоимость вновь спроектированной камеры на 25%.

Все рассмотренные выше примеры соответствуют приведенному выше определению реинжиниринга и включают в себя использование принципов реинжиниринга и технологии:

1. ***Ориентация на процесс***. Во всех случаях положительный результат получен не благодаря ориентации на узкую задачу, решаемую в предопределенных организационных границах, а благодаря рассмотрению всего процесса в целом.

2. ***Результат***. Все компании добились качественного прорыва в решении поставленных задач. Их не устраивало улучшение на 10-50%, обеспечиваемое простой автоматизацией

3. ***Новые правила***. Каждая компания при проведении реинжиниринга неизбежно приходила к необходимости отказаться от установленных ранее незыблемых правил ведения бизнеса. Средствами, которые позволили создать модели новых процессов, явились новые информационные технологии и новые организационные отношения.

4. ***Технология***. Добиться поставленных целей, скачкообразно улучшив основные показатели, помогла тщательно продуманная технология проведения BPR.

К сожалению, кроме примеров успешного реинжиниринга немало примеров и неудач. Экспертные оценки показывают, что ранее (в 1993 г.) около 50% проектов по реинжинирингу заканчивались неудачей. Однако необходимо подчеркнуть, что причины неудач заключены не в загадочности реинжиниринга, а в нарушении правил его проведения. С точки зрения риска реинжиниринг подобен игре в шахматы, а не игре в рулетку [2], т.е. участники реинжиниринга в меру своих знаний и умений могут влиять на результат.

С целью выяснения причин неудач и определения необходимых для успеха предпосылок был проведен ряд специальных исследований, опирающийся на опросы консультантов из более чем 40 фирм, оказывающих услуги по менеджменту, информационным технологиям, реинжинирингу, формулировке стратегий бизнеса и т.п. В результате были выявлены факторы, способствующие успеху реинжиниринга и типичные ошибки, приводящие к неудачам.

Типичные ошибки при проведении реинжиниринга [3]:

1. Компании пытаются улучшить существующий процесс вместо того, чтобы перепроектировать его.

Это наиболее грубая ошибка, хотя довольно распространенная. Значительные результаты достигаются только при больших амбициях руководства компании. Здесь не подходит поговорка: "Лучше синица в руках, чем журавль в небе". Искушение выбрать более легкий путь, сводящийся к усовершенствованиям, оказывается довольно соблазнительным. Менеджеры, например, начинают устанавливать стандарты по эффективности работы на каждом шаге или применять улучшающие методики. Пытаются применять теорию очередей и линейное программирование, чтобы сбалансировать работы между подразделениями и минимизировать время ожидания. Однако совершенствования, как правило, усложняют существующий процесс, а их

наслоения делают процесс малопонятным. Кроме того, усовершенствования требуют затрат времени и денег на существующий неэффективный процесс, усложняют управление и прививают культуру "инкрементизма".

Не может привести к значительному успеху и простая автоматизация, так как она не меняет сути процесса. Более того, она увековечивает плохо организованный процесс путем запоминания его в компьютере, что усложняет проведение коренных преобразований в будущем.

2. Ограниченная постановка задачи.

Реинжиниринг обречен на неудачу до начала работ, если ограничена область его действия или задача поставлена очень узко. Задача реинжиниринга должна быть поставлена в терминах процессов. Нельзя вместо процесса рассматривать только его некоторый фрагмент, выполняемый некоторой организационной единицей. Задача реинжиниринга не укреплять, а разрушать существующие организационные границы.

Например, компания Ford в ходе реинжиниринга процесса "поставки" пришла к решению устранить накладную и отделение оплаты счетов. Это решение не могло бы быть выработано, если бы с самого начала компания Ford ограничилась бы только оптимизацией работы отделения оплаты счетов.

Реинжиниринг начинается с определения целей, которые должны быть достигнуты, а не с определения способов их достижения.

3. Преждевременное завершение реинжиниринга.

Реинжиниринг не сводится к замыслам, необходимо обеспечить их реализацию. Реализация идей реинжиниринга вызывает значительные изменения в таких областях, как проектирование работ, организационные структуры, системы управления и оценок и др. Разнообразие последствий приводит к тому, что даже менеджеры, заинтересованные в радикальном перепроектировании процессов, избегают проводить все требуемые изменения. Когда команда по реинжинирингу перечисляет им все необходимые преобразования, они говорят: "Я просил вас сократить время и стоимость, а не переделывать всю компанию". Но реинжиниринг занимается как раз "переделыванием" компании.

Первые трудности и, что удивительно, первые успехи, тоже зачастую становятся предлогом для возврата к более привычному способу ведения бизнеса.

4. Недооценка роли мотивации.

Афоризм о том, что нельзя приготовить омлет, не разбив яйца, точно отражает суть реинжиниринга. Реинжиниринг не приносит всем только радости. В результате его проведения одним сотрудникам приходится изменять характер своей работы, другие могут потерять работу. То, что некоторые сотрудники будут сопротивляться изменениям, вызванным реинжинирингом - это естественно. Необходимо предвидеть и учесть неизбежное сопротивление преобразованиям и противопоставить ему положительную мотивацию. Нужно убедить исполнителей в том, что реинжиниринг необходим для выживания компании. Менеджеры должны сформировать и провести в жизнь новые системы ценностей и убеждений.

Еще более важна мотивация руководства компании, т.к. реинжиниринг требует прямой и персональной ответственности руководства. Ответственность не может быть делегирована вниз. Реинжиниринг всегда проводится «сверху - вниз". Причина состоит в том, что менеджеры нижнего и среднего уровня не обладают той широтой взглядов, которая необходима для проведения реинжиниринга. Они, как правило, ограничиваются узкими проблемами своего подразделения. Им трудно увидеть процессы в целом, т.к. бизнес-процессы пересекают организационные границы. Кроме того, радикальные преобразования процессов могут привести к уменьшению влияния отдельных менеджеров среднего уровня. Поэтому они могут препятствовать проведению реинжиниринга.

5. Недостаточное внимание.

Если руководство компании не уделяет реинжинирингу основное внимание, то его проведение обречено на неудачу. Реинжиниринг не должен осуществляться на фоне других программ и мероприятий. Компания не должна одновременно осуществлять большое количество проектов по реинжинирингу. Недопустимо, чтобы внимание менеджеров непрерывно переключалось между различными проектами.

Для успеха реинжиниринга необходимо выделить достаточное количество ресурсов (затрат времени и работы наиболее ответственных людей компании). Достижение высоких результатов невозможно без существенных инвестиций в программу реинжиниринга. Причем они должны обеспечить проведение реинжиниринга в достаточно короткие сроки - до 12 месяцев. Этого времени достаточно, чтобы пройти путь от декларации целей до завершения первой действующей версии реконструированных процессов. Затраты большего времени приводят тому, что сотрудники становятся нетерпеливыми, встревоженными и сбитыми с толку.

Лекция 12. Базовые управленческие технологии

Управление проектами и заданиями

В современной литературе и практике проектом принято называть совокупность действий, направленных на достижение поставленной производственной или коммерческой цели и связанных с использованием и расходом ресурсов различного типа. Примером проекта является выполнение контракта на поставку изделия, предполагающего выполнение целого ряда задач. Другим примером проекта может служить решение отдельной сложной задачи, такой как разработка комплекта документации или ввод изделия в эксплуатацию. Технология управления проектами не зависит от содержания проектов, что позволяет рассматривать ее как базовую (инвариантную) технологию.

Термин Project Management (PM) обозначает класс управленческих задач, связанных с планированием, организацией и управлением действиями,

направленными на достижение поставленных целей при заданных ограничениях на использование ресурсов.

Типовыми задачами PM являются:

- разработка планов выполнения проекта, в том числе разработка структурной декомпозиции работ проекта и сетевых графиков;
- расчет и оптимизация календарных планов с учетом ограничений на ресурсы; – разработка графиков потребности проекта в ресурсах;
- отслеживание хода выполнения работ и сравнение текущего состояния с исходным планом;
- формирование управленческих решений, связанных с воздействием на процесс или с корректировкой планов;
- формирование различных отчетных документов.

Действия, приводящие к выполнению проекта и потребность в которых выявляется в ходе его планирования, могут представлять собой типовые бизнес-процессы (закупка комплектующих, разработка документации, производство и т.д.). Такие бизнес-процессы часто выполняются по заранее определенным формальным схемам (моделям) [IDEF/0/3], фактически определяющим технологию их выполнения. В ходе выполнения проекта исполнители (организации или сотрудники), действуя в соответствии с заданной технологий (моделью процесса), получают и выполняют задания, соответствующие структурным элементам бизнес-процесса (операциям).

Автоматизация управления потоком таких заданий есть функция другой базовой технологии управления – технологии "workflow" (поток работ

– буквальный перевод английского "workflow").

Управление ресурсами

Понятия MRP II (Manufacturing Resource Planning) и ERP (Enterprise Resource Planning) в настоящее время являются общепринятыми обозначениями комплекса задач управления финансово-хозяйственной деятельностью предприятия. Автоматизированные системы, построенные на этих принципах, широко применяются не только в производстве, но и для управления проектной деятельностью (конструкторские бюро), коммерцией, эксплуатацией сложной техники (авиакомпании). Это позволяет рассматривать принципы и стандарты MRP/ERP как базовую технологию управления ресурсами при решении различных задач.

В соответствии с [ISO /IEC 2382-24:1995] системы класса MRP должны выполнять функции:

- Управление финансовыми ресурсами (Financial Management)

- Расчет потребностей в материалах (Materials Requirement Planning)
- Управление персоналом (Human Resources) Прогнозирование объема реализации и продаж (Forecasting)
- Ведения портфеля заказов (Customer Orders)
- Оперативно-производственное планирование (Finite Scheduling)
- Управление запасами (Inventory Management) Оперативное управление производством (Production Activity Control)
- Управление складами (Warehouse Management)
- Управление техническим обслуживанием оборудования (Equipment Maintenance)
- Управление закупками (Purchasing)
- Расчет себестоимости продукции и затрат (Cost Accounting)
- Управление продажами (Sales) Управление транспортировкой готовой продукции (Transportation)
- Объемноепланирование(MasterProductionScheduling)
- Управление сервисным обслуживанием (Service)

Для выполнения перечисленных в таблице функций MRP/ERP-системы используют информацию, содержащуюся в ИИС, и помещают в нее результаты своей работы для использования данных на последующих стадиях ЖЦ [2].

Управление качеством

Обеспечение требуемого качества продукции является одной из целей реализации концепции CALS, поэтому управление качеством (в терминах стандартов серии ИСО 9000 система менеджмента качества – СМК) следует отнести к базовым технологиям управления.

Управление качеством в широком смысле необходимо понимать, как управление процессами, направленное на обеспечение качества их результатов. Такой подход соответствует идеям всеобщего управления качеством (Total Quality Management), суть которых как раз и заключается в управлении предприятием через управление качеством.

В контексте концепции CALS методы и технологии управления качеством приобретают новое развитие. Применение ИИС обеспечивает информационную поддержку и интеграцию процессов, а соответственно и возможность использования электронных данных, созданных в ходе различных процессов предприятия, для задач управления качеством.

Интегрированная логистическая поддержка (ИЛП)

Одним из важных потребительских параметров сложного наукоемкого изделия является величина затрат на поддержку его ЖЦ (life cycle cost). Они

складываются из затрат на разработку и производство изделия, а также затрат на ввод изделия в действие, эксплуатацию и поддержание его в работоспособном состоянии. Сокращение затрат на поддержку ЖЦ изделия – одна из целей CALS. Комплекс управленческих технологий, направленных на сокращение этих затрат, объединяется понятием ИЛП (Integrated Logistic Support).

Согласно стандарту DEF STAN 0060 ИЛП включает в себя: анализ логистической поддержки, процедуры планирования процессов технического обслуживания и ремонта, интегрированные процедуры материально-технического обеспечения, меры по обеспечению персонала электронной эксплуатационной и ремонтной документацией (Подробнее в разделе "Концепция ИЛП").

Базовые технологии управления данными и информационные модели

Информацию, циркулирующую в системе информационной поддержки ЖЦ машиностроительного изделия, можно условно разделить на три класса:

- данные о продукции (изделии);
- данные о выполняемых процессах;
- данные о ресурсах, требуемых для выполнения процессов.

Под изделием (конечным) понимается комбинация материалов, предметов, программных и иных компонентов, готовых к использованию по назначению. Компоненты конечного изделия в свою очередь являются изделиями. Данные об изделии составляют основной объем информации в ИИС. На разных стадиях ЖЦ требуются различные подмножества из всей совокупности данных об изделии, отличающиеся составом и объемом информации. В целом информация об изделии включает в себя:

- данные о составе и структуре изделия, используемых материалах и комплектующих изделиях, с указанием возможных альтернатив и их взаимозаменяемости;
- данные, определяющие состав возможных конфигураций изделия в зависимости от внешних требований и условий, а также данные об отличиях конкретных экземпляров изделий (партий изделий);
- данные о технических, физических и других характеристиках изделия;
- классификационные и идентификационные данные об изделии и его компонентах, в том числе его наименование, обозначение, классификационные коды, данные о поставщиках, сведения, касающиеся степени конфиденциальности информации об изделии и его компонентах;
- геометрические данные, представленные в форме объемных геометрических моделей изделия, сборочных единиц и отдельных деталей, электронных (векторных) и сканированных бумажных (растровых) чертежей;

- текстовая документация;
- сведения об имеющихся версиях структуры изделия, документов, моделей и чертежей и их статусе;
- данные о разработчиках;
- указания и требования, касающиеся финишной обработки и качества поверхностей готового изделия;
- данные о качестве изделий;
- данные об эксплуатации изделия [7].

Приведенный перечень не является полным и может быть расширен. Многие из перечисленных типов данных требуют для своего представления сложных специфических информационных моделей, учитывающих семантику данных и правила работы с ними. Например, международные стандарты ИСО 10303 и ИСО 15384, регламентируют технологию представления данных об изделии и его компонентах на стадии проектирования и подготовки производства, стандарты ИЛП [DEF STAN 0060] – представление данных об изделии в контексте обеспечения эффективной эксплуатации, стандарты серии ИСО серии 9000 рассматривают данные о качестве изделий.

Ресурс – это совокупность материальных, финансовых, интеллектуальных или иных ценностей, используемых и расходуемых в ходе деятельности, связанной с разработкой, проектированием, производством или эксплуатацией изделия. Ресурсы, используемые в проекте, могут иметь различную природу, свойства и характеристики. Некоторые классификационные характеристики ресурсов приведены в табл. 3.

Между ресурсами могут существовать отношения: заменяемости, когда один ресурс может заменить другой, и взаимозаменяемости, когда ресурсы могут заменять друг друга. Ресурсы могут быть простыми и составными и, соответственно, образовывать иерархические структуры.

Классификационные характеристики ресурсов

По типу физической природы

- Материальный
- Финансовый
- Информационный
- Трудовой
- Временной
- Энергетический
- Другие

По характеру расхода и возобновления

- Не расходуемый (используемый)
- Расходуемый, но возобновляемый
- Расходуемый безвозвратно

По профилю доступности

- Доступный постоянно
- Доступный в соответствии с расписанием

По способу измерения величины

- Измеряемый в количественных единицах
- Измеряемый в логических единицах (есть/нет)

Структуры данных, описывающих ресурсы различного типа, регламентируются стандартом ИСО 15551 [7].

Процесс (бизнес-процесс) – это совокупность последовательно или/и параллельно выполняемых операций, преобразующая материальный или/и информационный потоки в соответствующие потоки с другими свойствами. Бизнес-процесс протекает в соответствии с управляющими директивами, вырабатываемыми на основе целей деятельности. В ходе процесса потребляются финансовые, энергетические, трудовые и материальные ресурсы и выполняются ограничения со стороны других процессов и внешней среды.

Описание процесса может быть представлено как совокупность составляющих процесс операций, необходимых условий и ресурсов, входных и выходных потоков. Совокупность стандартизованных информационных моделей изделия, процессов и ресурсов образует единую интегрированную модель, обеспечивающую информационную поддержку задач, выполняемых в ходе ЖЦ.

На каждой стадии ЖЦ требуется свой объем данных, определяемый содержанием решаемых. Совокупность этих данных можно трактовать как контекстные информационные модели изделия, процессов и ресурсов, соответствующие стадиям ЖЦ изделия. Например, на стадии проектирования и разработки используются данные об изделии, о процессе проектирования, о требуемых организационных и иных ресурсах. Информационная модель технологической подготовки производства трактуется как описание процесса, использующее данные об изделии и технологических ресурсах. Модель производства также может быть представлена как описание процесса, связанного с данными об изделии и потребных материальных, финансовых и иных ресурсах.

Кроме того, частные информационные модели могут быть сформированы для специфических точек зрения (view), например, "управление качеством" или "обеспечение эффективной эксплуатации".

Каждый класс данных может иметь свой набор "методов" работы, который образует "технологический" слой программного обеспечения – систему (или комплекс систем) управления данными, учитывающую их семантику, особенности организации и обеспечивающую высокоуровневый интерфейс обмена с прикладными системами.

Под ***технологией управления данными*** будем понимать комплекс методов, понятий (объектов), информационных моделей, правил использования, интерфейсов доступа к данным, необходимых и достаточных

для работы с данным классом данных при решении различных задач в ходе ЖЦ изделия.

Модели данных (или их части) могут быть представлены с использованием различных технологий (ИСО 10303-11 Express, ИСО 8879 SGML и т.д.). При этом они должны быть логически взаимоувязанными. При преобразовании данных из одной форму в другую объекты информационных моделей должны интерпретироваться однозначно (mapping). Один из вариантов такой технологии изложен в стандарте ИСО 18876 [5].

Приведение совместно используемых в ходе ЖЦ данных к единой стандартизованной информационной модели существенно упрощает построение интегрированной информационной системы, поскольку позволяет применять коммерческие (COTS) прикладные решения для различных конкретных задач.

Систематизация принципов и технологий построения интегрированных информационных систем поддержки ЖЦ сложной наукоемкой продукции необходима для формирования общей методической и системотехнической базы для решения данного класса задач.

Лекция 13. Автоматизация конструирования в машиностроении

Геометрические модели используются для решения многих задач: визуализации, построения расчетных сеток, генерации управляющих программ ЧПУ и т.д. В первую очередь, они предназначены для хранения информации о форме объектов и их взаимном расположении и предоставления ее для обработки в удобном для компьютерной программы виде. В этом - ключевое отличие электронной геометрической модели от чертежа, который представляет собой условное символьно-графическое изображение, предназначенное для чтения человеком.

Роль геометрического моделирования

Современные предприятия не смогут выжить во всемирной конкуренции, если не будут выпускать новые продукты лучшего качества, более низкой стоимости и за меньшее время. Поэтому они стремятся использовать огромные возможности памяти компьютеров, их высокое быстродействие и возможности удобного графического интерфейса для того, чтобы автоматизировать и связать друг с другом задачи проектирования и производства, которые раньше были весьма утомительными и совершенно не связанными друг с другом. Таким образом сокращается время и стоимость разработки и выпуска продукта. Для этой цели используются технологии автоматизированного проектирования (computer-aided design - CAD), автоматизированного производства (computer-aided manufacturing - CAM) и автоматизированной разработки и конструирования (computer-aided

engineering - CAE). Чтобы понять значение систем CAD/CAM/CAE (по-русски все эти системы вместе называются системами автоматизированного проектирования - САПР), мы должны изучить различные задачи и операции, которые приходится решать и выполнять в процессе разработки и производства продукта. Все эти задачи, взятые вместе, называются *жизненным циклом продукта (product cycle)*. Пример жизненного цикла продукта, приведен на рисунке 1.1.

Прямоугольники, нарисованные сплошными линиями, представляют два главных процесса, составляющих жизненный цикл продукта: процесс разработки и процесс производства. Процесс разработки начинается с запросов производства, которые обслуживаются отделом маркетинга, и заканчивается полным описанием продукта.

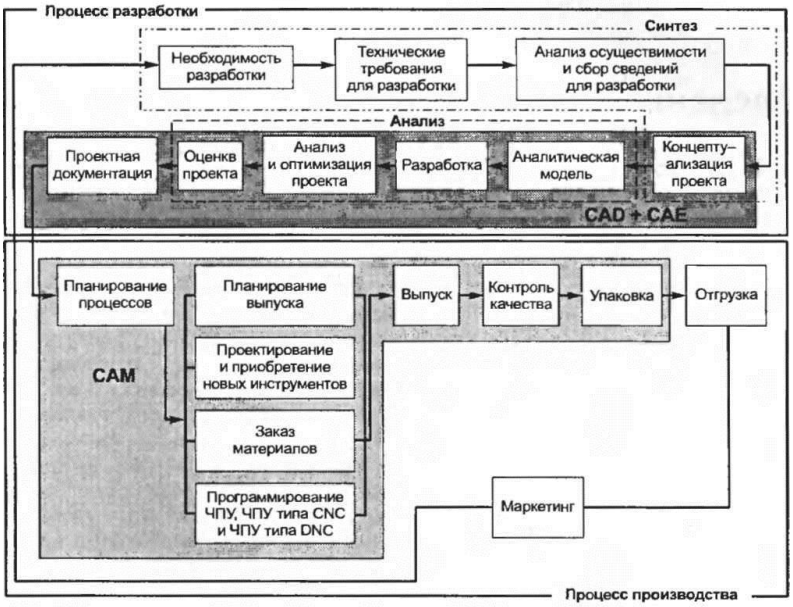


Рисунок 1.1 - Жизненный цикл продукта

Процесс производства начинается с технических требований и заканчивается поставкой готовых изделий заказчику.

Операции, относящиеся к процессу разработки, можно разделить на аналитические и синтетические. Как следует из рисунка 1.1, первичные операции разработки, такие как определение необходимости разработки, формулирование технических требований, анализ осуществимости и сбор важной информации, а также концептуализация разработки, относятся к подпроцессу синтеза. Результатом подпроцесса синтеза является концептуальный проект предполагаемого продукта в форме эскиза или топологического чертежа, отражающего связи различных компонентов продукта. В этой части цикла делаются основные финансовые вложения, необходимые для реализации идеи продукта, а также определяется его функциональность. Большая часть информации, порождаемой и обрабатываемой в рамках подпроцесса синтеза, является качественной, а, следовательно, неудобной для компьютерной обработки.

Готовый концептуальный проект анализируется и оптимизируется - это

уже подпроцесс анализа. Прежде всего, вырабатывается аналитическая модель, поскольку анализируется именно модель, а не сам проект. Несмотря на быстрый рост количества и качества компьютеров, используемых в конструировании, в обозримом будущем отказаться от использования абстракции аналитической модели мы не сможем. Аналитическая модель получается, если из проекта удалить маловажные детали, редуцировать размерности и учесть имеющуюся симметрию. Редукция размерностей, например, подразумевает замену тонкого листа из какого-либо материала на эквивалентную плоскость с атрибутом толщины или длинного и тонкого участка на линию с определенными параметрами, характеризующими поперечное сечение. Симметричность геометрии тела и нагрузки, приложенной к нему, позволяет рассматривать в модели лишь часть этого тела.

После завершения проектирования и выбора оптимальных параметров начинается этап оценки проекта. Для этой цели могут изготавливаться прототипы. В конструировании прототипов все большую популярность приобретает новая технология, названная *быстрым прототипированием (rapid prototyping).* Эта технология позволяет конструировать прототип снизу-вверх, то есть непосредственно из проекта, поскольку фактически требует только лишь данных о поперечном сечении конструкции. Если оценка проекта на основании прототипа показывает, что проект не удовлетворяет требованиям, описанный выше процесс разработки повторяется снова.

Если же результат оценки проекта оказывается удовлетворительным, начинается подготовка проектной документации. К ней относятся чертежи, отчеты и списки материалов. Чертежи обычно копируются, а копии передаются на производство.

Как видно (см. рисунок 1.1), процесс производства начинается с планирования, которое выполняется на основании полученных на этапе проектирования чертежей, а заканчивается готовым продуктом. Технологическая подготовка производства - это этап, устанавливающий список технологических процессов по изготовлению продукта и задающий их параметры. Одновременно выбирается оборудование, на котором будут производиться технологические операции, такие как получение детали нужной формы из заготовки. В результате подготовки производства составляются план выпуска, списки материалов и управляющие программы (УП) для оборудования с ЧПУ. На этом же этапе обрабатываются прочие специфические требования, в частности рассматриваются конструкции средств технологического оснащения (зажимов, креплений и пр.). Подготовка занимает в процессе производства примерно такое же место, как подпроцесс синтеза в процессе проектирования, требуя значительного человеческого опыта и принятия качественных решений. Такая характеристика подразумевает сложность компьютеризации данного этапа. После завершения технологической подготовки начинается выпуск готового продукта и его проверка на соответствие требованиям. Детали, успешно проходящие контроль качества, собираются вместе, проходят тестирование

функциональности, упаковываются, маркируются и отгружаются заказчикам.

Описанный выше жизненный цикл продукта является типовым. Посмотрим теперь, каким образом на этапах этого цикла могут быть применены технологии CAD, CAM и CAE. Как уже говорилось, компьютеры не могут широко использоваться в подпроцессе синтеза, поскольку они не обладают способностью хорошо обрабатывать качественную информацию. Однако даже на этом этапе разработчик может, например, при помощи коммерческих баз данных успешно собирать важную для анализа осуществимости информацию, а также пользоваться данными из каталогов.

Полезными могут оказаться средства параметрического и геометрического моделирования, а также макропрограммы в *системах автоматизированной разработки чертежей (computer-aided drafting).* Все это типичные примеры систем CAD.

Система геометрического моделирования *(geometric modeling system)* - это трехмерный эквивалент системы автоматизированной разработки чертежей, то есть программный пакет, работающий с трехмерными, а не с плоскими объектами.

В аналитической фазе проектирования ценность компьютеров проявляется по- настоящему. Программных пакетов для анализа напряжений, контроля столкновений и кинематического анализа существует столько, что приводить какие-либо названия смысла не имеет. Эти программные пакеты относятся к средствам автоматизированного конструирования (CAE). Главная проблема, связанная с их использованием, заключается в необходимости формирования аналитической модели. Проблемы не существовало бы вовсе, если бы аналитическая модель автоматически выводилась из концептуального проекта. Однако, как уже отмечалось, аналитическая модель не идентична концептуальному проекту - она выводится из него путем исключения несущественных деталей и редукции размерностей. Необходимый уровень абстракции зависит от типа анализа и желаемой точности решения. Следовательно, автоматизировать процесс абстрагирования достаточно сложно, поэтому аналитическую модель часто создают отдельно. Обычно абстрактная модель проекта создается в системе разработки рабочих чертежей или в системе геометрического моделирования, а иногда с помощью встроенных средств аналитического пакета. Аналитические пакеты обычно требуют, чтобы исследуемая структура была представлена в виде объединения связанных сеток, разделяющих объект на отдельные участки, удобные для компьютерной обработки. Если аналитический пакет может генерировать сетку автоматически, человеку остается задать только границы абстрактного объекта. В противном случае сетка также создается пользователем либо в интерактивном режиме, либо автоматически, но в другой программе. Процесс создания сетки называется *моделированием методом конечных элементов (finite-element modeling).* Моделирование этим методом включает в себя также задание граничных условий и внешних нагрузок.

Подпроцесс анализа может выполняться в цикле оптимизации проекта по каким-либо параметрам. Разработано множество алгоритмов поиска

оптимальных решений, а на их основе построены коммерчески доступные программы. Процедура оптимизации может считаться компонентом системы автоматизированного проектирования, но более естественно рассматривать эту процедуру отдельно.

Фаза оценки проекта также выигрывает от использования компьютера. Если для оценки проекта нужен прототип, мы можем быстро сконструировать его по заданному проекту при помощи программных пакетов, генерирующих код для машины быстрого прототипирования. Такие пакеты считаются программами для автоматизированной подготовки производства (CAM). Разумеется, форма прототипа должна быть определена заранее в наборе входных данных. Данные, определяющие форму, получаются в результате геометрического моделирования.

Быстрое прототипирование — удобный способ конструирования прототипа, однако еще удобнее пользоваться виртуальным прототипом, который часто называется «цифровой копией» (digital mock-up) и позволяет получить столь же полезные сведения.

Когда аналитические средства для работы с цифровыми копиями станут достаточно мощными, чтобы давать столь же точные результаты, что и эквивалентные эксперименты на реальных прототипах, цифровые копии начнут вытеснение обычных прототипов. Эта тенденция будет усиливаться по мере совершенствования технологий виртуальной реальности, позволяющих нам ощущать цифровую копию так же, как реальный прототип. Построение цифровой копии называется *виртуальным прототипированием.* Виртуальный прототип может быть создан и в специализированной программе геометрического моделирования. Виртуальная реальность — это технология создания изображений, выглядящих как настоящие объекты. Эта технология позволяет пользователю ощущать цифровые объекты и манипулировать ими так же, как настоящими.

Последняя фаза процесса разработки - подготовка проектной документации. На этом этапе чрезвычайно полезным оказывается использование систем подготовки рабочих чертежей. Способность подобных систем работать с файлами позволяет систематизировать хранение и обеспечить удобство поиска документов.

Компьютерные технологии используются и на стадии производства. Процесс производства включает в себя планирование выпуска, проектирование и приобретение новых инструментов, заказ материалов, программирование станков с ЧПУ, контроль качества и упаковку. Компьютерные системы, используемые в этих операциях, могут быть классифицированы как системы автоматизированного производства. Например, программа автоматизированной технологической подготовки (computer-aided process planning - CAPP) используется на этапе подготовки производства и относится к системам автоматизированного производства (CAM). Как отмечалось выше, подготовка производства с трудом поддается автоматизации, поэтому полностью автоматических систем технологической подготовки в настоящий момент не существует. Однако существует

множество хороших программных пакетов, генерирующих код для станков с числовым программным управлением. Станки этого класса позволяют получить деталь нужной формы по данным, хранящимся в компьютере. Они аналогичны машинам для быстрого прототипирования.

К системам автоматизированного производства относят также программные пакеты, управляющие движением роботов при сборке компонентов и перемещении их между операциями, а также пакеты, позволяющие программировать координатно-измерительную машину (coordinate measuring machine - CMM), используемую для проверки геометрии продукта.

Согласно выше сказанному, *автоматизированное проектирование (computer-aided design - CAD)* представляет собой технологию, состоящую в использовании компьютерных систем для облегчения создания, изменения, анализа и оптимизации проектов. Таким образом, любая программа, работающая ***с компьютерной графикой***, так же, как и любое приложение, используемое в инженерных расчетах, относится к системам автоматизированного проектирования. Другими словами, множество средств CAD простирается от геометрических программ для работы с формами до специализированных приложений для анализа и оптимизации. Между этими крайностями умещаются программы для анализа допусков, расчета масс-инерционных свойств, моделирования методом конечных элементов и визуализации результатов анализа.

Самая основная функция CAD - определение ***геометрии*** конструкции, поскольку геометрия определяет все последующие этапы жизненного цикла продукта. Для этой цели обычно используются ***системы геометрического моделирования*** и разработки рабочих чертежей. Вот почему эти системы обычно и считаются системами автоматизированного проектирования. Более того, геометрия, определенная в этих системах, может использоваться в качестве основы для дальнейших операций в системах CAE и CAM. Это одно из ***наиболее значительных*** преимуществ CAD, позволяющее экономить время и сокращать количество ошибок, связанных с необходимостью определять геометрию конструкции с нуля каждый раз, когда она требуется в расчетах. Можно, следовательно, утверждать, что ***системы геометрического моделирования*** и системы автоматизированной разработки рабочих чертежей являются ***наиболее важными*** компонентами автоматизированного проектирования.

Таким образом, одним из наиболее важных этапов проектирования машиностроительных изделий является этап конструирования. Значимость его не только в том, что на этом этапе формируется концептуальный облик будущего изделия, но и в том, что именно на этапе конструирования создаются математически точные геометрические модели, как отдельных деталей, так и всего изделия, которые будут играть определяющую роль на всех последующих этапах жизненного цикла изделия.

Классификация программного обеспечения автоматизированного конструирования

В настоящее время все существующее программное обеспечение автоматизированного конструирования принято классифицировать по функциональной полноте. По этому признаку оно условно делится на три уровня.

1. К нижнему уровню относят программы, реализующие 2D модели в виде чертежей и эскизов, например, пакеты российских разработчиков БАЗИС-Конструктор 4.5 (Базис), Графика-81 (Институт проблем управления), SprutCAD (СПРУТ-Технологии), чертежно-графический редактор АРМ Graph (НИЦ АПМ), CADMECH и CADMECH LT на базе AutoCAD и AutoCAD LT2000 (Интермех), T-Flex CAD LT (Топ Системы), КОМПАС-ГРАФИК (Аскон), АДЕМ (Omega Technologies) и др.
2. На среднем уровне располагаются программные комплексы, которые позволяют создавать трехмерную геометрическую модель сравнительно несложного изделия в основном методом твердотельного моделирования. К числу этих программных комплексов можно отнести: AutoCAD 2000 и AMD (AutoDesk), Solid Works (Solid Works), Solid Edge (Unigraphics Solu- tions), PowerSHAPE (Delcam plc), Prelude Design (Matra Datavision), Mi- croStation (Bentley Systems), ГеММа-3D (ГеММа), T-Flex CAD 3D (Топ Системы), bCAD (ПроПро Группа), CREDO (НИЦ АСК), OceanCAD и др.
3. Наиболее мощные программные системы сквозного проектирования и производства расположены на верхнем уровне. Среди них можно выделить: CATIA5 (Dassault Systemes, Франция), EUCLID3 (EADS Matra Data-vision, Франция), UNIGRAPHICS (Unigraphics Solutions, США), Pro/ENGINEER и CADDS5 (PTC, США).

С точки зрения CALS-технологий программное обеспечение автоматизированного конструирования должно удовлетворять не только требованию функциональной полноты. При выборе и установке той или иной конфигурации программного обеспечения важно учитывать специфику моделей и задач, решаемых на каждом рабочем месте. В этом случае вместо одного пакета с множеством универсальных функций должны устанавливаться строго специализированные пакеты программ, разработанные в соответствии с этими задачами.

В основе автоматизированного конструирования машиностроительных изделий лежит объемное моделирование. В этом случае на помощь конструктору при моделировании приходит как его собственный опыт, так и результаты работы других специалистов, воплощенные в рисунках, эскизах, чертежах, реально выполненных образцах изделий в материале, данные сканирования этих образцов и компьютерные геометрические модели ранее разработанных изделий.

Для создания объемной модели изделия конструктор может воспользоваться методом трехмерного твердотельного моделирования,

методом поверхностного моделирования или сочетанием этих методов в адаптивных формах.

Рассмотрим более подробно основные методы формообразования машиностроительных изделий и наиболее важные аспекты компьютерного моделирования, которые должны составлять основу подготовки инженера.

Объёмное моделирование твёрдого тела. Способы моделирования.

Инженеры и конструкторы имеют дело с математической (прежде всего - геометрической) моделью разрабатываемого изделия. Исторически первым и главным языком их общения (то есть языком описания инженерных моделей) был язык чертежей. Чертеж (и другие подобные графические схемы) широко использовался (и используется до сих пор) не только для описания механического изделия и его частей, но также и для описания электрических схем, архитектурных конструкций, карт местности и т. п. Четкие стандарты (как национальные, так и международные) гарантируют однозначное понимание языка чертежей всеми «читателями» - от инженера - конструктора до токаря, слесаря и фрезеровщика. Однако создание чертежей вручную - чрезвычайно дорогостоящая процедура, доступная только подготовленным специалистам и требующая использования специальной чертежной доски с линейкой - кульмана, а также разных вспомогательных средств (например, лекал для рисования кривых).

Неудивительно, что первые системы автоматизации в этой области были предназначены именно для упрощения и ускорения создания чертежей (подобно другой эпохальной концепции автоматизации с помощью компьютера - текстовым процессорам, предназначенным для упрощения создания текстовых документов и легкого внесения изменений в них). Системы класса computer aided drafting существуют и поныне, самый известных их представитель – AutoCAD. Типичная функциональность таких систем включает в себя средства, необходимые для создания и редактирования чертежей, а процесс работы концептуально не отличается от работы в графическом редакторе (основными понятиями графических моделей таких систем являются графические примитивы с атрибутами, отображаемые уровни, а также различные способы конструирования). В нашем курсе мы не будем рассматривать системы этого класса, так как в настоящее время они стремительно уступают свои позиции системам трехмерного моделирования (даже Autodesk делает основную ставку не на AutoCAD, а на Inventor Series). Дело в том, что с изобретением трехмерной компьютерной графики (возможности реалистического изображения трехмерной сцены на двумерном дисплее компьютера и ее вращения с помощью манипулятора «мышь» в воображаемом трехмерном пространстве) у инженеров появилась возможность работать напрямую с трехмерной геометрической моделью проектируемого изделия, а не с его двумерными чертежами.

Модель - такое представление данных, которое наиболее адекватно отражает свойства реального объекта, существенные для процесса

проектирования.

Геометрические модели описывают объекты, обладающие геометрическими свойствами.

Геометрическое моделирование - моделирование объектов различной природы с помощью геометрических типов данных.

Геометрическое моделирование оказалось настоящим прорывом в конструировании и производстве изделий. Оно не только значительно упрощает процесс проектирования (теперь инженер-конструктор не обязан обладать развитым пространственным мышлением или использовать подручные материалы типа пластилина - он видит проектируемое изделие непосредственно на экране), но снимает многие коммуникативные проблемы.

Геометрические модели в САПР используются для решения многих задач. В первую очередь они предназначены для хранения информации о форме объектов и их взаимном расположении и предоставления ее для обработки в удобном для компьютерной программы виде. В этом ключевое отличие электронной геометрической модели от чертежа, который представляет собой условное символьно-графическое изображение, предназначенное для чтения человеком.

Представьте себе ребенка, который лепит что-то из пластилина. Малыш мнет пластилин, а иногда добавляет или отрывает кусочки, и постепенно приближается к конечному результату. Такую деятельность вполне можно назвать процессом проектирования, поскольку налицо детализация формы по мере развития идеи. Ребенок погружается в проектирование, не имея ни малейшего представления о технических чертежах, не умея пользоваться даже ручкой и бумагой. Если ребенок захочет передать результат другим, например, для прототипирования и массового производства, ему достаточно отдать реальный результат своих трудов, из которого можно будет извлечь всю необходимую информацию.

Системы геометрического моделирования были созданы для того, чтобы преодолеть проблемы, связанные с использованием физических моделей в процессе проектирования. Эти системы создают среду, подобную той, в которой создаются и изменяются физические модели. Другими словами, в системе геометрического моделирования разработчик изменяет форму модели, добавляет и удаляет ее части, детализируя форму визуальной модели таким же образом, как ребенок формирует фигурку из пластилина. Визуальная модель может выглядеть точно так же, как физическая, но она нематериальна. Однако трехмерная визуальная модель хранится в компьютере вместе со своим математическим описанием, благодаря чему устраняется главный недостаток физической модели - необходимость выполнения измерений для последующего прототипирования или серийного производства.

За последние пятьдесят лет было разработано множество способов геометрического моделирования, которые мы разберем детально ниже.

Типы (способы) объёмного моделирования

Хронологически различают следующие подходы к геометрическому моделированию:

-каркасное моделирование;

-поверхностное моделирование;

-твердотельное моделирование;

- гибридное моделирование.

Каркасное моделирование - это исторически первая технология представления объемной геометрии. Она естественным образом развилась из систем 2D-черчения. Это самый простой способ представления трехмерных моделей - так называемые проволочные каркасы, или просто каркасы, которые дают неоспоримые преимущества по сравнению с моделированием на плоскости. Они помогают более ясно представлять модель и надежно контролировать взаимное расположение составляющих ее элементов. Кроме того, каркасы можно использовать и для создания проекционных видов. Достаточно простые структуры данных и алгоритмы работы с каркасами позволили реализовать их на маломощном оборудовании конца 70-х годов XX века.

В *системах каркасного моделирования (wireframe modeling systems)* форма представляется в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек. Линии и точки используются для представления трехмерных объектов на экране, а изменение формы осуществляется путем изменения положения и размеров отрезков и точек. Другими словами, визуальная модель представляет собой каркасный чертеж формы, а соответствующее математическое описание представляет собой набор уравнений кривых, координат точек и сведений о связности кривых и точек. Сведения о связности описывают принадлежность точек к конкретным кривым, а также пересечение кривых друг с другом. Системы каркасного моделирования были популярны в ту пору, когда геометрическое моделирование только начало зарождаться. Их популярность объяснялась тем, что в системах каркасного моделирования создание форм выполнялось через последовательность простых действий, так что пользователям было достаточно легко создавать формы самостоятельно.

Недостаток каркасного представления моделей состоит в том, что программы не могут отобразить всех особенностей поверхностей, определяемых каркасами, и это делает невозможным построение, например, точных сечений. Визуальное представление достаточно аскетичное и в ряде случаев не дает возможности однозначно интерпретировать увиденное (рисунок 2.1).

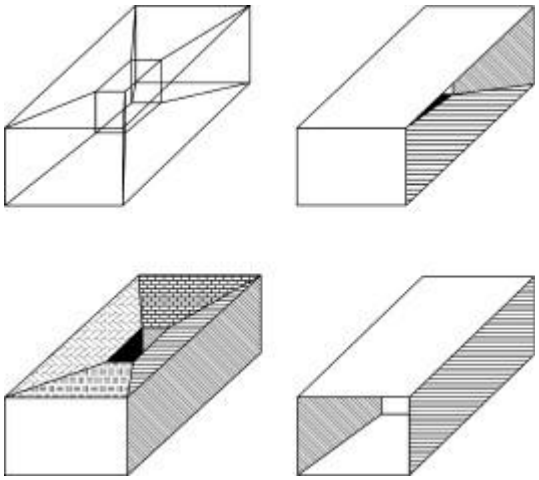


Рисунок 2.1 - Неоднозначные каркасные модели

Тем не менее даже такая, имеющая множество ограничений технология позволила существенно расширить функциональные возможности САПР по сравнению с 2D -системами. Более того, соответствующее математическое описание не содержит сведений о внутренних и внешних поверхностях моделируемого объекта. Без этих сведений невозможно рассчитать массу объекта, определить траектории перемещения инструмента при обработке объекта или создать сетку для конечно-элементного анализа, несмотря на то что объект кажется трехмерным. Поскольку эти операции являются неотъемлемой частью процесса проектирования, системы каркасного моделирования были постепенно вытеснены системами поверхностного и твердотельного моделирования.

В настоящее время построение каркасов также используется в геометрическом моделировании САПР, но лишь как вспомогательная система промежуточных построений (рисунок 2.2).

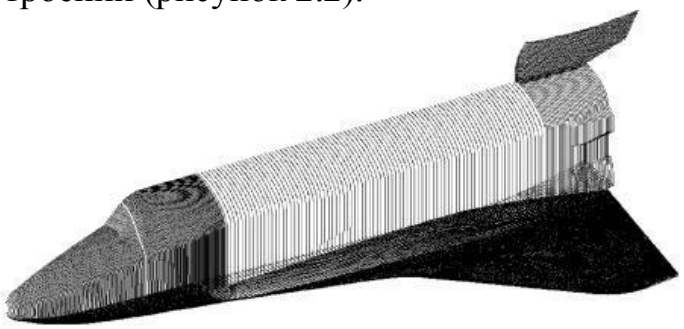


Рисунок 2.2 - Каркасная модель теоретических обводов космического корабля Буран

Поверхностное моделирование

В отличие от каркасного представления, моделирование при помощи поверхностей имеет существенно меньше ограничений, так как позволяет определить своеобразную «оболочку» трехмерного объекта (рисунок 2.3).

Рисунок 2.3 - Поверхностная модель теоретических обводов космического корабля Буран

Геометрические модели на основе поверхностного представления обеспечивают качественную визуализацию, более простой переход к построению расчетных сеток для численного моделирования, обеспечивают ряд полезных функций, таких как построение пространственных сопряжений, сечений, определения линии пересечения оболочек, генерацию чертежных проекций.

Поверхностные модели различаются по способу аппроксимации поверхности. Более простой в части структуры данных и используемых для работы с ними алгоритмов является *полигональная* аппроксимация, когда поверхность представляется набором взаимосвязанных плоских граней, на практике чаще всего треугольных. Такая аппроксимация легко строится, для нее разработаны эффективные алгоритмы реалистичной визуализации, она не требует значительных вычислительных ресурсов, хотя может быть и затратной по памяти.

Главным ограничением подобной аппроксимации является то, что она имеет фиксированную точность, то есть отклонение положения модельной поверхности от «идеальной» моделируемой. Для достижения высокой точности требуется создание сеток с малым шагом, что ведет к росту требований к вычислительным возможностям системы. Поэтому использование полигональной аппроксимации в САПР на текущий момент ограничено подсистемами визуализации и простейшего 3D-эскизирования.

Этих недостатков лишена технология NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, неоднородный B-сплайн), сегодня наиболее часто используемая в практике САПР.

Такое описание поверхности обеспечивает определение координат любой ее точки, радиуса кривизны в ней, направления нормали к поверхности с высокой, в общем случае (без учета вычислительных затрат) с любой наперед

заданной точностью.

Определенным недостатком такого подхода является сложность алгоритмов работы с NURBS, однако это обстоятельство исторически преодолено исследователями и разработчиками.

В определенной степени NURBS-представление является развитием полигонального, но в отличие от него позволяет описывать не только плоские, но и криволинейные грани и ребра (кромки). Совокупность таких граней с общими ребрами по традиции называют сеткой.

Технология NURBS обеспечивает реализацию ряда функциональных возможностей, недоступных или существенно ограниченных при использовании каркасного либо полигонального представления: вычисление радиуса кривизны поверхностей, их гладкое сопряжение, построение траекторий на поверхности, что важно для подготовки ЧПУ- программ, получение точных изображений, спроецированных на плоскость, например, для получения чертежных видов и т. д. и т. п.

Поверхностное моделирование играет важную роль при проектировании изделий из листового металла (sheet metal parts), таких как капоты и крылья автомобилей, где форма поверхности важна как для дизайна, так и для аэродинамики изделия (рисунок 2.4).

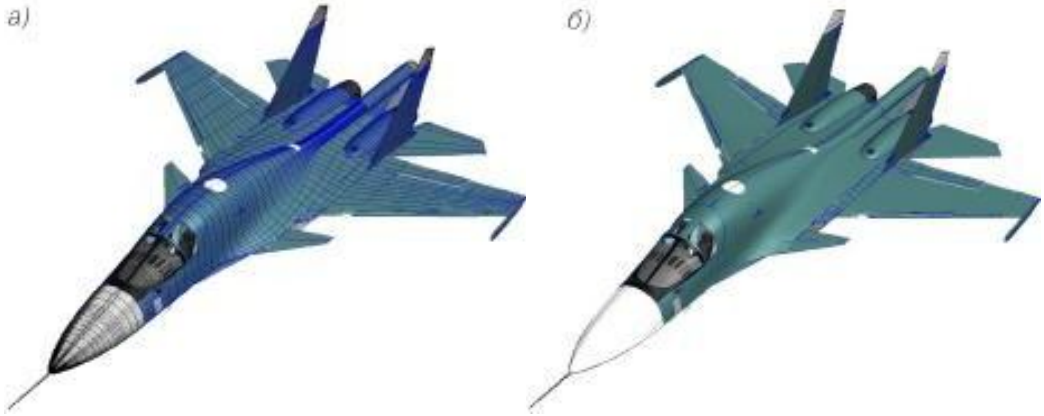


Рисунок 2.4 - Аппроксимация теоретических обводов самолета: а) полигональная и б) NURBS-аппроксимация

Традиционно используются несколько типовых **контекстов создания поверхностей:**

-плоская поверхность - получается заполнением плоского контура (2D-эскиз или набор замкнутых кромок, лежащих в одной плоскости);

-поверхность вытяжки - образуется в результате плоскопараллельного вытягивания замкнутого или разомкнутого 2D/3D-эскиза в направлении, перпендикулярном плоскости эскиза, или под произвольным углом;

-поверхность вращения - получается вращением произвольного профиля (2D -эскиз) относительно оси;

-поверхность по траектории - создается движением 2D/3D эскиза вдоль криволинейной образующей (2D/3D-эскиз, 3D-кривая) и произвольного числа направляющих кривых (2D/3D - эскиз, 3D - кривая), деформирующих исходный контур;

-поверхность по сечениям - аналог поверхности по траектории; отличается тем, что строится не по одному, а по нескольким поперечным сечениям с направляющими кривыми;

-граничная поверхность - аналог поверхности по сечениям; отличается тем, что строится по нескольким произвольно сориентированным в пространстве 3D-кромкам других поверхностей с сохранением касательности к ним и с соблюдением непрерывности по второй производной (гладкая стыковка); при построении могут использоваться направляющие кривые;

-поверхность свободной формы - строится разбиением сетки с управляющими точками на поверхности грани 3D-модели; изменение формы поверхности достигается перетаскиванием контрольных точек;

-эквидистантная поверхность - получается смещением на определенное расстояние от существующих граней или поверхностей;

-поверхность разъема - используется при проектировании литейных форм, а также в качестве вспомогательной геометрии для разделения матрицы и пуансона;

-срединная поверхность - создается на середине (или заданном проценте) толщины тонкостенной детали;

-линейчатая поверхность - строится под углом к выбранной кромке и предназначена для построения граней с уклоном.

В том случае, если установлена программная связь между вспомогательным каркасом и результирующей поверхностью, моделирование становится *ассоциативным*, при этом изменение каркасных элементов ведет к автоматическому изменению геометрии поверхностей, построенных с использованием этого контекста.

В *системах поверхностного моделирования (surface modeling systems)* математическое описание визуальной модели включает в себя не только сведения о характеристических линиях и их конечных точках, как в каркасном моделировании, но и данные о поверхностях. При работе с отображаемой на экране моделью изменяются уравнения поверхностей, уравнения кривых и координаты конечных точек. Если поверхности не окрашены и не затушеваны, визуальная модель в системе поверхностного моделирования может выглядеть точно так же, как в системе каркасного моделирования.

Математическое описание может включать сведения о связности поверхностей, то есть о том, как поверхности соединяются друг с другом и по каким кривым. В некоторых приложениях эти сведения оказываются очень полезными. Например, программа для формирования траектории перемещения фрезы с ЧПУ может воспользоваться этой информацией для проверки, не задевает ли фреза поверхности, примыкающие к обрабатываемой.

Существует ***три стандартных метода*** создания поверхностей в системах поверхностного моделирования.

1. Интерполяция входных точек.
2. Интерполяция криволинейных сеток.
3. Трансляция или вращение заданной кривой.

Способы ввода для каждого метода могут зависеть от конкретной системы поверхностного моделирования. Однако базовый метод ввода для каждой системы легко определить по представлению кривых и плоскостей.

Системы поверхностного моделирования используются для создания моделей со сложными поверхностями, потому что визуальная модель позволяет оценить эстетичность проекта, а математическое описание позволяет построить программу для обработки поверхностей детали на станке с ЧПУ.

Несмотря на достаточно широкие возможности, которые предоставляет поверхностное моделирование, оно имеет ряд существенных ограничений с точки зрения использования в САПР, в частности невозможность вычисления объемов, масс и моментов инерции объектов, ограниченность применения к ним булевых операций (вычитания, объединения, пересечения).

Твердотельное (объемное моделирование-логическое развитие каркасного и поверхностного. Основной объект моделирования - трехмерное объемное тело, которое может описываться разными способами: декомпозиционным, конструктивным или граничным. Мы разберем их подробнее ниже. Главным преимуществом твердотельного моделирования перед каркасным и поверхностным является свойство физической корректности - все твердотельные модели имеют аналоги в реальном мире (чего не скажешь о каркасных и поверхностных моделях).

При использовании твердотельного моделирования, ставшего на сегодня стандартом де- факто в 3D CAD/CAM/CAE-системах, снимаются ограничения поверхностного моделирования.

Системы твердотельного моделирования (solid modeling systems) предназначены для работы с объектами, состоящими из замкнутого объема, или *монолита (solid)*. В системах твердотельного моделирования, в отличие от систем каркасного и поверхностного моделирования, не допускается создание наборов поверхностей или характеристических линий, если они не образуют замкнутого объема. Математическое описание объекта, созданного в системе твердотельного моделирования, содержит сведения, по которым система может определить, где находится какая-либо точка: внутри объема, снаружи него или на его границе. По этим сведениям, можно получить любую информацию об объеме тела, а значит, могут быть написаны приложения, работающие с объектом на уровне объема, а не на уровне поверхности.

Если бы система твердотельного моделирования требовала ввода всех данных для полного математического описания, она была бы слишком сложной для пользователей, и они отказались бы от нее. Процесс детализации формы не был бы похож на интуитивный процесс физического моделирования, и в результате получилось бы совсем не то, на что рассчитывали создатели систем геометрического моделирования. Поэтому разработчики систем твердотельного моделирования стараются предоставить простые и естественные функции, чтобы пользователи могли работать с объемными формами точно так же, как они работают с физическими моделями, не вдаваясь в подробности математического описания. Функции

моделирования, подобные созданию примитивов, булевым операциям, вытягиванию, построению фигуры вращения, повороту и скруглению, требуют от пользователя совсем немного. Обо всех деталях математического описания системы заботятся сами.

Существуют различные алгоритмические методы представления твердотельных моделей:

- декомпозиционные модели;
- конструктивные модели;
- граничные модели

Декомпозиционные модели являются простейшим подходом к твердотельному моделированию, представляя трехмерное тело композицией некоторых простых элементов. Различают следующие декомпозиционные модели:

-воксельное (voxel) представление;

-октантное дерево;

-ячеечное представление.

Воксельное представление - полный трехмерный аналог растрового одноцветного изображения. Тело представляется трехмерным булевым массивом, каждый элемент которого является пространственным кубиком одинакового размера со своими уникальными координатами. Такой кубик называется вокселом (voxel - от VOlume piXEL). Вокселы (рисунок 2.5) равномерно покрывают всю область (тор), в которой содержится моделируемое тело. Отметим удобство воксельного представления для реализации на его основе булевых операций твердотельного моделирования. Для этого необходимо построить согласованные воксельные представления двух тел и применить соответствующую операцию к булевым значениям ячеек массива.

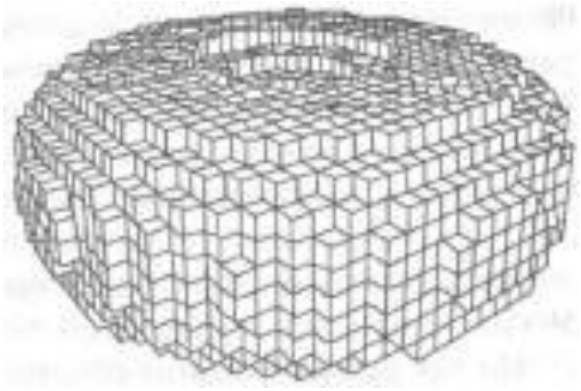


Рисунок 2.5 - Воксельное представление тора

Сложность такого алгоритма будет прямо зависеть от числа вокселов. На воксельном представлении несложно вычислять объемные параметры тела - достаточно лишь вычислить их аналитически для каждого воксела и просуммировать.

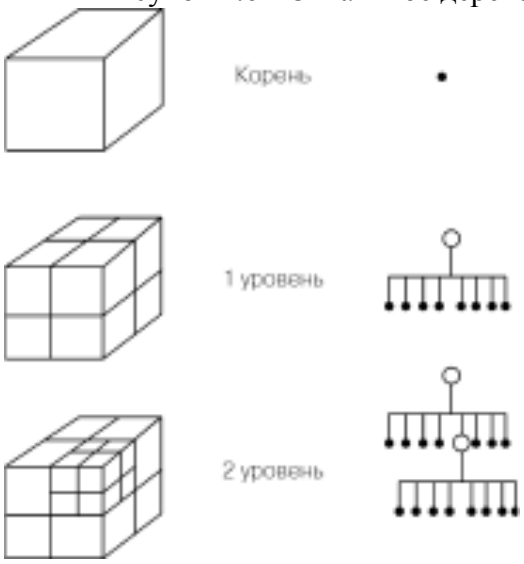
Октантное дерево является развитием воксельного представления. Каждый узел октантного дерева соответствует некоторому кубу в трехмерном пространстве, который является либо:

-полностью (с заданной точностью) принадлежащим описываемому телу;

-полностью непринадлежащим описываемому телу;

-частично пересекающимся с описываемым телом.Первые два типа узлов - терминальные (листья в октантном дереве), а каждый узел третьего типа обязательно имеет 8 дочерних узлов, соответствующих геометрическому разбиению его куба на 8 частей (октантов) (рисунок 2.6).

Рисунок 2.6 - Октантное дерево



Ячеечное представление соответствует разбиению моделируемого тела на произвольные непересекающиеся выпуклые многогранники, полностью (в соответствии с заданной погрешностью) заполняющие его объем.

Конструктивные модели основаны на применении операций твердотельного моделирования. Для создания конструктивной модели, модели CSG (constructive solid geometry) реализуют конструктивный подход в терминах булевых операций над параметрическими твердотельными примитивами (прямоугольный параллелепипед, цилиндр и пр.).

В рамках CSG представления для описания составных твердых тел определены следующие операции (рисунок 2.7) над исходными (а) элементарными телами:

-вычитание (б);

-объединение (в);

-пересечение (г).

Таким образом, любое составное тело может быть описано в виде традиционного уравнения из булевых функций, в котором аргументами являются либо элементарные тела, либо другие составные тела. Это представление называют деревом построений (рисунок 2.8).

Такое представление, кроме удобства модификации геометрии результирующего тела, позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам за счет применения оптимизирующих процедур к дереву построений. Представление твердых тел в виде дерева построений удобно также и с точки зрения организации пользовательского интерфейса,

обеспечивающего наглядный и быстрый доступ к любому элементу, входящему в описание геометрии тела, его модификацию и получение отчетной информации.

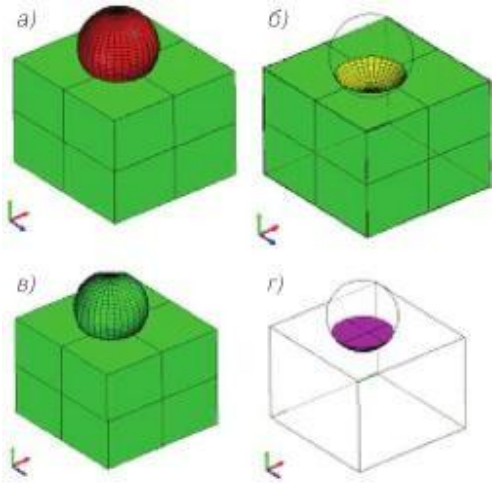


Рисунок 2.7 - Булевы операции над простыми твердыми телами

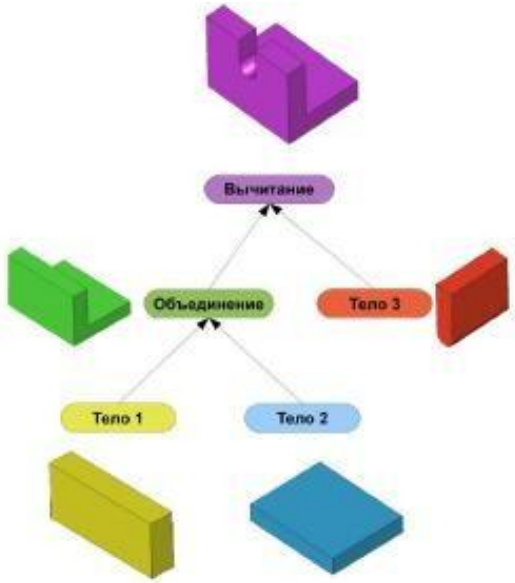


Рисунок 2.8 - Дерево построения составных твердых тел

Граничные модели

Твердое тело (рисунок 2.9) образуется в пространстве одной или несколькими поверхностями, образующими замкнутый объем. Оно включает в себя *грани*, *ребра* (или кромки) и *вершины*. ***Грань*** – часть граничной поверхности, образующей тело, граница которой состоит из криволинейных сегментов, при пересечении которых происходит существенное изменение вектора нормали к поверхности, т.е. нарушается непрерывность изменения кривизны поверхности (рисунок 2.10). Криволинейные сегменты, ограничивающие грань, называются ***ребрами***. Точки, в которых встречаются соседние ребра, называются ***вершинами***.

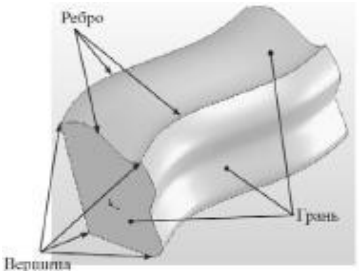


Рисунок 2.9 - Твердое тело

Рисунок 2.10 - Грани, ребра и нормали к поверхности

Граничные модели хранят информацию о границах тела (гранях, ребрах и вершинах). Для простоты манипулирования эта информация подразделяется на геометрические и топологические данные.

Геометрические данные для каждой граничной сущности свои:

- для вершины - ее координаты;
- для ребра - параметрическое уравнение кривой (прямой);
- для грани - параметрическое уравнение поверхности либо тип и набор параметров в случае канонической поверхности (плоскости, сферы, цилиндра, конуса, тора).

Топологические данные - это информация о смежности вершин и ребер, ребер и граней, а также о внутренних и внешних границах грани. Для удобного манипулирования топологической информацией было предложено несколько структур данных, называемых

BRep (Boundary Representation):

- многогранные (фасетные) модели;
- вершинные модели;
- полурёберные модели;
- крыльевые рёберные модели.

Разберем одну из самых популярных структур – полурёберную, основанную на том простом факте, что каждое ребро границы твердого тела принадлежит ровно двум граням (рисунок 2.11).

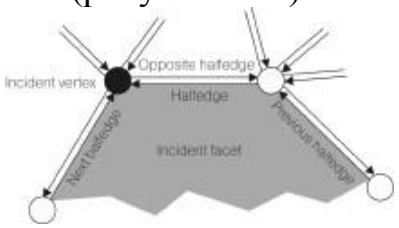


Рисунок 2.11 - Полурёберная модель

Структура данного представления такова:

- список тел (solid), каждое тело состоит из списка его граней (faces), ребер (edges) и вершин (vertices);
- грань состоит из колец (loop), представляющих собой внешнюю границу грани, а также ее опциональные внутренние границы;
- кольцо состоит из списка полурёбер (halfedges);
- полуребро указывает на начальную вершину и следующее полуребро, а также на свое ребро;

- ребро хранит указатели на два своих полуребра.

Одним из достоинств граничной модели является удобный способ расчета ее объемных параметров.

В практике САПР наиболее широкое применение имеет технология, базирующаяся на граничном представлении элементарных односвязных тел (BRep, Boundary Representation) в совокупности с конструктивной геометрией (CSG, Constructive solid geometry), описывающей операции над телами.

Граничное представление определяет сплошное тело неявно путем описания ограничивающей его поверхности. Суть BRep-представления заключается в том, что твердое тело описывает замкнутая пространственная область, ограниченная набором элементарных тонких поверхностей (граней) с общими образующими контурами (ребрами) на границе поверхностей и признаком внешней или внутренней стороны поверхности (рисунок 2.12), а также обеспечивающим следующий ряд операций, определенных над телами:

-проверка правильности задания, для односвязных тел осуществляется по формуле Эйлера, в наиболее общем виде записываемой как:

$$V - E + F = 2,$$

где **V**-количество вершин, **E**- количество ребер, **F** - количество граней;

- вычисление габаритного объема;
- вычисление нормали в точке;
- вычисление кривизны поверхности;
- нахождение точки пересечения с контуром или другой поверхностью;
- определение положения точки относительно поверхности.

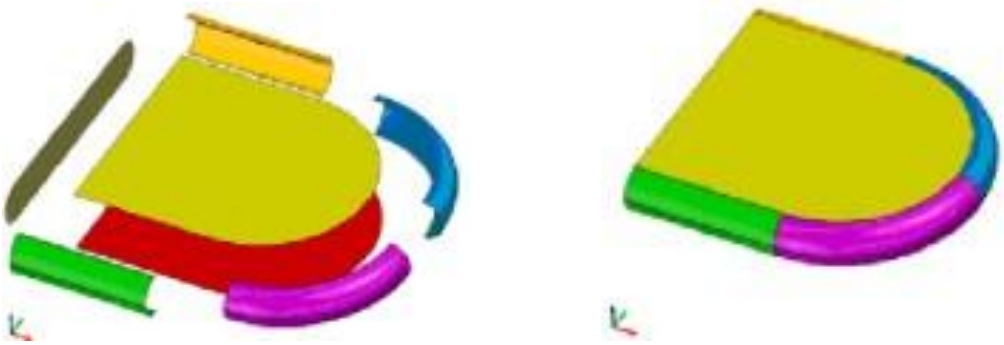


Рисунок 2.12 - BRep-представление простых твердых тел

Для описания сложных тел, моделирующих объекты реального мира, получаемые обработкой материала или неразъемной сборкой, используется иерархическая структура, описывающая тела как последовательность применения булевых операций над набором элементарных твердых тел - так называемое CSG-дерево (Constructive Solid Geometry tree) (рисунок 2.13, см. также рисунок 2.8).

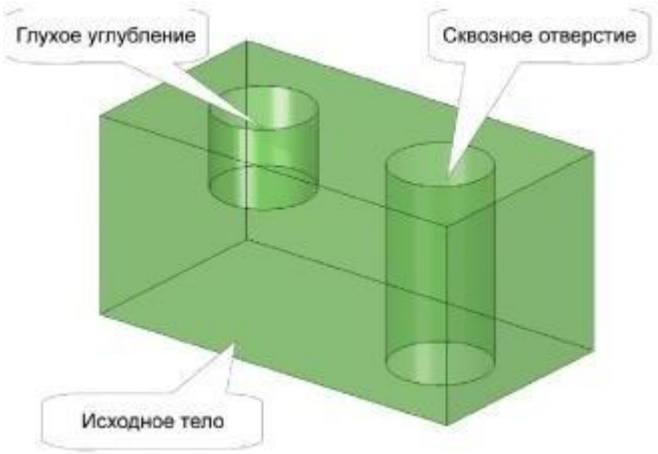


Рисунок 2.13 - BRep-представление сложных твердых тел

Так же как и для элементарного тела, правильность построения определяется формулой Эйлера, записываемой для многосвязных тел в частном виде:

$$V - E + F - H = 2(C - G),$$

где V - количество вершин, E - количество ребер, F - количество граней, H - количество несквозных отверстий, C - количество компонент, G - количество сквозных отверстий.

Гибридное моделирование снимает ограничения, присущие классическому твердотельному моделированию: с его помощью можно описывать геометрические модели, которые локально могут быть не только многообразиями размерности три (объемными телами), но и размерности два (поверхностями), один (кривыми), нуль (точками), а также участками сопряжения многообразий разной размерности.

Лекция 14. Функции твёрдотельного моделирования. Кривые линии

Функции моделирования, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, могут быть разделены на пять основных групп.

В первую группу входят функции, используемые для создания простых форм на основе объемных заготовок, имеющихся в программе, - так называемые *функции создания примитивов (primitive creation functions)*. К этой же группе относятся функции добавления и вычитания объема - *булевы операторы (Boolean operations)*. Функции моделирования из первой группы позволяют проектировщику быстро создать форму, близкую к окончательной форме детали, подобно тому, как ребенок сминает пластилин и создает из него приблизительную физическую модель.

Ко второй группе относятся функции создания объемных тел путем перемещения поверхности. Функция *заметания (sweeping)* позволяет

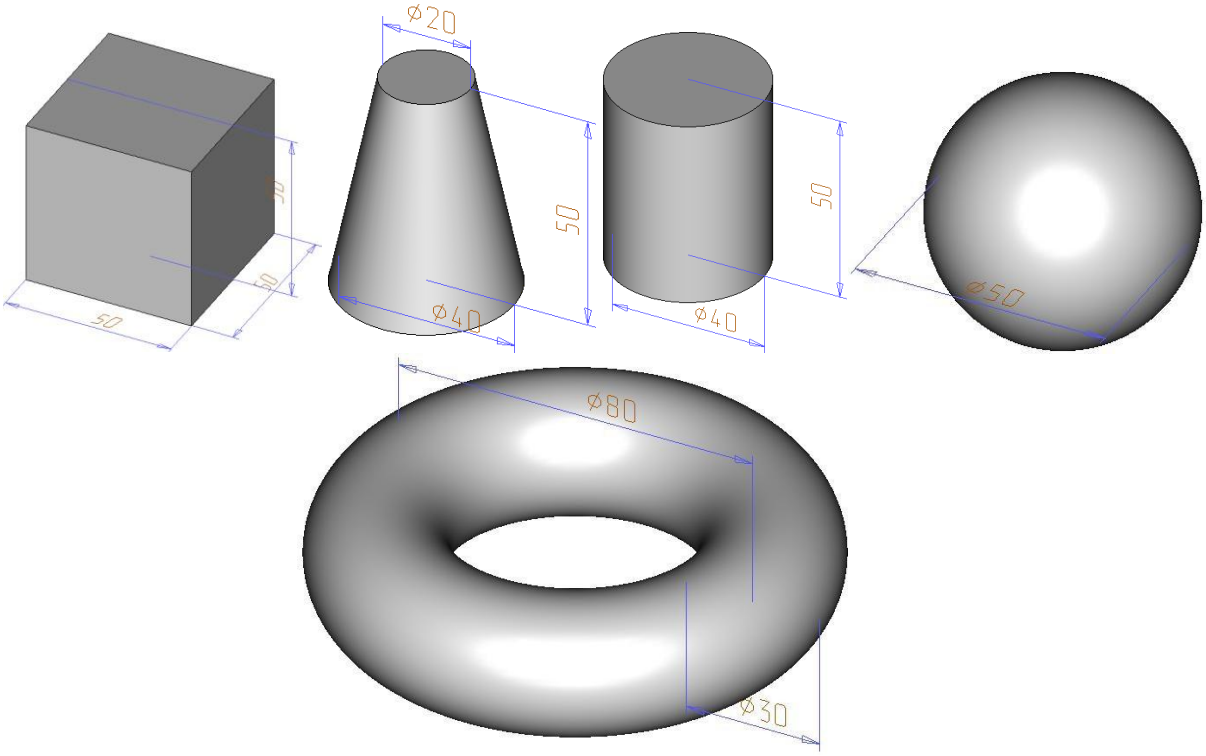
создавать объемное тело трансляцией или вращением области, заданной на плоскости. Построение тела вращения из плоской кривой называется также *качанием* или *вращательным заметанием (swinging)*. Задавая замкнутую плоскую область, пользователь может указывать геометрические ограничения или вводить данные о размерах, а не рисовать форму вручную. Здесь под геометрическими ограничениями понимаются соотношения между элементами рисунка (перпендикулярность отрезков, касание дуги окружности отрезком и т. д.). В этом случае система построит точную форму, удовлетворяющую ограничениям, самостоятельно. Изменение геометрических ограничений или размеров даст другую плоскую область и другое объемное тело. Такой подход называется параметрическим моделированием, поскольку изменение параметров позволяет получить разные объекты. Параметрами могут быть постоянные, входящие в геометрические ограничения, а также размеры. Функция *скиннинга (skinning)* создает объемное тело, натягивая поверхность на заданные поперечные сечения. Функции второй группы позволяют проектировщику начать моделирование с формы, весьма близкой к конечному результату, поскольку одних поперечных сечений вполне достаточно для точного описания конечного объемного тела.

В третью группу входят функции моделирования, предназначенные главным образом для изменения существующей формы. Типичными примерами являются функции с*кругления* или *плавного сопряжения (rounding, blending)* и *поднятия (lifting).*

К четвертой группе относятся функции, позволяющие непосредственно манипулировать составляющими объемных тел, то есть вершинами, ребрами и гранями. Работа с этими функциями (аналогичными функциям систем поверхностного моделирования) называется *моделированием границ (boundary modeling).*

В *пятую группу входят* функции, используя которые проектировщик может моделировать твердое тело при помощи свободных форм. Например, он может давать системе команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте». Работа с такими функциями называется *объектно- ориентированным моделированием (feature-based modeling).* В последнее время функциям пятой группы уделяется особое внимание, поскольку модель, построенная с их помощью, содержит информацию о процессе создания, без которой невозможно автоматическое формирование плана технологического процесса для детали. Заметьте, что модель, созданная другими средствами, содержит только элементарные геометрические сведения о вершинах, ребрах и гранях.

I. Функции создания примитивов позволяют выбирать и создавать простейшие объекты, заранее определенные авторами системы моделирования. Размер примитива задается пользователем. Примитивы, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, показаны на рисунке 3.1. Размеры, указанные на этом рисунке, могут устанавливаться пользователем. Примитивы сохраняются в базе данных процедурой, осуществляющей их создание, а параметры примитивов



передаются этой процедуре в качестве аргументов.

Рисунок 3.1 - Типичные примитивы

Булевы операции. Если бы в списке примитивов можно было найти любое объемное тело, это было бы замечательно. Однако из-за разнообразия возможных применений систем геометрического моделирования сохранить заранее все мыслимые формы невозможно. Гораздо проще приблизиться к решению, предоставив пользователю средства для комбинирования примитивов. В качестве метода комбинирования в твердотельном моделировании применяются булевы операции теории множеств. Другими словами, каждое примитивное объемное тело считается множеством точек, к множествам применяются булевые операции, а в результате получается объемное тело, состоящее из точек, полученных после преобразований.

Большинством систем твердотельного моделирования поддерживаются следующие булевы операции: объединение, пересечение и разность (рисунки 3.2, 3.3 и 3.4 соответственно). До применения булевых операций необходимо определить относительное положение и ориентацию примитивов. Булевы операции могут применяться не только к примитивам, хотя на рисунках в качестве примеров изображены именно примитивы.

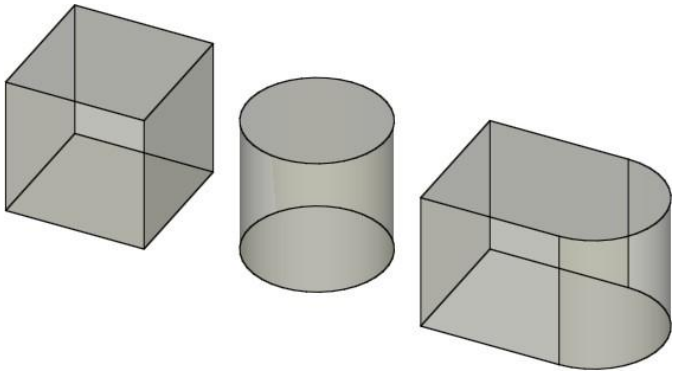


Рисунок 3.2 - Объединение примитивов

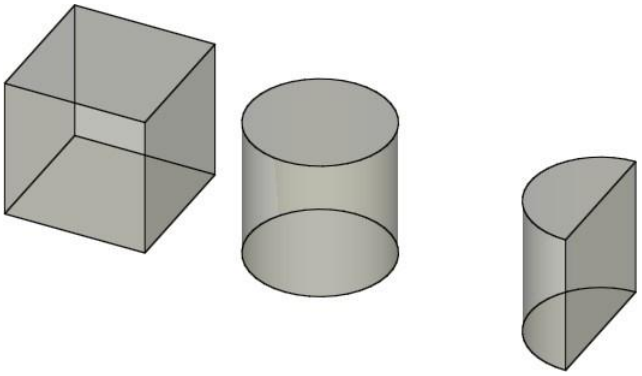


Рисунок 3.3 - Пересечение примитивов

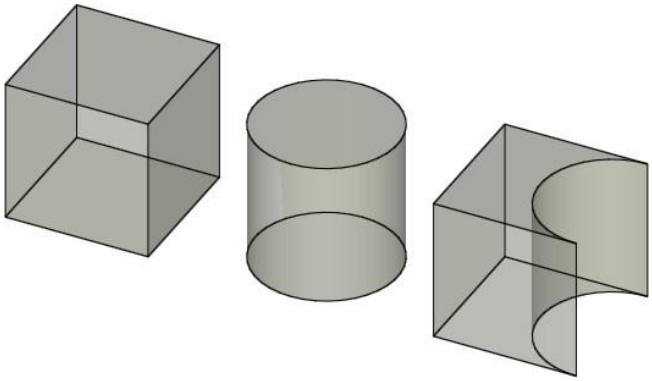
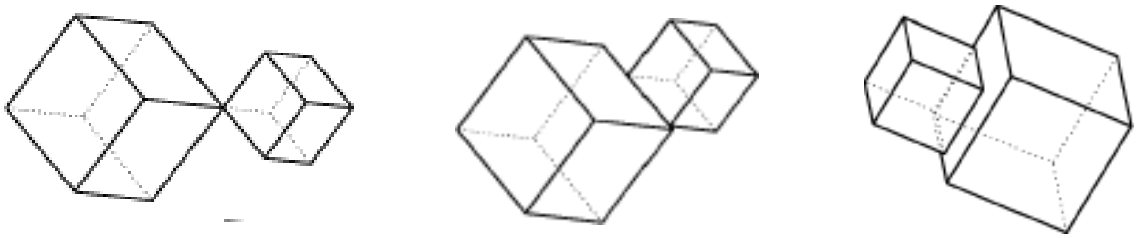


Рисунок 3.4 - Разность примитивов

Еще одна функция моделирования реализуется подобно булевым операциям, это функция разрезания объемного тела плоскостью, после применения которой случается тело из двух частей. Того же результата можно достичь, применив операцию вычитания к объемному телу, которое должно быть разрезано, и кубу, одной из граней которого является секущая плоскость.

По этой причине функция разрезания также может быть отнесена к булевым операциям.

При использовании булевых операций следует быть внимательным, чтобы не получить в результате тело, не являющееся объемным (рисунок 3.5). Некоторые системы выдают предупреждение о возможности получения некорректного результата, другие могут просто завершить работу с сообщением об ошибке. Системы гибридного (немногообразного) моделирования способны обрабатывать и такие специфические ситуации, поскольку они работают не только с объемными телами, но и с поверхностями



и каркасами.

Рисунок 3.5 - Некорректная булева операция

II. Заметание. Функция ***заметания*** *(sweeping)* формирует объемное тело трансляцией или вращением замкнутой плоской фигуры. В первом случае процесс формирования называется ***заметанием при трансляции*** *(translational sweeping),* во втором случае **— *построением фигуры вращения*** *(swinging, rotational sweeping).* Если плоская фигура будет незамкнутой, в результате заметания получится не объемное тело, а поверхность. Такой вариант заметания поддерживается системами поверхностного моделирования.

Заметание при трансляции и вращении представлено на рисунках 3.6 и 3.7 соответственно. Хотя рисунок 3.7 демонстрирует вращение на 360°, большинство систем твердотельного моделирования позволяют поворачивать фигуру на произвольный угол.

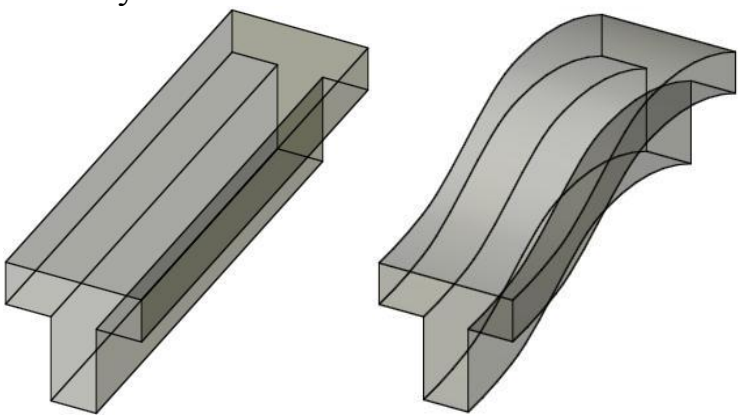


Рисунок 3.6 - Заметание при трансляции

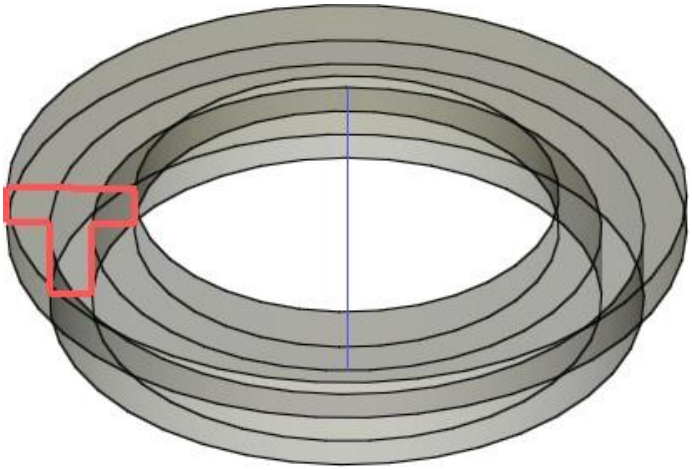


Рисунок 3.7 - Заметание при вращении

Скиннинг. Функция ***скиннинга*** *(skinning)* формирует замкнутый объем, натягивая поверхность на заданные плоские поперечные сечения тела (рисунок 3.8). Можно представить себе, что на каркас фигуры, образованный границами поперечных сечений, натягивается ткань или винил. Если к натянутой поверхности не добавить конечные грани (два крайних сечения), в результате получится поверхность, а не замкнутый объем. В таком варианте функция скиннинга представлена в системах поверхностного моделирования.

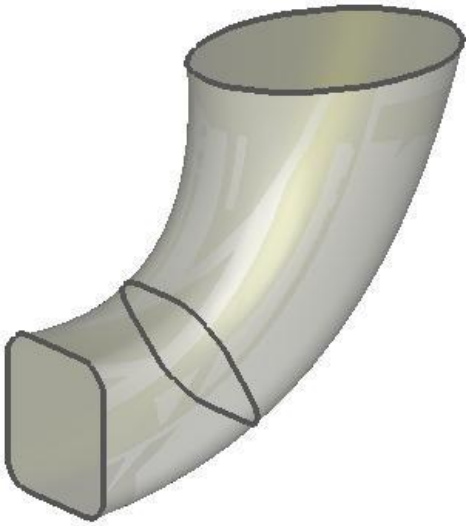
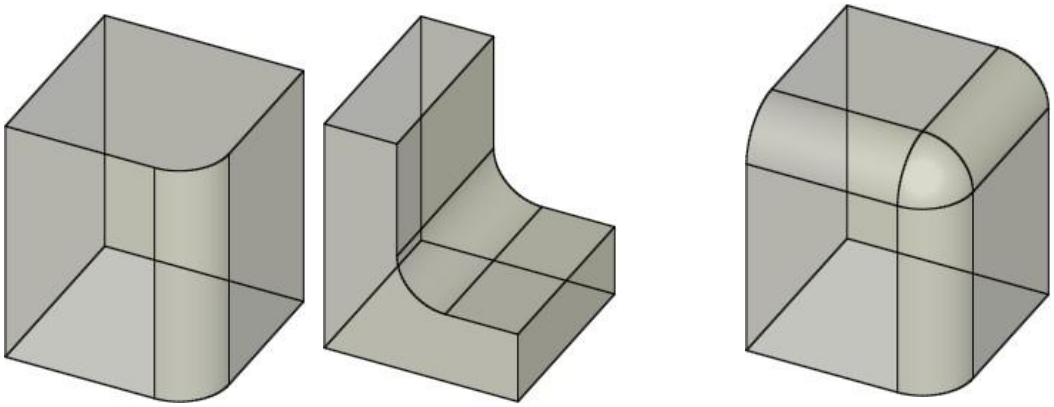


Рисунок 3.8 - Создание объемного тела методом скининга

III. Скругление или плавное сопряжение. Скругление (rounding), или плавное сопряжение (blending), используется для модифицирования существующей модели, состоящего в замене острого ребра или вершины гладкой криволинейной поверхностью, векторы нормали к которой непрерывно продолжают векторы нормали поверхностей, сходившихся у исходного ребра или вершины. Замену острого прямого ребра цилиндрической поверхностью демонстрирует рисунок 3.9а. Векторы нормали к цилиндрической поверхности продолжаются векторами соседних плоских граней. Замена острой вершины сферической поверхностью показана на рисунке 3.10. Здесь также обеспечивается непрерывность векторов нормали. Частный случай скругления с добавлением, а не удалением

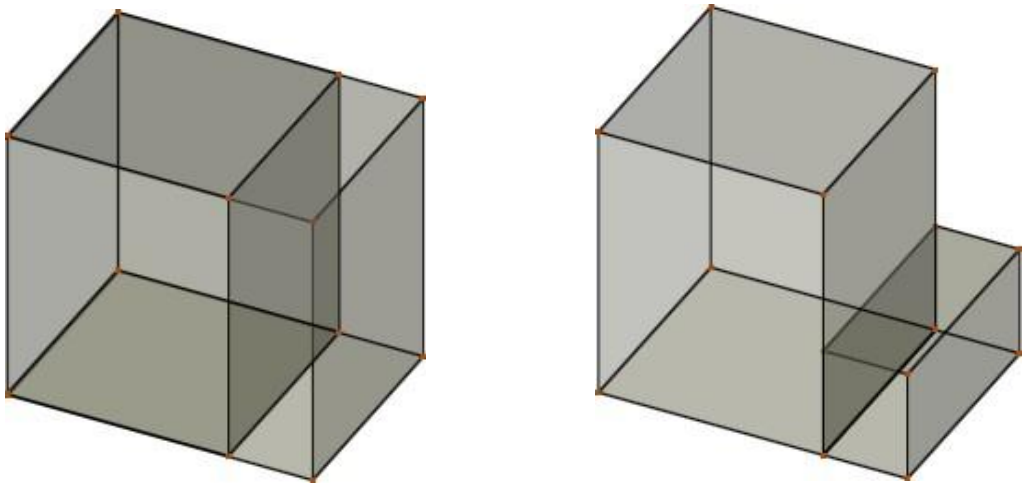


материала показан на рисунке 3.9б. Такая процедура называется выкружкой (filleting).

а б

Рисунок 3.9 - Скругление ребер Рисунок 3.10 - Скругление вершин

Поднятие. Поднятием/Вытягивание *(lifting)* называется перемещение всей грани объемного тела или ее части в заданном направлении с одновременным удлинением тела в этом направлении (рисунок 3.11а*)*. Если нужно поднять только часть грани (рисунок 3.11б), эту грань необходимо

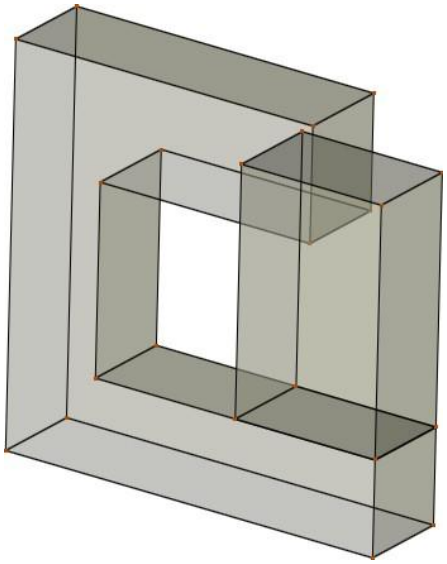


заранее разделить.

а б

Рисунок 3.11 - Поднятие грани и ее части

Для этого достаточно добавить ребро, которое будет разбивать грань на нужные части. Но внутри системы при этом будут произведены некоторые дополнительные действия, результатом которых станет деление грани. Обычно при этом обновляются сведения о связности поверхности. Внутри системы подобные действия выполняются при помощи операторов Эйлера. Чтобы добавленная часть тела не пересекалась с исходной (рисунок 3.12) при работе с функцией поднятия необходимо правильно указывать направление и величину поднятия. Пересечение не вызовет проблем, если функция поднятия реализована так, что при пересечении выполняется объединение добавленной части с исходным телом. Однако изначально функция поднятия разрабатывалась для небольших местных изменений, поэтому ситуация,



показанная на рисунке 3.12, дает некорректное объемное тело.

Рисунок 3.12 - Самопересечение в результате поднятия

IV. Моделирование границ. Функции *моделирования границ* используются для добавления, удаления и изменения элементов объемного тела - его вершин, ребер и граней. Следовательно, процедура, использующая функции моделирования границ, будет выглядеть точно так же, как в системах поверхностного моделирования. Другими словами, вначале создаются точки, затем создаются ребра, соединяющие эти точки, и наконец, граничные ребра определяют поверхность. Однако в системах твердотельного моделирования, в отличие от систем поверхностного моделирования, нужно определить все поверхности таким образом, чтобы образовался замкнутый объем. Создание клина при помощи функций моделирования границ иллюстрирует рисунок 3.13. Процедура включает создание точек, ребер, граней и поверхностей.

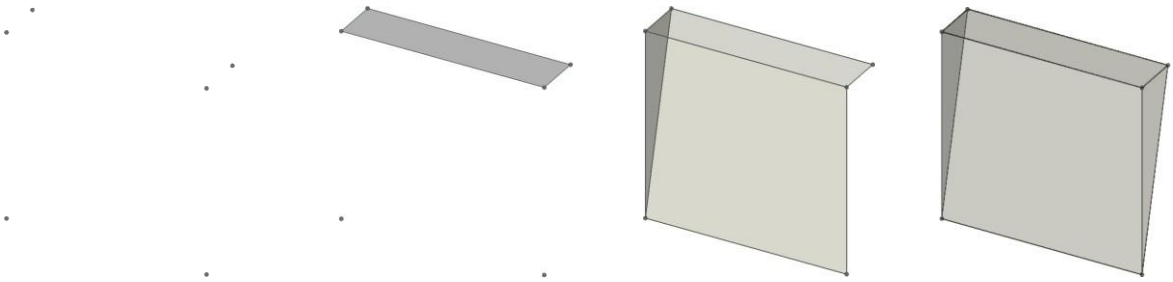
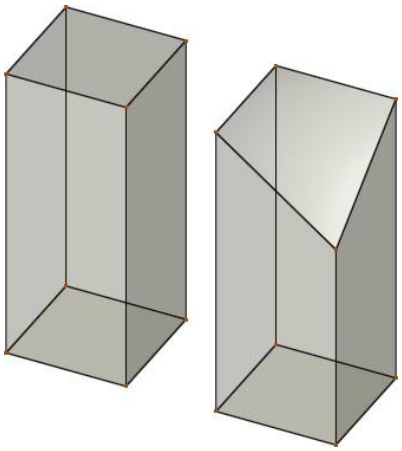


Рисунок 3.13 - Создание тела при помощи функций моделирования границ

Создавать объемное тело исключительно при помощи функций моделирования границ очень утомительно. Эти функции используются главным образом для создания плоских фигур, которые затем служат сечениями объемным телам, образуемым заметанием или скиннингом. Однако функции моделирования границ удобно применять для изменения формы уже существующего тела. Вершину можно передвинуть в новое положение, изменив соответствующим образом соседние ребра и грани (рисунок 3.14). Прямое ребро можно заменить криволинейным, в результате чего изменятся связанные грани и вершины (рисунок 3.15). Плоскую поверхность можно заменить на криволинейную с модификацией ребер и вершин (рисунок 3.16). Иногда плоскую поверхность можно заменять криволинейной, импортированной из системы поверхностного моделирования. Перечисленные функции моделирования называются *функциями тонкого редактирования (tweaking functions).* Они используются для моделирования тел, ограниченных криволинейными поверхностями, поскольку такие



поверхности легко получать из плоских граней многогранника.

Рисунок 3.14 - Модификация объекта перемещением вершины

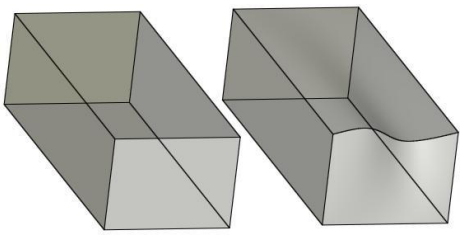


Рисунок 3.15 - Модификация объекта заменой ребра

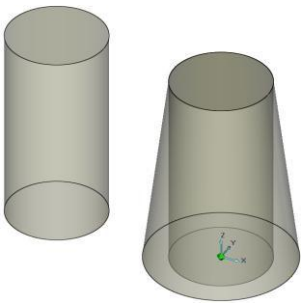
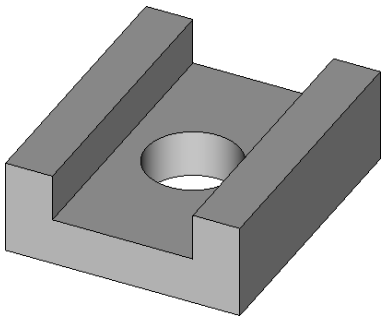


Рисунок 3.16 – Модификация объекта заменой поверхности

V. Объектно-ориентированное моделирование.

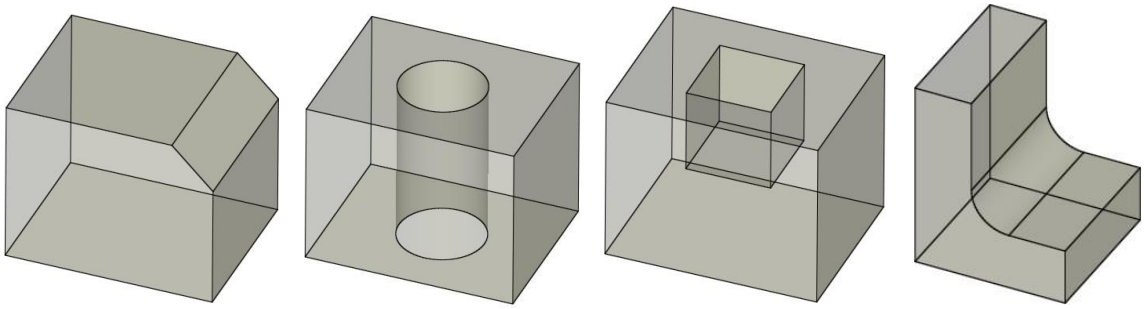
Объектноориентированное моделирование (feature-based modeling) позволяет конструктору создавать объемные тела, используя привычные *элементы форм [features).* Созданное тело несет в себе информацию об этих элементах в дополнение к информации об обычных геометрических элементах (вершинах, ребрах, гранях и др.). Например, конструктор может давать команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте», и получившаяся фигура будет содержать сведения о наличии в конкретном месте отверстия (или фаски) конкретного размера. Набор доступных в конкретной программе элементов формы зависит от спектра применения этой программы.

Большинством систем объектно-ориентированного моделирования поддерживаются такие элементы, которые используются при изготовлении деталей: фаски, отверстия, скругления, пазы, выемки и т. д. Такие элементы называются *производственными*, поскольку каждый из них может быть получен в результате конкретного процесса производства. Например, отверстие создается сверлением, а выемка — фрезерованием. Следовательно, на основании сведений о наличии, размере и расположении производственных элементов можно попытаться автоматически сформировать план технологического процесса. Автоматическое планирование технологического процесса, если оно будет разработано на практическом уровне, перебросит мост между CAD и CAM, которые сейчас существуют отдельно друг от друга. Таким образом, в настоящий момент лучше моделировать объекты, подобные изображенному на рисунке 3.17, с использованием команд объектно-ориентированного моделирования «Паз» и «Отверстие», а не просто булевых операций. Модель, созданная при помощи таких команд, облегчит планирование технологического процесса, если не сделает его полностью автоматическим. Использование производственных элементов в моделиро-



вании иллюстрирует рисунке 3.18.

Рисунок 3.17 - Модель, созданная командами "Паз" и "Отверстие"



а б в г

Рисунок 3.18 - Производственные элементы: а- фаска; б - отверстие; в – глухое отверстие; г - скругление

Один из недостатков объектно-ориентированного моделирования заключается в том, что система не может предоставить все элементы, нужные для всех возможных приложений. Для каждой задачи может потребоваться свой набор элементов. Чтобы исключить этот недостаток, большинство систем объектно-ориентированного моделирования поддерживают какой-либо язык, на котором пользователь при необходимости может определять свои собственные элементы. После определения элемента необходимо задать параметры, указывающие его размер. Элементы, как и примитивы, могут быть разного размера, а задаются размеры параметрами в момент создания элемента. Создание элементов разного размера путем присваивания различных значений соответствующим параметрам является разновидностью параметрического моделирования.

Моделирование кривых линий и поверхностей

Все непрямые и не ломаные линии называются кривыми. Кривые линии разделяются на два вида:

-плоские кривые, т.е. такие, все точки которых располагаются в одной плоскости;

-пространственные кривые (линии двоякой кривизны), т. е. такие, точки которых не принадлежат одной плоскости.

Если закон перемещения точки может быть выражен аналитически в виде уравнения, то образующаяся при этом линия называется закономерной, в противном случае - незакономерной, или графической. Закономерные кривые линии делятся на алгебраические, определяемые алгебраическими уравнениями (эллипс, парабола, гипербола и др.), и трансцендентные, определяемые трансцендентными уравнениями (синусоида, циклоида, спираль Архимеда и др.). Важной характеристикой алгебраической кривой является её порядок (трансцендентные кривые порядка не имеют). С алгебраической точки зрения порядок кривой линии равен степени её уравнения, с геометрической - наибольшему числу точек пересечения кривой с прямой линией для плоских кривых и с произвольной плоскостью для пространственных. В число точек пересечения включаются как действительные точки, так и совпавшие и мнимые. Например, прямую линию,

имеющую уравнение первой степени ax+by+c=0 (с произвольной прямой пересекается в одной точке), можно рассматривать как линию первого порядка, эллипс - кривая второго порядка, имеет уравнение $x^2/a^2+y^2/b^2=1$ второй степени, пересекается с прямой максимум в двух точках. Кривыми второго порядка являются также окружность, парабола, гипербола. Примерами кривых третьего порядка могут служить строфоида, Декартов лист, циссоида; четвертого - лемниската Бернулли, кардиоида, улитка Паскаля.

Прямая, пересекающая кривую линию в одной, двух и более точках, называется секущей (прямая **m**) (рисунок 3.19). Касательной прямой **t** в данной точке **A** линии **l** называется предел, к которому стремится секущая (AB), когда точка **B**, оставаясь на линии **l**, стремится к точке **A**. Касательная к прямой линии согласно этому определению есть сама прямая. Нормалью к кривой **l** называется прямая **n**, перпендикулярная к **l** и проходящая через точку касания **A.**

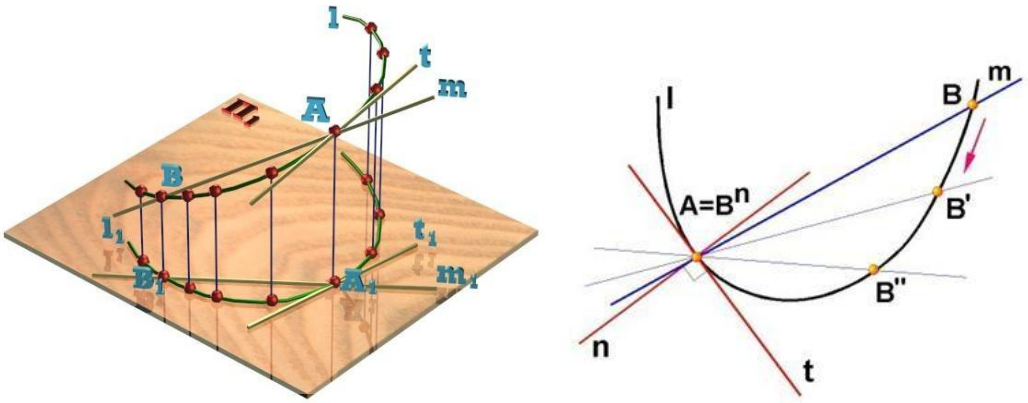


Рисунок 3.19 - Кривая линия

Кривая второго порядка имеет уравнение второй степени в декартовой системе координат. С прямой линией пересекается в двух точках (действительных, совпавших или мнимых).

Эллипс - геометрическое место точек, сумма расстояний которых до двух заданных точек (фокусов) - величина постоянная, равная 2|a| (длине большой оси эллипса). Эллипс не имеет несобственных точек.

Парабола - геометрическое место точек, равноудаленных от данной точки F (фокуса) и данной прямой d (директрисы). Парабола имеет одну несобственную точку.

Гипербола - геометрическое место точек, разность расстояний которых до двух заданных точек (фокусов) - величина постоянная, равная 2|a| (расстоянию между вершинами гиперболы). Гипербола имеет две несобственные точки, по одной на каждой асимптоте.

Кривые второго порядка - эллипс, окружность, парабола и гипербола - могут быть получены при пересечении конуса плоскостью и поэтому называются ***коническими сечениями***.

Из закономерных пространственных кривых наибольшее практическое

применение находят винтовые линии, в частности, цилиндрическая винтовая линия (рисунок 3.20).

Цилиндрическая винтовая линия представляет собой пространственную кривую, описываемую точкой, совершающей равномерно-поступательное движение по образующей цилиндра вращения, которая в свою очередь вращается вокруг оси цилиндра с постоянной угловой скоростью. Величина **P,** на которую поднимается точка за один оборот образующей, называется шагом винтовой линии. Горизонтальная проекция винтовой линии является окружностью, а фронтальная - синусоидой. На развертке цилиндрической поверхности винтовая линия изобразится в виде прямой. Угол подъёма винтовой линии равен углу наклона касательной **t** в любой точке винтовой линии к плоскости, перпендикулярной её оси.

Цилиндрическая винтовая линия, подобно прямой и окружности, обладает свойством сдвигаемости. Свойство сдвигаемости состоит в том, что каждый отрезок линии может сдвигаться вдоль неё, не подвергаясь деформации. Это свойство винтовой линии лежит в основе работы винтовых пар (винт-гайка). Винтовая линия является геодезической на цилиндрической поверхности. *Геодезической* называется линия, принадлежащая поверхности и кратчайшая из всех линий, которые можно провести между двумя точками поверхности. Кроме цилиндрической винтовой линии, геодезическими линиями также являются прямая на плоскости, окружность большого круга на сфере и др. Геодезическая линия изображается на развертке поверхности в виде прямой линии.

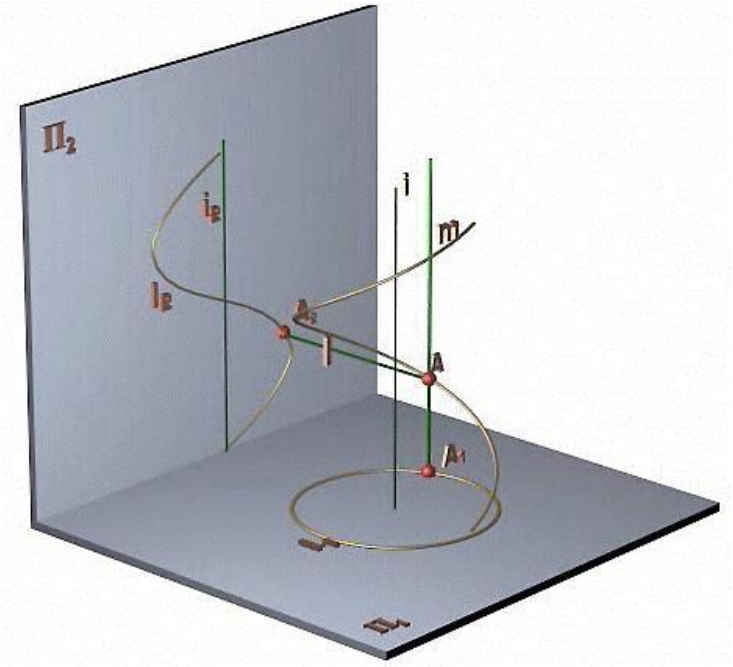


Рисунок 3.20 - Винтовая линия

В большинстве случаев с помощью тел и поверхностей, называемых аналитическими, нельзя описать реальные геометрические объекты. На протяжении долгого времени выход из этого положения заключался в

представлении объекта с помощью произвольно проведенных линий, взаимное сопряжение которых осуществлялось специалистами очень высокой квалификации: модельщиками, литейщиками, изготовителями штампов. Решение этой задачи в разных областях техники характеризовалось общим свойством - отсутствием какого бы то ни было предварительного математического определения, даже частичного, в результате чего решение задачи начиналось с выполнения последовательных шагов аппроксимации и заканчивалось вручную. Каждый шаг подгонки основывался на результатах экспериментов или просто на указаниях дизайнера. Из-за недостатка информации такие зависимости часто назывались экспериментальными.

В инженерной геометрии существует большое количество отработанных графических способов построения плавных кривых - обводов. Они традиционно применялись при проектировании таких объектов, как корпус корабля, кузов автомобиля, фюзеляж и крыло самолета и многих других (рисунок 3.21).

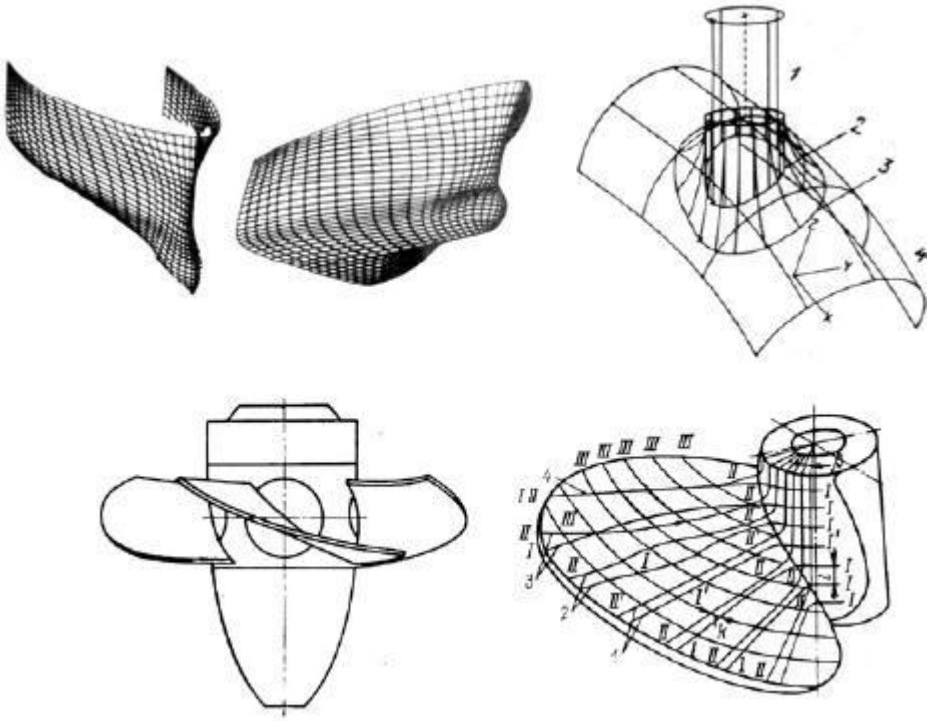


Рисунок 3.21 - Примеры кривых поверхностей в технике

В результате форма тела задается при помощи набора очень точно изготовленных сечений - плазов. Кроме перечисленных примеров сложную форму поверхности имеют лопасти гидравлических и паровых турбин, гребные винты, лопатки авиационных двигателей, крыльчатки и др., т. е. объекты, функциональные требования к которым связаны с омыванием какой-либо средой. Кроме функциональных требований к изделиям предъявляются и эстетические. В этом случае также решаются задачи проектирования кривых линий и поверхностей произвольной формы.

Появление ЭВМ позволило перейти от «ручных» графических способов моделирования к более эффективному способу задания кривых и

поверхностей. Процесс проектирования происходит следующим образом: задают координаты сравнительно небольшого числа опорных точек (например, расчетных или полученных в результате эксперимента), лежащих на искомой линии или поверхности, и через эти точки проводят плавные кривые линии. Такое конструирование носит итерационный характер.

Модель (аналитическое описание), полученную на некотором шаге итерации, модифицируют и улучшают до тех пор, пока не будет достигнута желаемая форма кривой или поверхности. Проблема состоит в математически точном воспроизведении формы изделия, исходя из координат точек, расположенных на его поверхности.

При моделировании кривых линий и поверхностей, их машинного представления возникают задачи аппроксимации, интерполяции и сглаживания исходных данных (рисунок 3.22).

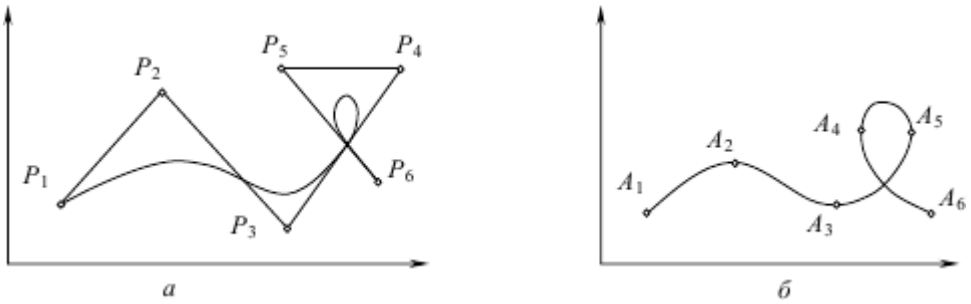


Рисунок 3.22 - Аппроксимация (а) и интерполяция (б) кривых

Задачи аппроксимации (приближенного представления) возникают при замене кривой или поверхности, описываемых сложными функциями, другими функциями, описываемыми более простыми уравнениями, без потери необходимой точности.

Задачи интерполяции (приближенного восстановления) связаны с поиском гладких кривых или поверхностей, проходящих через множество заданных точек.

Задачи сглаживания возникают, когда необходимо, чтобы искомая кривая или поверхность описывались функцией, обеспечивающей, например, необходимую степень дифференцирования.

Таким образом, при моделировании кривых линий и поверхностей решается следующая задача: по заданному массиву точек на плоскости или в пространстве строится кривая, проходящая через все эти точки (задача интерполяции) либо проходящая вблизи от этих точек (задача сглаживания).

Обратимся для определенности к задаче интерполяции и начнем рассмотрение с обсуждения правил выбора класса кривых.

Полином Лагранжа

Пусть на плоскости задан набор точек (x_i, y_i), i = 0, 1, … n, таких, что $x_0 < x_1 < \ldots < x_{n-1} < x_n$ (рисунок 3.23).

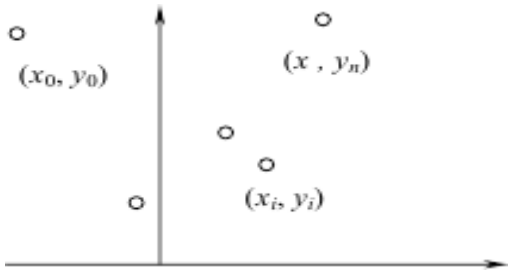


Рисунок 3.23 Набор точек

То обстоятельство, что точки заданного набора пронумерованы в порядке возрастания их абсцисс, позволяет искать кривую в классе графиков функций. Можно описать основные проблемы сглаживания этого дискретного набора, ограничившись случаем многочлена.

Из курса математического анализа известно, что существует интерполяционный многочлен Лагранжа

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i \frac{\omega_n(x)}{(x - x_i)\omega_n(x_i)},$$

где $\omega_n(x) = \prod_{j=0}^{n}(x - x_j)$ график которого проходит через все заданные точки (x_i, y_i), i = 0, 1, … n .

Это обстоятельство и простота описания (заметим, что многочлен однозначно определяется набором своих коэффициентов; в данном случае их число совпадает с количеством точек в заданном наборе) являются несомненными преимуществами построенного интерполяционного многочлена.

Однако данный подход имеет и некоторые недостатки.

1. Степень многочлена Лагранжа на единицу меньше числа заданных точек. Поэтому чем больше точек задано, тем выше степень такого многочлена. И, хотя график интерполяционного многочлена Лагранжа всегда будет проходить через все точки массива, его уклонение (от ожидаемого) может оказаться довольно значительным (рисунок 3.24).

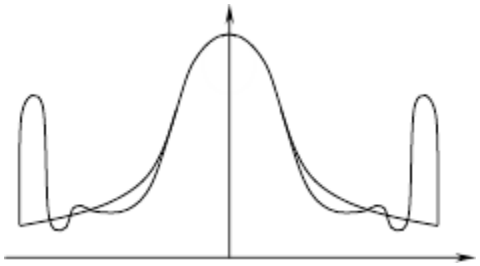


Рисунок 3.24 - Интерполяция полиномом Лагранжа

Кроме этого повышение степени многочлена приводит к нежелательным осцилляциям.

2. Изменение одной точки (ситуация, довольно часто встречающаяся на практике) требует полного пересчета коэффициентов интерполяционного многочлена и к тому же может существенно повлиять на вид задаваемой кривой.

Приближающую кривую можно построить и совсем просто: если последовательно соединить точки заданного набора прямолинейными отрезками, то в результате получится ломаная (рисунок 3.25).

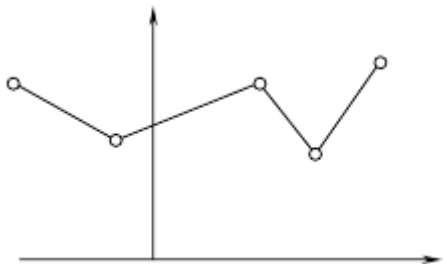


Рисунок 3.25 - Кусочно-линейная интерполяция

При такой кусочно-линейной интерполяции требуется найти всего 2n чисел (каждый прямолинейный отрезок определяется ровно двумя коэффициентами), но построенная таким образом аппроксимирующая кусочно-линейная функция не обладает нужной гладкостью: уже первая производная этой функции терпит разрывы в узлах интерполяции.

Рассмотрев эти две крайние ситуации, найдем класс функций, которые в основном сохранили бы перечисленные выше преимущества обоих подходов и одновременно были бы в известной степени свободны от их недостатков.

Для этого поступим так: будем использовать многочлены (как и в первом случае) и строить их последовательно, звено за звеном (как во втором случае). В результате получится, так называемый, полиноминальный многозвенник. При подобном подходе важно правильно выбрать степени привлекаемых многочленов, а для плавного изменения результирующей кривой необходимо еще тщательно подобрать коэффициенты многочленов (из условий гладкого сопряжения соседних звеньев). То, что получится в результате описанной схемы построения, называют сплайн-функциями или сплайнами.

Форма математического сплайна повторяет контур физического сплайна - гибкой металлической линейки, которыми издревле пользовались чертёжники и слесари-лекальщики (рисунок 3.26).

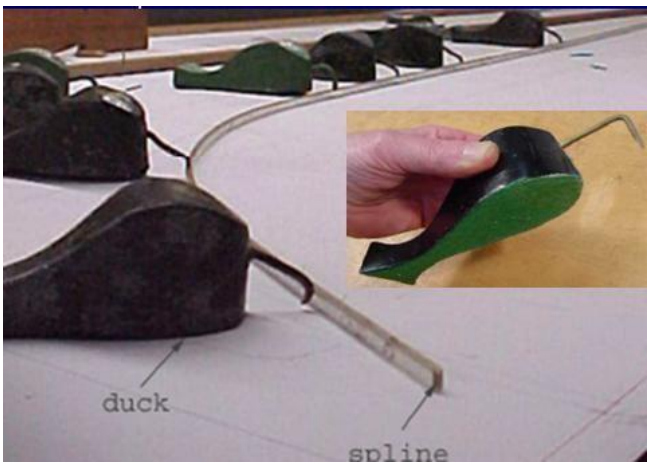
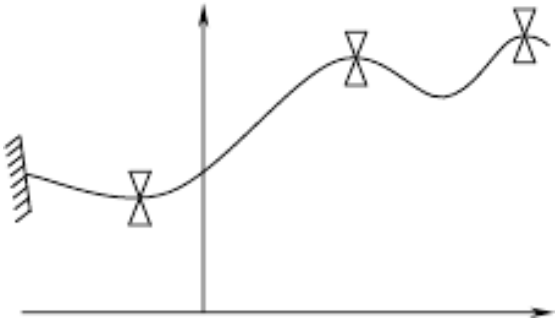


Рисунок 3.26 - Физический сплайн

Для изменения формы линейки используются точечные закрепления и концевые заделки. Меняя количество и расположение этих произвольно расположенных базовых точек, кривую можно выгнуть произвольным образом. Кривая всегда остаётся гладкой (не имеет разрывов и переломов)



(рисунок 3.27).

Рисунок 3.27 Сплайн

Задачи аппроксимации и интерполяции (интерполяция является частным случаем аппроксимации) при конструировании кривых линий и поверхностей могут быть решены с использованием различных вычислительных методов. При этом сегменты пространственных кривых аппроксимируются отрезками, дугами окружности, параболами и кривыми более высоких порядков.

Методы конструирования кривых линий и поверхностей: метод Эрмита, метод Безье, метод аппроксимации с помощью кубических B-сплайнов, метод Кунса и др. используют одинаковый подход: разбиение пространственной кривой на отдельные сегменты - элементарные куски. Описание этих сегментов полигонами третьей степени, определенные условия соединения элементарных кусков в составные кривые. Такие кривые в литературе обобщенно называют *сплайновыми кривыми*.

Сравнение форм Эрмита, Безье и B-сплайнов

Каждое из этих представлений оказывается полезным в разных ситуациях. Форма Эрмита пригодна для аппроксимации уже имеющихся поверхностей, когда необходимо добиться как соответствия точек, так и соответствия касательных векторов, в то время как представление в виде B-

сплайнов удобно для аппроксимации точек.

Формы Безье и B-сплайнов пригодны для работы в интерактивном режиме, так как их геометрические векторы состоят из одних только точек. Обе эти формы обладают свойством выпуклой оболочки, которое оказывается полезным при изображении кривых. Отметим, что кривую, первоначально заданную в одной форме, можно преобразовать в другую форму.

На рисунке 3.28 и рисунке 3.29 показано различие в поведении кривых, построенных разными методами на основе одного и того же точечного базиса.

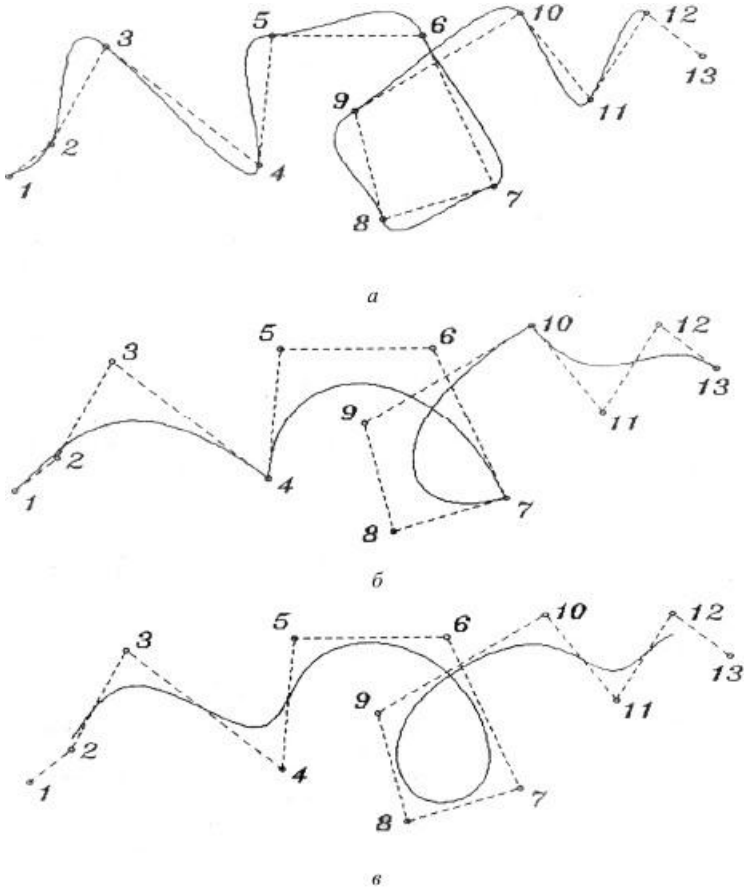


Рисунок 3.28 - Три формы построения кривых: а – форма Эрмита; б – форма Безье; в – форма B-сплайна

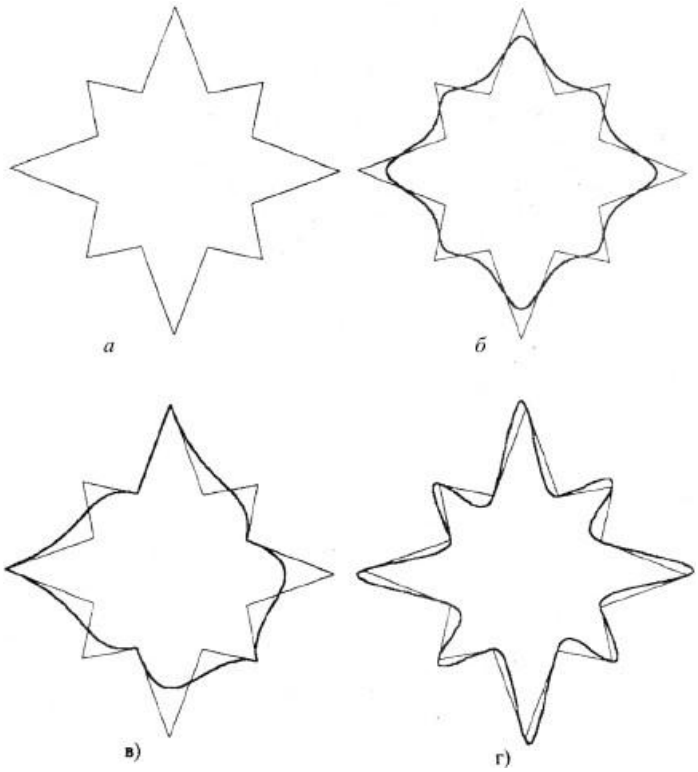


Рисунок 3.29 - Сглаживание фигуры: а – исходная фигура; б – форма B-сплайна; в – форма Безье; г – форма Эрмита

Одними из самых популярных сплайнов, применяемых в компьютерном моделировании, являются "кривые Безье" и NURBS-кривые (Non-Uniform Rational B-Spline - неоднородный рациональный фундаментальный сплайн). Эти сплайны обладают высокой степенью гладкости, легко вычисляются и управляются.

Кривая (сплайн) Безье задаётся вершинами многоугольника и в общем случае не проходит через базовые точки (рисунок 3.30).

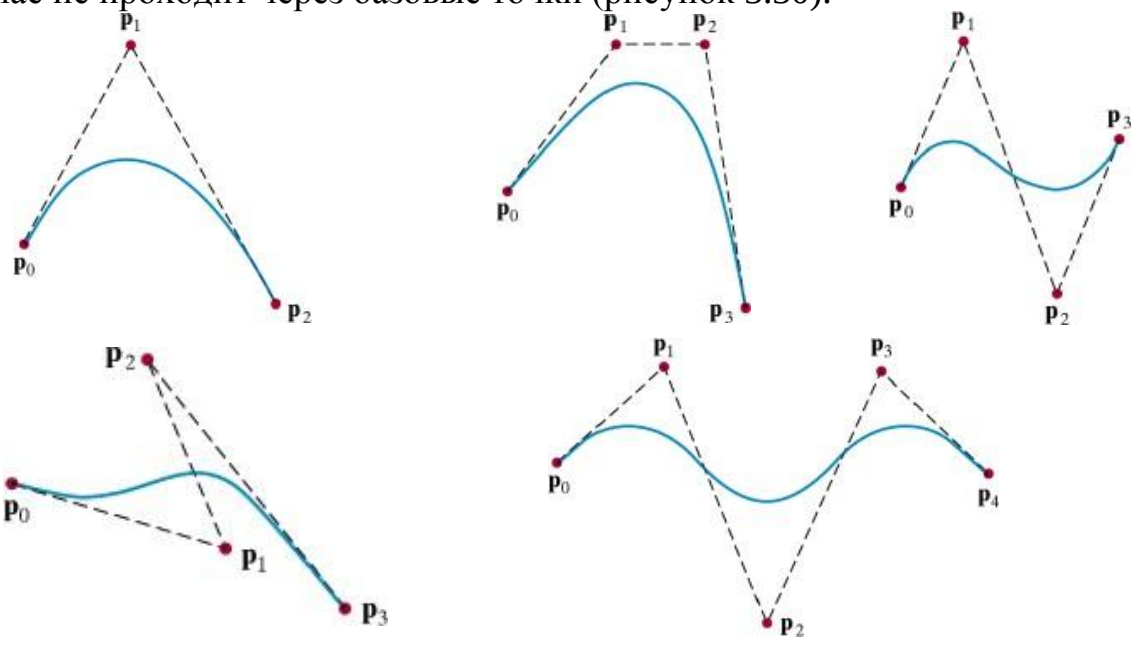


Рисунок 3.30 - Сплайны Безье

Для получения кривой, проходящей через заданные точки применяются составные кривые Безье, которые также можно использовать для задач интерполяции.

Неоднородный рациональный B-сплайн или NURBS подобен обычному кубическому B- сплайну.

NURBS-кривые не проходят через базовые точки, а усредняют - аппроксимируют их, причём узловые точки могут быть расставлены неравномерно. Такие линии называются неоднородными, а каждый такой узел, имеющий свой вес (коэффициент, определяющий влияние данной точки на кривизну линии), - рациональным. Перемещая узловые точки, можно управлять формой кривой (рисунок 3.31).

Рисунок 3.31 - Интерактивное управление формой гладких NURBS-кривых

NURBS позволяет точно воспроизвести все конические сечения - окружность (см. рисунок 3.31 справа), эллипс, параболу и гиперболу. В NURBS - представлении можно работать не только с коническими сечениями, но с кривыми Безье, рациональными кривыми Безье и B-сплайнами. Преобразование всех этих кривых к NURBS может значительно сократить объем программирования.

Поверхности Безье используются при интерактивном проектировании по тем же причинам, что и кривые Безье: управляющие точки позволяют легко изменять форму куска поверхности. Поверхности Безье так же, как и кривые Безье, обладают свойством выпуклой оболочки. Геометрическая матрица состоит из 16 управляющих точек (рисунок 3.32).

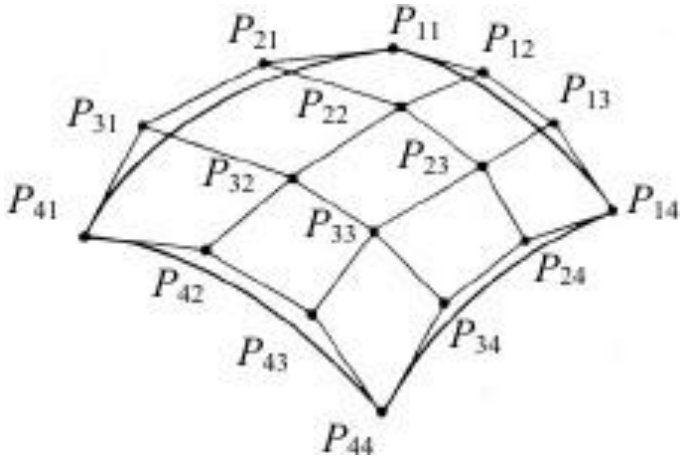


Рисунок 3.32 - Шестнадцать управляющих точек бикубического куска Безье

Для достижения непрерывности в поперечном направлении относительно

ребер кусков необходимо равенство четырех управляющих точек, принадлежащих общим ребрам соседних кусков. Для непрерывности касательного вектора требуется, чтобы две четверки управляющих точек по обеим сторонам общего ребра были коллинеарны другим ребрам. Коллинеарными будут следующие совокупности управляющих точек: (P13, P14, P15), (P23, P24, P25), (P33, P34, P35), (P43, P44, P45). Отношения длин коллинеарных отрезков должны быть постоянными (рисунок 3.33).

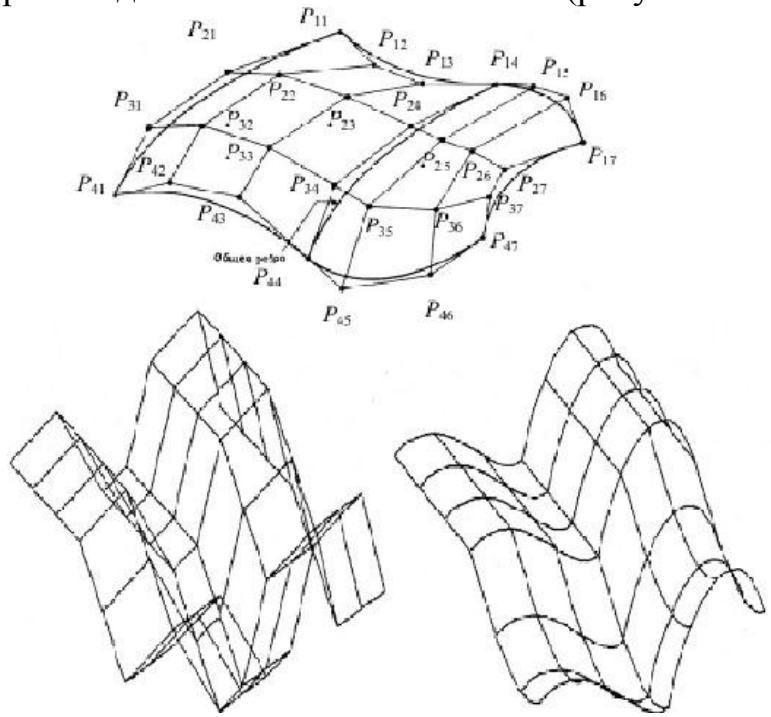


Рисунок 3.33 - Составные поверхности Безье

На рисунках 3.34 и 3.35 приведены примеры B-сплайновых поверхностей.

Рисунок 3.34 - Пример B-сплайновой поверхности

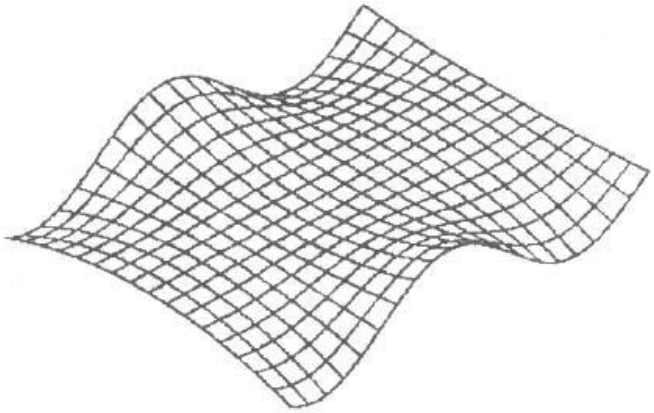
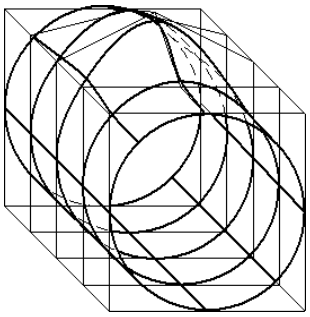


Рисунок 3.35 - Каркас и B-сплайновая поверхность

На рисунке 3.36 показана NURBS-поверхность третьего порядка по каждому из двух направлений. Характеристический многогранник изображен



тонкими линиями.

Рисунок 3.36 - NURBS-поверхность

Лекция 15. Классификация поверхностей. Развёртки

Поверхность представляет собой множество последовательных положений линии, перемещающейся в пространстве. Эту линию называют образующей поверхности. Она может быть прямой или кривой. Закон перемещения образующей задается линиями - направляющими.

Многогранники

Поверхность, образованная частями попарно пересекающихся плоскостей, называется многогранной. Элементами многогранных поверхностей являются грани, ребра и вершины. Отсеки плоскостей, образующие многогранную поверхность, называются гранями, линии пересечения смежных граней - ребрами, точки пересечения не менее чем трех граней - вершинами (рисунок 4.1).

Если каждое ребро многогранной поверхности принадлежит одновременно двум её граням, то её называют замкнутой (рисунок 4.1б, г), в противном случае - незамкнутой (рисунок 4.1а, в). Многогранная поверхность называется пирамидальной, если все её ребра пересекаются в

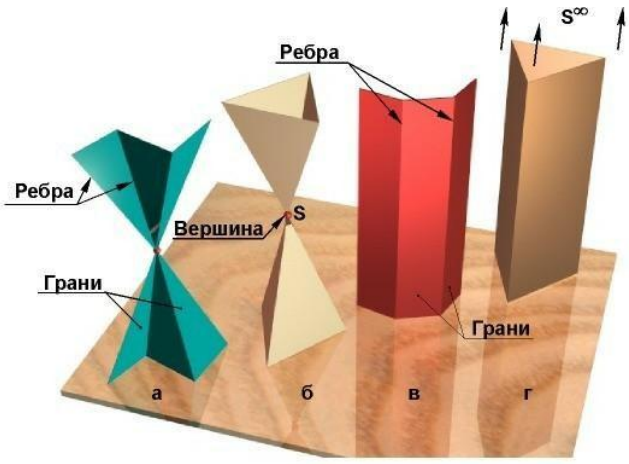


Рисунок 4.1 - Элементы многогранных поверхностей

одной точке - вершине (см. рисунок 4.1а). Пирамидальная поверхность имеет две неограниченные полы. Многогранная поверхность называется призматической, если все её ребра параллельны между собой (см. рисунок 4.1г).

Геометрическое тело, со всех сторон ограниченное плоскими многоугольниками, называется многогранником (рисунок 4.2). Простейшими многогранниками являются пирамиды и призмы.

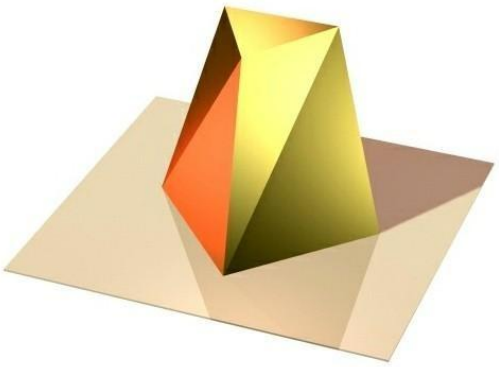


Рисунок 4.2 - Многогранник

Среди других видов многогранников следует выделить - призматоиды и правильные многогранники (тела Платона). Призматоидом называется многогранник, у которого верхнее и нижнее основания - многоугольники, расположенные в параллельных плоскостях, а боковые грани представляют собой треугольники или трапеции.

Существует пять правильных многогранников:

-***тетраэдр*** (четырехгранник) - ограничен четырьмя равносторонними и равными треугольниками;

-***гексаэдр*** (четырехгранник, или куб) - ограничен шестью равными

квадратами;

-***октаэдр*** (восьмигранник) - ограничен восемью равносторонними и равными треугольниками;

-***додекаэдр*** (двенадцатигранник) - ограничен двенадцатью равносторонними и равными пятиугольниками;

-***икосаэдр*** (двадцатигранник) - ограничен двадцатью равносторонними и равными треугольниками.

Вокруг всех правильных многогранников можно описать сферу. Совокупность всех ребер и вершин многогранника называется его сеткой.

Кривые поверхности (рисунок 4.3) широко применяются в различных областях науки и техники при создании очертаний различных технических форм или как объекты инженерных исследований.

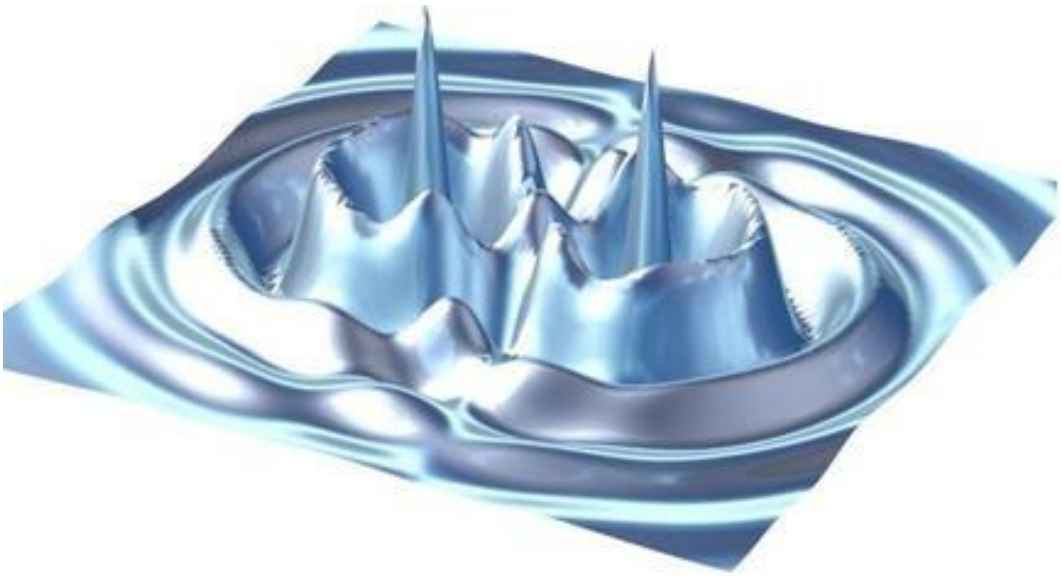


Рисунок 4.3 - Пример сложной поверхности

Существуют три способа задания кривых поверхностей:

- -аналитический - при помощи уравнений;
- -при помощи каркаса;
- -кинематический - перемещением линий в пространстве.

Составлением уравнений поверхностей занимается аналитическая геометрия; она рассматривает кривую поверхность как множество точек, координаты которых удовлетворяют некоторому уравнению или системе алгебраических уравнений.

При каркасном способе задания кривая поверхность задается

совокупностью некоторого количества линий, принадлежащих поверхности. В качестве линий, образующих каркас, как правило, берут семейство линий, получающихся при пересечении поверхности рядом параллельных плоскостей. Этот способ применяется при проектировании кузовов автомобилей, в самолето- и судостроении, в топографии и т.п.

При кинематическом способе образования и задания кривых поверхностей каждая кривая поверхность рассматривается как совокупность последовательных положений образующей линии, перемещающейся в пространстве по определенному закону. Образующая линия при своем движении может оставаться неизменной, а может и менять свою форму. Закон перемещения образующей линии, как правило, задается при помощи направляющих линий и алгоритма перемещения образующей по направляющим.

Определителем поверхности называют совокупность условий, необходимых и достаточных для задания поверхности в пространстве. Определитель поверхности выявляется путем анализа способов образования поверхности или её основных свойств. В общем случае поверхность может быть образована несколькими способами и поэтому может иметь несколько определителей. Обычно из всех способов образования поверхности выбирают простейший. Определитель поверхности состоит из двух частей:

-*геометрической части* - совокупности геометрических фигур, с помощью которых можно образовать поверхность;

-*алгоритмической части* - алгоритма формирования поверхности при помощи фигур, входящих в геометрическую часть определителя.

Рассмотрим примеры выявления определителя для некоторых простейших поверхностей (рисунок 4.4):

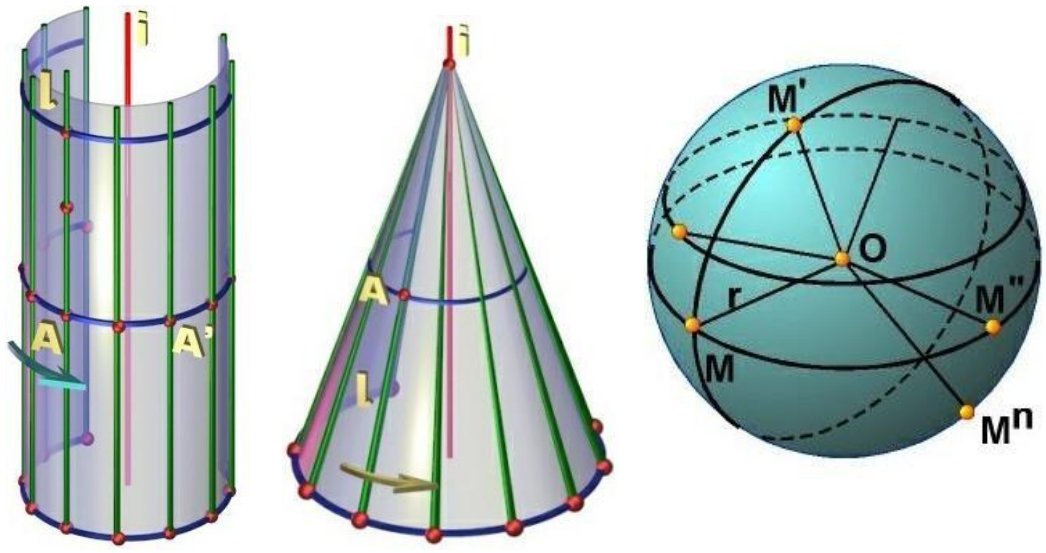


Рисунок 4.4 - Определители цилиндра, конуса и сферы

1.***Цилиндрическая поверхность вращения*** может быть образована вращением прямой l || i вокруг оси i. Геометрическая часть определителя поверхности состоит из образующей l и оси
i. Алгоритмическая часть определителя состоит из операции вращения образующей линии l вокруг оси i.

2.***Коническая поверхность вращения*** может быть образована вращением прямой l, пересекающей ось вращения i под некоторым углом. Алгоритмическая часть определителя состоит из словесного указания о том, что поверхность образуется вращением образующей l вокруг оси i.

3.***Сферой*** называется поверхность, образованная множеством точек пространства, находящихся на расстоянии |r| от данной точки O. Геометрическая часть определителя сферы состоит из точки O (центра сферы) и точки M, принадлежащей её поверхности. Алгоритм построения любой точки сферы заключается в проведении через точку O произвольной прямой и откладывания на ней от точки O отрезка | OM' |=| OM |=| r |.

Кривые поверхности разделяются на линейчатые и нелинейчатые, закономерные и незакономерные. Поверхность называется линейчатой, если она может быть образована перемещением прямой линии, в противном случае она называется нелинейчатой. Если поверхность может быть задана каким-либо уравнением, она называется закономерной, в противном случае - незакономерной, или графической (задается только чертежом). Закономерные поверхности, в зависимости от вида уравнения, разделяются на алгебраические и трансцендентные. Алгебраическое уравнение n-й степени (в декартовых координатах) задает алгебраическую поверхность n-го порядка (трансцендентные поверхности порядка не имеют). Алгебраическая поверхность n-го порядка пересекается плоскостью по кривой n-го порядка, а с прямой линией - в n точках. Плоскость, имеющую уравнение первой степени (с произвольной плоскостью пересекается по прямой линии, а с прямой - в одной точке), можно рассматривать как поверхность первого порядка.

Примерами кривых поверхностей второго порядка могут служить поверхности, образованные вращением кривых второго порядка вокруг одной из своих осей. Поверхности второго порядка пересекаются с произвольной плоскостью по кривым второго порядка, а с прямой - в двух точках. Примером поверхности четвертого порядка может служить тор.

Наибольшее применение в технике получили кинематические кривые поверхности с образующими постоянной формы:

-линейчатые поверхности: развертывающиеся, неразвертывающиеся, винтовые.

-поверхности вращения.

Поверхность называется линейчатой, если она может быть образована перемещением прямой линии. Поверхность, которая не может быть образована движением прямой линии, называется нелинейчатой. Например, конус вращения - линейчатая поверхность, а сфера - нелинейчатая. Через любую точку линейчатой поверхности можно провести, по крайней мере, одну прямую, целиком принадлежащую поверхности. Множество таких прямых представляет собой непрерывный каркас линейчатой поверхности. Все нелинейчатые поверхности являются неразвертывающимися.

Поверхность называется развертывающейся, если она путем изгибания может быть совмещена с плоскостью без образования складок и разрывов. Очевидно, что все многогранные поверхности являются развертывающимися. Из кривых поверхностей этим свойством обладают только те линейчатые поверхности, которые имеют ребро возврата.

Существует только три вида линейчатых поверхностей, имеющих ребро возврата: торсы, конические и цилиндрические (рисунок 4.5).

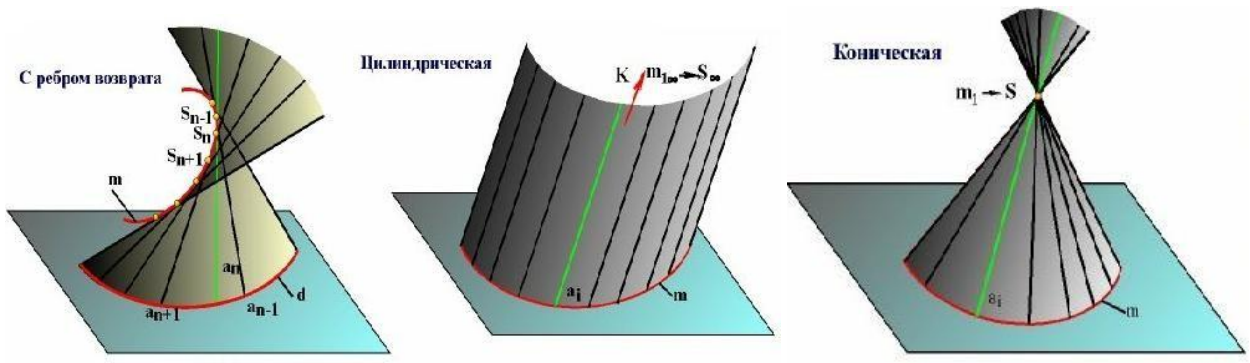


Рисунок 4.5 - Линейчатые поверхности с ребром возврата

Торсы

Возьмем некоторую пространственную ломаную линию 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... и продолжим её стороны так, как показано на рисунке 4.6. В результате получим двухполую многогранную развертываемую поверхность. При неограниченном увеличении числа сторон ломаной линии с одновременным стремлением длины каждой из них к нулю и переходе к

пределу получим:

-пространственная ломаная линия 1, 2, 3, 4, 5, 6, ... преобразуется в пространственную кривую линию m;

-ребра многогранной поверхности преобразуются в касательные к пространственной кривой m;

-многогранная поверхность преобразуется в линейчатую двухполую развертывающуюся кривую поверхность, которая называется торсом.

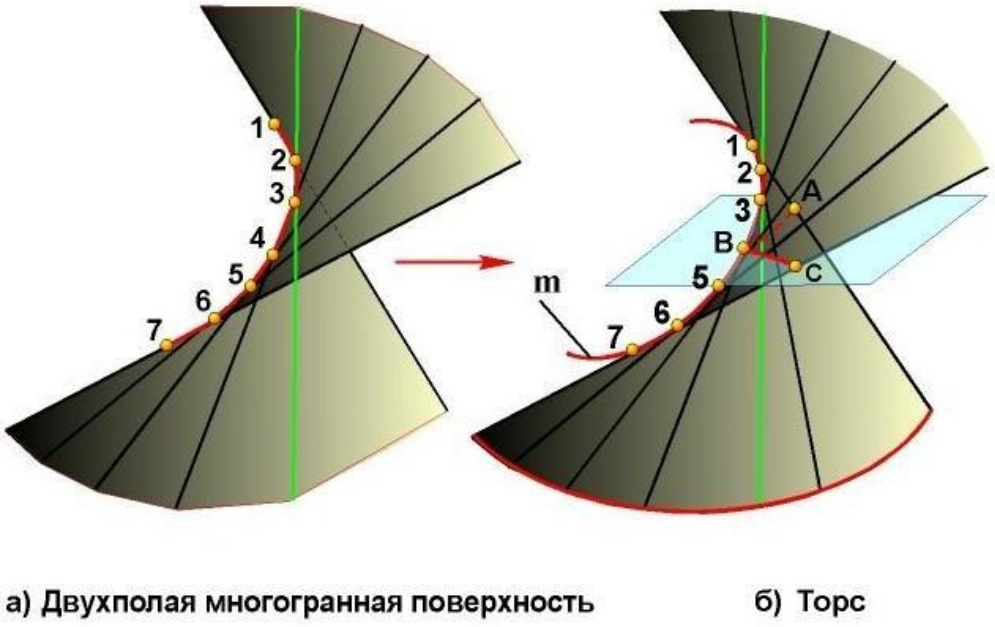


Рисунок 4.6 - Формирование торса

Множество всех касательных прямых к пространственной кривой представляет собой непрерывный каркас поверхности торса. Через каждую точку поверхности проходит одна касательная к кривой m. Таким образом, торс представляет собой поверхность, которая образуется непрерывным движением прямолинейной образующей, касающейся во всех своих положениях некоторой пространственной кривой линии. Направляющая пространственная кривая m служит границей между двумя полостями поверхности торса и называется ребром возврата. Если взять на кривой m какую-либо точку B и провести через неё плоскость, пересекающую обе полости поверхности, то полученная в пересечении кривая ABC будет иметь так называемую точку возврата B, следовательно, ребро возврата является множеством точек возврата кривых линий, полученных при пересечении данной поверхности различными плоскостями. Этим и объясняется её название. Если ребром возврата является цилиндрическая винтовая линия, то такая поверхность называется развертывающимся

геликоидом.

Свойством развёртываемости торс обладает потому, что он является пределом некоторой развертывающейся многогранной поверхности. Геометрическая часть определителя торса состоит из ребра возврата. Алгоритмическая часть определителя торса состоит из указания о том, что образующая прямая при своём движении остается касательной к ребру возврата. Если ребро возврата выродится в собственную точку пространства, то образующие торса, проходя через неё, образуют коническую поверхность произвольного вида. Если эта точка (вырожденное ребро возврата) будет несобственной точкой пространства, то образующие торса, проходя через неё, окажутся параллельными между собой и образуют цилиндрическую поверхность общего вида. Таким образом, цилиндрическая и коническая поверхности обладают свойством развёртываемости, так как являются частными случаями поверхности торса. Однако, чтобы задать коническую или цилиндрическую поверхности, недостаточно иметь только ребро возврата (собственную или несобственную точку) - положение образующей прямой не определяется одной точкой. Необходимо задать ещё направляющую линию.

Цилиндрическая поверхность образуется движением прямой линии, скользящей по некоторой неподвижной замкнутой или незамкнутой кривой и остающейся параллельной

своему исходному положению (рисунок 4.7).

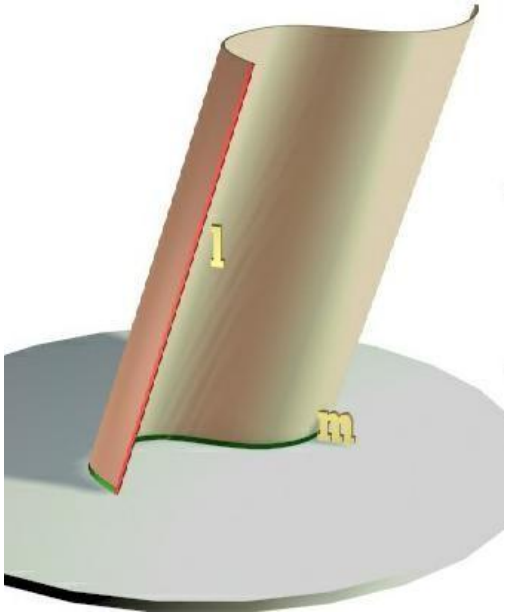


Рисунок 4.7 - Формирование цилиндрической поверхности

Множество прямолинейных образующих представляет собой непрерывный каркас цилиндрической поверхности. Через каждую точку поверхности проходит одна прямолинейная образующая (см. рисунок 4.5). Неподвижная кривая m, по которой скользит образующая l, называется направляющей. Если направляющая линия является кривой второго порядка, то и цилиндрическая поверхность будет второго порядка. Геометрическая часть определителя цилиндрической поверхности состоит из направляющей линии m и исходного положения образующей l. Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая кривую m и параллельная прямой l. Цилиндрическая поверхность является бесконечной в направлении своих образующих. Часть замкнутой цилиндрической поверхности, заключенная между двумя плоскими параллельными сечениями, называется цилиндром, а фигуры сечения

- его основаниями. Сечение цилиндрической поверхности плоскостью, перпендикулярной её образующим, называется нормальным. В зависимости от формы нормального сечения цилиндры бывают (рисунок 4.8):

-круговые - нормальное сечение - окружность;

-эллиптические - нормальное сечение - эллипс;

-параболические - нормальное сечение - парабола;

-гиперболические - нормальное сечение - гипербола;

-общего вида - нормальное сечение - кривая случайного вида.

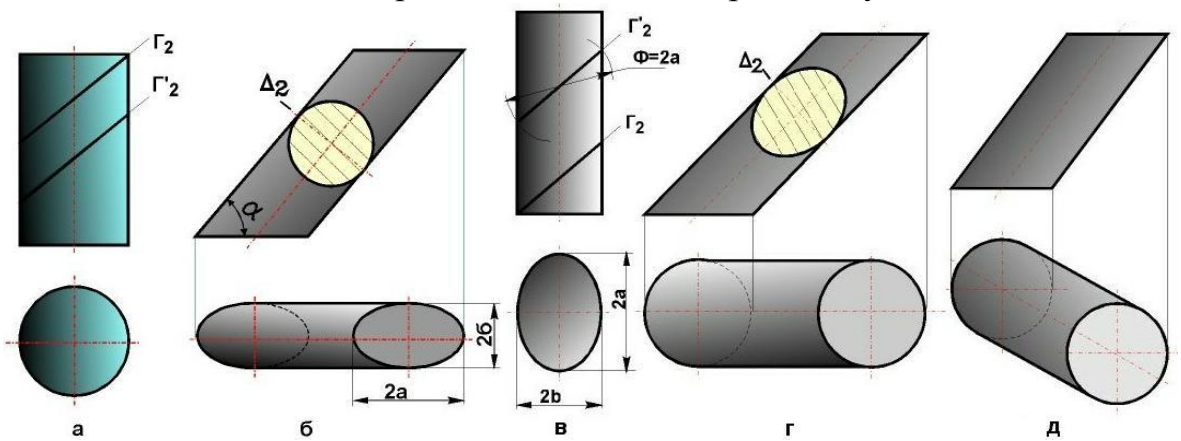


Рисунок 4.8 - Разновидности цилиндра

Если за основание цилиндра принимается его нормальное сечение (окружность), цилиндр называют прямым (рисунок 4.8а). Если за основание цилиндра принимается одно из косых сечений, цилиндр

называют наклонным (рисунок 4.8б, г, д). Наклонные сечения прямого кругового цилиндра являются эллипсами (см. рисунок 4.8а). Наклонные сечения прямого эллиптического цилиндра в общем случае - эллипсы (см. рисунок 4.8б). Однако его всегда можно пересечь плоскостью, наклонной к его образующим, таким образом, что в сечении получится окружность.

Коническая поверхность образуется движением прямой линии, скользящей по некоторой неподвижной замкнутой или незамкнутой кривой и проходящей во всех своих положениях через неподвижную точку (рисунок 4.9).

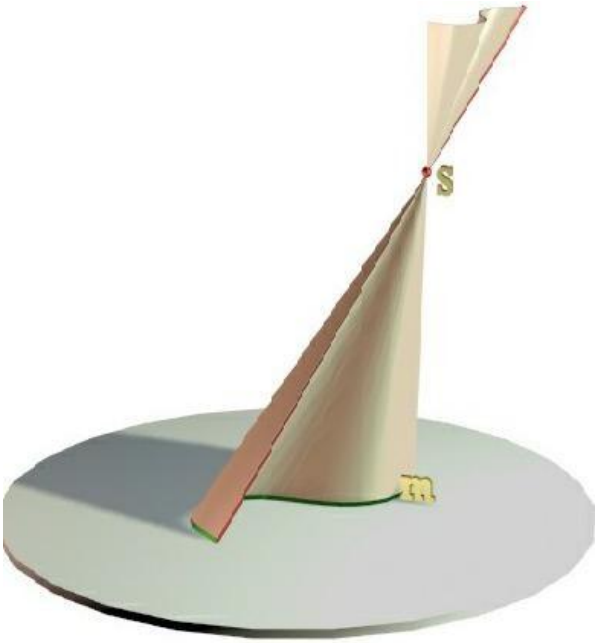


Рисунок 4.9 - Формирование конической поверхности

Неподвижная кривая **m**, по которой скользит образующая **l**, называется направляющей (см. рисунок 4.5). Если направляющая линия является кривой второго порядка, то и коническая поверхность будет второго порядка. Неподвижная точка S, делящая поверхность на две бесконечные полы, называется вершиной. Множество прямолинейных образующих представляет собой непрерывный каркас конической поверхности. Через каждую точку поверхности проходит одна прямолинейная образующая (исключением является только вершина S, которая называется "особой точкой поверхности"). Геометрическая часть определителя конической поверхности состоит из направляющей кривой m и вершины S. Алгоритмическая часть определителя состоит из указания

о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, проходящая через вершину S и пересекающая кривую m. Часть замкнутой конической поверхности, ограниченная вершиной и какой-либо плоскостью, пересекающей все её образующие, называется конусом. Фигура сечения конической поверхности этой плоскостью называется основанием конуса. Сечение конической поверхности плоскостью, перпендикулярной её оси, называется нормальным. Осью конической поверхности называется линия пересечения её плоскостей симметрии. Следовательно, не все конические поверхности имеют ось, а только те, которые имеют не меньше двух плоскостей симметрии. Конические поверхности, не имеющие оси (а, следовательно, и нормального сечения), называются коническими поверхностями общего вида.

Конические поверхности, имеющие ось, в зависимости от вида нормального сечения бывают (рисунок 4.10):

-круговые - нормальное сечение - окружность;

-эллиптические - нормальное сечение - эллипс;

-другие.

Если за основание конуса принимается фигура его нормального сечения, конус называют прямым, если иное сечение - наклонным. Прямой круговой конус изображен на рисунке 4.10а, наклонный круговой конус - на рисунке 4.10б. Основанием такого конуса может быть только эллипс, ось его не проходит через центр основания. Прямой эллиптический конус показан на рисунке 4.10в. Эллиптический конус (так же как и эллиптический цилиндр) имеет две системы круговых сечений. Если принять одну из них за основание конуса, получим наклонный эллиптический конус с круговым основанием (рисунок 4.10г). Ось наклонного конуса не проходит через центр основания.

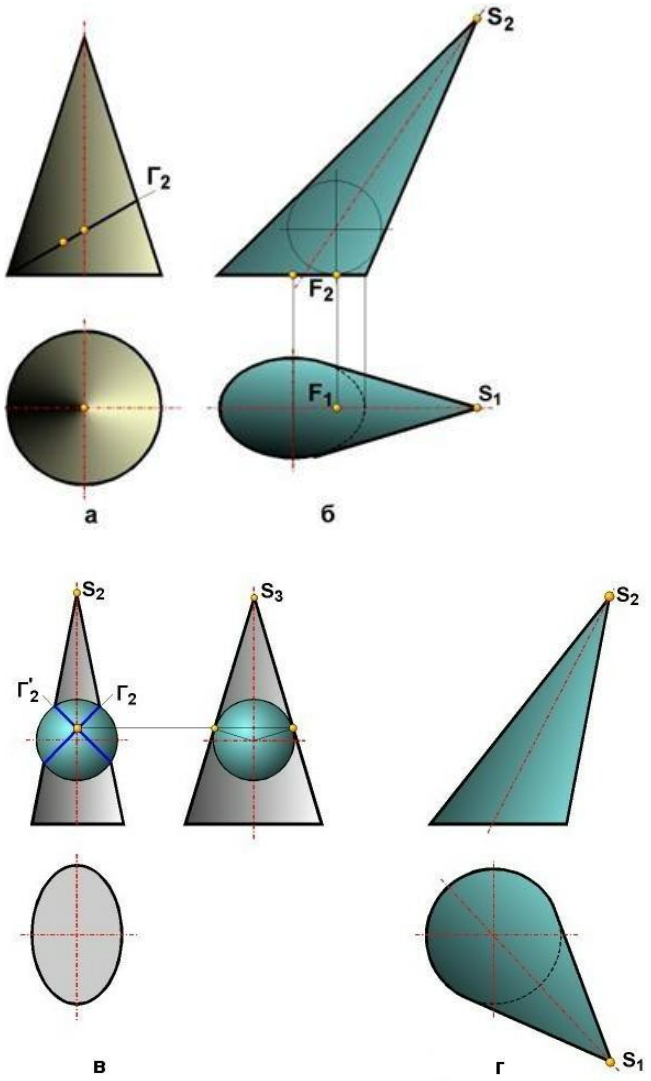


Рисунок 4.10 - Разновидности конуса

Заметим, что у всех развертывающихся линейчатых поверхностей две смежные образующие либо пересекаются (торс, коническая поверхность), либо параллельны (цилиндрическая поверхность).

Неразвёртывающиеся (косые) линейчатые поверхности в общем случае образуются движением прямолинейной образующей по трем направляющим линиям, которые однозначно задают закон её перемещения (рисунок 4.11). Множество возможных положений прямой, которая в каждый момент времени пересекает три скрещивающиеся прямые образует однополостный гиперболоид.

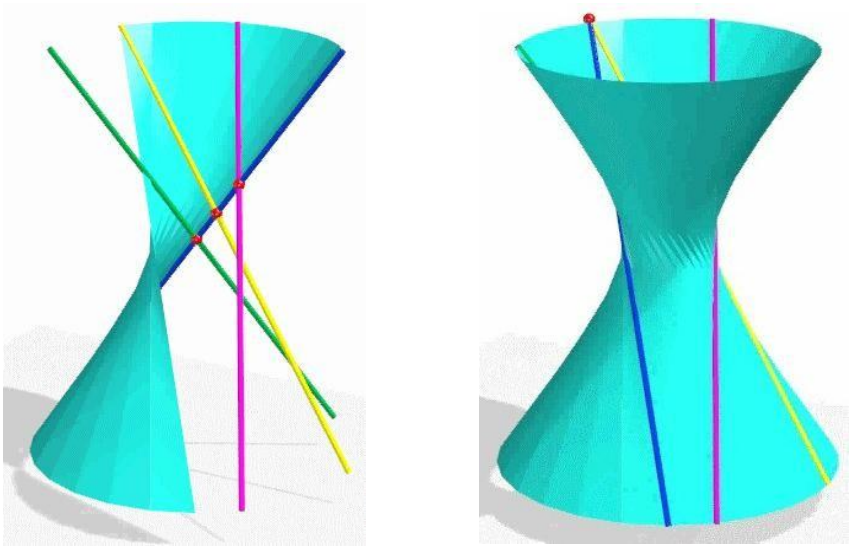


Рисунок 4.11 - Однополостный гиперболоид

Направляющие линии могут быть прямыми и кривыми. В общем случае линейчатая поверхность может быть построена из множества образующих прямых, пересекающих три заданные пространственные кривые (рисунок 4.12).

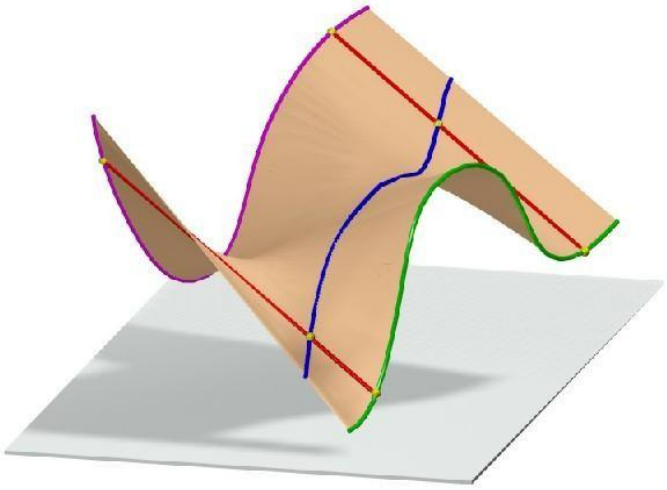


Рисунок 4.12 - Формирование косой поверхности

Разновидностями косых поверхностей являются линейчатые поверхности с направляющей плоскостью и частные их виды - линейчатые поверхности с плоскостью параллелизма (поверхности Каталана). В первом случае поверхность однозначно задается двумя направляющими линиями и направляющей плоскостью, которая заменяет третью направляющую линию. Образующая прямая скользит по двум направляющим и сохраняет постоянный угол с некоторой плоскостью ,

которая называется направляющей. В частном случае, если угол равен нулю, образующая прямая будет параллельна направляющей плоскости, которая в этом случае называется плоскостью параллелизма.

Поверхности с направляющей плоскостью (0) называются косыми цилиндроидами, если обе направляющие являются кривыми линиями; косыми коноидами - если одна из направляющих - прямая линия; дважды косой плоскостью, если направляющие - скрещивающиеся прямые.

На рисунке 4.13 показан дважды косой цилиндроид, как линейчатая поверхность с тремя направляющими, из которых две - пространственные кривые и одна прямая.

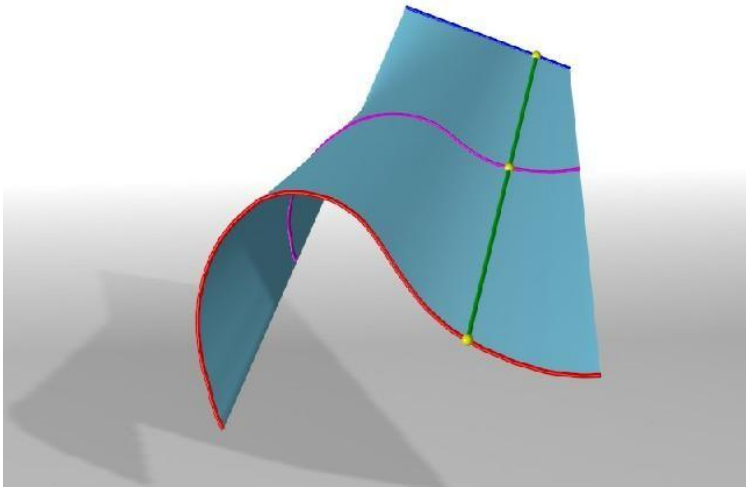


Рисунок 4.13 - Дважды косой цилиндроид

На рисунке 4.14 показан дважды косой коноид, образованный перемещением образующей прямой по трем направляющим, из которых две - прямые. Показано построение одной образующей, как результата пересечения вспомогательной плоскости, проходящей через одну из прямолинейных направляющих, с двумя другими направляющими.

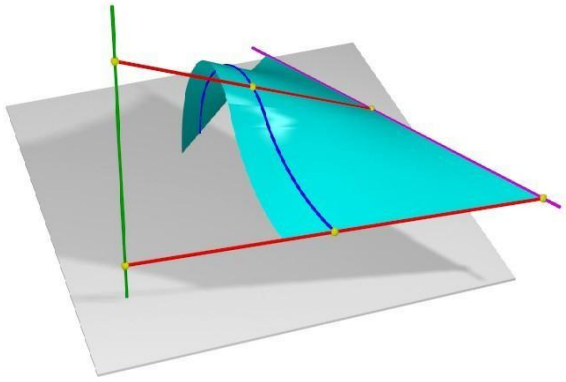


Рисунок 4.14 - Дважды косой коноид

Поверхности с плоскостью параллелизма в аналогичных случаях соответственно называются прямыми цилиндроидами, прямыми коноидами и косой плоскостью.

Линейчатые поверхности с плоскостью параллелизма (поверхности Каталана)

Прямой цилиндроид. Прямым цилиндроидом называется поверхность, образованная движением прямой линии, скользящей по двум криволинейным направляющим, не принадлежащим одной плоскости, и остающейся во всех своих положениях параллельной некоторой заданной плоскости. Эта плоскость называется плоскостью параллелизма.

Через каждую точку поверхности проходит одна образующая. Геометрическая часть определителя цилиндроида состоит из двух направляющих кривых линий (m и n) и плоскости параллелизма (Σ). Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая направляющие кривые и параллельная плоскости параллелизма.

Прямой коноид. Прямым коноидом называется поверхность, образованная движением прямой линии, скользящей по двум направляющим, одна из которых - кривая, а вторая - прямая, и остающейся во всех своих положениях параллельной некоторой плоскости параллелизма. Коноид, направляющими которого являются кривая и прямая, а плоскостью параллелизма - плоскость, изображен на рисунке 4.15.

Геометрическая часть определителя коноида состоит из двух направляющих линий (прямой и кривой) и плоскости параллелизма. Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая направляющие линии и параллельная плоскости параллелизма.

Косая плоскость. Косой плоскостью называется поверхность, образованная движением прямой линии, скользящей по двум скрещивающимся прямым и остающейся во всех своих положениях параллельной некоторой плоскости параллелизма.

Косая плоскость имеет два семейства прямолинейных образующих и две плоскости параллелизма. Образующие одного семейства -

скрещивающиеся прямые, каждая образующая

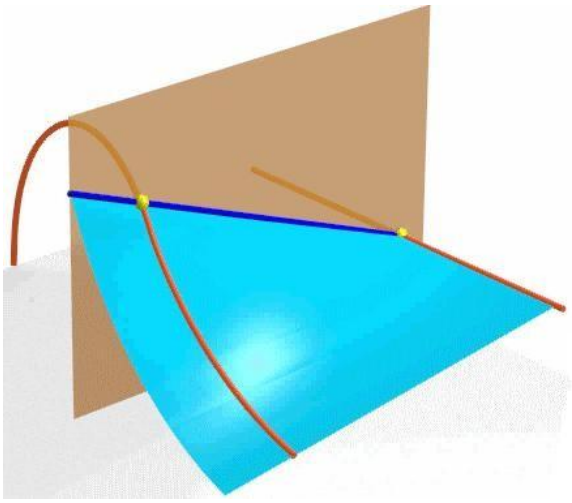


Рисунок 4.15 - Прямой коноид

одного семейства пересекает все образующие второго. Поэтому через каждую точку поверхности проходят две прямолинейные образующие разных семейств (рисунок 4.16).

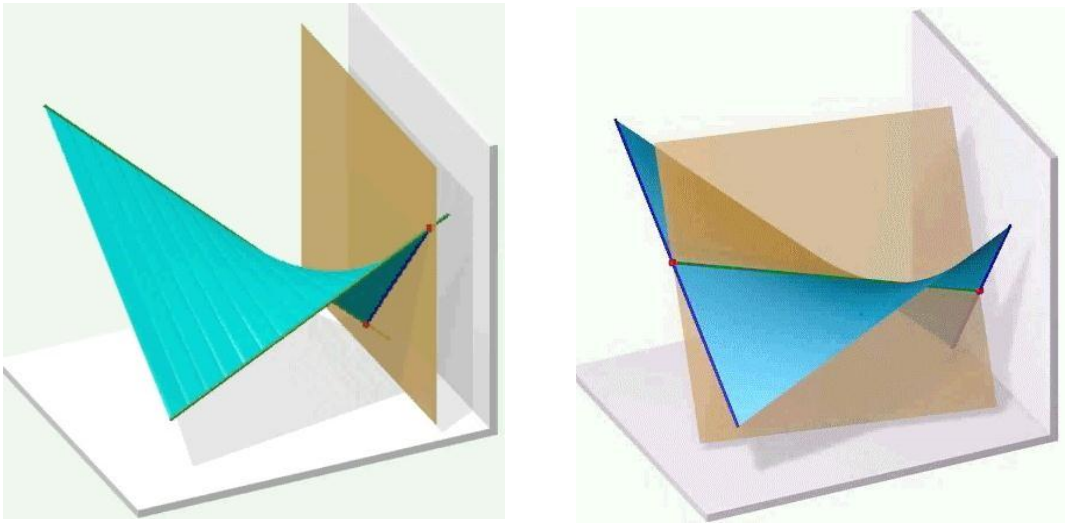
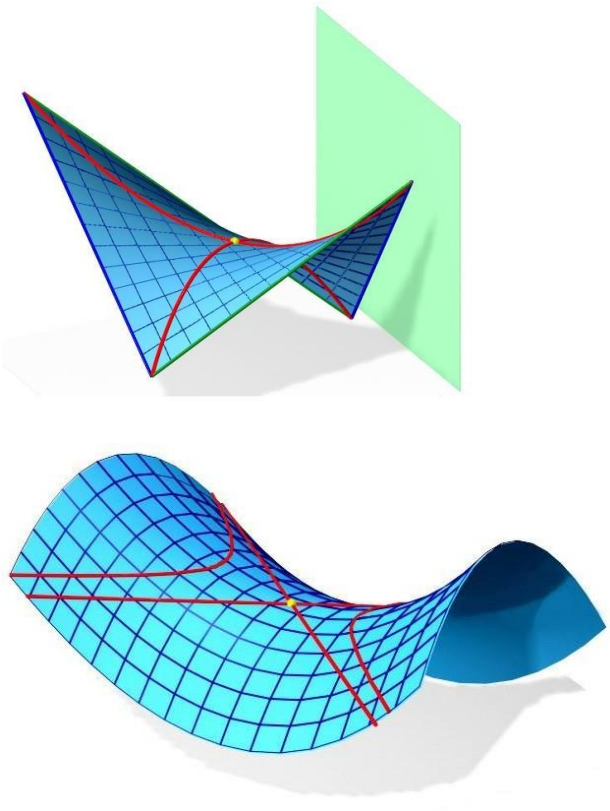


Рисунок 4.16 - Косая плоскость

Косую плоскость называют также гиперболическим параболоидом, так как при пересечении её соответствующими плоскостями в сечении можно получить параболы и гиперболы (рисунок 4.17а).



а б

Рисунок 4.17 - Гиперболический параболоид и поверхность Каталана

Геометрическая часть определителя косой плоскости состоит из направляющих прямых и плоскости параллелизма. Алгоритмическая часть определителя состоит из указания о том, что любая образующая поверхности может быть построена как прямая, пересекающая направляющие прямые и параллельная плоскости параллелизма.

Косая плоскость может быть получена как поверхность Каталана путем плоскопараллельного перемещения одной из парабол, как образующей, по второй параболе, как направляющей. Результат этого кинематического варианта формирования косой плоскости показан на рисунке 4.17б. На рисунке 4.17б также показан пример гиперболического сечения рассматриваемой поверхности и его вырожденный случай - две прямые, проходящие через "седловую" точку.

Винтовые поверхности

Поверхность, образованная винтовым движением прямой линии, называется линейчатой винтовой поверхностью - геликоидом (винтовое движение характеризуется вращением вокруг некоторой оси i и

поступательным перемещением, параллельным этой оси).

Прямой геликоид. Если в качестве кривой направляющей коноида взять цилиндрическую винтовую линию, в качестве прямой направляющей - ось винтовой линии, а за плоскость параллелизма принять плоскость, перпендикулярную оси винтовой линии, то поверхность, образованная при этих условиях, называется винтовым коноидом или прямым геликоидом (рисунок 4.18).

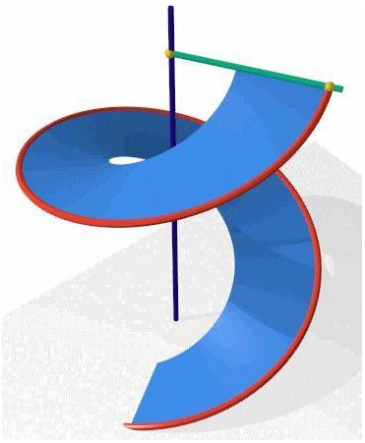


Рисунок 4.18 - Винтовой коноид (прямой геликоид)

На рисунке 4.19 приведен пример прямого открытого геликоида, имеющего конечную толщину поверхности.

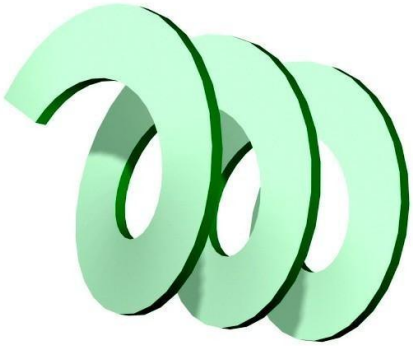


Рисунок 4.19 - Прямой открытый геликоид

Поверхности вращения

Если перемещение образующей линии представляет собой вращение вокруг некоторой неподвижной прямой (оси), то образованная в этом случае поверхность называется поверхностью вращения (рисунок 4.20).

Образующая линия может быть плоской или пространственной кривой, а также прямой. Каждая точка образующей линии при вращении вокруг оси описывает окружность, которая располагается в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Эти окружности называются

параллелями. Следовательно, плоскости, перпендикулярные оси, пересекают поверхность вращения по параллелям. Линия пересечения поверхности вращения плоскостью, проходящей через ось, называется меридианом. Все меридианы поверхности вращения конгруэнтны. Множество всех параллелей или меридианов представляет собой непрерывный каркас поверхности вращения. Через каждую точку поверхности проходит одна параллель и один меридиан.

Рисунок 4.20 - Поверхность вращения

Геометрическая часть определителя поверхности вращения состоит из оси вращения i и образующей линии l. Алгоритмическая часть определителя поверхности вращения состоит из операции вращения образующей l вокруг оси i и построения каркаса параллелей необходимой плотности.

При проектировании различных инженерных сооружений, машин и механизмов наибольшее распространение получили поверхности, образующиеся вращением прямой линии и кривых второго порядка.

Поверхности, образуемые вращением прямой (линейчатые поверхности вращения)

(рисунок 4.21).

Вращением прямой линии образуются:

-цилиндр вращения, если прямая l параллельна оси i;
-конус вращения, если прямая l пересекает ось i;

-однополостный гиперболоид вращения, если прямая l (BC) скрещивается с осью i.

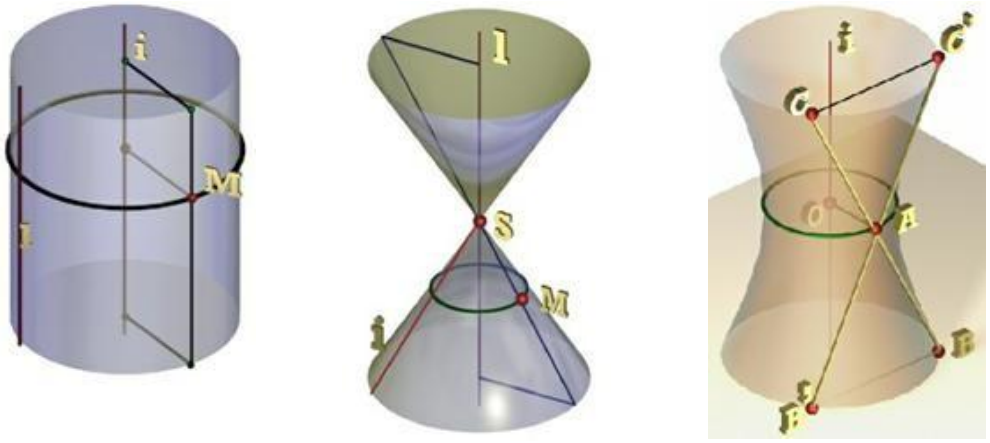


Рисунок 4.21 - Линейчатые поверхности вращения

Поверхность однополостного гиперболоида имеет две образующие линии l (BC) и l' (B'C'), наклоненные в разные стороны и пересекающиеся в точке (A), принадлежащей наименьшей параллели. Отрезок OA является кратчайшим расстоянием между образующей и осью. Таким образом, на поверхности однополостного гиперболоида располагаются два семейства прямолинейных образующих. Все образующие одного семейства - скрещивающиеся прямые. Каждая образующая одного семейства пересекает все образующие другого. Через каждую точку поверхности проходят две образующие разных семейств. Меридианом поверхности является гипербола.

Все рассмотренные линейчатые поверхности вращения являются поверхностями второго порядка.

Поверхности, образуемые вращением кривых второго порядка вокруг их осей.

Сфера образуется вращением окружности вокруг её диаметра.
Эллипсоид вращения образуется вращением эллипса вокруг большой или малой оси.

Параболоид вращения образуется вращением параболы вокруг её оси.

Однополостный гиперболоид вращения образуется вращением гиперболы вокруг её мнимой оси. Эта поверхность образуется также вращением прямой.

Двуполостный гиперболоид вращения образуется вращением гиперболы вокруг её действительной оси.

При вращении асимптот гиперболы образуется конус вращения, который называется асимптотическим по отношению к поверхности гиперболоида.

Все рассмотренные поверхности вращения являются поверхностями второго порядка.

Поверхности, образуемые вращением кривых второго порядка вокруг оси, не являющейся осью кривой, но расположенной в её плоскости. Существует теорема: "При вращении плоской или пространственной алгебраической кривой n-го порядка вокруг произвольной оси образуется алгебраическая поверхность вращения, имеющая в общем случае порядок 2n". Из этой теоремы следует, что при вращении кривой второго порядка вокруг оси, не являющейся осью кривой, но расположенной в её плоскости, образуется поверхность четвертого порядка. Наиболее распространенной поверхностью четвертого порядка является тор (рисунок 4.22).

Рисунок 4.22 - Тор

Тором называется поверхность, образованная вращением окружности вокруг оси, принадлежащей плоскости окружности, но не проходящей через её центр. При этом ось вращения может пересекать окружность, касаться её и располагаться вне окружности. В первых двух случаях тор называется закрытым, в последнем - открытым или кольцом.

Каналовые и циклические поверхности

Каналовой называют поверхность, образованную непрерывным каркасом замкнутых плоских сечений, определенным образом ориентированных в пространстве (рисунок 4.23). Площади этих сечений могут оставаться постоянными или монотонно изменяться в процессе перехода от одного сечения к другому.

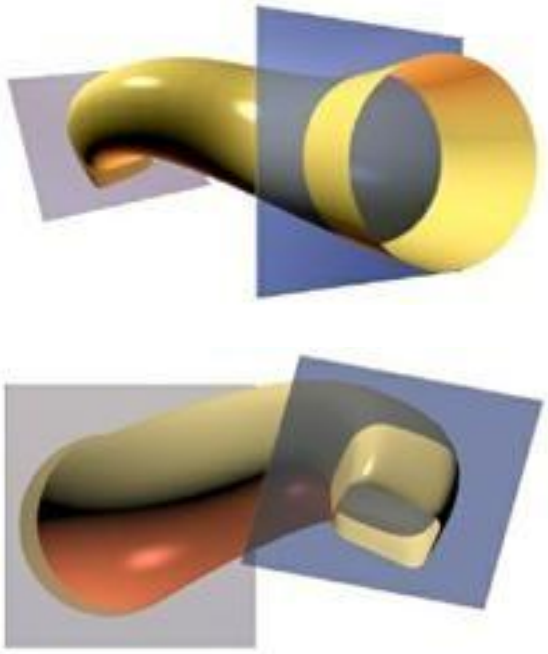


Рисунок 4.23 - Каналовые поверхности

В инженерной практике наибольшее распространение получили два способа ориентирования плоскостей образующих:

-параллельно какой-либо плоскости- каналовые поверхности с плоскостью параллелизма;

-перпендикулярно к направляющей линии - прямые каналовые поверхности.

Каналовая поверхность может быть использована для создания переходных участков между двумя поверхностями типа трубопроводов, имеющих:

-различную форму, но одинаковую площадь нормального сечения;

-одинаковую форму, но различные площади сечения;

-различную форму и различные площади поперечных сечений.

Поверхность Эшера - это каналовая поверхность, направляющей

которой является пространственный трехлистник (рисунок 4.24). Последний можно представить как нить, намотанную по поверхности тора.

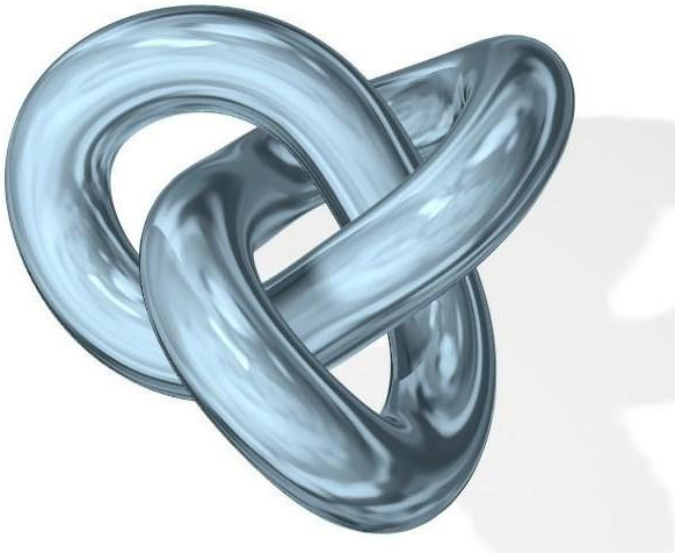


Рисунок 4.24 - Поверхность Эшера

Циклическую поверхность (рисунок 4.25) можно рассматривать как частный случай каналовой поверхности. Она образуется с помощью окружности, центр которой перемещается по криволинейной направляющей. В процессе движения радиус окружности монотонно меняется.

Рисунок 4.25 - Циклическая поверхность

Трубчатая поверхность (рисунок 4.26) относится к группе нелинейчатых поверхностей с образующей постоянного вида и является частным случаем циклической и каналовой поверхностей. Она обладает свойствами, присущими этим видам поверхностей. У циклической

поверхности она позаимствовала форму образующей, а у каналовой - закон движения этой образующей.

Кинематический метод построения поверхностей, в частности, каналовых поверхностей представлен на рисунке 4.27.

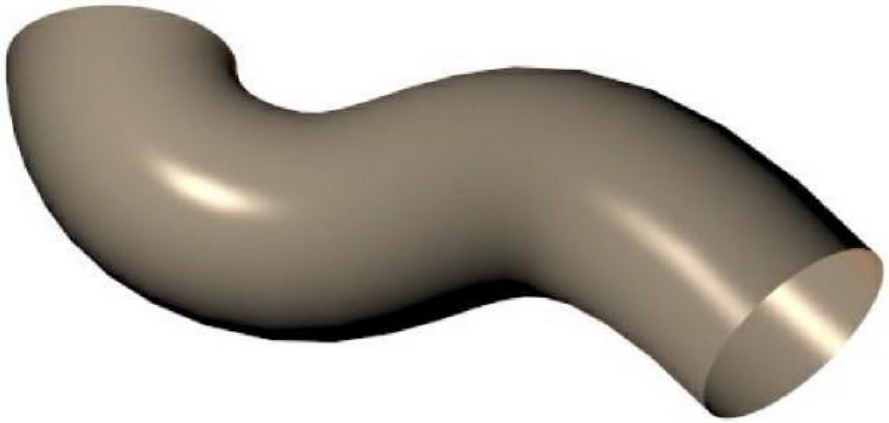


Рисунок 4.26 - Трубчатая поверхность

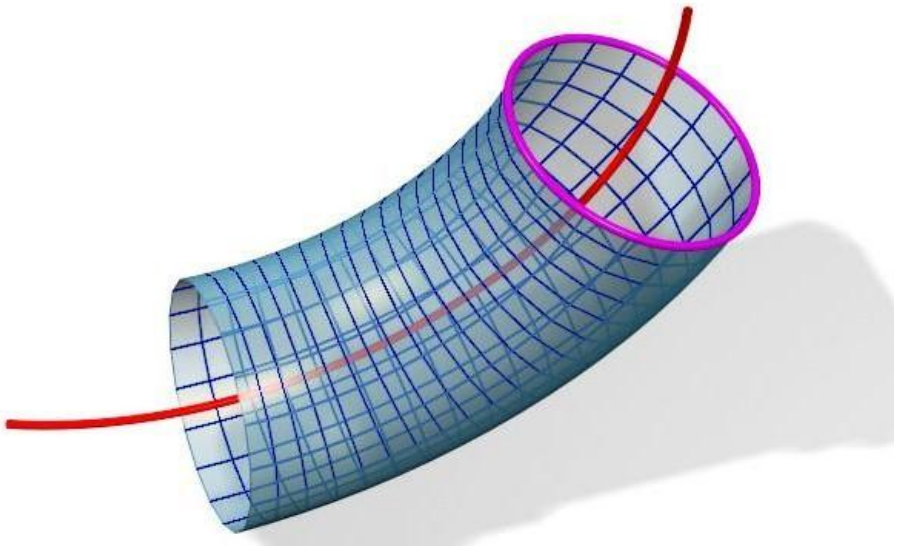


Рисунок 4.27 - Кинематический метод образования поверхности

Развёртки

Поверхность называется развертывающейся, если она путем изгибания может быть совмещена с плоскостью без образования складок и разрывов. При этом исходят из представления поверхности как гибкой, но нерастяжимой и несжимаемой пленки. Свойством развертываемости обладают многогранные поверхности и кривые линейчатые поверхности с ребром возврата: торсы, конические и цилиндрические. Линейчатые косые и нелинейчатые поверхности этим свойством не обладают.

Существуют различные способы построения их условных разверток при помощи аппроксимации.

Плоская фигура, полученная в результате совмещения поверхности с плоскостью, называется разверткой. Между поверхностью и её разверткой существует взаимно- однозначное точечное соответствие (точке А на поверхности соответствует точка А' на развёртке, и наоборот), обладающее следующими свойствами:

-длина участка АВ линии l на поверхности равна длине участка А'В' соответствующей ей линии l' на развертке;

α -угол между кривыми m и n на поверхности равен углу α' между соответствующими им кривыми m' и n' на развертке (углом между кривыми называется угол между касательными к ним в точке пересечения);

-площадь отсека F поверхности равна площади соответствующего ему отсека F' развертки.

В дифференциальной геометрии доказывается, что второе и третье свойства являются следствием первого. Первое свойство вытекает из представления поверхности как гибкой, но нерастяжимой и несжимаемой пленки.

Из рассмотренных свойств следует (рисунок 4.28):

-прямой линии (а) на поверхности соответствует прямая (а') на развертке;

-прямым, параллельным ($a \parallel b$) на поверхности, соответствуют прямые, параллельные ($a' \parallel b'$) на развертке.

Однако оба указанных свойства обратной силы не имеют, т.е. не всякой прямой на развертке соответствует прямая на поверхности. Примерами этого могут служить цилиндрическая винтовая линия, параллели поверхности вращения. Если кривой линии, принадлежащей поверхности, соответствует прямая на развертке, то эта кривая линия является геодезической для данной поверхности.

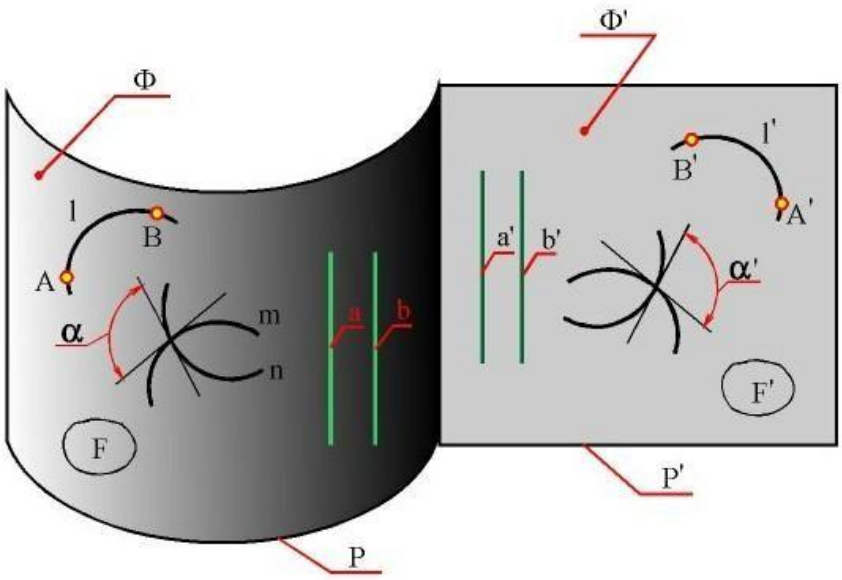


Рисунок 4.28 - Поверхность и ее развертка

Развертка многогранника представляет собой плоскую фигуру, полученную при совмещении всех его граней с плоскостью. Следовательно, построение развертки многогранника сводится к построению истинных величин его граней. Выполнение этой операции связано с определением натуральных величин его ребер, которые являются сторонами многоугольников - граней, а иногда и некоторых других элементов. Ребра многогранника условно разделяются на боковые и стороны основания.

Боковые грани любой пирамиды являются треугольниками (рисунок 4.29). Для построения развертки пирамиды необходимо предварительно определить натуральные величины боковых ребер и сторон основания.

Построение точных разверток кривых развертывающихся поверхностей традиционными методами сложно и, как правило, не вызывается практической необходимостью. Поэтому обычно строят приближенные развертки поверхностей. Основным способом построения приближенных разверток развертывающихся поверхностей (кроме цилиндрических) является способ триангуляции поверхности.

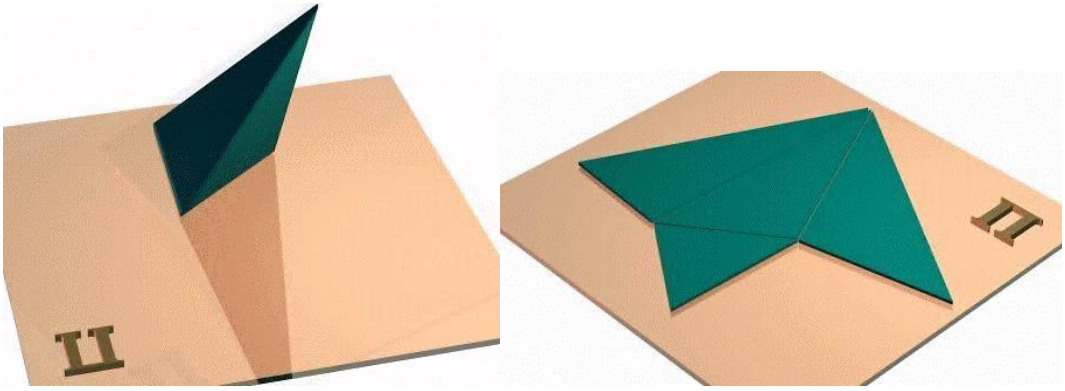


Рисунок 4.29 - Пирамида и ее развертка

Способ триангуляции состоит в том, что кривая поверхность заменяется многогранной поверхностью, состоящей из треугольных граней.

Развертка прямого кругового конуса, образующая которого равна |l| и радиус основания

|r|, имеет форму кругового сектора с радиусом равным |l| и центральным углом $\alpha = 360^{o}|r|/|l|$ (рисунок 4.30).

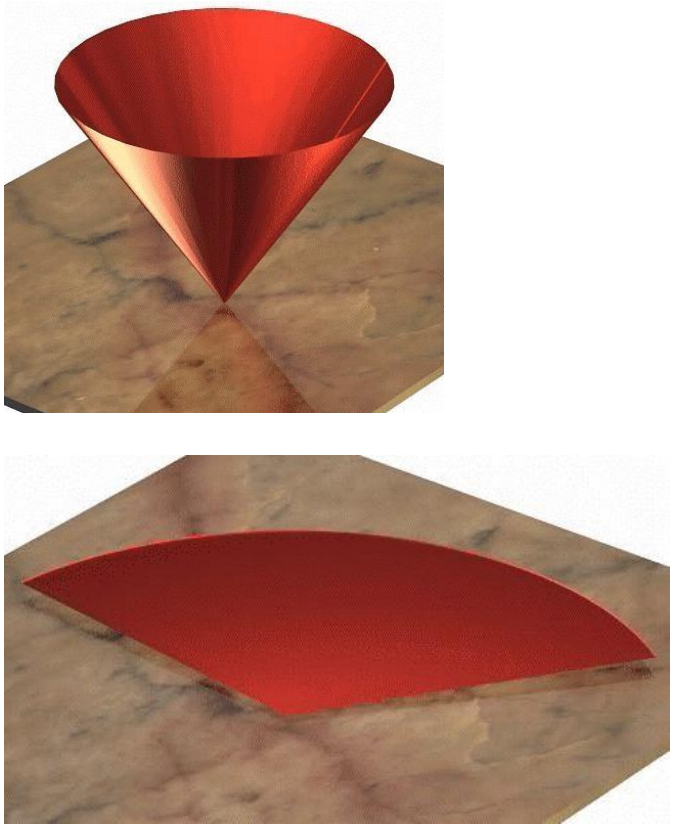


Рисунок 4.30 - Конус и его развертка

При построении разверток цилиндрических поверхностей способ триангуляции, как правило, не применяется. Цилиндрическая поверхность

заменяется (аппроксимируется) вписанной в неё призматической поверхностью, которая определяется ломаной, вписанной в направляющий кривой цилиндр, и направлением образующих. Развёртка этой п-угольной призмы и принимается за развертку цилиндра. Ломаная линия, получающаяся на развертке призмы, заменяется плавной кривой. Развертка боковой поверхности прямого кругового цилиндра представляет собой прямоугольник со сторонами, соответственно равными 2πr и h, где r - радиус окружности основания цилиндра, а h - его высота (рисунок 4.31).

Развёртку неразвертывающейся поверхности построить нельзя. Для построения условной развёртки такой поверхности применяют метод аппроксимации, который заключается в следующем. Данная неразвертываюшаяся поверхность Ф разбивается на некоторые отсеки.

Каждый из этих отсеков заменяется отсеком кривой развертывающейся поверхности. Совокупность всех отсеков развертывающихся поверхностей называется обводом Ф' поверхности Ф. С помощью триангуляции обвод Ф' заменяется обводом Ф" гранных поверхностей. Развертка гранных поверхностей, образующих обвод Ф", принимается за условную развертку поверхности Ф. При свёртывании такой развертки, кроме изгибания, необходимо произвести частичное растяжение или сжатие отдельных её участков.

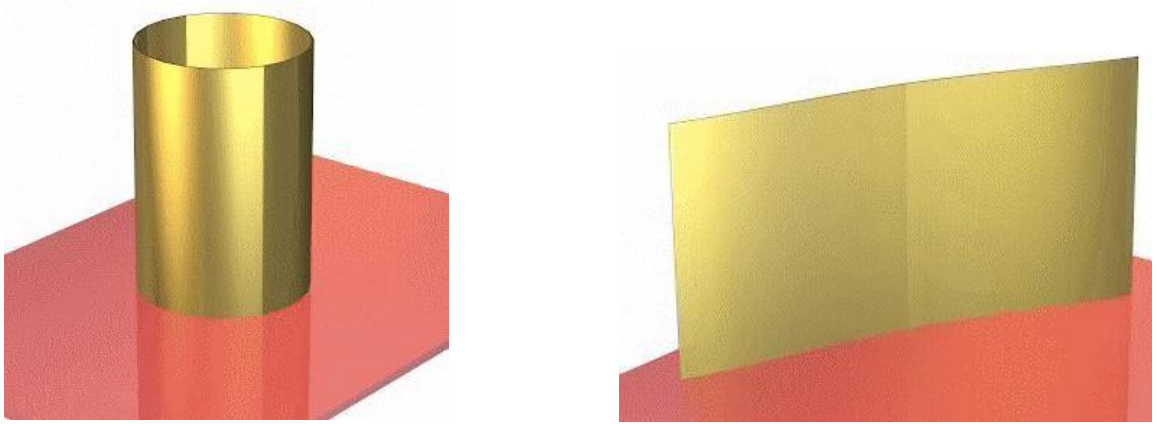


Рисунок 4.31 - Цилиндр и его развертка

Рассмотрим применение этого способа на примере построения условной развертки сферы. Разделим поверхность сферы (рисунок 4.32а) на некоторое число (например, шесть) одинаковых отсеков при помощи осевых плоскостей Σ, Δ, . Поверхность каждого отсека сферы заменим отсеком описанной цилиндрической поверхности. В результате поверхность сферы заменяется обводом (составной поверхностью), составленным из отсеков прямых

круговых цилиндров. Поверхность каждого отсека цилиндрической поверхности заменим отсеком вписанной призматической поверхности (рисунок 4.32б). В результате обвод, составленный из отсеков цилиндров, заменяется обводом, составленным из гранных поверхностей (отсеков прямых призм). Строим развертку каждого отсека призматической поверхности. На чертеже (рисунок 4.32в) показана развёртка одного из них. Затем ломаная 1-3-5-7-... заменяется плавной кривой, проходящей через те же точки (рис унок 4.32г). Полученная фигура принимается за условную развёртку отсека сферы. Полная развертка будет состоять из шести таких фигур (рисунок 4.32д).

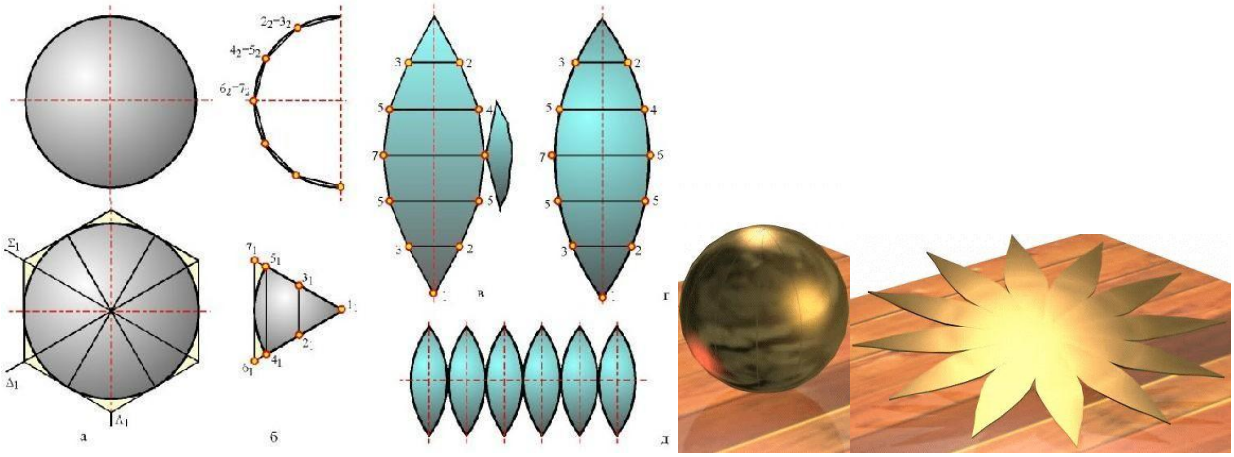


Рисунок 4.32 - Сфера и её развертка

Применяя в качестве аппроксимирующих поверхностей цилиндрические, конические или торсовые поверхности, аналогично можно строить условные развертки других неразвертывающихся поверхностей.

Лекция 16. Ядра геометрического моделирования

Рассмотрим состояние вопроса в хронологической последовательности.

Для начала определимся с понятиями. Что такое геометрическое ядро, какие функции оно реализует, насколько эти функции критичны для пользователей САПР?

Любая САПР представляет собой набор конечно-пользовательских приложений, разделяющих общую платформу, в основе которой лежит несколько базовых технологий, как правило, реализуемых в отдельных модулях, называемых технологическими компонентами. Каждая компонента отвечает за что-то свое: создание и редактирование трехмерной модели, ее визуализацию на дисплее, параметризацию, импорт/экспорт данных в определенном формате и т.д. Такие компоненты разработчики САПР либо

проектируют, кодируют и поддерживают самостоятельно, либо лицензируют их у сторонних технологических поставщиков.

Технологические компоненты - это фундамент, на котором строится здание САПР. От этого фундамента зависит все остальное - возможности различных инструментов, их быстродействие, устойчивость к ошибкам, и даже общая интеллектуальность системы. Заложив в фундамент определенную компоненту, разработчик понимает, что впоследствии заменить ее на другую будет довольно трудно. Часто эта задача решается разборкой старого здания и строительством нового, т.е. выпуском нового поколения (не путать с очередной версией) программного продукта.

С точки зрения программиста каждая компонента - это набор библиотек с программным интерфейсом (API), который позволяет вызывать различные функции из приложения. В случае геометрического ядра речь идет об использовании базовых типов геометрических данных (точка, прямая, кривая, поверхность) и операций с ними (трансформация, проекция, пересечение), моделировании топологии граничной модели, реализации булевых операторов и типичных команд создания и редактирования трехмерных тел и поверхностей (заметание профиля, скругление ребра), построении треугольной сетки и экспорте/импорте данных в разных форматах (родном для ядра или нейтральном IGES/STEP).

Перечисление функций ядра занимает один абзац, но их реализация растягивается на десятки и сотни человеко-лет. Дело в том, что за каждой элементарной операцией (типа пересечения двух NURBS) стоит вычислительный алгоритм, реализация и отладка которого является весьма трудоемкой задачей. А таких операций в ядре - сотни (с учетом разнообразия типов данных, с которыми приходится работать). Далеко не все САПР - разработчики готовы инвестировать в таком объеме в базовую технологию и предпочитают лицензировать готовое ядро, осуществляя компании - разработчику ежегодные платежи (часто включающие определенную сумму с каждой проданной копии конечного продукта). Важно и то, что лицензированное ядро, как правило, уже было «обкатано» в других системах, поэтому обладает богатой функциональностью и высоким уровнем надежности. Наконец, выбрав стороннее ядро, поставщик САПР сможет быстрее закончить разработку своего продукта и вывести его на рынок. Иногда это время является определяющим - если опоздать с релизом на год-другой, то рынок может оказаться занятым конкурентами. Ярчайшим примером является выпуск САПР SolidWorks, ставшей первой системой параметрического твердотельного

моделирования для платформы Windows. Этим же путем впоследствии пошли разработчики MicroStation, T-FLEX, ADEM, SpaceClaim и множества других систем.

Немало и тех, кто ставит на возможность полного контроля над исходным кодом, оперативного исправления ошибок и наращивания функционала, быстрого переноса на новые платформы и готов расплачиваться за это

собственными ресурсами. Этой трудной дорогой идут разработчики CATIA, NX, Creo Elements/Pro, Solid Edge, Autodesk Inventor, think3, КОМПАС-3D.

А началось все в далеком 1965 году, когда в компьютерной лаборатории Кембриджского университета было создано подразделение CAD Group. Эта команда ученых, возглавляемая Чарльзом Лэнгом (Charles Lang), проводила исследования в области создания программных средств, лежащих в основе систем MCAD/CAM. Вскоре к CAD Group присоединился Ян Брэйд (Ian Braid), который начал разрабатывать экспериментальную программу BUILD, систему геометрического моделирования на основе революционной для того времени технологии - граничного представления (BRep).

Здесь придется сделать небольшое отступление, чтобы рассказать об этой инновационной технологии - ведь ныне она лежит в основе большинства современных САПР. Граничные модели хранят информацию о границах объемного тела (гранях, ребрах и вершинах), что позволяет максимально точно описать деталь и рассчитать ее объемно-массовые характеристики. Для простоты манипулирования информация в граничной модели подразделяется на геометрические и топологические данные. Геометрические данные для каждой граничной сущности свои: для вершины - ее координаты, для ребра - параметрическое уравнение пространственной кривой (чаще всего - в виде NURBS - неоднородного рационального B-сплайна), для грани - параметрическое уравнение поверхности (опять же часто в виде NURBS). Топологические данные хранят информацию о смежности вершин и ребер, ребер и граней, а также о внутренних и внешних границах грани. Для удобного манипулирования топологической информацией было предложено несколько структур данных, обобщенно называемых BRep (от англ. Boundary Representation – граничное представление). Над разработкой первой в мире граничной структуры данных, которая позволяла описывать геометрию сложной формы, как раз и трудился в Кембридже Ян Брэйд.

В 1974 году ведущие участники CAD Group образуют компанию Shape Data Ltd., которая начинает разработку первого в мире коммерческого геометрического ядра ROMULUS.

Разработка ведется на языке Fortran и основывается на идеях, обкатанных в экспериментальных программах BUILD I и BUILD II. Вскоре продается первая коммерческая лицензия на ROMULUS. Покупатель - компания Hewlett-Packard - использует ее для создания своей CAD-системы ME30 (наследником которой является CoCreate OneSpace Modeler, ныне принадлежащая компании PTC и недавно переименованная в CREO Elements/Direct). В 1981 г. Shape Data становится частью компании Evans & Sutherland (одним из основателей которой был легендарный САПР-пионер Айвэн Сазерлэнд), а в 1985 году начинает разработку пакета Parasolid - прямого наследника геометрического ядра ROMULUS.

На этого наследника довольно скоро объявился серьезный претендент - компания Unigraphics, которая к тому времени осознала, что твердотельное моделирование на основе конструктивного подхода (CSG) - тупиковый путь

развития. Основной продукт Unigraphics - САПР UniSolids (ныне всем известная под именем NX и принадлежащий Siemens PLM

Software), основанный на собственном CSG-ядре PADL, требовалось перевести на граничное представление твердых тел. Взвесив все варианты, в 1988 г. Unigraphics полностью выкупила Parasolid-бизнес у Evans & Sutherland и начала инвестировать в разработку ядра. Годом позже был выпущен конечно - пользовательский пакет UG/Solids, полностью основанный на Parasolid, но лицензировать Parasolid сторонним разработчикам компания начала лишь с середины 1990-х, когда на время стала частью компании EDS.

Вскоре после начала работы над Parasolid (активно поучаствовав в составлении соответствующего ТЗ) трое ведущих сотрудников Shape Data - Ян Брэйд, Чарльз Лэнг и Алан Грэйер (Alan Grayer) - оставляют компанию и создают собственную под названием Three- Space Ltd., которая начинает разработку принципиально нового геометрического ядра - ACIS.

Разработка идет по заказу компании Spatial Technology (США), которая намеревается использовать ACIS в собственных целях. Дик Соуэр (Dick Sowar), основавший Spatial в 1986 г., сначала планировал использовать новое ядро для своей инновационной CAM-системы Strata, основанной на твердотельном моделировании, но через несколько лет понял, что бизнес по лицензированию самого ядра другим компаниям оказался более выгодным, и свернул остальные разработки. Дик вообще больше верил в перспективы компаний, поставляющих технологии, а не конечно-пользовательские продукты, поэтому инвестировал часть своих средств в проект еще одного кембриджского ученого - Джона Оуэна (John Owen), создавшего на эти деньги D-Cubed для разработки первого в мире коммерческого решателя геометрических ограничений. В дальнейшем базировавшиеся в Кембридже разработчики Three-Space (со временем поглощенной Spatial) и D-Cubed тесно сотрудничали друг с другом, что сыграло решающую роль в развитии событий вокруг ACIS в начале нового века.

Разработка ACIS с самого начала велась на C++, первая версия вышла в 1989 г. (она работала как на UNIX-платформах, так и на MS DOS), а первым покупателем снова стала HP. Вскоре лицензии на ACIS приобрели компании Control Data и Autodesk. Другими крупнейшими клиентами ACIS стали компании Bentley Systems и Intergraph.

За год до образования Spatial произошло одно знаменательное событие, которое вскоре перевернуло всю отрасль САПР: эмигрант из СССР Самуил Гейзберг основал компанию PTC (Parametric Technology Corp.) для разработки Pro/ENGINEER – первой в мире системы параметрического твердотельного моделирования на основе конструктивных элементов (использующей дерево построения для автоматической регенерации модели при внесении изменений). Pro/ENGINEER (ныне известный под именем CREO Elements/Pro) с самого начала базировался на собственном геометрическом ядре, спроектированном специально для поддержки твердотельного моделирования. Компания, впрочем, долго не решалась предложить свое ядро

другим разработчикам, сделав это только в 2001 году. В это время рынок уже принадлежал ACIS и Parasolid, поэтому GRANITE (такое название получило ядро) лицензировался в основном для обмена данными с Pro/E, а не для создания собственных систем твердотельного моделирования. Такое положение это ядро занимает и поныне.

Успех Pro/E (новообразованная компания уже через несколько лет стала лидером отрасли по объемам продаж, став первой в истории САПР - компанией, пробившей планку в $1 млрд. годового дохода) заставил всех конкурентов срочно реализовывать в своих системах аналогичный функционал. Самыми дальновидными оказались Джон Хёрштик (John Hirshtik) и Майкл Пейн (Michael Payne), которые, покинув PTC, в 1993 году создали собственную

компанию с целью разработки аналога Pro/E для платформы Windows. Стремясь ускорить разработку, они решили не разрабатывать собственное геометрическое ядро, а использовать готовое. Испробовав ACIS, разработчики остались неудовлетворенными его функционалом (многие функции, которые правильно работали в Pro/E, в ACIS давали ошибки). И, поскольку, попытки Майка договориться с руководителями PTC о лицензировании их геометрического ядра окончились неудачей (PTC прозорливо видела в будущем SolidWorks своего конкурента), а реакция Spatial на указанные ошибки в ACIS его не устроила, он решил протестировать Parasolid. В результате оказалось, что на наборе разработанных тестов Parasolid показал себя много лучше ACIS, и один из главных тендеров в мире САПР был решен в его пользу. Без сомнения, в успехе SolidWorks есть немалая заслуга разработчиков Parasolid.

Осознав, насколько выгодным может быть лицензирование своего ядра сторонним разработчикам, на рынок вышла японская компания Ricoh со своим продуктом Designbase. Ricoh использовала это ядро для дизайна своих фотоаппаратов, предъявляя высокие требования к сложности поверхностей. Designbase - первое ядро, в котором поверхности и твердые тела можно проектировать отдельно, легко переходя от одного представления к другому. Кроме того, Designbase использовало концепцию мета - моделирования, позволяющую автоматически создавать историю создания модели, и легко проводить параметрическую модификацию геометрии. В настоящее время ядро Designbase исчезло с рынка технологических компонент, но до сих пор можно встретить САПР, основанные на нем

- это система твердотельного моделирования Helix, распространяемая в Японии компанией Futjitsu, CADRA (SofTech), GMSWorks (C-Solutions) и другие.

Французской компании Dassault Systemes пришлось догонять ушедших вперед конкурентов. Будучи одним из пионеров в области трехмерного проектирования и реализовав возможности твердотельного моделирования еще в четвертой версии CATIA (выпущенной в 1993 г.), компания - как и многие другие старожилы рынка САПР - пропустила появление Windows.

Осознав, что полноценный перенос на новую платформу CATIA 4, написанной на языке Fortran и ориентированной на архитектуру UNIX, невозможен, Dassault решила создать новое поколение CATIA с нуля. Новая разработка, получившая кодовое имя CNext, в 1998 году стала известной всему миру под названием CATIA V5 (после чего потребовалось еще несколько долгих лет на доведение V5 до функционального уровня своей предшественницы). Вместо устаревшего Fortran в качестве языка программирования был выбран C++, а геометрическое ядро новой системы получило название CGM - CNext/CATIA Geometric Modeler и было написано с нуля - ни строчки кода из прежней системы в нем не было.

Выпущенная в 2008 г. PLM-платформа V6 базируется на том же геометрическом ядре CGM. Все эти годы ядро непрерывно совершенствовалось и развивалось. С самого начала CGM позволяло моделировать геометрию, состоящую из многообразий разной размерности: нулевых (точки), 1-manifold (криволинейные каркасы), 2-manifold (поверхности) и 3-manifold (твердые тела), произвольно смешивая их в рамках одной модели.

Сделав ставку на новое современное ядро, Dassault выиграла - CATIA V5 и смежные PLM-продукты вывели компанию в абсолютные лидеры мирового рынка САПР (как когда-то PTC). Однако, за это пришлось заплатить высокую цену: данные, созданные в CATIA 4 (основанной на старом ядре), нельзя полноценно использовать в V5. Точнее расплатиться

пришлось крупнейшему клиенту Dassault – концерну Airbus, который, проектируя самый большой пассажирский самолет A380 одновременно в четвертой и пятой версиях CATIA, сорвал все сроки с вводом его в эксплуатацию и понес убытки в размере $6 млрд. Причина – ошибки при переносе геометрических моделей между разноядерными САПР.

Никто и не думал, что геометрическое ядро CATIA (святая святых компании) когда- нибудь будет доступно для лицензирования. Но летом 2010 г. компания всех удивила, начав через свою дочернюю структуру Spatial предлагать CGM всем желающим (конечно, для этого пришлось изменить расшифровку первой буквы: “C” теперь не “CATIA”, а “Convergence”). Таким образом, последнее ядро из «большой четверки» (Parasolid, ACIS, GRANITE, CGM) стало доступно для лицензирования.

Впрочем, CGM было не единственным французским ядром твердотельного моделирования. Еще в начале 1990-х другая компания из этой страны - Matra Datavision - начала работу над средой CAS.CADE, набором компонент, лежащих в основе САПР. Первым основанным на нем продуктом стала CAD/CAM - система EUCLID QUANTUM, выпущенная Matra в 1996 г. Впрочем, особого успеха на рынке она не снискала, а в 1999 Dassault Systemes выкупила у Matra бОльшую часть САПР-бизнеса. Так как ядро CAS.CADE осталось невостребованным (у Dassault в руках уже было собственное ядро CGM), то Matra приняла решение опубликовать его исходный код и организовать сервисную компанию для обслуживания разработчиков,

решившихся взять это ядро за основу своих продуктов. Так появился Open CASCADE.

Бизнес, основанный на открытом коде, давно доказал свою эффективность. Одно из подтверждений тому - судьба компании Open CASCADE SAS, которая, сменив несколько владельцев, по-прежнему продолжает свое существование: последний на сегодняшний день релиз ядра (6.4) датируется октябрем 2010 г.

Многие другие компании предпринимали попытки разработки геометрических ядер, но заметных результатов не достигли. Можно, например, вспомнить XOX Corporation со своим ядром Shapes (которое использовалось в первых версиях CADKEY, будучи затем заменено на ACIS). Американская компания IntegrityWare с 1996 г. разрабатывает набор библиотек для геометрических вычислений. С 1998 г. их распространением (под именем SMLib) занимается компания Solid Modeling Solutions, которая предлагает каждому купившему лицензию не только объектный, но и исходный код ядра вместе с правом модифицировать его в своих целях. А в 2004 г. IntegrityWare выпустила ядро геометрического моделирования SOLIDS++. Реализованное на языке программирования C++, ядро имеет модульную архитектуру, поддерживает в рамках одной модели топологию разной размерности, обладает настраиваемыми геометрическими допусками, позволяет выполнять триангуляцию модели, реализует скругления вершин со сложной топологией, может моделировать поверхности с контролем кривизны G2 и G3. Впрочем, о коммерческих САПР, созданных на этом ядре, пока ничего не известно.

Глядя на успехи англичан, французов, американцев и японцев, отечественные разработчики не могли сидеть, сложа руки. Движение возглавила компания АСКОН, выпустившая в 2000 г. первую версию КОМПАС-3D, полностью основанную на собственном геометрическом ядре. В 2002 почин поддержали в НТЦ АПМ, где создали собственное ядро APM Engine, используемое в системе твердотельного и поверхностного моделирования APM

Studio. Впрочем, оба этих ядра не предлагаются для лицензирования сторонним разработчикам.

С 2007 г. Правительство РФ осуществляет федеральную целевую программу

«Национальная технологическая база» с целью создания новых передовых технологий и оборудования, внедрения разработанных технологий в производство, коммерциализации новых технологий, создания перспективного научно-технологического задела для разработки перспективной наукоемкой продукции, решения проблем улучшения экологической ситуации в стране.

В рамках этой программы Министерство промышленности и торговли РФ объявило тендер на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы

«Создание отечественного лицензируемого программно-математического ядра трехмерного моделирования как базы для компьютерных систем автоматизированного проектирования сложной машиностроительной продукции». Такое ядро, будучи положено в основу нового поколения компьютерных систем проектирования, инженерного анализа, подготовки производства, создания технической документации, будет способствовать созданию российской промышленностью инновационных изделий, конкурентоспособных на мировом рынке, став частью национальной технологической базы.

Победителем тендера стало федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», под руководством которого группа организаций в рамках проекта "Гербарий" (с 2011 по 2013 г.г.) разработала ядро RGK.

Конкуренция на рынке геометрических ядер между ACIS, Parasolid и Designbase, сложившаяся во второй половине 1990-х годов, привела к тому, что многие поставщики САПР получили возможность выбора: если они были не удовлетворены качеством используемого ядра или уровнем поддержки со стороны компании-разработчика, то могли сменить поставщика. Этой возможностью воспользовались Bentley Systems и Intergraph, переведя свои САПР - MicroStation и Solid Edge соответственно - с ACIS на Parasolid.

Компания 3D/EYE, разработчик IRONCAD, пошла еще дальше: встроив в 1995 г. в свою систему ядро ACIS, в 1999 она добавила туда Parasolid, разрешив пользователям свободно переключаться между ними. Система до сих пор сохраняет такую архитектуру, что помогает пользователям сократить затраты при работе с импортированной геометрией (созданной в другой САПР). Разные геометрические ядра обычно по-разному трактуют геометрические допуски, с разной точностью вычисляют пересечения кривых и поверхностей, в результате чего вполне корректная модель при переносе ее в систему, основанную на другом ядре, становится неработоспособной из-за многочисленных ошибок, которые приходится исправлять в полуавтоматическом режиме.

Компания Dassault пошла дальше. Приобретя в 2000 г. компанию Spatial, французы получили в свое распоряжение ядро ACIS – в дополнение к CGM, лежащему в основе CATIA, и лицензированному Parasolid, работающему в составе SolidWorks. Но руководители Dassault и не думали использовать ACIS в своих САПР. Вместо этого они поставили руководить Spatial Майкла Пейна, основателя SolidWorks, которому поручили провести переговоры с Autodesk – основным лицензиатом ACIS.

Изучив дела Spatial, Майк быстро понял, почему от этого ядра отказались Bentley и Intergraph (продукт был ненадежным, по возможностям он был полуфабрикатом, служба поддержки клиентов не существовала, цены все были разными в зависимости от того, сколько кто-то будет в состоянии заплатить в конце квартала, была нулевая система проверки качества).

На встрече с руководителем Autodesk Кэрол Барц Майк пообещал исправить ситуацию. Впрочем, в самой Autodesk тогда посчитали, что Майк, напротив, шантажирует их, угрожая вовсе прекратить развитие ядра, если Autodesk не примет предложение Dassault стать реселлером SolidWorks, убрав с рынка свой конкурирующий продукт Inventor. В результате Autodesk воспользовалась условием лицензионного соглашения и после единовременной выплаты $6.5 млн. получила в свое распоряжение исходный код ACIS. Взяв его за основу, компания приступила к разработке собственного геометрического ядра, получившего название Shape Manager. Ответ на вопрос, где взять квалифицированных программистов для этой специфической работы, долго искать не пришлось - конечно в Кембридже, где же еще! Заключив соглашение с D-Cubed, Autodesk отдала эту разработку на аутсорсинг фактически авторам ACIS (разобраться в генетических связях Spatial и D-Cubed практически невозможно; можно лишь сказать, что компании тесно сотрудничали с 1986 г., а их ключевые сотрудники работали рука об руку в той самой CAD-лаборатории Кембриджского университета). Spatial подала на Autodesk в суд, но проиграла. Таким образом, кембриджское дерево принесло свой пятый плод (BUILD, ROMULUS, Parasolid, ACIS, Shape Manager).

Ядерные войны на этом закончились. А ядро ACIS, кстати, вполне успешно развивается в рамках Dassault. Регулярно выходят новые релизы, наращивается функционал по поддержке прямого редактирования геометрии. Неутомимый Майк Пейн, покинув Dassault, основал SpaceClaim, построив систему в этот раз не на Parasolid, а на ACIS. И благодаря личному знакомству разработчиков двух компаний, у них получилась отличная совместная работа, результатом которой теперь могут воспользоваться все клиенты Spatial. Не случайно, большинство систем прямого моделирования (SpaceClaim, KeyCreator, IRONCAD и частично Creo Elements/Direct) построены на ACIS.

Подведем итог. В таблице 1 представлены упомянутые геометрические ядра, включая те, которые никогда не были доступны для лицензирования сторонним разработчикам.

Таблица 1

Программные продукты и ядра геометрического моделирования

Продукт	**Производитель**	**Область**	**3D-ядро**
4MCAD IntelliCAD	4M S.A., Греция	CAD, AEC	Open CASCADE Technology
Adams	MSC Software, США	CAE	Parasolid
ADEM	Группа компаний ADEM, Россия-Израиль-Германия	CAD, CAM, CAPP	ACIS

ADINA Modeler	ADINA R&D Inc., США	CAE	Parasolid и Open CASCADE Technology
Alibre Design	3D Systems, США	MCAD	ACIS
Allplan	Nemetschek AG, Германия	AEC/BIM	SMLib
AMPSolid	AMPS Technologies, США	CAE	ACIS
ANSYS	ANSYS Inc., США	CAE	ACIS и Parasolid
APM Studio	НТЦ АПМ, Россия	MCAD	Собственное (APM Engine)
ArchiCAD	Graphisoft, Венгрия	AEC/BIM	Собственное
ARES	Graebert, Германия	CAD	ACIS
Ashlar-Vellum Cobalt, Xenon, Argon	Ashlar-Vellum, США	MCAD	ACIS
AutoCAD	Autodesk, США	CAD, AEC, GIS	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
Autodesk Inventor	Autodesk, США	MCAD	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
Autodesk Moldflow	Autodesk, США	CAE	Parasolid
Autodesk Revit Architecture	Autodesk, США	AEC/BIM	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
bonzai3d	AutoDesSys, США	CAD	ACIS в комбинации с собственным ядром
Bricscad	Bricsys NV, Бельгия	AEC, MCAD	ACIS
BtoCAD	YuanFang Software Co., Ltd., Китай	CAD	ACIS
CADopia	CADopia Inc., США	CAD	ACIS
CATIA	Dassault Systemes, Франция	CAD/CAM/CAE, AEC	CGM

Cimatron	Cimatron Limited, Израиль	CAM	ACIS
CollabCAD	National Informatics Centre, Индия	CAD/CAM	Open CASCADE Technology
Creo (прежнее название – Pro/Engineer)	Parametric Technology, США	MCAD	GRANITE
Creo Elements/Direct Modeling (прежнее название – CoCreate)	Parametric Technology, США	CAD	ACIS
Edgecam	Planit Software, Великобритания	CAM	Parasolid и GRANITE
ESPRIT	DP Technology Corp., США	CAM	Parasolid
form-Z	AutoDesSys, США	CAD	ACIS в комбинации с собственным ядром
FreeCAD	Открытый онлайн-проект	CAD	Open CASCADE Technology
GibbsCAM	Cimatron, Израиль	CAD/CAM	Parasolid и GRANITE
GstarCAD	Suzhou Gstarsoft Co., Ltd, Китай	CAD	ACIS
IRONCAD	IronCAD LLC, США	MCAD	ACIS и Parasolid
KeyCreator	Kubotek USA Inc., Япония-США	CAD	ACIS
КОМПАС-3D	АСКОН, Россия	MCAD, AEC	Собственное ядро (C3D)
Mastercam	CNC Software, США	CAD/CAM	ACIS
Masterwork	Tecnos G.A., Италия	CAM	Open CASCADE Technology
MicroStation	Bentley Systems, США	AEC	Parasolid (ранние версии – ACIS)
Moment of Inspiration	Triple Squid Software Design, США	CAD	SOLIDS++
NX	Siemens PLM Software, Германия	CAD/CAM/CAE	Parasolid

Patran	MSC Software, США	CAE	Parasolid
Power NURBS	Ideate Inc., США	CAD	SOLIDS++
PowerSHAPE	Delcam plc, Великобритания	CAD/CAM	Parasolid
progeCAD	progeCAD Srl Uninominale, Италия	CAD	ACIS
Radan	Planit, Великобритания	CAD/CAM	ACIS
Rhinoceros	Robert McNeel and Associates, США	CAD	SOLIDS++ (отдельные модули)
Shark LT	Encore, США	CAD	ACIS
SmartCAM	SmartCAMcnc	CAM	ACIS
Solid Edge	Siemens PLM Software, Германия	MCAD	Parasolid (ранние версии – ACIS)
SolidWorks	Dassault Systemes, Франция	MCAD	Parasolid
SpaceClaim	SpaceClaim Corp., США	MCAD	ACIS
STAR-CCM+	CD-adapco, Великобритания-США	CAE	Parasolid
StruCad	AceCad Software, Великобритания	AEC/BIM	Собственное
T-FLEX	Топ Системы, Россия	MCAD	Parasolid
ThinkDesign	Versata, США	MCAD	Собственное ядро
TopSolid	Missler Software, Франция	CAD/CAM	Parasolid
TurboCAD	IMSI/design, США	AEC, MCAD	ACIS
Vectorworks	Nemetschek, Германия	AEC	Parasolid (ранние версии - SMLib)
ViaCAD 2D/3D	Encore, США	CAD	ACIS
ZW3D (прежнее название – VX CAD/CAM)	ZWCAD Software, Китай	MCAD	Собственное ядро (VX Overdrive)
ZWCAD	ZWCAD Software, Китай	CAD	ACIS

Лекция 17. Параметрическое моделирование

Процесс проектирования и конструирования, как правило, итеративный и предполагает перебор нескольких вариантов, поэтому упрощение и автоматизация построения модели будущего изделия являются одной из важнейших задач САПР.

Одним из широко распространенных методов решения этой задачи является параметрическое проектирование (или просто параметризация), основанное на моделировании деталей и изделий с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перебрать с помощью изменения параметров или геометрических отношений различные конструктивные схемы, выбрать оптимальные решения и избежать принципиальных ошибок.

Определить цель конструирования достаточно просто, однако процесс поиска рационального решения сложен и требует гармоничного сочетания различных методов автоматизированного конструирования изделий. Параметрическое конструирование как методология автоматизированной разработки является основой для параллельного ведения проектно-конструкторских работ и позволяет уточнить конечную цель конструирования уже на ранних стадиях реализации проекта, что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства на едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация подразумевает использование различных видов взаимосвязей между компонентами модели и приложениями, которые используют данную модель.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели, в результате чего пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии средств обеспечения параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геометрией, поэтому внесение даже малейших изменений требует значительных трудовых затрат. Изменения же параметрической модели выполняются так же легко, как и изменения значения размеров на чертежах.

Параметризация - концепция, которая охватывает все методы для решения задач конструирования. Важной особенностью современной концепции параметрического конструирования является прежде всего возможность создания геометрической модели с использованием связей и правил, которые могут переопределяться и дополняться на любом этапе ее создания. Связи представляются в виде размерных, геометрических и алгебраических соотношений. Правила же определяются как условия выполнения базовой операции (например, сквозное или «глухое» отверстие).

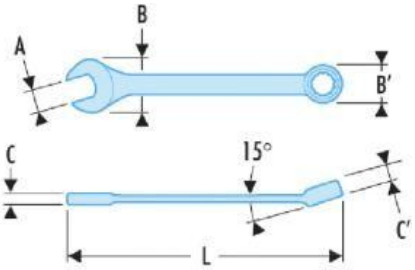
Параметрическое проектирование существенно отличается от обычного двухмерного черчения или трехмерного моделирования. В случае параметрического проектирования создаётся по сути математическая модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации и размеров деталей, их взаимного расположения в сборках и т. п.

На практике применяется достаточно много различных методов параметризации, на сегодняшний день нет однозначно превалирующего решения. Рассмотрим наиболее часто применяемые на практике методы.

Табличная параметризация

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей (рисунок 6.1). Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.



Please select one table row below:

Item code	A (")	B (mm)	B' (mm)	C (mm)	C' (mm)	L (mm)	Mass (g)
40.1/4	1/4"	15	10.4	3.8	6	113	18
40.5/16	5/16"	19.5	12.9	4.3	6	130	28
40.11/32	11/32"	21.6	14.2	4.3	6.1	137	34
40.3/8	3/8"	23.6	15.9	4.8	6.6	145	40
40.7/16	7/16"	25.6	17	5.1	7	153	53
40.1/2	1/2"	29.4	19.8	5.6	8	170	70
40.9/16	9/16"	31.5	21.2	6	8.5	178	80
40.5/8	5/8"	35.5	23.8	6.9	9.8	193	104
40.11/16	11/16"	37.5	25	7	10.3	200	120
40.3/4	3/4"	41.8	29.4	7.6	11.3	216	160
40.13/16	13/16"	44	29.4	8	11.6	224	172
40.7/8	7/8"	48	32	8.2	12.3	248	212
40.15/16	15/16"	52	34.7	8.5	12.9	268	270
40.1"	1"	54.4	36.3	8.5	13.2	270	297
40.1"1/16	1" 1/16	59	39	8.8	14	294	355
40.1"1/8	1" 1/8	61.6	41	9	14.4	305	394
40.1"1/4	1" 1/4	68.8	46	10.1	15	356	575

Рисунок 6.1 - Табличная параметрическая модель гаечного ключа

Иерархическая параметризация

Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения» (рисунок 6.2). В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «дерева построения» модели, система запоминает не только порядок ее формирования, но и иерархию ее элементов (отношения между элементами). (Например,: сборки => подсборки => детали). Параметризация на основе истории построений присутствует практически во всех САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией.

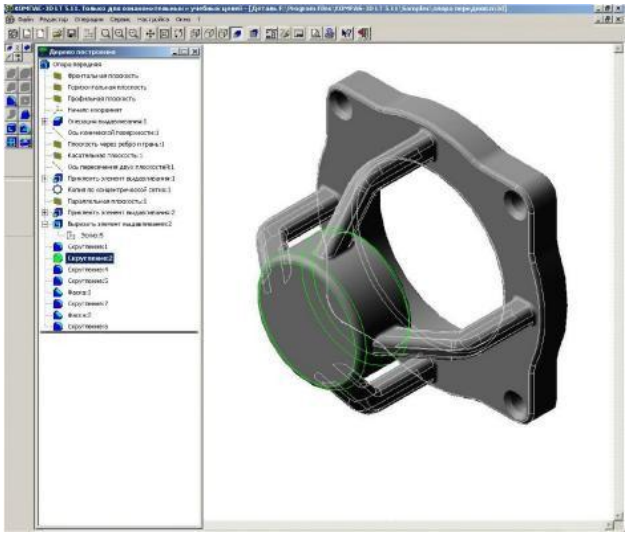


Рисунок 6.2 - Геометрическая модель с «деревом построения

Вариационная (размерная) параметризация

Вариационная, или размерная, параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами (рисунок 6.3).

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит следующим образом:

1. На первом этапе создается эскиз (профиль) для трехмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи.

2. Затем эскиз «образмеривается». Уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные (например, присвоить имя Length) и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, Length/2).

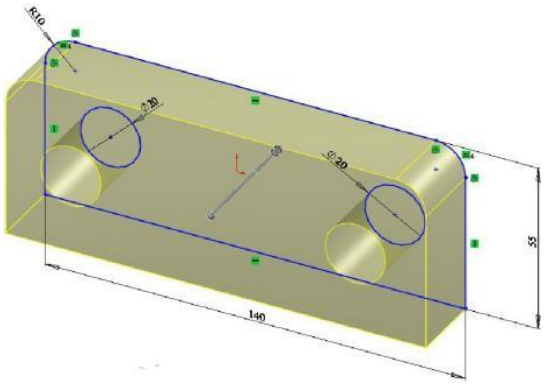


Рисунок 6.3 - Геометрическая модель с вариационной параметризацией

3. Затем производится трехмерная операция (например, смещение),

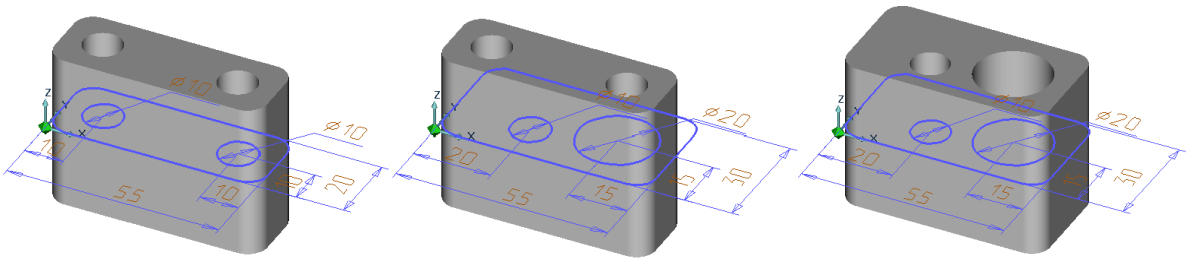
значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина смещения).

4. В случае необходимости создания сборки взаимное положение компонентов сборки задается путем указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или

перпендикулярность граней и ребер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трехмерную модель.

Частным случаем размерной параметризации является так называемая "эвристическая" параметризация, когда последовательно выполняется эскиз, который "образмеривается"; операцией смещения получают геометрическую модель (рисунок 6.4а). Затем производят редактирование значений размеров и выполняют операцию "эвристическая параметризация", в результате которой происходит автоматическое изменение геометрии профиля (рисунок 6.4б). Результат (рисунок 6.4в)



получают после регенерации объёмной модели.

а б

вРисунок 6.4 -
"Эвристическая" параметризация

Геометрическая параметризация

Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель в случае геометрической параметризации состоит из элементов построения и элементов изображения (рисунок 6.5). Элементы построения (конструкторские или вспомогательные линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а

также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.). Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения.

Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит следующим образом:

1. На первом этапе конструктор задает геометрию профиля конструкторскими линиями, отмечает ключевые точки.

2. Затем проставляет размеры между конструкторскими линиями. На этом этапе можно задать зависимость размеров друг от друга.

3. Затем обводит конструкторские линии линиями изображения - получается профиль, с которым можно осуществлять различные трехмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования с использованием метода вариационной параметризации.

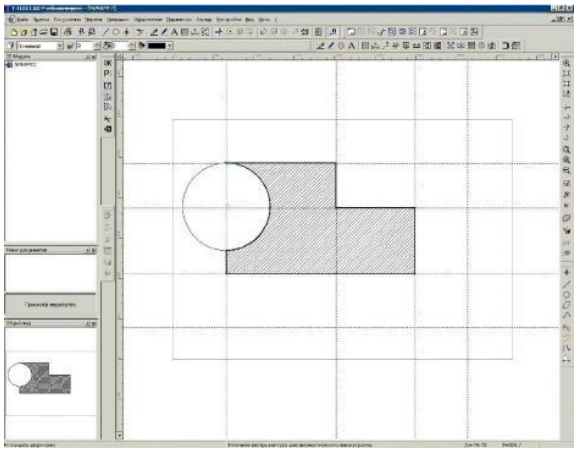


Рисунок 6.5 - Геометрическая параметризация основного контура с использованием направляющих линий

Геометрическая параметризация обеспечивает возможность более гибкого редактирования модели. В случае необходимости внесения незапланированного изменения в геометрию модели необязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), можно провести новую линию построения и перенести на нее линию изображения.

Ассоциативное конструирование

Ассоциативное конструирование (Associative Design) - это

обобщающее название технологии параметрического конструирования, обеспечивающей единую, в том числе и двустороннюю, информационную взаимосвязь между геометрической моделью, расчетными моделями, программами для изготовления изделия на станках с ЧПУ, конструкторской документацией, базой данных проекта.

Использование технологии ассоциативного конструирования позволяет, при необходимости, изменять форму модели и получать автоматически перестроенные чертежи (рисунок 6.6) или траектории инструмента для обработки на станках с ЧПУ.

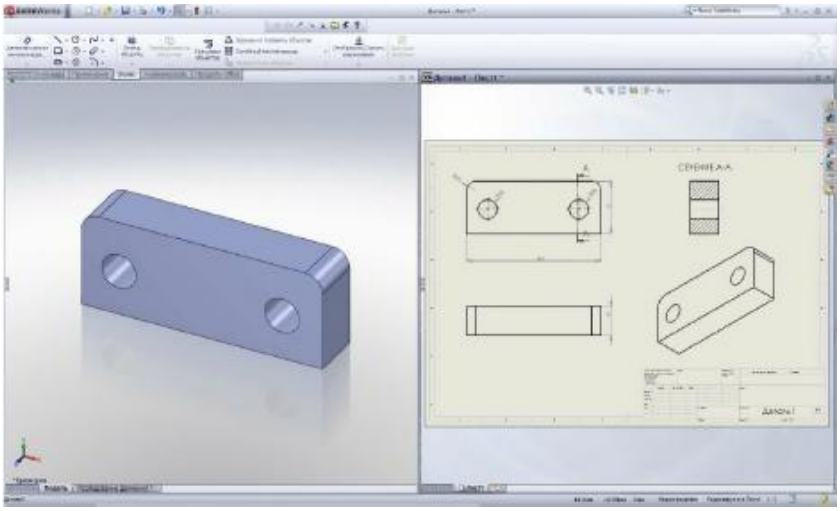


Рисунок 6.6 - Конструкторский чертеж, ассоциативно связанный с геометрической моделью

Частным случаем ассоциативного конструирования является технология ассоциативной геометрии, иногда именуемая как направленная ассоциативность (idirected associativity), - это технология ассоциативного конструирования, которая базируется на непосредственных взаимосвязях между объектами. Простейший пример - определение параллельности двух отрезков. Отрезок А может быть определен как параллельный отрезку В. В результате при перемещении отрезка В отрезок А также изменит свое положение с сохранением ориентации по отношению к отрезку В. Собственное же положение отрезка А не может быть непосредственно изменено. Можно определить отрезки А и В как параллельные и другим способом, так что можно будет изменять положение любого из этих отрезков, удовлетворяя условиям других наложенных связей, - это случай так называемой «мягкой» ассоциативности. Преимущество использования ассоциативной геометрии - скорость.

Недостаток же заключается в том, что пользователь должен полностью определить размеры и ориентацию элемента, прежде чем приступить к созданию следующего элемента.

Объектно-ориентированное конструирование

Объектно-ориентированное конструирование (Feature-Based Modeling) основано на том, что конструктивные элементы геометрии "фючерсы" (features) представляют собой объекты с предопределенным поведением и структурой данных. Это один из подходов ассоциативного конструирования, с помощью которого определяется поведение геометрической формы при дальнейших изменениях.

Этот подход реализован на основе определенного набора правил и атрибутов, задаваемых при выполнении базовой операции, в дополнение к уже заданным связям и ассоциативной геометрии. Базовые операции являются высокоэффективным инструментом для создания геометрической модели конструкции, инженерного анализа или изготовления. Объектно- ориентированное моделирование предоставляет в распоряжение пользователя макрофункции, ранее определенные как последовательность действий, использующих булевы операции. Например, сквозное отверстие (рисунок 6.7) - может быть представлено как булева операция вычитания и цилиндр достаточной длины, большей, чем текущая толщина детали.

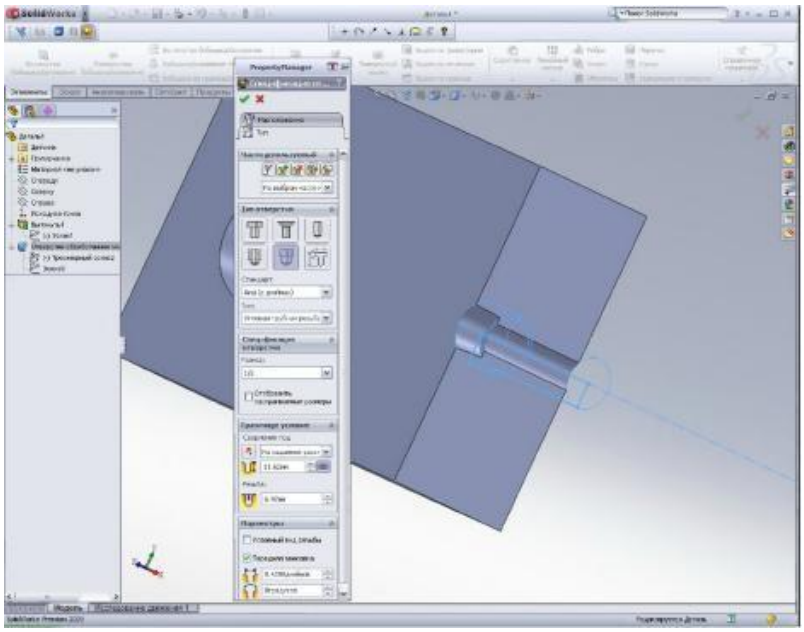


Рисунок 6.7 - Конструирование отверстия как специального объекта построения

Но если модель станет толще, то цилиндр уже не будет обладать достаточной длиной и отверстие превратится в «глухое». Однако под сквозным отверстием понимается дополнительное правило, которое определяет сквозной проход в указанном месте через тело модели, независимо от того, изменилась форма модели или нет. Базовые операции также могут иметь и дополнительные атрибуты, которые используются в других приложениях, таких как анализ и изготовление.

Обязательные требования к базовым операциям при объектно-ориентированном моделировании:

1) используемая базовая операция должна быть полностью определена. После выполнения базовой операции ее топология должна сохраняться и распознаваться как базовая операция (отверстие, паз и т. д.), а также предоставлять возможность изменения определяющих ее геометрических параметров (диаметр, глубина, и т. д.);

2) определение базовой операции должно включать в себя правила, определяющие поведение геометрической формы, а также средства контроля за соблюдением этих правил после выполнения базовой операции. Например, сквозное отверстие должно оставаться таковым, в то время как форма модели подвергается изменению;

3) для повышения эффективности процесса параллельной разработки приложения для инженерного анализа и изготовления должны иметь доступ к описанию объекта, не требуя при этом от пользователя информации об объекте, использованной ранее при выполнении базовой операции.

Уже существующие типы конструктивных элементов могут быть использованы для создания новых типов путем наследования всех свойств исходных объектов и добавления новых атрибутов и поведения. Обязательным компонентом объектно-ориентированного конструирования являются механизмы создания конструктивного элемента и его обновления путем изменения данных каждого элемента. Запуск механизма обновления при изменении данных автоматически инициирует операцию его создания, а так как эти механизмы наследуются всеми конструктивными элементами от базового типа, обеспечивается совместимость структур данных для всего набора элементов. Конструктивные элементы включены в общий цикл обновления, таким образом, любое изменение данных приводит к автоматическому обновлению модели в соответствии с правилами построения и данными

для каждого элемента.

Конструирование на основе использования параметрической модели комплексного представителя типовой детали

В этом случае геометрические параметры модели могут быть связаны как переменные и можно задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул. Реализация геометрической модели осуществляется в среде CAD модуля путём последовательного использования языка высокого уровня (например, VBA или Си++) и табличного процессора Excel.

Каждая группа деталей имеет свои особенности конструкции, определяющие выбор метода создания объемной модели. Несмотря на это, можно перечислить основные этапы работы, общие во все варианты:

-анализ конструкции деталей группы (рисунок 6.8);

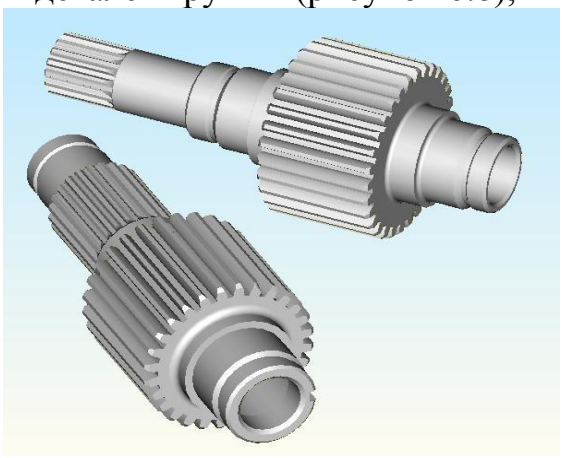


Рисунок 6.8 - Анализ конструкции деталей группы

-формирование комплексного представителя группы деталей;

-построение исходных контуров для создания объемной модели;

-простановка размеров (координация поверхностей) (рисунок 6.9);

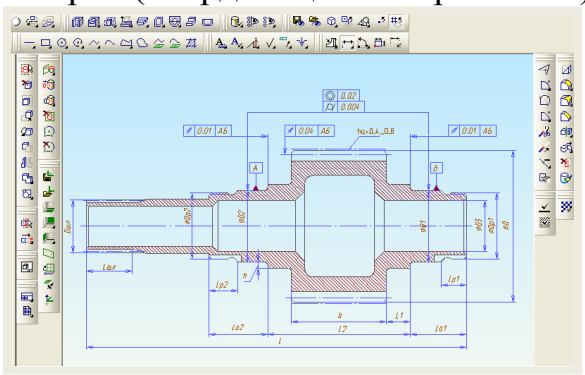


Рисунок 6.9 - Простановка размеров

-преобразование размеров в параметрические;

-построение объемной модели с помощью выполнения операций над контурами (рисунок 6.10);

-создание электронной табличной формы для внесения информации из конструкторского чертежа детали (рисунок 6.11);

-написание алгоритма расчета параметрических размеров с использованием данных с чертежа, оформление таблицы расчета;

-подключение таблицы значений параметрических размеров к параметрической модели, запись параметрического фрагмента.

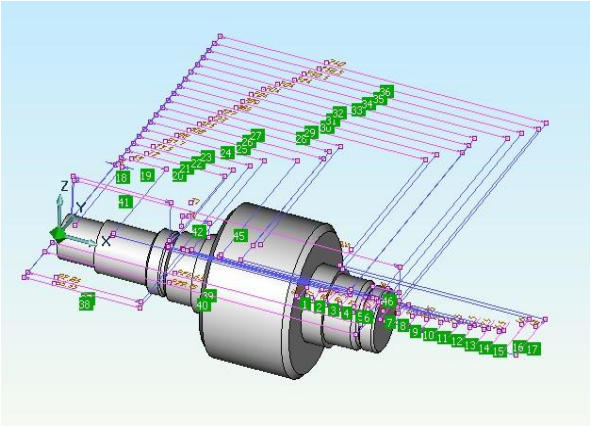


Рисунок 6.10 - Параметрическая объёмная модель комплексного представителя

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Зубчатый венец			Диаметр вала под подшипники		* - в зав. от серии				
2		*m*	*z*	*b*	*D1*	*D2*	*h*	*L1*	*L2*	*Lo1*	*Lp1*
3	деталь №1	3	30	66	45	45	3	15	96	36	16
4	деталь №2	6	20	65	50	50	4	15	105	38	18
5	деталь №3	3	28	77	55	55	4	8	96	38,5	12,5
6	деталь №4	3	30	60	45	45	4	15	90	37	18
7	деталь №5	4,5	25	38	40	40	3	10	85	28	16
8	деталь №6	3,5	50	45	45	45	4	12	80	25	15
9	деталь№7	5	20	65	50	50	5	10	92	32	18

Лекция 18. Автоматизация технологической подготовки производства

Технологическая подготовка производства

Этап технологической подготовки производства тесно связан с предыдущими этапами, так как входной информацией служат данные геометрической модели изделия. В процессе работы технолог будет неоднократно обращаться к предыдущим этапам для проектирования моделей инструмента, оснастки или модификации модели изделия совместно с конструктором.

Практика показывает, что предприятия подходят к созданию своих интегрированных информационных систем, предназначенных для комплексного решения задач автоматизации конструирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства, по-разному. 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 между ними ложится на самих пользователей. Поэтому важно, чтобы для этих программ были разработаны соответствующие интерфейсы с необходимой полнотой реализации форматов.

Назначение этапа технологической подготовки производства в основном сводится к решению следующих задач (рис. 7.1):

- разработка технологий изготовления изделия, инструментов, приспособлений и т.д. на основе их геометрических моделей, полученных на этапе проектирования;
- подготовка программ для станков с ЧПУ по спроектированным технологиям.

Программные среды, с помощью которых решаются указанные задачи, можно разделить на две группы. К первой из них следует отнести программные комплексы, специально разработанные для выполнения всего цикла или отдельных процедур технологической подготовки производства. Среди этой 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 МО (Станкин СОФТ) – механообработка, 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.

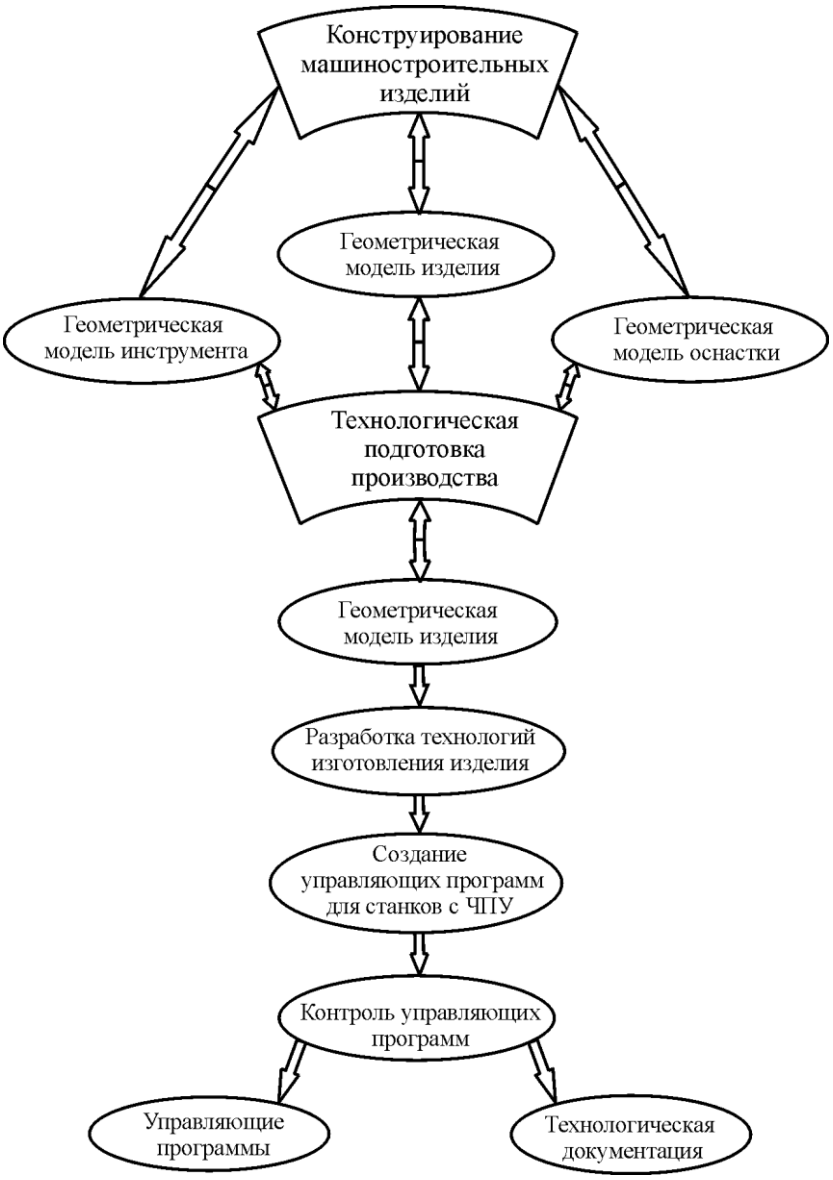


Рис. 7.1. Обобщенная структурная схема технологической подготовки производства

Другую группу программного обеспечения составляют программные системы сквозного проектирования и технологической подготовки производства: CATIA5, EUCLID3, Unigraphics, Pro/ENGINEER, CADDS5. Контроль качества управляющих программ выполняют специальные программы, например, NC Simul, NC Formater.

В производстве машиностроительных и части приборостроительных изделий используются 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. Имеется возможность моделировать движение инструмента и снятие материала во время черновой и чистовой обработки поверхности заготовки. Например, в

простейшем варианте 2- и 2,5-координатной обработки во многих программных комплексах реализованы следующие способы 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 различных поверхностей изделий, например, 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 создаются 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 подрезы и быстро вносить изменения в циклы обработки. С помощью специальных функций автоматически вычисляется объем материала, который необходимо удалить из заготовки при обработке.

Проектирование технологии фрезерной обработки

В системах сквозного проектирования и технологической подготовки производства различных фирм-разработчиков реализованы свои подходы к организации программ, свои алгоритмы и методы. Для более предметного изложения этой темы обратимся к основным этапам работы технолога в системах верхнего уровня на примере системы EUCLID3 фирмы EADS MATRA DATAVISION (Франция), которая воплотила многолетний опыт специалистов различных отраслей и считается одной из лучших в мире.

Приведем некоторые основные понятия, используемые в проектировании технологических процессов.

Удаляемый материал. Материал, удаляемый из заготовки детали в каком-либо цикле ее обработки, определяется геометрическим объектом, тип которого зависит от вида механической обработки. Таким геометрическим объектом может быть элемент одного из следующих типов:

- незамкнутая линия (например, для сверления);
- замкнутая линия или контур (например, для контурной обработки);
- призма (например, для обработки выемок);

- тело вращения.

Удаляемый материал может состоять из нескольких частей, соответствующих последовательности переходов обработки. Удаляемый материал в виде объема восстанавливается из истории создания обрабатываемой детали. Контуры (возможно, перфорированные) обрабатываются как отверстия или острова.

Система базирования элементов оборудования. Одним из важных понятий в проектировании технологий является понятие системы базирования элементов оборудования. В системе EUCLID3 это понятие ассоциируется с понятием trihedral. Системы базирования отвечают за взаимное расположение всех элементов оборудования: станка, инструмента, инструментальной оснастки, технологической оснастки (приспособления) и заготовки в процессе обработки. Система базирования элемента создается путем определения положений начала координат и направления осей X, Y, Z. При этом на экране монитора указываются только оси Z и X. Ось Y не отображается, так как ее положение всегда можно вычислить по правилу правой руки. В процессе описания того или иного элемента оборудования технолог самостоятельно определяет положение системы базирования. Назначение ее для того или иного элемента оборудования будем называть определением данного элемента. На всех приведенных далее рисунках в системах базирования ось Z будет изображаться сплошной линией, ось X – пунктирной. Система базирования существует как самостоятельный объект, имена этим объектам технолог назначает произвольно.

Среда обработки. В подсистеме проектирования процессов механообработки предварительно создается так называемая среда обработки. Элементами этой среды являются:

- описание имеющихся на предприятии фрезерных станков с ЧПУ;
- геометрически точные модели используемых инструментов;
- геометрически точные модели элементов установки инструмента (конусов, державок) в шпинделе станка;
- модели элементов установки заготовки на столе фрезерного станка;
- модель заготовки;
- модель конечной детали.

В среду обработки следует ввести сведения о материале, из которого будет изготовляться конечная деталь. Система предоставляет выбор материала детали из списка возможных материалов.

Базу данных технологического оборудования, имеющегося на предприятии, необходимо создать до начала работы с подсистемой технологической подготовки производства. Создание макетов станков, моделей приспособлений и инструмента ведется методами твердотельного или поверхностного моделирования, которые описаны ранее в параграфах 6.1 и 6.3. При разработке моделей оборудования и инструмента следует

учитывать, что геометрическое моделирование позволяет повысить качество контроля управляющих программ.

Однако для проектирования процессов механообработки подробная геометрически точная модель всего станка не нужна. Достаточно определить кинематическую схему станка. Поэтому далее используется понятие
«макет станка», содержание которого определяется при описании оборудования конкретного способа механообработки. На этапе макетирования некоторых видов оснастки можно использовать условное или «виртуальное» приспособление. Этот прием позволяет получить предварительный вариант управляющей программы, выполнить контроль зарезов детали и столкновений элементов станка, в результате которого можно определить оптимальную установку заготовки, подобрать инструмент, а затем спроектировать нужное приспособление. После получения окончательного варианта управляющей программы с реальными элементами оснастки и инструментом у технолога появляется возможность проконтролировать работу этой программы с имитацией всех реальных условий процесса обработки.

Макеты станков, приспособлений и инструмента также могут использоваться для анимации процесса фрезерования и удаления материала во время обработки.

Описание станка в базе данных содержит следующую информацию:

- название станка;
- описание архитектуры (компоновки);
- технологические параметры станка;
- геометрические параметры;
- описание кинематической схемы.

Описание архитектуры станка определяет возможные движения элементов станка в процессе его работы (в отечественной литературе более употребительным будет термин «компоновка станка»). В архитектуре указывается, какие элементы станка двигаются или вращаются соответственно вдоль или вокруг определенных осей и как они связаны друг с другом. Архитектура станка определяется выражением типа «Оси заготовки/Оси инструмента», где «Оси заготовки» представляют оси координат станка, по которым движется обрабатываемая заготовка относительно станины станка, а «Оси инструмента» – оси координат станка, по которым движется инструмент относительно станины станка.

Для описания архитектуры станка нужно определить оси линейных перемещений элементов станка относительно его станины X, Y, Z. Дополнительные оси A, B и C описывают вращения подвижных элементов станка (стол или шпиндельная головка), вокруг осей X, Y и Z соответственно. Оси A, B и C обычно записываются в начале и в конце символьного описания архитектуры станка. Например, запись CXY/ZB идентифицирует 5- координатный станок, поворотный стол которого

может вращаться вокруг оси Z и перемещаться вдоль осей X и Y, а инструмент перемещается вдоль оси Z и вращается вокруг оси Y.

Выбор станка можно выполнить одним из следующих способов:

- вызвать из базы данных оригинальный, созданный ранее станок;
- выбрать тип станка по образцу.

База данных содержит наиболее широко используемые станки со следующей архитектурой:

XY/ZV, X/YZ_H, BX/YZ_H, CBX/YZ_V, X /YZCA_V, CYX/ZB_V.

Выбранный по образцу станок создается «фиктивно»: без связанного геометрического представления и ограничений. Он также имеет технологические параметры по умолчанию.

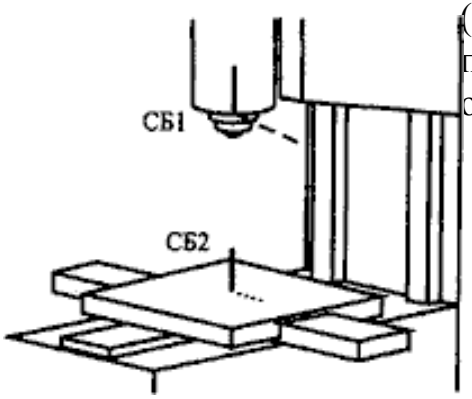
Технологические параметры – это максимальные обороты шпинделя, максимальные скорости подачи, наличие охлаждения и т.д. Геометрические параметры используются для условного или реалистичного представления станка. Эти параметры необязательны, можно дать определение станка без создания его геометрической модели. Однако более детальное представление станка позволяет точно контролировать столкновения элементов станка при движении инструмента по траектории.

Кинематическая схема определяет связь обрабатываемой заготовки с элементами технологической оснастки, станком, элементами инструментальной оснастки и инструментом. Кинематическая схема возникает в результате нескольких операций определения:

- станка;
- элементов инструментальной оснастки;
- инструмента;
- заготовки;
- элементов технологической оснастки.

Определение станка заключается в назначении системы базирования шпинделя СБ1 и системы базирования положения технологической оснастки на его столе СБ2 (рис. 7.2).

Определение элементов инструментальной оснастки состоит в указании систем базирования шпинделя и инструмента. Инструментальная оснастка может быть простой, т. е. состоять из одного элемента (например, из конуса), и комбинированной, состоящей из нескольких элементов (например, из переходника и конуса). В последнем случае каждому элементу оснастки определяется по две системы базирования.



На рис. 7.3 в качестве примера показаны системы базирования элементов комбинированной инструментальной оснастки: конуса (СБ3 и СБ4) и переходника (СБ5 и СБ6), где СБ3 – система базирования шпинделя, которая

будет совмещаться с СБ1, СБ4

Рис. 7.2. Определение станка

– система базирования переходника, СБ5 –система базирования конуса, СБ6 – система базирования инструмента, которая в дальнейшем будет совмещаться с системой базирования державки инструмента. При сборке этих элементов переходник присоединяется к конусу так, что СБ4 совпадает с СБ5 (рис. 7.4).

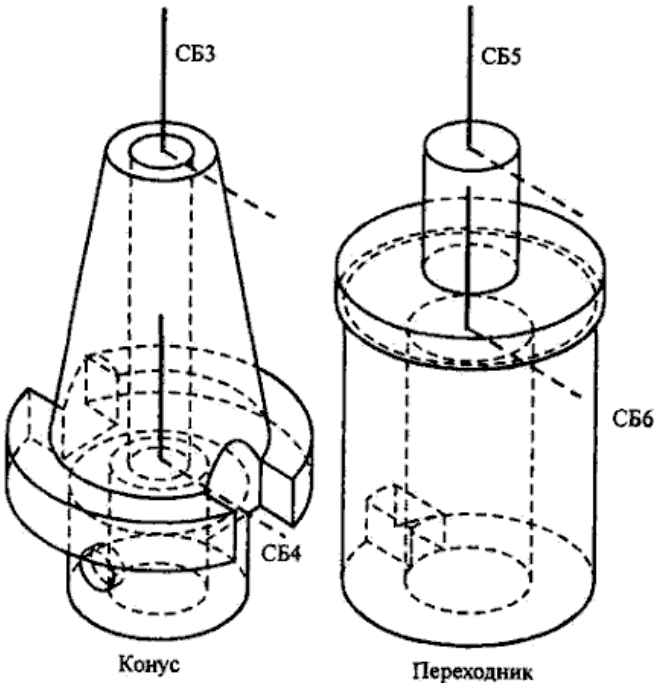


Рис. 7.3. Определение элементов инструментальной оснастки

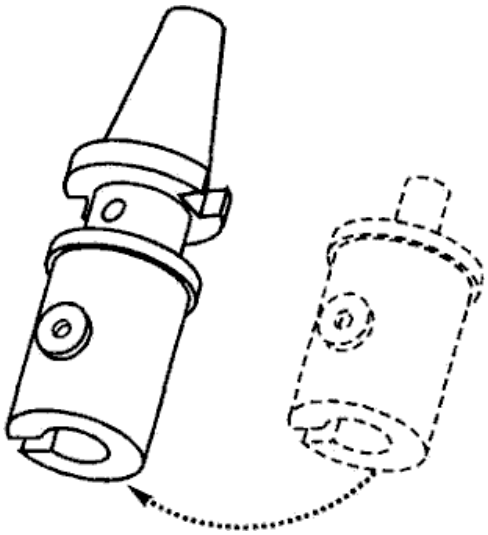


Рис. 7.4. Сборка элементов инструментальной оснастки

Определение инструмента есть продолжение описания кинематической схемы фрезерного станка и содержит следующую информацию:

- геометрическое описание, условное или реалистичное представление инструмента, служащее моделью реального инструмента;
- система базирования державки (конуса), которая фиксирует инструмент в шпинделе;
- система базирования фрезы, которая определяет положение инструмента относительно обрабатываемой заготовки; параметры инструмента, соответствующие типу инструмента.

При создании процесса обработки можно установить инструмент непосредственно в шпиндель станка либо предварительно создать сборку инструмента с одним (или более) элементом инструментальной оснастки и затем установить эту сборку в шпиндель станка.

При определении инструмента необходимо выбрать систему базирования державки инструмента СБ7 и систему базирования фрезы СБ8 (рис. 7.5). Указание СБ7 необходимо для совмещения инструмента с соответствующей системой базирования элемента оснастки. Например, если в качестве такой оснастки используется комбинированная оснастка,

изображенная на рис. 7.3, то при сборке ее с инструментом система СБ6 будет совмещаться с СБ7 (рис. 7.6).

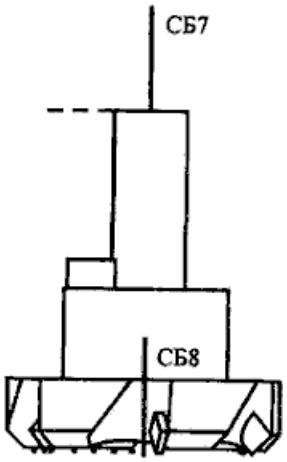


Рис. 7.5. Определение инструмента

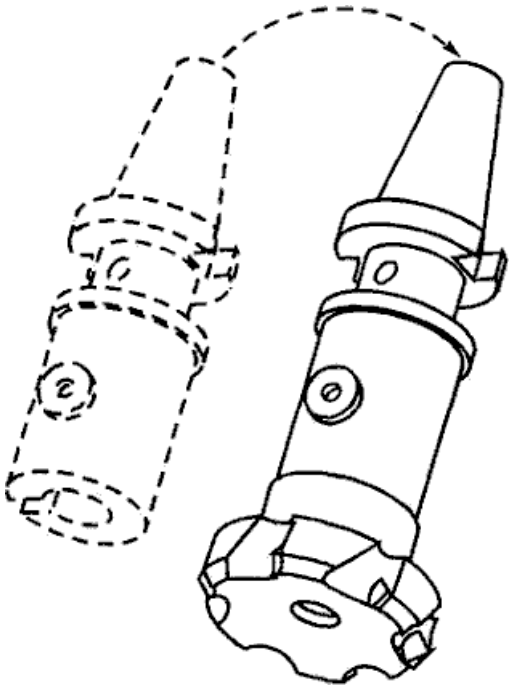


Рис. 7.6. Сборка инструмента с инструментальной оснасткой

База данных инструментов содержит следующие типы инструмента: метчик, развертку, сверло, центровочное сверло, коническую фрезу, коническую зенковку, цилиндрическую зенковку, торцевую фрезу, концевую фрезу, концевую обдирочную фрезу, инструмент для гравировки, резцы, нестандартный и фасонный инструмент.

Для каждого типа инструмента определяются его параметры. Например, метчик будет описан следующими параметрами: диаметром метчика, шагом резьбы, длиной режущей части, его полной длиной и геометрической моделью метчика. Концевая фреза описывается следующими параметрами: диаметром фрезы, длиной режущих поверхностей по оси фрезы, глубиной резания, радиусом торца фрезы, максимальной глубиной обработки, полной длиной фрезы, количеством зубьев и геометрической моделью фрезы.

Для автоматического расчета режимов резания в процессе обработки учитываются свойства материала и параметры инструмента. В системе есть возможность создавать цепочки ассоциированных объектов «инструмент (тип и параметры) – материал – режим обработки». Можно выбрать другой материал и связать другой набор параметров с тем же типом инструмента. Инструмент с заданным режимом резания и заданным материалом как ассоциированный объект сохраняется в базе данных.

Формировать цепочки ассоциированных объектов «инструмент – материал – режим обработки» необходимо следующим образом:

- выбрать созданный ранее инструмент;
- выбрать обрабатываемый материал: графит, латунь, золото, серебро, воск, пластик, дерево, алюминий, литой чугун, сталь и др.;
- ввести параметры режима резания:
  - единицы, в которых выражается скорость резания: число оборотов в минуту, единицы длины в минуту;
  - скорость резания;
  - направление вращения шпинделя (по ходу или против хода часовой стрелки);
  - единицы, в которых выражается скорость подвода: единицы в минуту, единицы на оборот инструмента, единицы на режущую кромку, ускоренная подача;
  - скорость, с которой инструмент подводится к обрабатываемой заготовке;
  - единицы, в которых выражается скорость подачи: единицы в минуту, единицы на оборот инструмента, единицы на режущую кромку, скорость рабочей подачи;
  - единицы, в которых выражается скорость отвода инструмента: единицы в минуту, единицы на оборот инструмента, единицы на режущую кромку, ускоренная подача;
  - скорость отвода инструмента;
  - перекрытие проходов, которое выражается в процентах от диаметра инструмента;
  - глубина резания;
- сохранение цепочки ассоциированных объектов «инструмент – материал – режим обработки» в базе данных.

База данных инструментов содержит огромное количество данных, последовательный просмотр которых может занять много времени. В системе есть возможность ограничить объем предъявляемых данных путем ввода определенных признаков. Для инструментов такими признаками могут быть: тип инструмента, материал заготовки и параметры инструмента.

Определение заготовки содержит выбор системы базирования заготовки, которая позволяет однозначно зафиксировать заготовку относительно технологического приспособления. Система базирования заготовки СБ13 показана на рис. 7.7.

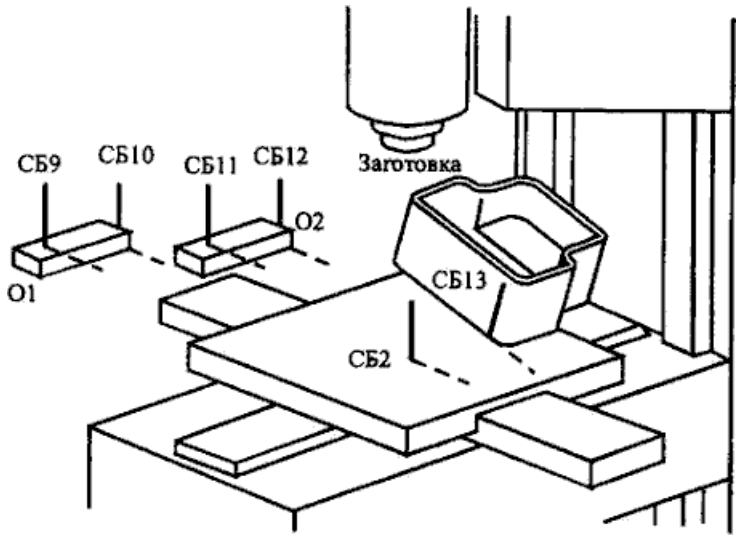


Рис. 7.7. Определение элементов технологической оснастки и заготовки

Определение элементов технологической оснастки заключается в назначении каждому элементу технологической оснастки его систем базирования. Элементы установки детали (крепежного приспособления) позволяют зафиксировать заготовку на столе станка. С каждым элементом установки детали связаны две системы базирования: стола, которая определяет положение приспособления на столе, и заготовки детали, которая указывает положение заготовки относительно приспособления. Определение всех элементов технологической оснастки на станке дает возможность точно проконтролировать столкновения при имитации процесса фрезерования.

Можно использовать более одного элемента крепежного приспособления. На рис. 7.7 условно изображены два элемента технологической оснастки:

- элемент О1 и его системы базирования:
  - СБ9 – система базирования заготовки,
  - СБ10 – система базирования элемента О2;
- элемент О2 и его системы базирования:
  - СБ11 – система базирования элемента О1,
  - СБ12 – система базирования стола.

Определение всех составляющих кинематической схемы позволит системе технологического проектирования собрать воедино все составляющие оборудования в момент создания процесса (рис. 7.8), а именно:

- монтировать инструмент с элементами инструментальной оснастки;
- автоматически закрепить элементы инструментальной оснастки в шпинделе станка;

- автоматически установить технологическую оснастку (СБ10 + СБ11);

- автоматически установить заготовку в технологическую оснастку (СБ9 + СБ13);
- автоматически установить технологическую оснастку в исходную позицию обработки заготовки (СБ12 + СБ2).

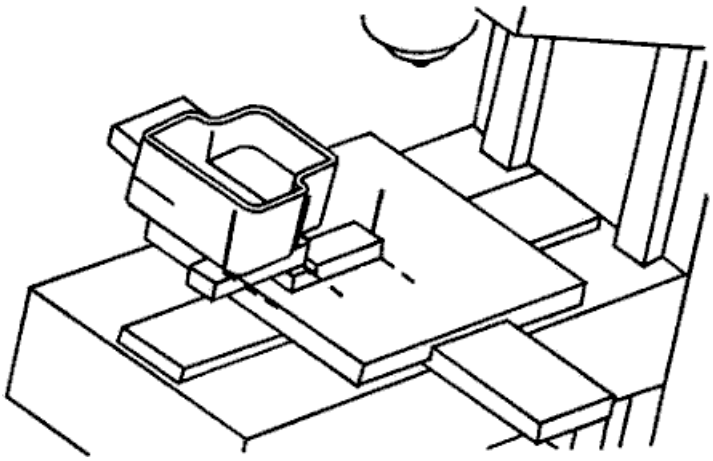


Рис. 7.8. Кинематическая схема оборудования

Проектирование технологии токарной обработки

Специализированная подсистема «Токарная обработка» – одна из подсистем комплекса EUCLID3, с помощью которой выполняется подготовка управляющих программ для токарных станков с ЧПУ.

Проектирование технологии токарной обработки базируется на тех же подходах, что и проектирование фрезерной обработки. У этих подсистем общая база данных и одни и те же этапы проектирования, но содержательная часть этих этапов у них разная. Чтобы не дублировать изложенную в разделе 7.2 методику построения процесса, остановимся только на характерных особенностях токарной обработки.

Рассмотрим основные понятия, используемые в проектировании технологического процесса токарной обработки.

Удаляемый материал. Это часть заготовки, удаляемая при обработке установленным инструментом в заданном цикле токарной обработки. Для таких циклов, как сверление и контурное точение, удаляемым материалом могут быть:

- незамкнутая линия, соответствующая траектории режущего инструмента;
- призма (например, для обработки выемок, используя точение по оси С);
- отверстие.

Кроме точения по оси С, удаляемый материал должен быть представлен плоскими гранями в плоскости обработки, определяемой осями X и Z. Для многопроходной обточки по контуру удаляемый материал определяется контуром, который состоит из обрабатываемого контура заготовки и обрабатываемого контура детали. Если существуют объемные

модели заготовки и детали, то удаляемый материал выделяется из контуров их образующих (рис. 7.9).

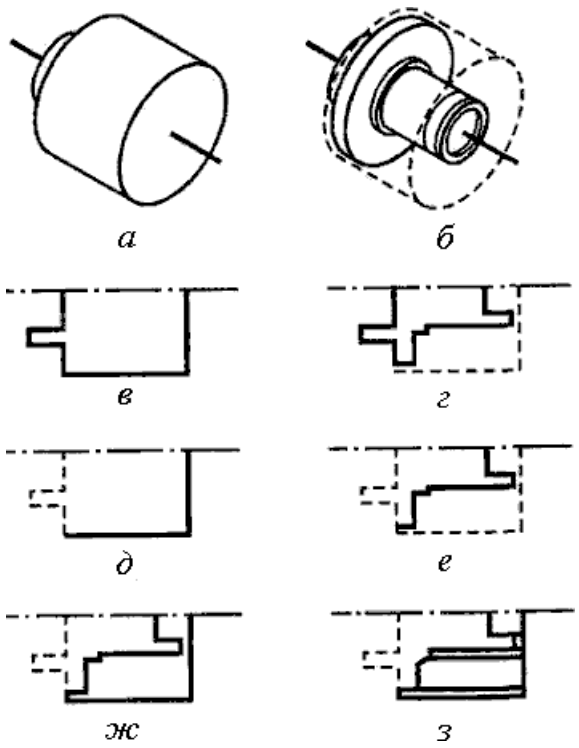


Рис. 7.9. Определение удаляемого материала по контурам заготовки и детали: *а* – заготовка; *б* – деталь; *в, г* – образующие соответственно заготовки и детали; *д, е* – обрабатываемые контуры соответственно заготовки и детали; *ж* – контур удаляемого материала; *з* – вариант разбиения удаляемого материала

Система базирования элементов оборудования. Системы базирования отвечают за взаимное расположение всех элементов оборудования: токарного станка, инструмента, инструментальной оснастки, технологической оснастки (приспособления) и детали в процессе обработки. Система базирования элемента создается описанным во фрезерной обработке методом, определяющим положение начала координат элемента и направления его осей X, Y, Z.

Среда токарной обработки. Эта среда включает:

- описание имеющихся на предприятии токарных станков с ЧПУ;
- геометрические модели используемых инструментов;
- геометрические модели элементов инструментальной оснастки (резцедержатели, переходные патроны);
- модели элементов технологической оснастки токарного станка;
- модель заготовки;
- модель конечной детали.

Необходимо также указать сведения о материале, из которого будет изготовляться деталь.

Базу данных технологического оборудования, имеющегося на предприятии, следует создать до начала работы с подсистемой

технологической подготовки производства. Если геометрические модели станка и инструмента не были построены заранее, в процессе создания макетов оборудования автоматически будет создано точное их представление, достаточное для контроля обработки. Геометрические модели оригинальных элементов оборудования предприятия повышают качество технологического процесса и контроля управляющих программ.

Макеты токарных станков должны быть обязательно протестированы после создания, а сборка макетов и моделей всего оборудования необходима для анимации процесса токарной обработки.

Описание станка в базе данных содержит следующую информацию:

- название токарного станка;
- описание архитектуры;
- технологические параметры;
- геометрические параметры;
- описание кинематической схемы.

Архитектура токарного станка. Описание архитектуры станка определяет направления перемещения детали и инструмента станка X, Z, C, а также положения упоров (рис. 7.10).

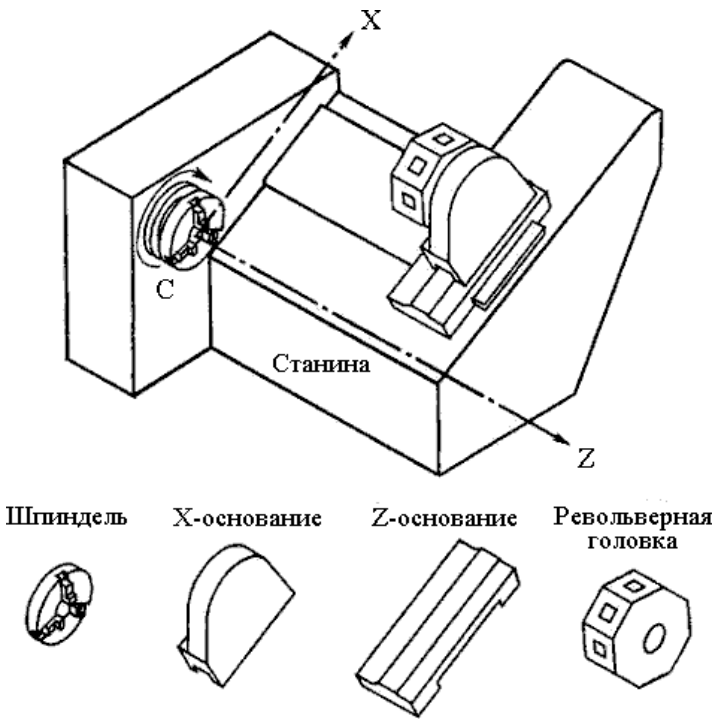


Рис. 7.10. Схема токарного станка

Описание токарного станка можно вызвать из базы данных ранее созданных станков.

Технологические параметры токарного станка. Существуют следующие технологические характеристики токарных станков:

- время на смену инструмента (с);
- максимальное число оборотов шпинделя в минуту (об/мин);
- максимальная подача (перемещение заготовки) в текущих единицах

(мм или дюймы) в минуту (мм/мин);

- максимальная скорость перемещения вдоль осей X, Z в текущих единицах (мм или дюймы) в минуту (мм/мин);
- максимальное число оборотов в минуту вокруг оси C (об/мин);
- возможность подачи охлаждающей жидкости.

Технолог может описать тип станка и кинематические параметры револьверной головки дополнительными параметрами, такими, как количество устанавливаемых в револьверную головку инструментов, угол поворота револьверной головки при смене инструмента и др.

Геометрические параметры станка. Геометрические параметры используются для условного или геометрического представления токарного станка. Если геометрические элементы для представления различных частей станка не созданы заранее и не присутствуют в базе данных, то система создаст схематичное представление нового станка. Для этого необ-

ходимо определить неподвижную часть (станину) и подвижные части станка:

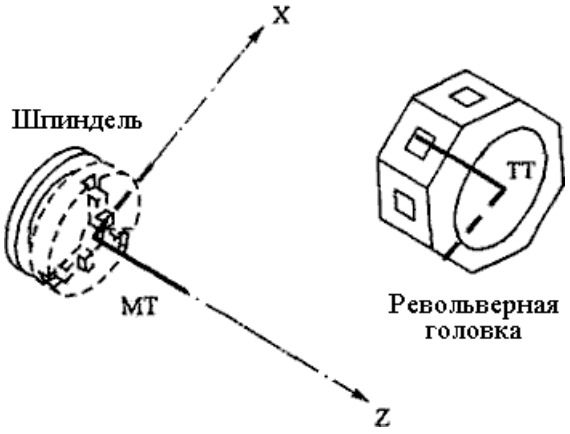
- шпиндель;
- часть станка (стол), перемещающуюся вдоль оси Z (оси вращения шпинделя);
- часть станка (стол), перемещающуюся вдоль оси X.

Кинематическая схема токарного станка. Кинематика токарного станка определяет положение плоскости обработки, упоров, револьверной головки и возможность C-координатной обработки. Для создания кинематической схемы станка необходимо иметь ранее построенные и сохраненные в базе данных все элементы оборудования. Напомним, что они обеспечат более точный контроль.

Кинематическая схема является результатом нескольких операций определения:

- токарного станка;
- элементов инструментальной оснастки;
- инструмента;
- элементов технологической оснастки.

При определении токарного станка задаются положение и ориентация двух элементов: револьверной головки и шпинделя станка



(рис. 7.11).

Рис. 7.11. Системы базирования токарного станка

Система базирования станка включает:

- систему базирования шпинделя (МТ) (рис 7.12), определяющую:
  - начало координат станка,
  - ось вращения шпинделя – направление оси Z станка,
  - направление оси X станка,
  - плоскость XOZ станка – плоскость обработки;
- систему базирования револьверной головки (ТТ) (рис. 7.13), определяющую ее положение и направление оси ее вращения Z. Направление вращения револьверной головки по ходу часовой стрелки определяется, глядя в направлении вектора оси Z системы базирования головки;
- системы базирования инструмента (ТТ1 – ТТ8).

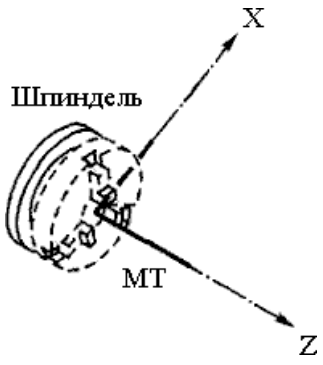


Рис. 7.12. Система базирования шпинделя токарного станка

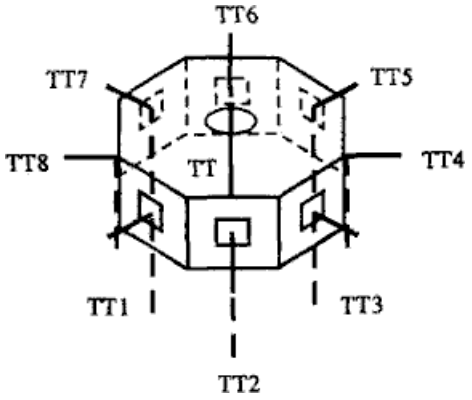


Рис. 7.13. Системы базирования револьверной головки и инструмента

Чтобы обеспечить безопасную работу токарного станка, вводятся предельно допустимые положения одной или нескольких револьверных головок. Эти значения задаются в виде координат ближнего и дальнего упоров на оси шпинделя (упоры по Z) и координат ближнего и дальнего упоров на оси X (упоры по X) (рис. 7.14). Для этого на револьверной головке можно создать дополнительные системы базирования.

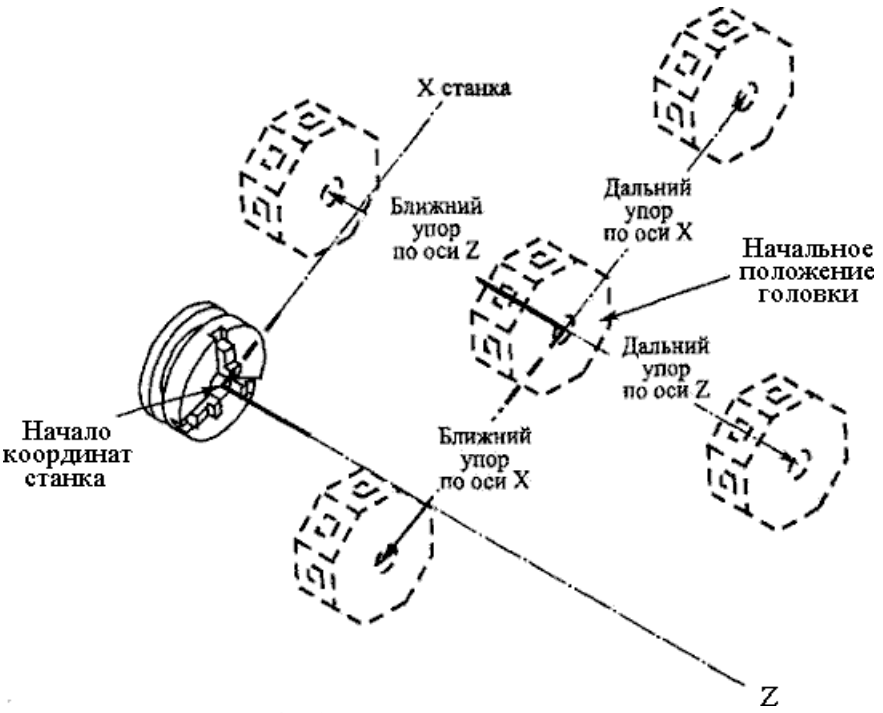


Рис. 7.14. Схема определения положения упоров

Для проверки заданных параметров и настроек в завершении процедуры создания макета токарного станка необходимо выполнить его тестирование. Оно заключается в имитации движений частей станка в плоскости обработки, вокруг и вдоль заданных осей станка, а также в положениях дальних и ближних упоров.

Определение инструментальной оснастки состоит в указании системы базирования револьверной головки и инструмента на геометрических моделях элементов оснастки. Комбинированная инструментальная оснастка может состоять из нескольких элементов (переходников, удлинителей и т.п.). В этом случае следует создать все необходимые системы базирования этих элементов, которые обеспечат их сборку на станке. Пример комбинированной инструментальной оснастки приведен на рис. 7.15.

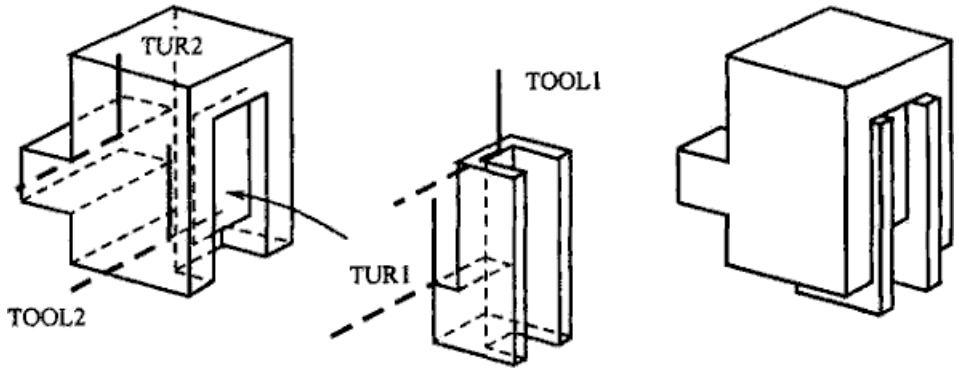
Переходной элемент 2 имеет две системы базирования:

- револьверной головки (TUR2);
- элемента 1 (TOOL2).

Промежуточный элемент 1 (удлинитель), в свою очередь, тоже имеет две системы базирования:

- элемента 2 (TUR1);
- инструмента (TOOL1).

При сборке данной комбинированной оснастки системы базирования ее элементов TOOL2 и TUR1 будут совмещены. В единой кинематической схеме токарного станка система базирования элемента инструментальной оснастки TUR2 будет совмещаться с соответствующей системой базирования инструмента TT1 – TT8, а TOOL1 будет совмещаться с системой базирования державки инструмента.



а *б* *в*

Рис. 7.15. Определение комбинированной инструментальной оснастки и ее сборка: *а* – элемент 2; *б* – элемент 1; *в* – инструментальная оснастка в сборе

Определение инструмента будет продолжением описания кинематической схемы токарного станка и содержит следующую информацию:

- геометрическое описание, условное или реалистичное представление инструмента, являющееся моделью реального токарного резца;
- систему базирования державки, с помощью которой резец фиксируется в инструментальной оснастке;
- систему базирования резца, которая определяет положение режущей кромки резца относительно обрабатываемой заготовки;
- параметры соответствующего типа резца.

Если геометрическая модель оригинального токарного резца не создана заранее в подсистеме твердотельного моделирования и отсутствует в базе данных предприятия, то условное представление типового резца будет создано автоматически (вызвано из стандартной базы данных). При проектировании процесса обработки можно установить инструмент непосредственно в револьверную головку токарного станка либо предварительно создать сборку инструмента с одним или более элементом инструментальной оснастки и затем установить эту сборку в револьверную головку токарного станка.

На рис. 1.16 приведен пример токарного резца и его систем базирования. Система базирования державки НТ при сборке с элементом 1 инструментальной оснастки совместится с системой базирования TOOL1 (рис. 7.17). Система базирования резца позволит точно

рассчитать траекторию движения резца в процессе обработки.

База данных токарного инструмента содержит следующие типы резцов, нестандартного и фасонного инструмента: метчик, развертка, сверло, резец резьбовой, резец гравировальный, резец проходной с продольным и поперечным перемещениями.

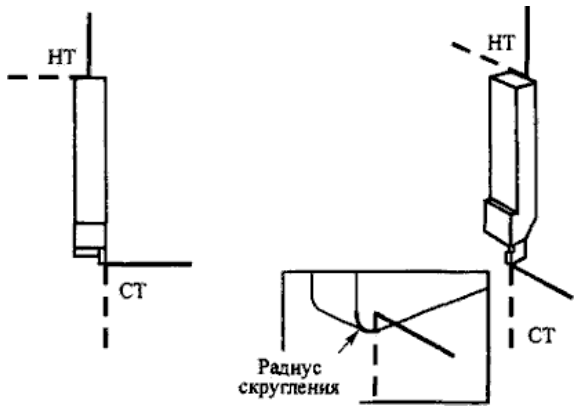


Рис. 7.16. Системы базирования токарного резца: СТ – система базирования резца; НТ – система базирования державки инструмента

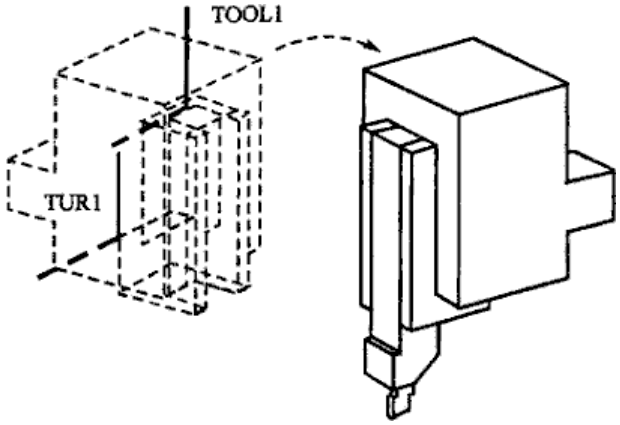


Рис. 7.17. Сборка резца с комбинированной инструментальной оснасткой

Для каждого типа инструмента определяют его параметры:

- форма режущей кромки (рис. 7.18), определяемая незамкнутой линией (ломаной и (или) дугой);
- глубина резания в одном или двух направлениях, определяемая отрезком или ломаной из двух отрезков (границы обработки) (рис. 7.19);
- направление обработки, определяемое двумя точками, или первое направление в случае нескольких направлений обработки;
- второе (возможное) и третье (возможное) направления обработки, определяемые двумя точками (рис. 7.20);
- максимальная глубина обработки.

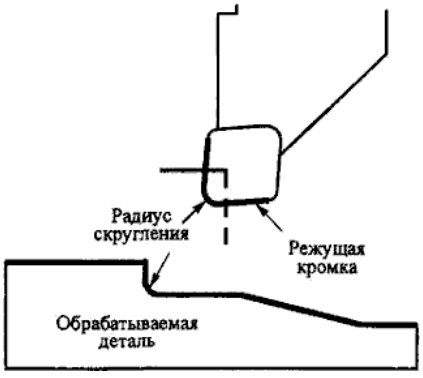


Рис. 7.18. Параметры рабочей части резца

Свойства материала используются вместе с параметрами инструмента для автоматического расчета режима резания в процессе обработки. При обработке резцами, так же, как и при фрезерной обработке, можно документировать все свойства резцов и других инструментов в цепочках ассоциированных объектов «инструмент (тип и параметры) – материал – режим обработки», а затем выбирать их из базы данных по определенным признакам.

Определение элементов технологической оснастки заключается в назначении каждому элементу технологической оснастки его систем

базирования. Элементы установки обрабатываемой заготовки (крепежного приспособления) закрепляют заготовку в шпинделе токарного станка. С каждым элементом установки заготовки связаны две системы базирования: шпинделя, которая определяет положение приспособления, и заготовки детали, которая указывает положение заготовки относительно приспособления. Определение всех элементов технологической оснастки на станке позволяет точно проконтролировать возможные столкновения при имитации процесса обработки.

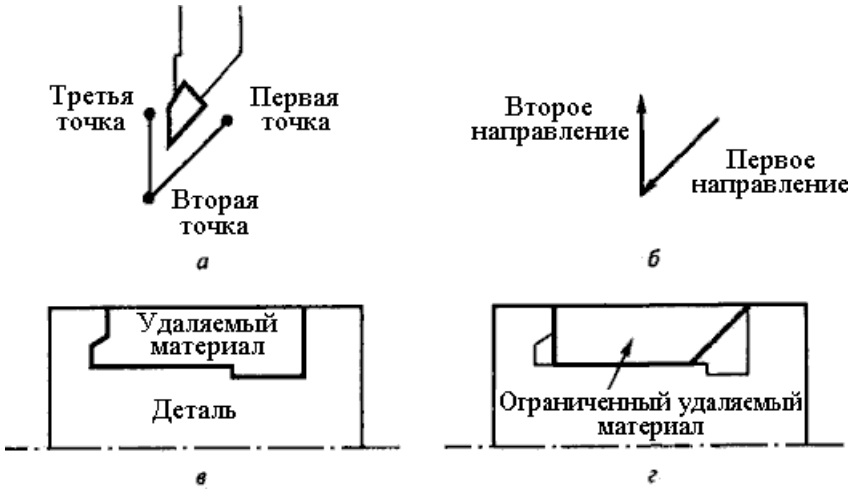


Рис. 7.19. Определение границ обработки тремя точками: *а* – указание трех точек; *б* – полученные два направления обработки; *в* – исходный удаляемый материал; *г* – получаемый после обработки удаляемый материал

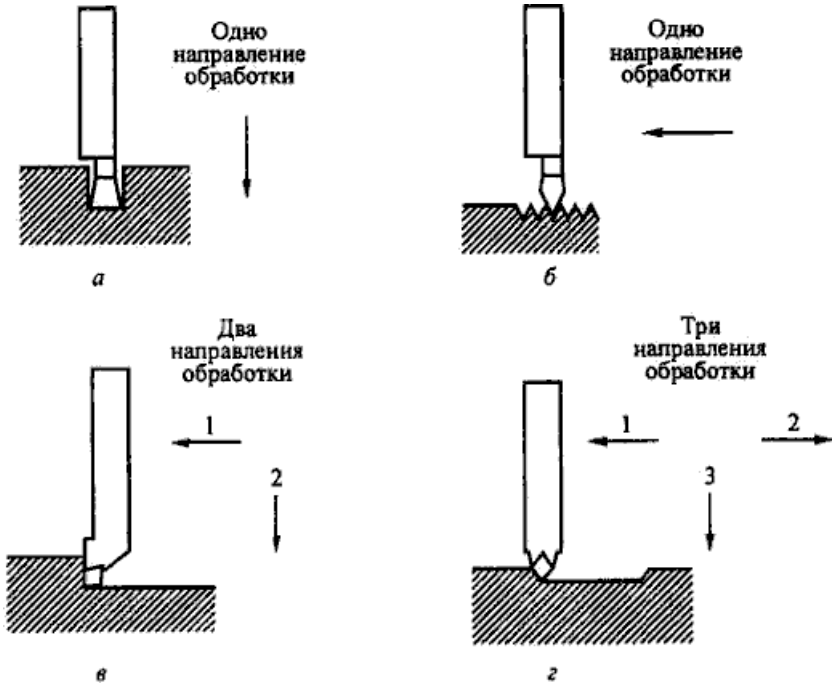


Рис. 7.20. Определение направлений обработки: гравировальным (*а*), резьбовым (*б*), проходным (*в*) резцами и резцом для контурного точения (*г*)

Технологическая оснастка, так же, как и инструментальная, может быть сложной и состоять из нескольких крепежных элементов, каждому

из которых необходимо создать пару систем базирования. Пример такой комбинированной технологической оснастки приведен на рис. 7.21. Системы базирования элементов технологической оснастки рассмотрим ниже.

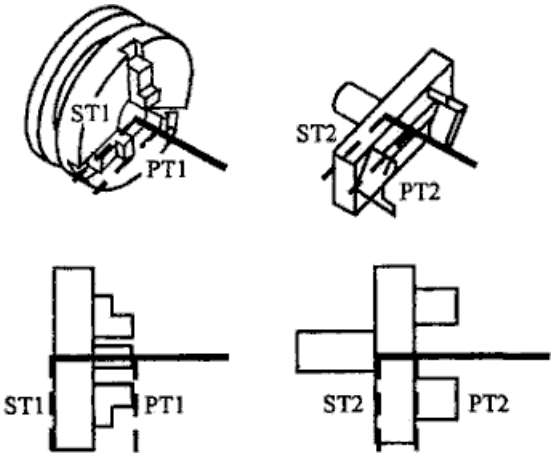


Рис. 7.21. Системы базирования элементов технологической оснастки

Система базирования крепежного приспособления 1 включает в себя системы базирования:

- шпинделя (ST1), которая при сборке должна совместиться с системой базирования станка (МТ);
- крепежного приспособления 2 (PT1).

Система базирования крепежного приспособления 2 включает в себя системы базирования:

- крепежного приспособления 1 (ST2),
- заготовки детали (PT2).

При сборке данной комбинированной технологической оснастки системы базирования ее крепежных приспособлений 2 и 1 (PT1 и ST2) будут совмещены. В единой кинематической схеме токарного станка система базирования крепежного приспособления 1 (ST1) будет совмещаться с системой базирования шпинделя станка МТ, а PT2 будет совмещаться с системой базирования заготовки.

Определение всех составляющих кинематической схемы позволяет собрать воедино все составляющие оборудования:

- монтировать инструмент с элементами инструментальной оснастки;
- автоматически закреплять элементы оснастки инструмента в револьверной головке или на суппорте в начале последовательности операций;
- автоматически устанавливать смонтированный инструмент в головку или на суппорт в начале операции;
- автоматически устанавливать станок в исходную позицию (первую точку) обработки детали в начале цикла.

Лекция 19. Алгоритм работы в CAM-системе

Несмотря на то что сегодня существует не один десяток CAM-систем и все они отличаются интерфейсом и возможностями, порядок работы с ними примерно одинаков.

Выбор геометрии

Самым первым действием технолога-программиста является выбор геометрических элементов, подлежащих обработке. Такие геометрические элементы называются рабочими, или обрабатываемыми. Это могут быть точки, линии, поверхности, грани и ребра 3D-моделей.

Современные CAM-системы позволяют контролировать перемещение инструмента не только относительно рабочих элементов, но и относительно других геометрических элементов. Можно выбрать контролируемые элементы, которых инструмент не должен касаться ни при каких условиях.

Некоторые CAM-системы требуют определения геометрии заготовки уже на начальном этапе проектирования обработки. Это означает, что система «видит» заготовку и рассчитывает траектории, исходя из действительного припуска. Заготовка может быть определена несколькими способами:

- в виде цилиндра;
- в виде параллелепипеда (куба);
- произвольной формы.

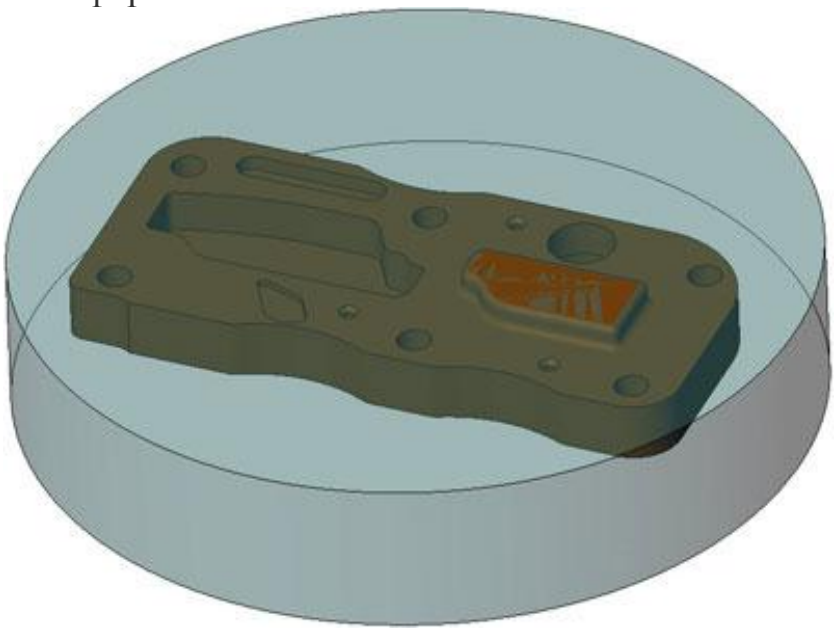


Рис. 12.11. Цилиндрическая заготовка

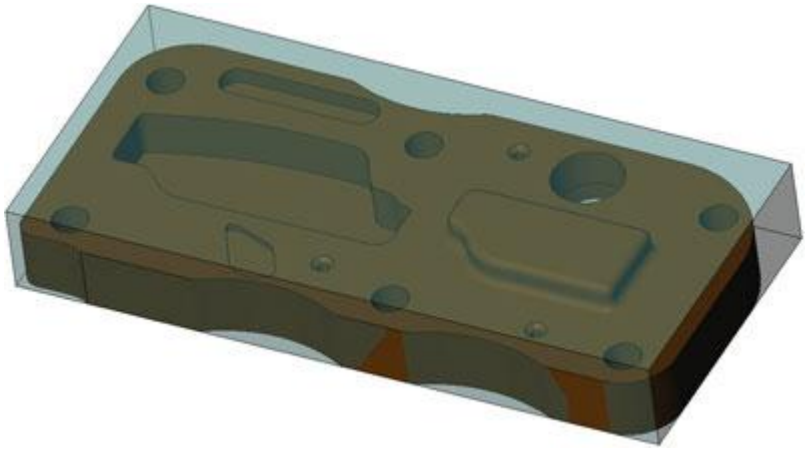


Рис. 12.12. Заготовка в виде параллелепипеда

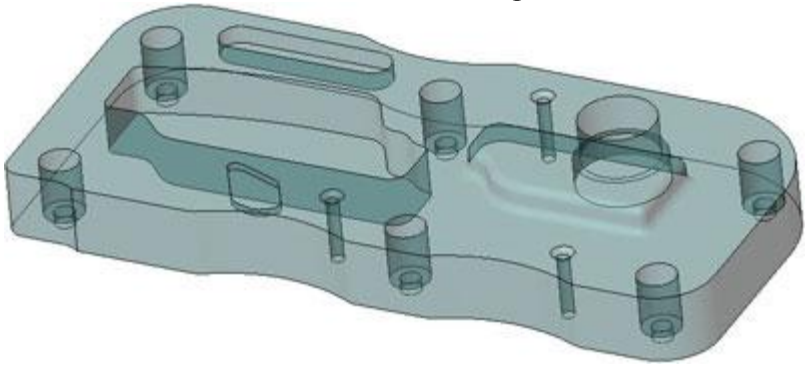


Рис. 12.13. Для построения заготовок сложных форм, имитирующих отливки и поковки, CAM-система может создавать модели заготовок, смещая внешние границы 3D-модели детали на указанное расстояние. Большинство современных CAD/CAM-систем позволяют импортировать 3D-модель заготовки, которая была создана в другой или в этой же системе

Существуют системы, которые не требуют определения геометрии заготовки на этом этапе. Заготовка назначается и используется только на этапе верификации и не участвует в процессе расчета траекторий. Такое решение является недостаточно эффективным, так как при расчетах система всегда исходит из заготовки правильной формы – параллелепипеда или цилиндра. Если же на самом деле заготовка имеет неправильную форму, то система может сформировать довольно много холостых ходов.

Выбирая геометрические элементы, подлежащие обработке, технолог-программист должен учитывать положение детали и заготовки относительно нулевой точки. Здесь есть два пути. Во-первых, можно сместить 3D-модель детали относительно нулевой точки таким образом, чтобы выбранный элемент совпал с ней. Во-вторых, можно смещать нулевую точку относительно модели, «привязывая» ее к определенному геометрическому элементу. Однако это не означает, что первоначальный выбор нулевой точки является окончательным. Система позволяет изменять любые параметры, в том числе и положение нулевой точки детали, в любой момент и на любом этапе проектирования обработки.

Выбор стратегии и инструмента, назначение параметров обработки

На втором этапе работы с CAM-системой технолог-программист выбирает стратегию и параметры обработки, назначает инструмент и режимы резания. Современная система обычно имеет солидный набор стратегий и позволяет выполнить обработку одной и той же детали разными способами.

Условно все стратегии можно разделить на черновые и чистовые, стратегии плоской и объемной обработки. Рассмотрим стратегии, характерные для большинства современных CAM-систем.

Плоская обработка

Стратегии плоской обработки применяются при работе с 2D-геометрией. В этом случае не требуется большого разнообразия – вся обработка сводится к фрезерованию контура или плоскости, выборке кармана и обработке отверстий (рис. 12.14–12.17).

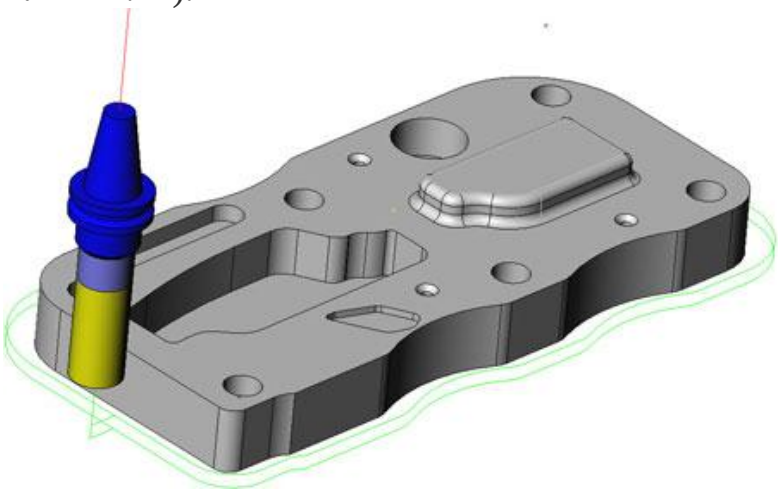


Рис. 12.14. Контурная стратегия (Contour). Для чернового фрезерования указываются количество проходов и шаг между ними (перекрытие)

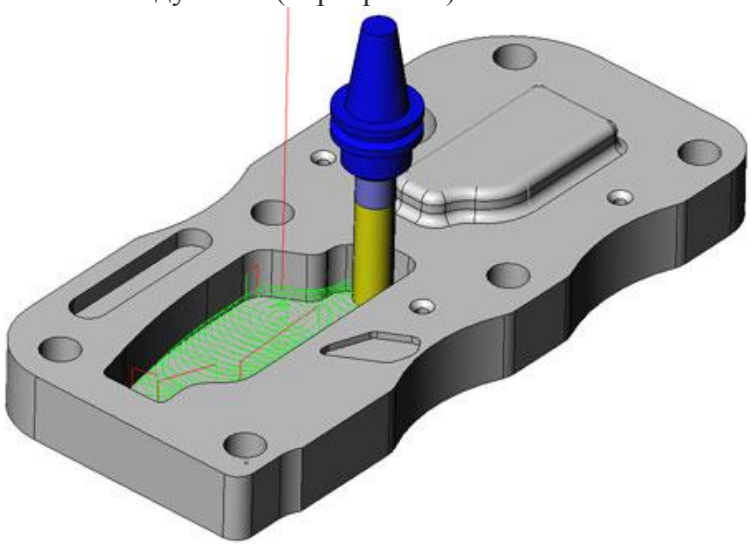


Рис. 12.15. Обработка кармана (Pocket). Эта стратегия предназначена для выборки замкнутых областей. Основными параметрами являются шаг между проходами фрезы и тип траектории (параллельная, спиральная, зигзаг и др.)

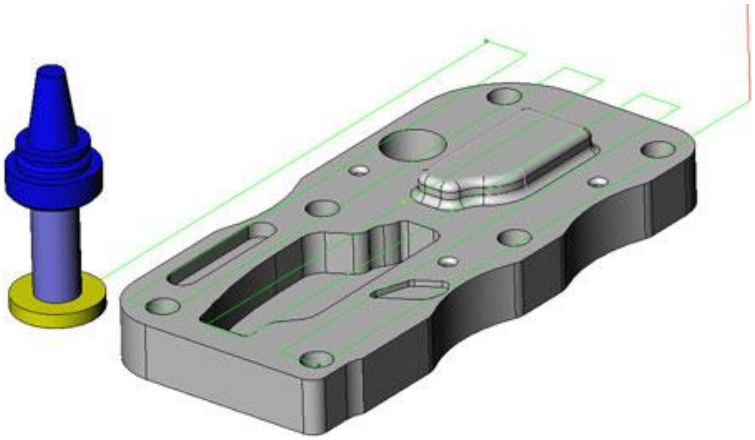


Рис. 12.16. Обработка торца (Face). Основными параметрами для этой стратегии являются шаг между проходами фрезы и угол обработки

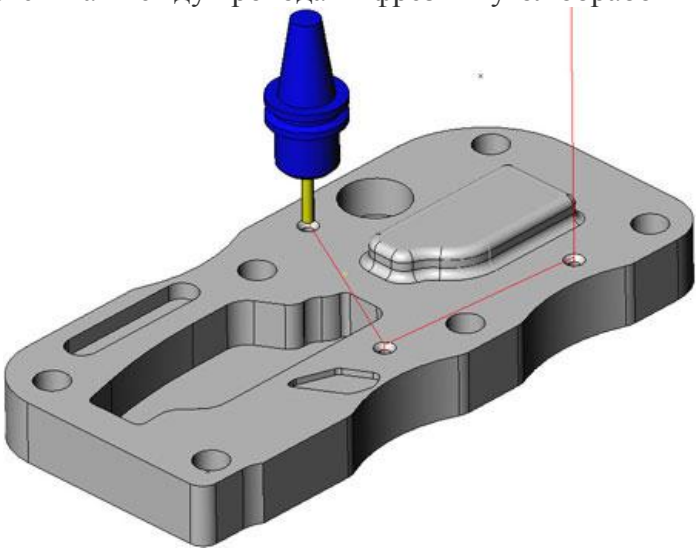


Рис. 12.17. Обработка отверстий: сверление (Drill), нарезание резьбы (Threading), растачивание (Boring). Основные параметры – тип операции и глубина обработки

Объемная обработка

Стратегии объемной обработки предназначены для работы с 3D-моделями. Эти стратегии отличаются большим разнообразием, однако все они условно могут быть разделены на черновые и чистовые.

Стратегии объемной черновой обработки предназначены для быстрой послойной выборки большого объема материала и подготовки детали к последующей чистовой обработке. Стратегии объемной чистовой обработки используются для окончательного фрезерования поверхностей с требуемым качеством. Зачастую при объемном чистовом фрезеровании управление перемещением режущего инструмента осуществляется одновременно минимум по трем координатам. Как правило, при объемной обработке используют сферические фрезы. В этом случае произвести расчет перемещения инструмента самостоятельно, без использования CAD/CAM-системы чрезвычайно трудно.

В качестве примеров рассмотрим некоторые стратегии объемной обработки более подробно.

Обработка кармана – стратегия, предназначенная для эффективного удаления материала из закрытых или открытых карманов. Существует множество схем карманной обработки: зигзаг, в одном направлении, параллельная и круговая спираль. Современная CAD/CAM-система выбирает оптимальную схему фрезерования, обеспечивая максимальную производительность и минимальное число холостых ходов. Как правило, эта стратегия заключается в последовательной послойной выборке материала и выполнении заключительного чистового обхода контура на окончательной глубине. При зигзагообразной схеме обработки кармана происходит изменение вида фрезерования – с встречного на попутное или наоборот.

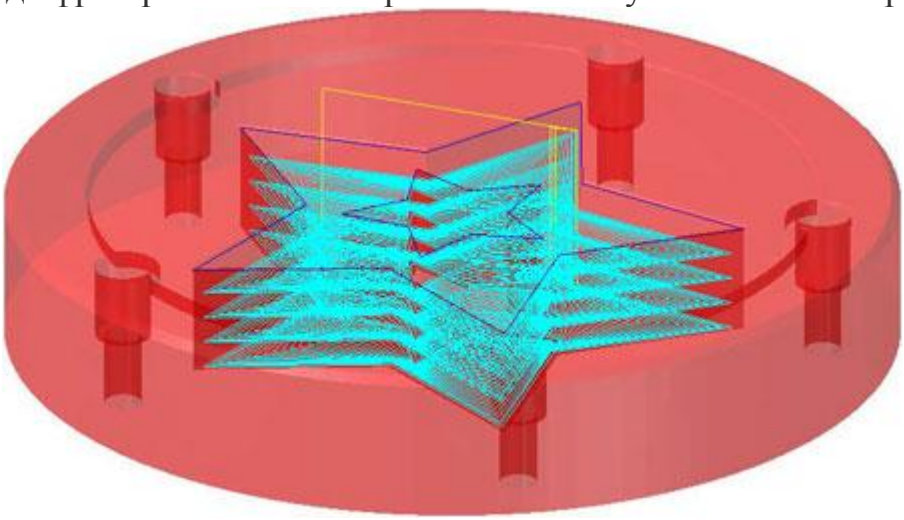


Рис. 12.18. Послойная обработка кармана

Стратегия радиальной обработки обычно применяется для черновой или чистовой обработки деталей круглой формы. Перемещение инструмента в этой стратегии производится от центра детали к ее внешним границам (или наоборот) с постепенным изменением угла в плоскости обработки.

С помощью черновой вертикальной выборки можно быстро обработать деталь, используя движения, аналогичные сверлению. Производства, использующие такую стратегию, приобретают специальные плунжерные фрезы, позволяющие быстро выбрать материал и имеющие подвод охлаждающей жидкости через ось инструмента. Стратегия черновой вертикальной выборки отлично подходит для обработки глубоких впадин и карманов.

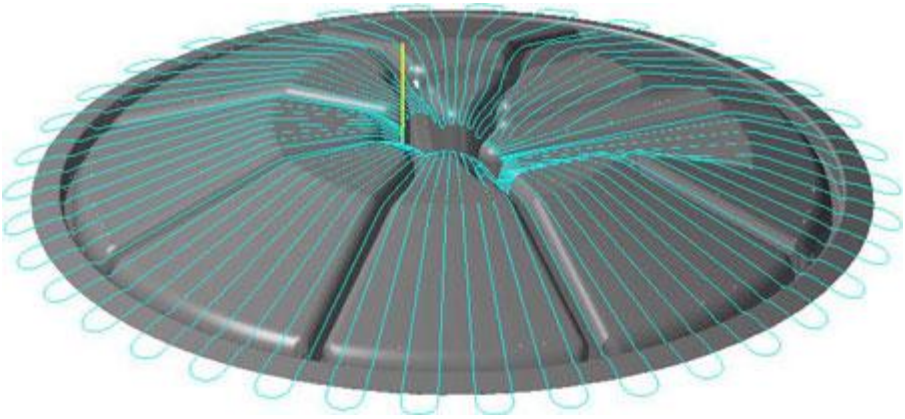


Рис. 12.19. Радиальная обработка

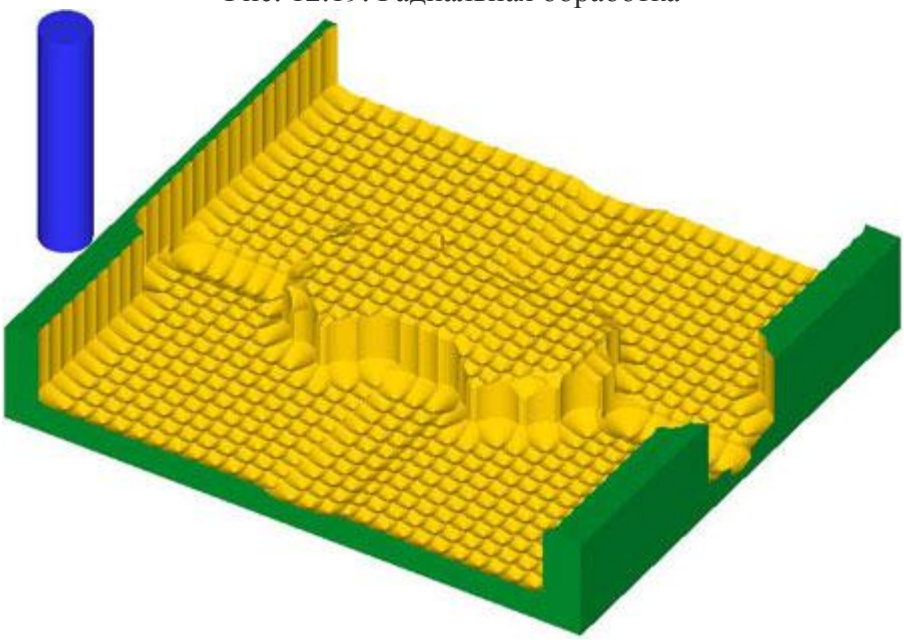


Рис. 12.20. Результат применения стратегии черновой вертикальной выборки

Стратегия фрезерования остатков (дообработка) позволяет автоматически удалить материал, оставшийся от предыдущей операции. Для увеличения производительности обработки принято выбирать материал сначала инструментом большого диаметра, а уже затем производить фрезерование в труднодоступных местах инструментом меньшего диаметра. Система, анализируя объем снятого и оставшегося материала, автоматически генерирует траекторию для выборки материала, который не был удален в предыдущей операции обработки.

Стратегия контурной обработки используется для черновой или чистовой контурной обработки деталей произвольной формы. Суть стратегии заключается в удалении припуска за счет проходов фрезы по контурам, созданным путем «смещения» границ текущего слоя по Z.

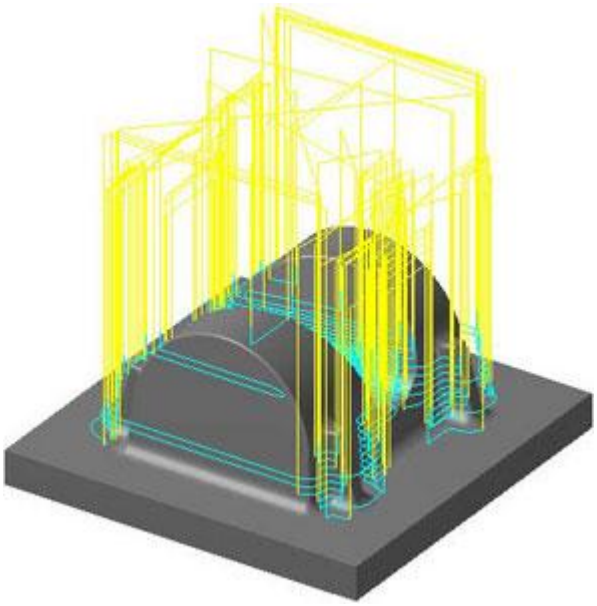


Рис. 12.21. Стратегия дообработки меньшим инструментом

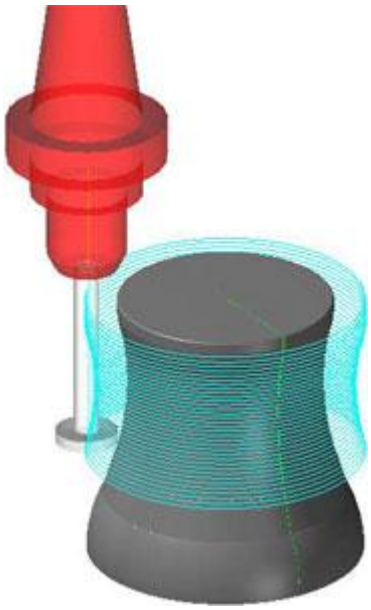


Рис. 12.22. Объемная контурная обработка

Стратегию обработки по потоковым линиям применяют для чистовой обработки любых поверхностей. Система создает траектории с учетом формы и направления поверхностей.

Стратегия проекционной обработки позволяет наложить на любой участок обрабатываемой поверхности своеобразный шаблон траектории движения инструмента или спроецировать плоскую траекторию на 3D-модель.

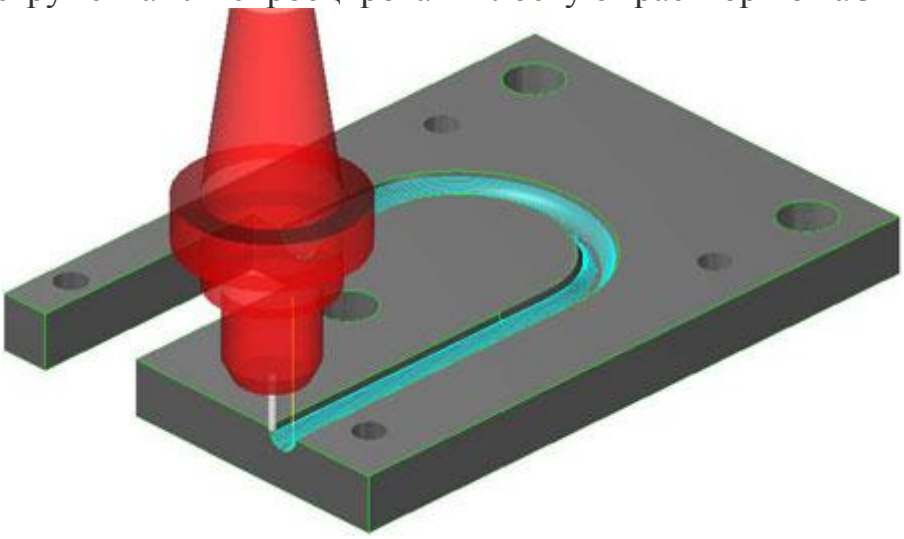


Рис. 12.23. Обработка по потоковым линиям, схема – зигзаг

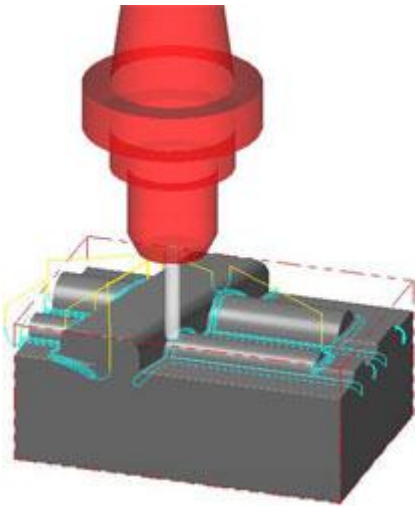


Рис. 12.24. Карандашная обработка

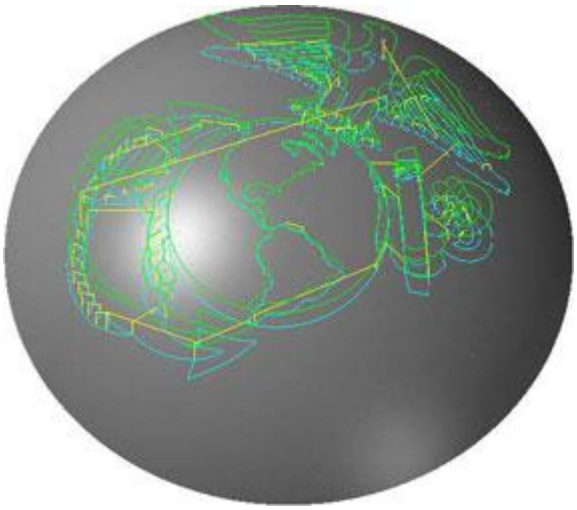


Рис. 12.25. Проецирование траектории на поверхность

После выбора стратегии и определения основных параметров обработки необходимо назначить режущий инструмент либо выбрать его из библиотеки инструментов. На этом же этапе определяются режимы резания: скорость рабочей подачи, обороты шпинделя – и программируется включение или выключение СОЖ. Результатом второго этапа является сформированная траектория. В дереве операций CAM-системы должна появиться новая технологическая операция.

Бэкплот и верификация

В настоящее время любая CAM-система имеет функции для проверки правильности созданных траекторий. Функция бэкплота (Backplot) позволяет программисту отслеживать перемещения режущего инструмента. При этом он может наблюдать за траекторией центра инструмента и самим инструментом прямо на 3D-модели. Как правило, бэкплот используется для предварительной проверки рассчитанных траекторий и настройки технологических параметров операции. Окончательная проверка обычно осуществляется с помощью верификации.

Инструменты верификации предоставляют программисту прекрасные возможности для наглядной проверки траектории движения инструмента, для оценки качества и общей технологии изготовления детали. Основной смысл верификации заключается в демонстрации процесса удаления материала заготовки и возможности посмотреть на окончательный результат работы УП – модель изготовленной детали. Полученную «виртуальную» деталь можно рассмотреть с разных сторон. Можно увидеть, все ли элементы выполнены правильно, и даже разглядеть гребешки на материале, оставшиеся от инструмента.

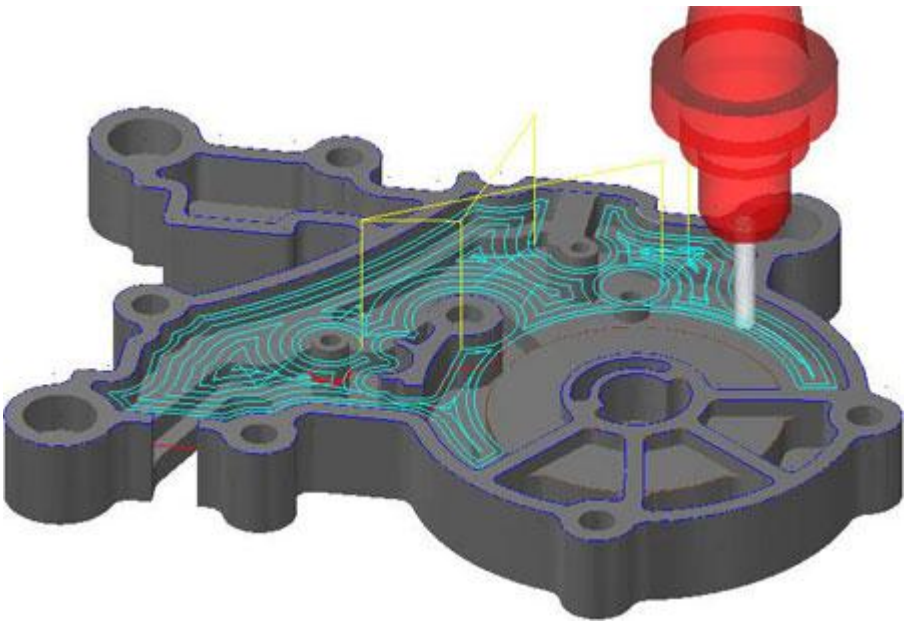


Рис. 12.26. В режиме «Backplot» можно наблюдать за траекторией перемещения центра инструмента

Верификация может быть твердотельной или растровой. В случае твердотельной верификации система работает с трехмерной моделью заготовки и позволяет реализовать множество полезных функций. К примеру, измерить обработанную деталь или экспортировать ее в CAD-систему для дальнейшей работы. Растровая верификация лишь имитирует работу с трехмерной моделью и применяется сейчас достаточно редко.

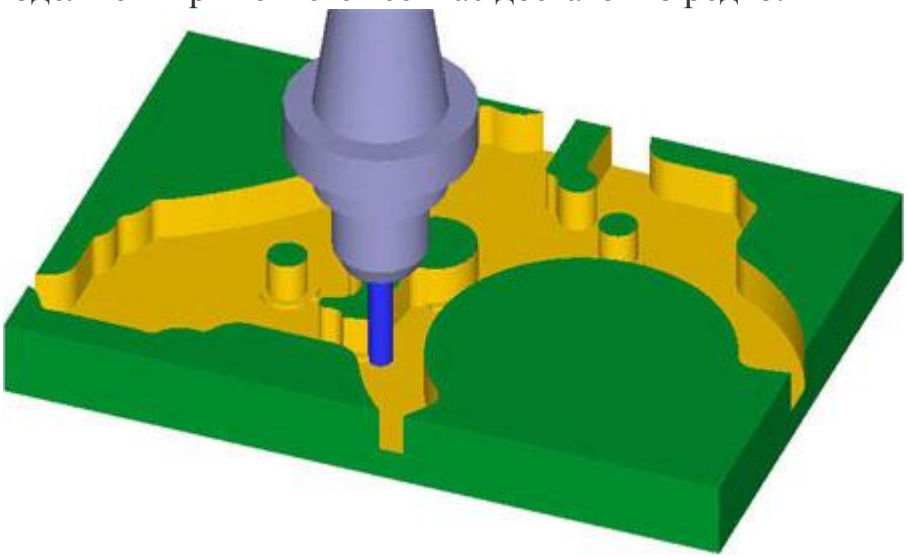


Рис. 12.27. Процесс верификации

Учтите, что на этом этапе мы еще не имеем готовой УП, то есть самого кода. Код программы обработки появится позже, после постпроцессирования. Но что же мы тогда проверяем?

Результатом предыдущего этапа является сформированная траектория перемещения инструмента для определенной операции. Информацию об этой траектории, всех координатах и инструменте система записывает в специальный промежуточный файл. Этот файл не похож на обычную программу обработки, то есть в нем нет привычных G- и M-кодов. В

настоящий момент именно этот файл является объектом для верификации и бэкплота.

Постпроцессирование

Постпроцессор – программа, которая преобразует файл траектории движения инструмента и технологических команд (промежуточный файл), сформированный CAD/CAM-системой, в файл УП в соответствии с требованиями конкретного комплекса станок – СЧПУ. В ряде отечественных систем постпроцессоры называются паспортами.

Для того чтобы абстрагироваться от большого разнообразия станков, систем ЧПУ и языков программирования обработки, CAM-система генерирует промежуточный файл, содержащий информацию о траектории, угле поворота инструмента (в случае многокоординатной обработки) и обобщенные команды управления станком. Обычно этот промежуточный файл называется CL-файлом (Cutter Location) или CLDATA-файлом.

Далее в работу вступает постпроцессор. Он преобразует этот промежуточный файл в программу обработки в строгом соответствии с форматом программирования конкретного станка с ЧПУ.

Такая технология позволяет программисту во время проектирования обработки в CAD/CAM-системе не задумываться о том, на какой конкретно станок попадет УП и каков будет ее формат. Ему необходимо лишь выбрать постпроцессор, соответствующий определенному станку с ЧПУ, и тот возьмет на себя всю работу по созданию программы обработки определенного формата.

Откуда же взялась идея постпроцессирования и почему до сих пор в этой области существуют проблемы? По идее, разработчики станков и систем ЧПУ должны соблюдать стандарты Ассоциации электронной промышленности (EIA) и Международной организации стандартизации (ISO). То есть, одинаковые G-коды на разных станках с ЧПУ должны выполнять одну и ту же функцию. В принципе, эти стандарты соблюдаются, но только для основных команд станка, например, для включения СОЖ, линейной и круговой интерполяции.

Если же дело доходит до других команд, постоянных циклов и специальных функций, то приверженность определенному стандарту практически отсутствует. Это приводит к невозможности правильного исполнения одной и той же УП на разных станках с ЧПУ. К этой проблеме прибавляется другая – постоянная «гонка» производителей оборудования с ЧПУ. В условиях жесткой конкуренции станкостроительные компании создают все более сложные станки, а разработчики систем ЧПУ придумывают новые циклы и функции. В результате серьезные отличия в формате УП могут быть замечены даже у станков одной фирмы, но разных моделей.

Рис. 12.28. Схема получения УП для конкретного комплекса «Станок – система ЧПУ»

Когда появились первые CAM-системы, то для работы с конкретным станком с ЧПУ разрабатывался индивидуальный постпроцессор, который представлял собой исполняемый файл. Индивидуальный постпроцессор мог быть создан только опытным программистом (именно программистом, а не технологом-программистом) путем длительного общения со станочником для выяснения всех нюансов работы с определенным станком. После этого проходили испытания и доводка индивидуального постпроцессора «до ума». В результате постпроцессор выполнял свои функции, но процесс его создания был очень долгим, мучительным и дорогим. Изменения в таком постпроцессоре мог сделать только сам авторразработчик.

В 70–80-х годах прошлого века наблюдался значительный подъем автоматизированного машиностроения. Как грибы после дождя стали появляться новые станки с различными системами ЧПУ. Возник огромный спрос на технологическое программное обеспечение и CAD/CAM-системы.

Программисты просто не успевали разрабатывать новые индивидуальные постпроцессоры, что подтолкнуло их к автоматизации собственного труда. Появилась идея создания обобщенных постпроцессоров для разных станков с одинаковой системой ЧПУ. В этом был смысл – при работе с системой ЧПУ одной фирмы даже на разных станках отличия в УП будут минимальными, значит, и изменения, которые нужно внести в исполняемый файл, тоже будут незначительными.

Классический постпроцессор, находящийся на службе современной CAD/CAM-системы, состоит из нескольких файлов. Во-первых, это исполняемый файл – программа. Исполняемый файл занимается преобразованием данных промежуточного CL-файла в кадры УП. Преобразование осуществляется по некоторым правилам, отличным для разных станков и систем ЧПУ. Эти правила, или алгоритмы преобразования, находятся во втором файле – текстовом.

Текстовый файл написан на специальном макроязыке, который может быть изменен в случае необходимости самим технологом-программистом в любом текстовом редакторе. Вносить какие-либо изменения в исполняемый файл не требуется. Как правило, с CAD/CAM-системой поставляется набор таких текстовых файлов, которые описывают правила для преобразования промежуточных файлов в программу обработки для нескольких десятков различных станков и систем ЧПУ. В данном случае постпроцессором можно

смело называть именно текстовый файл. Исполняемый же файл является модулем CAM-системы и работает незаметно для пользователя. В некоторых CAM-системах присутствует и третий файл, необходимый для постпроцессирования. Этот файл также является текстовым. Он предназначен для ввода дополнительных условий и передачи специальной информации в управляющую программу.

К сожалению, разработчики CAD/CAM-систем не придерживаются единого стандарта для формирования промежуточных CL-файлов. В результате текстовый файл с описанием алгоритмов преобразования (постпроцессор) одной CAM-системы будет абсолютно бесполезен для использования внутри другой CAM-системы. Для разработки даже такого текстового постпроцессора «с нуля» необходимы глубокие знания самой системы и принципов преобразования исходных данных. Поэтому пользователю предоставляют набор базовых постпроцессоров с редактируемыми переменными. Работая с этими переменными, пользователь может самостоятельно настроить постпроцессор для имеющегося станка.

Сегодня наиболее эффективным и простым решением проблем постпроцессирования на предприятии является использование универсального постпроцессора (генератора).

Универсальные постпроцессоры позволяют работать со многими известными CAD/CAM-системами и одновременно не зависеть от них. Дело в том, что, в отличие от классических постпроцессоров, которые работают с промежуточным файлом только «родной» системы, универсальные постпроцессоры способны «перерабатывать» CL-файлы разных CAM-систем. Прибавьте сюда продвинутый интуитивно-понятный графический интерфейс, позволяющий строить наглядную кинематическую схему станка и задавать типовые параметры системы ЧПУ, и вы получите мощное и универсальное средство для решения проблем совместимости любого оборудования с любой CAD/CAM-системой.

Как оценить результаты работы постпроцессора? Очень просто. Если полученная программа не требует ручной правки и доводки, значит, постпроцессор работает правильно. Это главный принцип. Хороший постпроцессор способен сформировать УП с учетом максимальных возможностей станка с ЧПУ и CAD/CAM-системы и должен грамотно работать с постоянными циклами. К примеру, если система ЧПУ станка поддерживает винтовую интерполяцию, то желательно, чтобы постпроцессор не заменял ее множеством линейных перемещений. Естественно, что программа обработки не должна содержать лишних кодов и координат.

Передача УП на станок с ЧПУ

Итак, программа обработки готова. После постпроцессирования CAD/CAM-система открывает файл УП в специальном редакторе или в

стандартном «Блокноте» операционной системы Windows. Многие системы поставляются со специальными редакторами УП, которые являются простым и удобным инструментом для правки и передачи программ на станок.

В большинстве случаев связь осуществляется в соответствии со стандартом RS-232. При этом COM-порт персонального компьютера соединяется кабелем со специальным разъемом на корпусе станка или панели УЧПУ. Для передачи данных необходимо, чтобы УЧПУ станка и коммуникационная программа были синхронизированы. Это достигается соответствующей настройкой параметров СЧПУ и коммуникационной программы. Например, если значение для стоповых битов (stop bits) системы ЧПУ станка равно двум, то такое же значение должно находиться и в соответствующем параметре коммуникационной программы.

После настройки основных параметров УП можно передать на станок. Вам придется переключить систему ЧПУ станка в режим приема/передачи данных, нажать на панели УЧПУ клавишу Прием данных, а в коммуникационной программе выбрать пункт меню Передать. Для передачи данных со станка на ПК нужно действовать наоборот. Сначала переключаем СЧПУ станка в режим приема/передачи данных, затем в коммуникационной программе выбираем пункт меню Принять и нажимает клавишу на панели УЧПУ станка Передать данные. Внимательно читайте документацию к станку – в ней вы обязательно найдете информацию о настраиваемых параметрах для приема и передачи данных, а также последовательность действий при работе с внешними устройствами хранения информации.

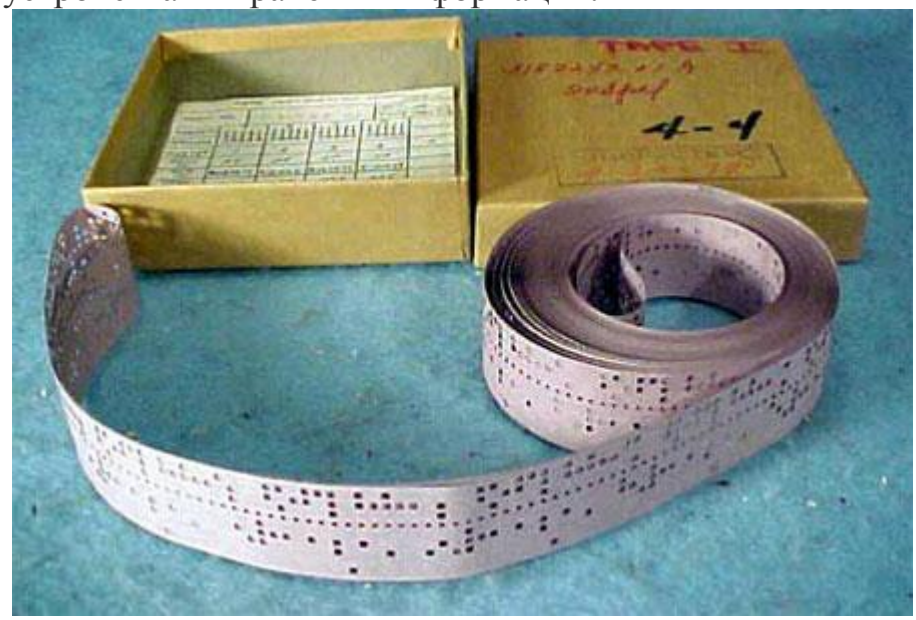


Рис. 12.29. На многих заводах до сих пор программы загружают в станок с ЧПУ при помощи перфоленты

Для передачи УП, размер которых превышает размер свободной памяти СЧПУ, используется режим DNC. В этом режиме программа обработки не записывается в память системы ЧПУ, а выполняется прямо с компьютера. Система ЧПУ имеет (или создает в памяти) специальный программный буфер, в который приходит часть программы. Как только этот буфер заполняется, система посылает сигнал на компьютер, чтобы тот прекратил передавать

данные. В это время СЧПУ станка выполняет кадры УП, находящиеся в буфере. Когда буфер освобождается, система ЧПУ посылает новый сигнал на ПК, который разрешает дальнейшую передачу данных. Этот процесс продолжается до полного выполнения УП. Для работы в режиме DNC необходимо, чтобы СЧПУ станка было соответствующим образом подготовлено производителем, а на персональном компьютере находилась коммуникационная программа с поддержкой этого режима.

Наиболее продвинутые системы дают возможность передавать данные по локальной сети, а не по RS-232. В этом случае пользователь прямо с ПК может «видеть» содержимое памяти станка. А прием и передача данных осуществляются привычным для Windows способом – перетаскиванием файлов из одной папки в другую, что очень удобно. Некоторые станки с ЧПУ снабжены встроенным дисководом или умеют читать информацию с флэш-карт.

Лекция 20. Аддитивные технологии. Аддитивное производство

«Аддитивные технологии» (Additive manufacturing), или AF-технологии (AF - от Additive Fabrication) - термин, которым в мировой практике обозначается применение 3D-печати в промышленности, что означает изготовление изделия путем добавления. Суть аддитивного производства — в сложении, а не вычитании, в таком способе создания детали сложной формы, когда материал наносится последовательно, как правило, слой за слоем, поэтому расходуется его столько, сколько необходимо, не больше и не меньше. Программное обеспечение 3D-принтера делит трехмерную компьютерную модель на слои одинаковой толщины, после чего принтер создаёт прототип, путём последовательного нанесения одного слоя модельного материала за другим.

3D-принтер — это устройство, работающее по принципу послойного формирования физического объекта из цифровой 3D-модели.

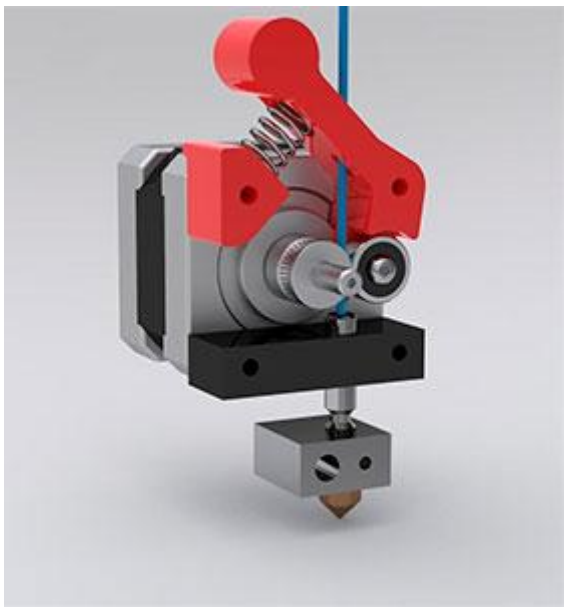
Процесс трехмерной печати еще называется быстрым прототипированием или аддитивным производством.

Настольный 3D-принтер

Технологии послойного формирования объектов называются аддитивные технологии от английского слова additive – добавлять. В отличии от традиционных способов получения деталей (фрезеровка, точение, распил и т.п.), на 3D-принтере детали получаются методом добавления материала (слоев), что позволяет добиться высокой экономии материалов. 3D-печать может осуществляться разнообразными материалами (от пластика до металла), а также несколькими технологиями, подробнее о которых мы расскажем ниже.

Управление 3D-принтером осуществляется программным способом. Для того, чтобы принтер воспроизводил физический объект, просчет задания на печать должен происходить в специализированном программном обеспечении, в которое загружается цифровая модель в формате для 3D-печати (STL). Специальная программа слайсер разбивает цифровую 3D-модель на слои и выдает сформированный бинарный код понятный для 3D-принтера. Далее полученный код может быть запущен на печать в программном обеспечении для принтера или записан на карту памяти для непосредственной печати без ПК.

Способы позиционирования печатающей головки 3D-принтера



FDM экструдер

В зависимости от расположения и механики работы (кинематической модели) печатающего механизма, они подразделяются на следующие основные способы:

- Декартова, когда в конструкции используются три взаимно-перпендикулярные направляющие, вдоль каждой из которых двигается либо печатающая головка, либо основание модели.
- Дельта-робот: три радиально-симметрично расположенных двигателя согласованно смещают основания трёх параллелограммов, прикреплённых к печатающей головке
- Автономная: когда печатающая головка размещена на собственном шасси, и эта конструкция передвигается целиком за счёт какого-либо двигателя, приводящего шасси в движение.

Сферы применения 3D-принтеров

- быстрое прототипирование
- мелкосерийное производство
- изготовление мастер-моделей и форм для литейного производства
- изготовление бытовых предметов
- производство готовых изделий со сложной геометрией и внутренней структурой
- макетирование
- реклама
- в медицине для изготовления протезов и имплантатов, также ведутся исследования по 3D-печати внутренних органов человека
- строительство зданий и сооружений
- производства корпусов экспериментальной техники (от телефонов до оружия)
- пищевое производство
- другое

Основные технологии 3D-печати

- Лазерная стереолитография (SLA)
- Полимеризация фотополимерного пластика ультрафиолетовой лампой (DLP)
- Выборочное лазерное спекание (*SLS*)
- Выборочное лазерное сплавление (SLM)
- Моделирование методом послойного наплавления (FDM)
- Электронно-лучевая плавка (EBM)
- Технология многоструйного моделирования (MJM)
- Технология цветной струйной печати (CJP)
- Ламинирование (LOM)
- Биопринтеры (экспериментальные)

Аддитивные технологии отличаются друг от друга выбором материалов и способа их нанесения, однако во всех случаях создание модели основывается на послойном наращивании. Предполагается, что готовая деталь не нуждается в традиционной механической обработке. Так что аддитивное производство — это еще один способ изготовления деталей и предметов из разных материалов наряду с литьем, прокатом, штамповкой и резкой.

Расходными материалами может послужить пластик, бетон, гипс, деревянное волокно, поликарбонат, металл и даже живые клетки и шоколад. Способов нанесения существует два:

- струйный;
- лазерный.

К струйному способу относятся такие технологии, как моделирование методом наплавления (Fused deposition modeling) и Polyjet.

К лазерному способу:

- послойное ламинирование (Laminated object manufacturing),
- селективное лазерное плавление (Selective laser melting),
- селективное лазерное спекание (Selective laser sintering),
- лазерная наплавка металла (Laser metal deposition);
- лазерная стереолитография (Laser stereolithography).

Считается, что аддитивные технологии впервые были разработаны и применены более 20 лет назад компанией Stratasys (США), которая и по сей день продолжает оставаться лидером в области 3D-печати и AF.

Мировыми лидерами в области аддитивных технологий являются Соединенные Штаты Америки, Германия, Китай, Япония. Кроме того, в 22 странах уже созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс GARPA. Например, корпорация "Боинг" благодаря 3D-печати изготавливает более 22 тысяч деталей 300 наименований для 10 марок коммерческих и военных самолетов. Американское космическое ведомство NASA объявило об успешном испытании на огнеупорность инжектора ракетного двигателя, изготовленного с помощью селективного лазерного

плавления. Немецкий концерн Siemens заявил о переходе с традиционных методов производства деталей для горелок газовых турбин на технологию селективного лазерного плавления. В Китае прошли первые испытания истребителя с несущей конструкцией, напечатанной из порошка титана. А компания Southern Fan представила крупнейший в мире 3D- принтер (28 метров в длину, 23 метра в ширину и 9,5 метра в высоту), способный производить металлические компоненты с максимальным диаметром до 6 метров и весом до 300 тонн. Изделия планируется применять в ядерной, нефтехимической, металлургической отрасли. Компания Local Motors с помощью 3D-печати изготовила первый пригодный для поездок автомобиль под названием Strati. Этот двухместный электрокар официально представили публике в сентябре 2014 года в Чикаго. Strati состоит всего из 49 деталей, включая напечатанный на 3D-принтере корпус, в то время как типичный промышленный автомобиль имеет в своем составе несколько тысяч деталей. Печать автомобиля из термопластика, усиленного углеродными волокнами, с помощью лазерной системы заняла примерно 44 часа. Автомобиль способен разгоняться до скорости 40 миль в час и проезжать на одной зарядке до 120 миль.

В России используют и внедряют аддитивные технологии считанное количество промышленных компаний и исследовательских центров. За последние 15 лет в России был выдан 131 патент по различным аспектам аддитивного производства (0,14% от мирового количества), причем 14 из них получили российские заявители, а 117 — иностранные. Для сравнения: Южная Корея, США, Япония и Китай совместно владеют 90% патентов в этой сфере. В институте ВИАМ впервые в России изготовили по аддитивной технологии с применением отечественной металлопорошковой композиции так называемый завихритель - деталь перспективного авиационного двигателя. Цикл изготовления 60 изделий методом селективного лазерного сплавления составляет 5-6 дней, что в 10 раз меньше, чем при традиционной технологии литья, которая требует 59 дней! Аддитивным путем выращенный завихритель уже внесен в конструкторскую документацию и пошел в производство.

AF-технологии имеют много преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. Инновационные AF позволяют вырастить “деталь в детали”, деталь - с переменными по толщине свойствами материала; сетчатые конструкции, которые не получить литьем или механообработкой. Используя бионические принципы, можно спроектировать и изготовить, например, эндопро- тез пустотелой кости. Один из существенных плюсов AF - возможность моментальной передачи цифровых моделей в любую точку мира и организации в кратчайшие сроки локального производства в любых масштабах. При использовании AF экономия сырья может достигать 75 процентов! Ведь технологический процесс выстроен не по принципу “беру камень и отсекаю от него лишнее” (Микеланджело), а наоборот: “не беру ничего лишнего” и выращиваю так, как творит природа тот или иной живой объект.

Далеко не все экономически целесообразно делать с помощью аддитивного производства, но есть очевидная ниша – это штучное и мелкосерийное производство уникальных деталей из дорогих материалов и в тех случаях, когда стоимость станочной обработки высока. На самом деле это очень большая ниша, начиная от ремонта и восстановления деталей сложных агрегатов и индивидуальных протезов до создания уникальных деталей сложной конфигурации.

Сегодня в России сформировалась задача по созданию новой отрасли промышленности – отрасли аддитивных технологий и определения направления ее развития. Во всех развитых странах происходит бум аддитивных технологий. Мировой рынок данных технологий с 2010 по 2014 год достиг более 3 млрд долларов, прирастая ежегодно более чем на 27%. В ближайшие 20 лет цифровое производство сменит некоторые виды массового, особенно с высокой конечной стоимостью продукции. Необходимо “оседлать эту тенденцию”, объединить усилия специалистов по созданию национальной концепции цифрового производства, в том числе программных кодов, технологического оборудования, а также единых подходов и стандартов, позволяющих обеспечить сквозной цикл проектирования и производства перспективной наукоемкой продукции [9]. Один из важнейших вопросов, который необходимо решать оперативно, - обеспечение новой отрасли кадрами.

На сегодняшний день рынок установок для аддитивного производства делится на три сегмента. Первый сегмент состоит из дешевых 3D-принтеров для офисов, ориентированных на изготовление концептуальных макетов. Второй сегмент - оборудование средней стоимости для создания прототипов деталей с различной степенью точности и/или функциональности. Дешевые и средние по стоимости установки обычно работают с полимерным материалом. Третий сегмент — установки высокого класса, которые стоят от двухсот тысяч до двух миллионов долларов. Они работают с полимерами, металлическими и керамическими порошками, с их помощью можно делать вполне крупногабаритные детали. Ведущие изготовители установок — американские компании 3D Systems и ExOne, израильская Stratasys, шведская Arcam, а также немецкие EOS и Voxejet.

Аддитивное производство полного цикла, включает в себя разработку порошковых композиций, 3D-моделей, конструирование поддержек технологий синтеза (мощность лазера, страте- гию лазерного сканирования, скорость и шаг сканирования). Сегодня в России закупают и используют порошки сплавов зарубежного производства, поставляемые фирмами – производителями установок. При этом имеется острая потребность в металлических порошках отечественных сплавов. Серийного производства порошковых материалов для данных технологий в России нет. Потребность существующего парка установок для аддитивного производства в РФ в порошковых материалах составляет примерно 20 тонн в год.

Изначально термина «3D-печать» не существовало, и инновационные технологии назывались «быстрое прототипирование». Создание прототипов

изделия является наиболее распространенным применением 3D-печати. Модели реальных размеров помогают оценить функциональность и исключить возможность различных ошибок перед серийным производством изделия.

Применение аддитивных технологий в различных отраслях машиностроения обеспечивает:

- изготовление сложнопрофильных и уникальных деталей без использования механических обрабатывающих станков и дорогостоящей оснастки;
- повышение рентабельности производства малой серии и эксклюзивных вариантов;
- устранение влияния "человеческого" фактора при изготовлении деталей: построение детали проводится в полностью автоматическом режиме;
- снижение веса деталей за счет уменьшения толщины стенок, элементов, создания сотовых и иных структур (т.н. бионического дизайна);
- возможность создания комплексных, интегрированных деталей за один технологический цикл;
- отсутствие в деталях литейных дефектов и напряжений;
- управление физико-механическими свойствами создаваемого изделия.

Быстрое прототипирование и 3D печать

Быстрое прототипирование (RP - Rapid Prototyping), сокр. БП — технология быстрого «ма- кетирования», быстрого создания опытных образцов или работающей модели системы для де- монстрации заказчику или проверки возможности реализации.

3D печать - это создание физических объектов на 3D принтере. Печать производится на основе цифровой 3D модели, по принципу послойного выращивания. Существуют различные технологии и материалы печати, но все они работают по общей схеме – слой за слоем создают объект

3d прототипирование широко используется в таких областях как:

- машиностроение
- электронная промышленность
- электротехническая промышленность
- медицина
- ювелирное дело
- архитектурное моделирование

С помощью технологий быстрого прототипирования изделий можно провести моделирование деталей любой сложности, прямо по данным из CAD программ. Сама 3D-печать занимает считанные часы. Это позволяет сократить время в проектировании готовых изделий.

Преимущества быстрого прототипирования

- Значительное повышение гибкости производства
- Быстрое и эффективное распространение дизайнерских идей
- Эффективную проверку соответствия, формы и функциональности конструкции
- Повышение конкурентоспособности производства
- Снижение себестоимости продукции, особенно для мелкосерийнойного производства
- Сокращение сроков выхода на рынок новой продукции
- Возможность проведения оперативных испытаний свойств изделий для разработки новых материалов и получения новых свойств продукции
- Интеграция компьютерных технологий и систем САПР

Технологии 3D печати

Основное различие технологий заключается в методах построения слоев. Лазерная стереолитография (Laser Stereolithography, SLA), Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS) и Моделирование методом наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM) самые распространенные технологии 3D печати. SLS и FDM используют плавление или размягчение материала для производства слоев.

Лазерная стереолитография (SLA) - объект формируется из специального жидкого фотополимера, затвердевающего под действием лазерного излучения (или излучения ртутных ламп).

Селективное лазерное спекание (SLS) - технология заключается в послойном спекании лазерным излучением порошкового материала.

Моделирование методом наплавления (FDM) - объект формируется путем послойной укладки расплавленной нити из плавкого рабочего материала (пластик, металл, воск). Рабочий материал слоями попадает на платформу, которая после завершения одного слоя, опускается для нанесения следующего.

Используемые материалы

Различные технологии прототипирования выбираются в зависимости от поставленной задачи и ее сложности, а, следовательно, и различные материалы для будущих моделей. Так как все проекты уникальны, то перед 3D-печатью необходимо проводить подробный анализ, и определить оптимальный по времени и стоимости способ выращивания модели.

- **ABS (пластик)** - подходит для большинства проектов. Самый распространённый материал, чтобы проверить будущий дизайн, оценить размеры, создать образец для презентации или для фокус группы. Можно печатать различными цветами - слоновая кость, белый, черный, красный, синий, зеленый, желтый, оранжевый, серый
- **Гипс (керамика)** - больше всего подходит для архитектурных проектов, дизайна интерьеров, макетов зданий, проектирования

районов. Так же используется для создания моделей для выставок и презентаций. Цветная 3D-печать позволяет делать наглядные модели, не требующие дальнейшей окраски.

- **Фотополимеры** - используется для точных размеров, проверки функционала, оценки механических свойств. Физические свойства фотополимеров известны заранее, поэтому можно подобрать свойства будущего изделия, и проводить испытания до начала

производства.

Пример использования стереолитографических моделей

Назначение БП

- Для оценки эргономики, визуализации, дизайна изделия
- Для функциональной оценки изделия (проверка качества сборочных изделий, аэродинамических характеристик, практичности)
- Использование в качестве модели для дальнейшего применения в производстве (в качестве литейной формы, электроэрозионного инструмента и др.)

Недостатки технологий БП

- Относительно высокая цена установок и расходных материалов.
- Невысокая точность
- Относительно низкая прочность моделей

С течением времени недостатки постепенно устраняются — снижаются цены, увеличивается выбор технологий и материалов.

Специальные области применения БП

- инженерный анализ
- визуализация потоков
- медицина

Лазерная стереолитография (SLA)

Наиболее точной аддитивной технологией считается стереолитография – метод поэтапного послойного отверждения жидкого фотополимера лазером. SLA принтеры используются преимущественно для изготовления прототипов, макетов и дизайнерских компонентов повышенной точ- ности с высоким

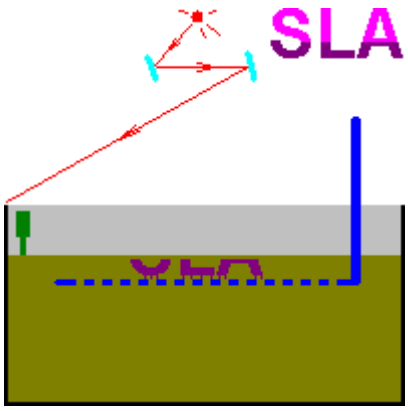
уровнем детализации.

В английской литературе обычно именуется кратко — SLA (сокращенно от Stereolithography). Этот метод стоит немного особняком от других, так как использует в качестве

«строительного материала» не порошки, а фотополимеры в жидком состоянии.

Фотополимер — это вещество, изменяющее свои свойства под воздействием света, обычно ультрафиолетового. Т.е. в обычном состоянии (кстати говоря, не обязательно жидком) они хрупкие и податливые, а при попадании под УФ-излучение электромагнитного диапазона приобрета- ют прочность. Продолжительность облучения и длина волны не может быть произвольной. Она рассчитывается в зависимости от конкретного материала, размеров объекта и условий окружающей среды. Под конкретные нужды подбирают различные источники излучения — лампы — дневного света, ртутные, аргоновые, импульсные, ксеноновые, светодиодные и т.д.

В емкость с жидким фотополимером помещается сетчатая платформа, на ней будет происходить выращивание прототипа. Изначально платформа находится на такой глубине, чтобы ее покрывал тончайший слой полимера толщиной от 0.05 до 0.15мм — это и есть приблизительная толщина слоя в стереолитографии. Далее включается лазер, который воздействует на те участки полимера, которые соответствуют стенкам целевого объекта, вызывая их затвердевание. После этого вся платформа погружается чуть глубже, на величину, равную толщине слоя. Также в этот момент специальная щетка орошает участки, которые могли остаться сухими вследствие некоторого поверхностного натяжения жидкости.



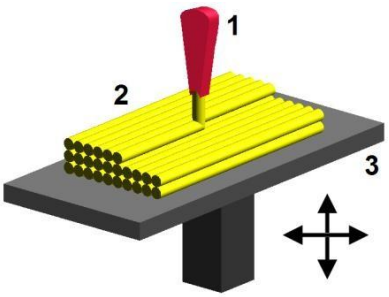
По завершению построения объект погружают в ванну со специальными составами для удаления излишков и очистки. И, наконец, финальное облучение светом для окончательного отвердевания. Как и многие другие методы 3D-прототипирования, SLA требует возведения поддерживающих структур, которые вручную удаляются по завершении строительства.

Необходимо понимать, что из-за выборочного отвердевания накладываются жесткие двусторонние ограничения на компоненты и технологию процесса. Например, чем гуще смола изначально, тем легче её перевести в полимерное состояние, но и тем хуже её гидромеханические качества. Чем мощнее введенный в смолу фотоинициатор, тем меньшее время нужно слабому лазеру для засветки, но и тем меньшее время жизни у всего объёма смолы, так как он подвержен фоновой засветке. Именно золотая середина в технологии и компонентах является «ноу-хау» каждого производителя лазерных стереолитографов. Устройство и принцип действия таких машин у всех производителей идентичны, поэтому в любой SLA-машине возможно применение любого расходного материала после соответствующей настройки.

Моделирование методом наплавления (FDM)

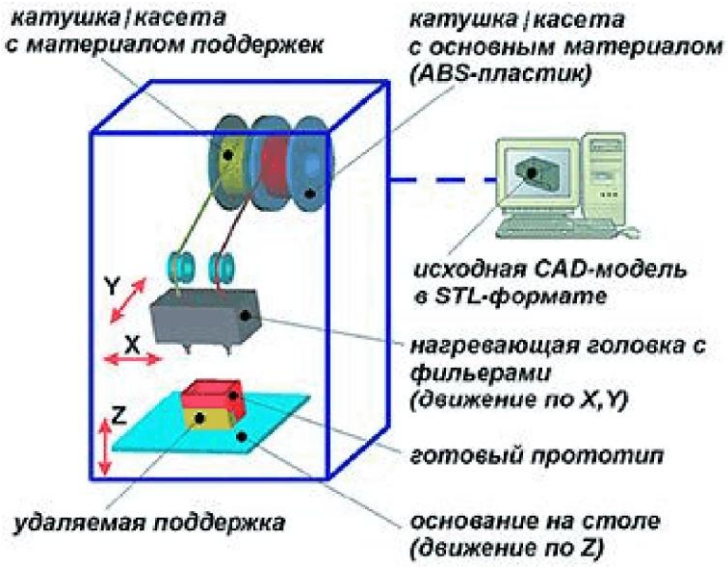
Принцип построения

3D модель в фомате STL передаётся в программное обеспечение 3d-принтера. Программа автоматически (или оператор вручную) располагает модель в виртуальном пространстве рабочей камеры. Затем, программа автоматически генерирует элементы поддерживающих конструкций и проводит расчет расходных материалов, а также времени выращивания прототипа. Перед запуском процесса трехмерной печати трехмерная модель автоматически разделяется на горизонтальные слои и производится расчёт путей перемещения печатающей головки. Затем запускается непосредственно



сам процесс печати: нагревающая головка с фильерами расплавляет тонкую пластиковую нить (леску), и послойно укладывает ее согласно данным математической 3D- модели.

Схема работы FDM-принтера



Материалы

ABSPlus - высокопрочный промышленный термопластик ABS-M30 - высокопрочный промышленный пластик

ABS-M30i - биосовместимый высокопрочный промышленный пластик ABSi - биосовместимый, прозрачный пластик

ABS-ESD7 - антистатический пластик PC - высокопрочный поликарбонат

PC-ABS - высокопрочный поликарбонат

PC-ISO - биосовместимый высокопрочный поликарбонат ULTEM 9085- огнестойкий высокотехнологичный термопластик

PPSF/PPSU - химико- и теплостойкий высокотехнологичный термопластик

Свойства прототипа

Детали, получаемые по технологии FDM – одноцветные, прочные и упругие.

Цвет

Стандартный цвет пластика ABSPlus - белый. Однако, этот вид пластика так же доступен еще в 8 цветах: слоновая кость, черный, красный, оливковый зеленый, нектарин, флуоресцентный желтый, синий, серый.

Точность

Точность построения моделей составляет от 0,127 мм до 0,254 мм. Поверхность слегка ребристая (ступенчатая) (в пределах 0,5 мм). Ребристость обусловлена тем, что расплавленная нить ABSPlus имеет округлую форму.

Последующая обработка

- Удаление материала поддержки
  - BST - материал поддержки выполнен из красноватого пластика и отделяется методом "отламывания". Процедура требует аккуратности и существенных усилий.
  - SST - детали отделяются от поддержки в подогреваемой щелочной ванне (поставляется в комплекте с машиной).
- Обработка прототипа после печати

- Выращенная поверхность будет немного ребристой в силу большой толщины нити.
- Обрабатывать изделия потребуется только в тех случаях, когда требуется идеально гладкая поверхность.

- Дополнительные возможности
- Прототипы легко красятся обычной краской или автоэмалью.
- Прототипы можно сверлить, полировать или шлифовать.
- Части моделей легко склеиваются между собой любым клеем для пластика.

Лучшее использование

Технология FDM – готовое решение для печати прототипов или готовых деталей средних и больших размеров, с простой или средней сложностью поверхности (не подойдет для маленьких моделей со сложной поверхностью, ювелирных изделий). Основным достоинством метода является достаточная дешевизна модели, хорошие механические свойства (если необходимы работающие прототипы сложных механизмов), стабильность геометрических размеров, возможность последующей доработки (склейка, покраска). Из недостатков можно выделить только невысокое качество построений мелких элементов, зависимость прочности от направления слоев, также метод не совсем подходит для мастер-модели при изготовлении силиконовых форм.

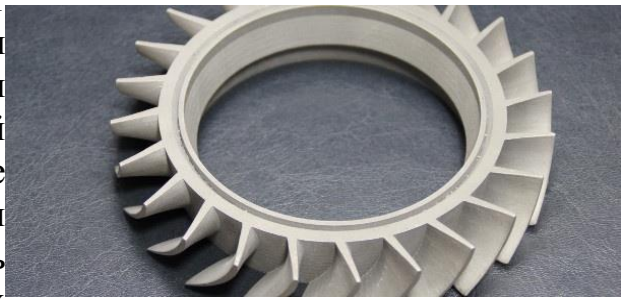
Несмотря на то, что первой технологией аддитивного производства, примененной для создания металлических трехмерных прототипов, стал метод экструзионного послойного наплавления (FDM), наибольшую популярность при производстве металлических деталей завоевали технологии лазерного и электронно-лучевого спекания и плавки.

Технологии лазерного спекания и лазерной плавки (SLS, DMLS и SLM)

В основе метода «выборочного лазерного спекания» (SLS или Selective Laser Sintering) лежит использование лазерных излучателей высокой мощности (как правило, углекислотных) для частичного сплавления, или «спекания», расходного материала в единое целое. Перед использованием расходный материал измельчается до консистенции пудры с помощью шаровых мельниц. Минимальный размер частиц может достигать двух микрон.

Уже доказано, что металлические изделия, напечатанные на 3D-принтерах, по своим свойствам – плотности, остаточному напряжению, механическому поведению, неравновесной микроструктуре, кристаллографической текстуре – в лучшую сторону отличаются от изделий, созданных литейным и другими деформируемыми методами.

Схема устройства для селективного лазерного спекания



В качестве материала могут использоваться различные полимеры и, что особенно интересно, металлы и металлические сплавы с высокой температурой плавления. В отличие от стандартной экструзионной печати (FDM), технология позволяет спекать однородный материал без связующих добавок. Таким образом, нет необходимости в термической обработке, фактически спеканию, готовых моделей после печати, а сами модели обладают высокой прочностью, приближающейся к показателям литых образцов. Данный метод постройки металлических моделей без применения связующих материалов получил название «прямого лазерного спекания металлов» (DMLS или Direct Metal Laser Sintering).

Образец металлической детали турбины, созданной с помощью устройства 3D System ProX 200 методом прямого лазерного спекания

Как и другие технологии 3D-печати, лазерное спекание создает модели послойно. Процесс в чем-то схож с лазерной стереолитографией: в случае со стереолитографическими принтерами модели погружаются в жидкую фотополимерную смолу на глубину, соответствующую толщине одного слоя, с последующим «вычерчиванием» нового слоя лазерным лучом. При лазерном спекании на модель наносится слой порошка толщиной в один слой (толщина слоя может регулироваться), в котором вычерчивается новый контур, а высокая температура позволяет частично расплавлять порошок в местах касания луча, спекая частицы между собой и с предыдущим слоем. И в том и в другом случае модель окружена неизрасходованным материалом до окончания печати.

Этот момент немаловажен для «порошковой» печати: при спекании неизрасходованный материал служит в качестве поддерживающей поверхности для последующих слоев моделей сложной формы. Отсутствие необходимости печатать «опоры» облегчает обработку готовых моделей и способствует экономии материала, который в случае с титаном или специальными сплавами может быть весьма дорог. Весь неиспользованный материал может быть собран и использован для печати последующих моделей.

Исходным материалом для промышленной 3D-печати служат композиции различных мелкодисперсных металлических порошков на основе титана, алюминия, никеля, кобальта и других металлов. Как правило, они должны обладать сферичностью, определенным гранулометрическим составом с высоким выходом годного, высокой химической однородностью, пониженным содержанием газовых примесей – кислорода и азота. Единственным существенным недостатком лазерного спекания металлических материалов считается пористость готовых моделей. Однако плотность можно повысить за счет повышения энергии лазера и замедления скорости печати. В результате, рабочий материал можно не просто «спекать»

в местах касания гранул, а фактически расплавлять, создавая однородное вещество. Именно этот подход и получил название «выборочной лазерной плавки» (SLM – Selective Laser Melting).

Ведущей компанией в сфере печати лазерным спеканием и плавкой можно считать 3D Systems – промышленного гиганта, в 2013 году прибравшего к рукам компанию-разработчика SLS- технологий Phenix Systems.

Лазерная стереолитография (англ. *laser stereolithography, SLA*) — 3D-печать, с помощью которой объект формируется из жидкого фотополимера, затвердевающего под воздействием лазерного или ультрафиолетового излучения. Процесс формирования объекта происходит в ванне с жидким фотополимером. На платформе, погруженной в фотополимер путем засветки формируется изображение первого слоя объекта и происходит кристаллизация фотополимера. Затем платформа перемещается на толщину одного слоя (6-100 мкм) вверх и происходит формирование следующего слоя. Процесс формирования слоев продолжается до полного построения объекта, при этом жидкий полимер затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик.

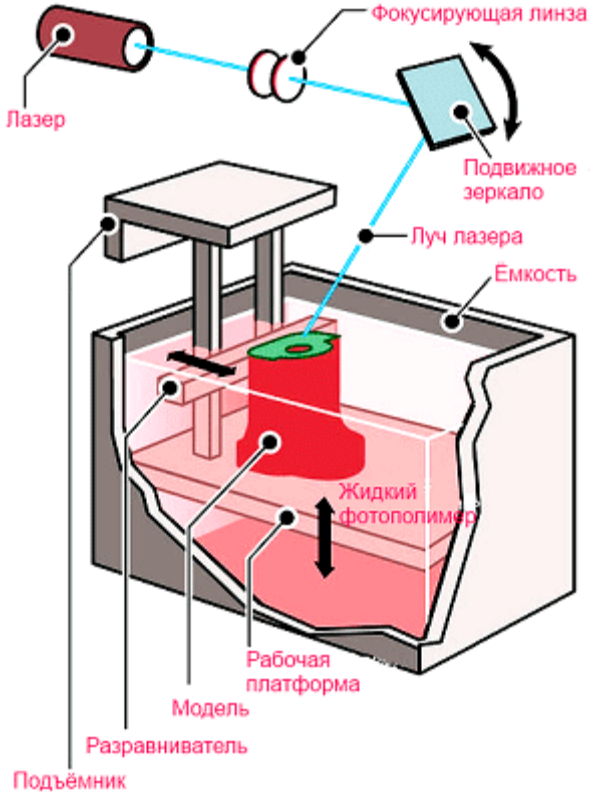


Схема 3D-печати SLA

Этот метод 3D-печати немного отличается от других, так как в качестве «строительного материала» используются не порошки, а фотополимеры в жидком состоянии. SLA технология применяется в промышленных 3D-принтерах. С помощью лазерной стереолитографии получаются объекты с высокой (до 6 микрон) точностью и гладкой, почти глянцевой, поверхностью не требующей постобработки.

Фотополимерный 3D-принтер и модель из фотополимера

Полимеризация фотополимерного пластика ультрафиолетовой лампой (англ. *Digital Light Processing, DLP*) — технология похожа на предыдущую (SLA), но пластик твердеет под действием ультрафиолета. DLP технология может использоваться как в промышленных, так и бытовых 3D-принтерах.

Выборочное лазерное спекание (англ. *selective laser sintering, SLS*) — 3D-печать, с помощью которой объект формируется из порошкового материала (пластик, металл) в следствие его расплавления лазерным лучом. При SLS печати, материал наносится на платформу тонким равномерным слоем (специальным выравнивающим скребком), после чего на поверхности платформы лазерным излучением формируется первый слой объекта. Затем платформа опускается на толщину одного слоя (16-80 мкм) и на неё вновь наносится порошковый материал. Температура в рабочей камере в процессе 3D-печати поддерживается на уровне чуть ниже точки плавления рабочего материала, что позволяет уменьшить необходимую для сплавления мощность лазера. Для предотвращения окисления материала процесс проходит в бескислородной среде.

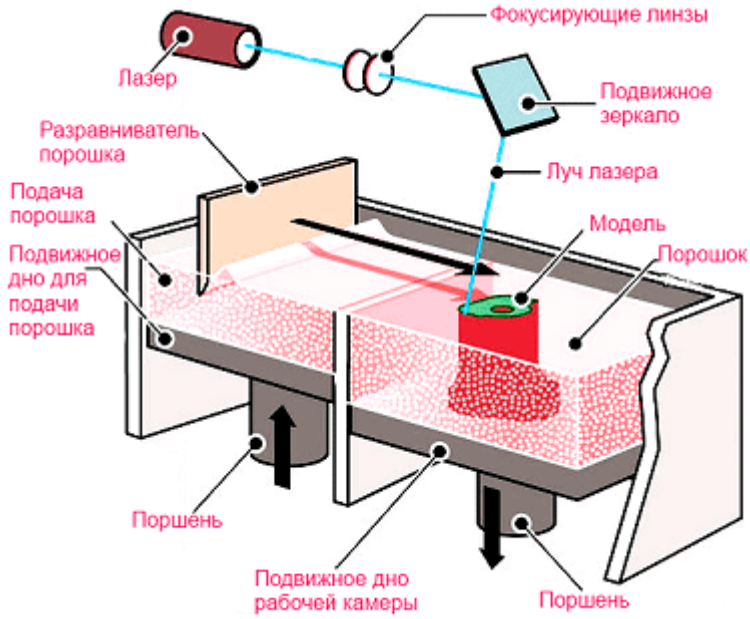
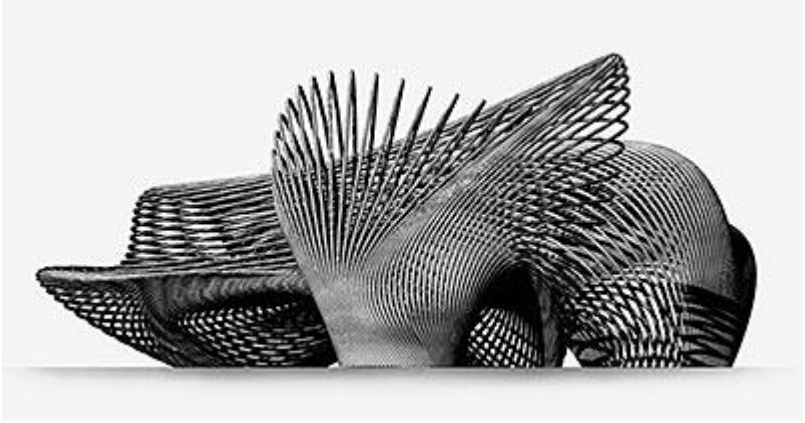


Схема 3D-печати SLS

Метод SLS-печати позволяет получать, в том числе, прочные металлические изделия, не уступающие аналогам произведенным

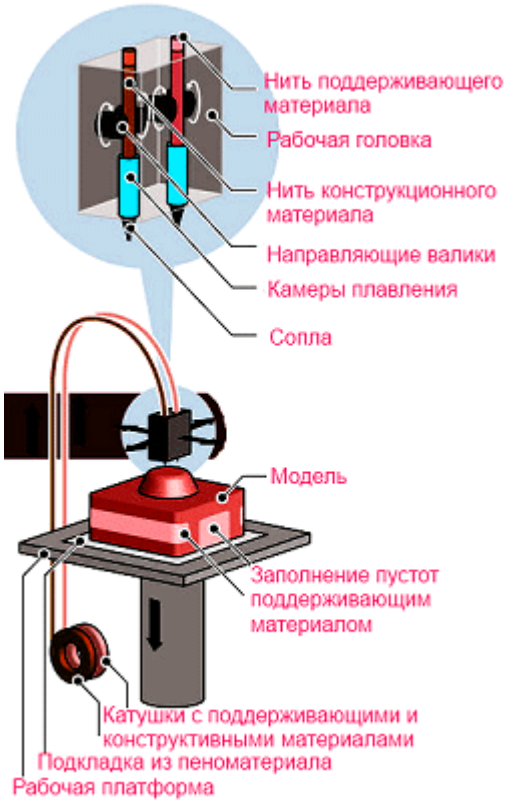
традиционными способами, но в отличии от последних, имеющие сложную внутреннюю структуру. SLS применяется только в промышленных 3D-принтерах.



Изделие из металла полученное на 3D-принтере

Выборочное лазерное сплавление (англ. *Selective laser melting, SLM*) — технология лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям. С помощью SLM-печати создаются сложные металлические детали узлов и агрегатов, а также неразборные конструкции с изменяемой геометрией.

Технология селективного лазерного плавления SLM очень похожа на SLS, однако в отличии от последней, материалы (порошки) подвергаются не спеканию, а плавлению до образования гомогенной (густой, пастообразной) массы, как это происходит в EBM-печати. В отличии от EBM, в SLM используется лазер. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных традиционным способом. По принципу SLM построены только промышленные 3D-принтеры.



Технология 3D-печати FDM

Моделирование методом послойного наплавления (англ. *Fused deposition modeling, FDM*) — технология послойного создания трехмерных объектов за счет укладки расплавленной нити из плавкого материала (пластика, металла, воска). В качестве материалов для FDM-печати в большинстве случаев используются термопластики (ABS, PLA и др.), выпускаемые в виде катушек нитей или прутков.

FDM-печать была разработана в конце 1980-х годов С. Скоттом Крампом. Ее коммерческое распространение началось в 1990 году. На сегодняшний день FDM является самой распространенной технологией 3D-печати из-за простоты конструкции и низкой стоимости подобных устройств.

Термин «Fused Deposition Modeling» и аббревиатура FDM являются торговыми марками компании Stratasys. Участники проекта RepRap, придумали аналогичный термин «Fused Filament Fabrication» или FFF (Производство способом наплавления нитей) для использования в обход юридических ограничений. Термины FDM и FFF равнозначны по смыслу и назначению.

Принцип печати по FDM/FFF технологии заключается в нанесении расплавленного материала на рабочую платформу. Нанесенный материал быстро остывает и переходит из вязкого состояния в твердое. Следующий слой наносится на предыдущий и тем самым спаивается с ним. В процессе печати пластиковая нить или пруток под воздействием высокой температуры в экструдере размягчается и выдавливается на платформу. Часто в данном способе печати используют две рабочие головки (экструдера) — одна выдавливает на платформу рабочий материал, другая — растворимый материал поддержки. Материал поддержки позволяет строить сложные объекты без провисания слоев.

FDM-печать применяется как в промышленных, так и в подавляющем большинстве современных бытовых 3D-принтерах. Технология на сегодняшний день настолько распространена, что понятия «бытовой принтер» и «FDM принтер» многие пользователи считают синонимами.

Электронно-лучевая плавка (англ. *Electron Beam Melting, EBM*) — аналогична SLS/DMLS, только здесь объект формируется путём плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме.

Электронно-лучевая плавка — метод плавки металла путем применения электронного пучка. Используется при плавке особо чистых материалов, например, сталей и титана, и материалов, стойких к высокой температуре и химическим воздействиям. При EBM-печати практически отсутствует загрязнение материала посторонними примесями, так как процесс проходит в вакууме. Промышленные электронные плавильные печи позволяют производить изделия длиной в несколько метров и весом несколько тонн.

Технология многоструйного моделирования (англ. *Multi Jet Modeling, MJM*) — основана на многоструйном моделировании с помощью фотополимерного или воскового материала. Используется в 3D-принтерах компании 3D Systems серии ProJet. Аналогичной технологией является PolyJet от компании Stratasys, которая сопоставима по качеству, но использует более дешевые материалы.

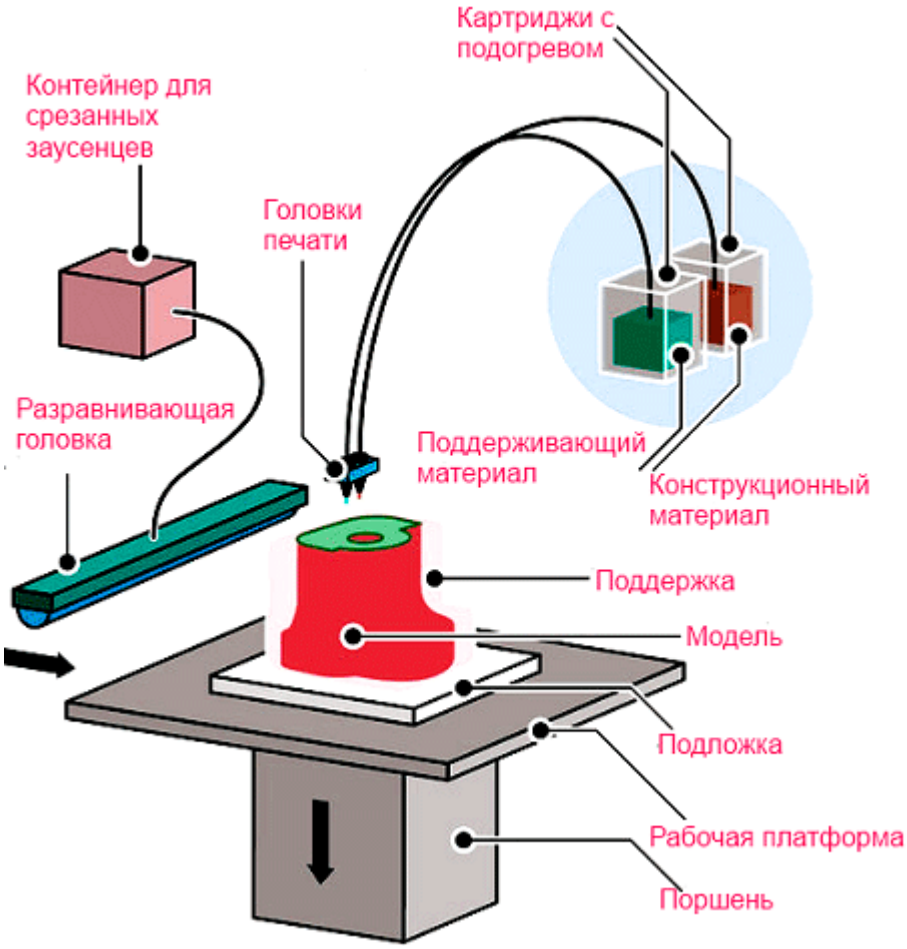


Схема 3D-печати MJM

Принцип MJM-печати заключается в следующем. Печатающая головка со множеством мельчайших сопел, расположенных линейно в несколько рядов наносит материал на рабочую поверхность по принципу струйной печати. Количество сопел начинается от 96 для младших моделей 3D-принтеров и достигает 448 для продвинутых моделей. Блок сопел движется вдоль рабочей поверхности и наносит слой жидкого фотополимера. Затем, УФ-лампа засвечивает только что нанесенные частицы материала, в результате чего тот затвердевает, формируя прочный слой. Операции нанесения и засвечивания материала повторяются до полного построения объекта.

Технология цветной струйной печати (англ. *Color Jet Printing, CJP*) — построена на принципе послойного склеивания и окрашивания композитного порошка на основе гипса или пластика. CJP применяется в 3D-принтерах компании 3D Systems серии ProJet. До этого данный принцип печати назывался 3D Printing (3DP) и был разработан в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1993 году. CJP (3DP) позволяет быстро создавать как одноцветные, так и полноцветные прототипы из композитного порошка.

Изделие полученное на CJP 3D-принтере

Принцип CJP-печати основан на склеивании основного материала (композитного порошка) связующим. Связующий материал — склеивает и окрашивает вместе частицы в нужных местах, формируя изделие. Построение объекта происходит послойно. Сначала материал модели равномерно тонким слоем распределяется по всей поверхности платформы камеры построения. Потом на этот слой наносится связующий материал, склеивая и окрашивая частицы между собой согласно цифровой 3D-модели. Затем платформа смещается вниз на толщину слоя (100 мкм). Операции нанесения материалов повторяются слой за слоем до полного построения модели.

Ламинирование (англ. *laminated object manufacturing, LOM*) — способ формирования объектов послойным склеиванием (нагревом, давлением) тонких листов рабочего материала с вырезанием (с помощью лазерного луча или режущего инструмента) соответствующих контуров на каждом слое.

Объекты, напечатанные техникой LOM, могут быть дополнительно модифицированы путем механической обработки или сверления после печати. Толщина слоя при печати таким способом зависит от используемого материала, как правило, равна толщине обычной бумаги для копирования.

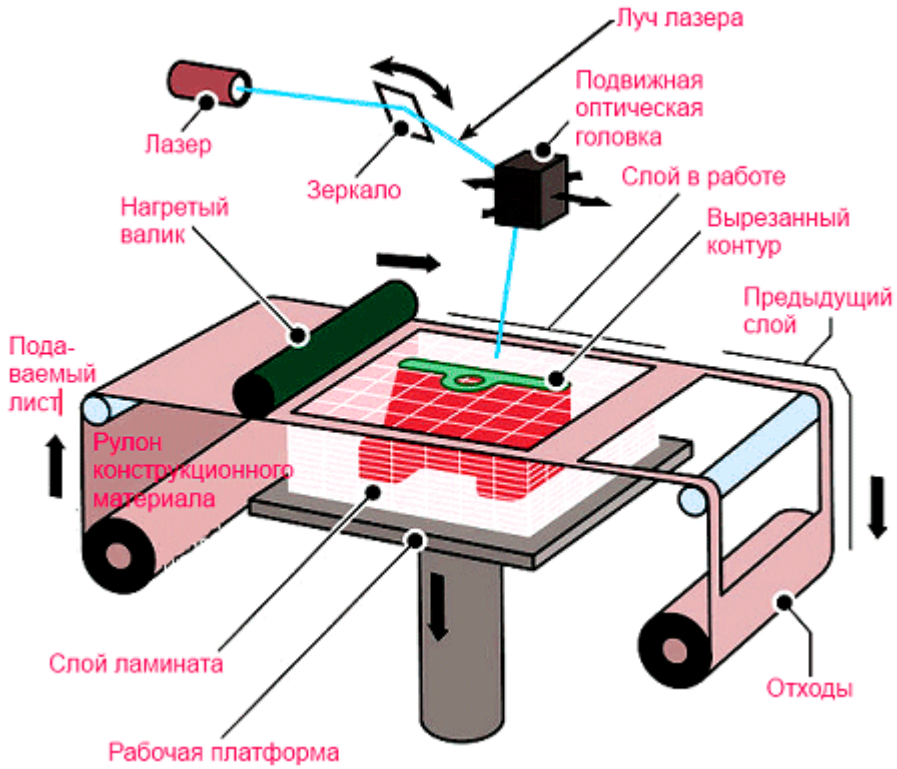


Схема 3D-печати LOM

Ламинирование не совсем относится к традиционным технологиям 3D-печати, поэтому не очень распространено. 3D-печатm таким способом требует использования материала поддержки, который затем очень затруднительно удалять, особенно на объектах с высокой детализацией.

Биопринтеры — экспериментальные установки, в которых печать 3D-структуры будущего объекта (органа для пересадки) производится каплями, содержащими живые клетки. Далее деление, рост и модификации клеток обеспечивает окончательное формирование объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., пе- рераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 336 с.
2. Малюх В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 192 с. — ISBN 978-5-94074-551-8
3. Ушаков Д.М. Введение в математические основы САПР: курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2011. — 208с.
4. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп.. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 430 с. — ISBN 978-5-7038- 3275-2
5. Большаков В.П., Бочков А.Л., Лячек Ю.Т., Твердотельное моделирование деталей в CAD- системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. —СПб,: Питер, 2015. – 480 с.
6. Муромцев Ю. Л., Муромцев Д. Ю., Тюрин И. В. и др. Информационные технологии в проектировании радиоэлектронных средств: учеб. пособие для студ. высш. учебн. заведений. — М.: Издательский центр "Академия", 2010. — 384 с. — ISBN 978-5-7695-6256-3
7. Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Коршиков С.Б., Лаптев И.В., Осиюк В.А. NX для конструктора- машиностроителя.— Москва: ИД ДМК Пресс, 2009. — 376 с. — ISBN 978-5-94074-590-7 УДК 681.3.068.5015 ББК 34.42 К63
8. Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Коршиков С.Б., Лаптев И.В., Осиюк В.А. NX для конструктора- машиностроителя.. — Москва: ИД ДМК Пресс, 2010. — 504 с. — ISBN 978-5-94074-590-7
9. Научно-практическая конференция «Аддитивные технологии в российской промышленности». Москва, 2015.

Периодические издания посвященные САПР

- CADmaster — бесплатный журнал, посвященный проблематике систем автоматизированного проектирования. Издается с 2000 года. Все статьи доступны в интернет-версии издания [18]. Проверено 4 x12 2010.
- САПР и графика — ежемесячный журнал, посвящённый вопросам автоматизации проектирования, компьютерного анализа, технологической подготовки производства и технического документооборота. Выпускается с 1996 года. Большая часть публикаций доступна на Web-сервере журнала [19]. Проверено 4 x12 2010.
- CAD/CAM/CAE Observer — международный информационно-аналитический PLM журнал, выходит с 2000 года. Часть опубликованных статей в открытом доступе на сайте журнала [20]. Проверено 4 x12 2010.
- Каталог САПР — первое русскоязычное периодическое издание в виде каталога по программам и производителям САПР. Выходит раз в 1,5 года. Информация о каталоге размещена на сайте проекта "CAD по-русски" [21]. Проверено 4 x12 2010.
- EDA Express — бесплатный журнал о технологиях проектирования и производства электронных устройств. Первое издание — 2000 год. Публикации доступны на сайте журнала [22]. Проверено 4 x12 2010.
- isicad.ru — электронный журнал о САПР, PLM и ERP, выходящий с 2004 года. Публикации доступны на сайте портала isicad [23]. Проверено 4 x12 2010.

Примечания

[1] ГОСТ 34.003-90 (http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=137473) «Информационная тех- нология. Комплекс стандартов на автоматизированные

системы. Термины и определения».

[2] ГОСТ 23501.101-87 (http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=140533) «Системы автоматизи- рованного проектирования. Основные положения».
[3] РД 250-680-88 (http://www.docload.ru/Basesdoc/10/10101/index.htm) «Методические указания. Авто- матизированные системы. Основные положения».
[4] ГОСТ 15971-90 (http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=137975) «Системы обработки ин- формации. Термины и определения».
[5] ГОСТ 23501.108-85 (http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=142365) «Системы автомати- зированного проектирования.
[6] Стандарт ИСО 9004-1-94. Управление качеством и элементы системы качества (п.5.1.1).

CAE

[1] CAElinux (http://www.caelinux.com/CMS/)
[2] Adams for Multibody Dynamics (http://www.mscsoftware.com/Contents/Products/CAE- Tools/Adams.aspx)
[3] Универсальный механизм: динамика машин и механизмов, динамика автомобилей и железнодорожных экипажей, прикладная механика, кинематика, обратная кинематика (http://www.umlab.ru/index_rus.htm)
[4] EULER — автоматизированный динамический анализ многокомпонентных механических систем (http://www.euler.ru/)
[5] frund — Комплекс моделирования динамики систем твердых и упругих тел (http://frund.vstu.ru)
[6] MBDyn — MultiBody Dynamics (http://www.aero.polimi.it/~mbdyn/)
[7] ITI — Supporting your visions!: SimulationX (http://www.simulationx.com/)

Ссылки

[1] http://shatura.laser.ru/Rapid/rptree/rptree_ru.html
[2] http://www.espotec.ru/art_prot.htm
[3] http://home.att.net/~castleisland/home.htm
[4] http://www.cadmaster.ru/
[5] http://www.sapr.ru
[6] http:///www.cadcamcae.lv
[7] http://www.cadcatalog.ru/sapr_about_book.html
[8] http://www.rodnik.ru/product/sapr/edaexpress/
[9] http://isicad.ru
(http://www.solidworld.ru
/) — SolidWorld
(http://fsapr2000.ru/) — Конференция САПР2000 (бывший САПР2К), посвящённая использованию CAD/CAE/CAM-технологий
(http://www.procae.ru/proCAE) — статьи по программам ANSYS, STAR-CD, QForm, Nastran, Fluent и

др.
(http://www.ansys.spb.ru/) — Новости CAE-системы ANSYS на русском языке
(http://www.FEA.ru/ANSYS_LSDYNA_AviGallery.html) — AVI-Галерея (более 150 анимационных

фильмов), иллюстрирующая результаты исследований, выполненных сотрудниками CompMechLab® СПбГПУ с помощью CAE-систем ANSYS, LS-DYNA, SIMULIA/Abaqus
(http://www.ansys.spb.ru/ansys-wall-planner/) — Результаты ежегодных Всемирных конкурсов CAE- системы ANSYS Multiphysics Image Gallery Competition
(http://www.FEA.ru/FEA_news_1760.html) — CompMechLab® СПбГПУ представляет 4 ВИДЕО УРОКА по применению CAE-системы ANSYS / Mechanical
(http://www.fea.ru/FEA_news_1779.html) — CompMechLab-REVIEW. Лидеру CAE-рынка ANSYS, Inc.

– 40 лет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по
учебно-методической работе
_____В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.О.24 ОСНОВЫ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Авторы: Дроздова И.В., доцент, к.э.н., Моор И.А. доцент, к.э.н., Гензель О.В., ст. преподаватель

Одобрены на заседании кафедры
Экономики и менеджмента
(название кафедры)

Зав. кафедрой _____
(подпись)
Мочалова Л.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 02.09.2024
(Дата)

Рассмотрены методической комиссией
Горно-механический факультет
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)
Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

ВВЕДЕНИЕ.....3
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ..... 6

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ… 8

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ 11

ПОДГОТОВКА К ДОКЛАДУ С ПРЕЗЕНТАЦИЕЙ 15

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ. 20

ПОДГОТОВКА К ДИСКУССИИ.....22

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ.....24

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 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, подготовка к устному опросу, участию в дискуссиях, решению практико-ориентированных задач 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 «*Основы проектной деятельности*» обращаю 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 экзамена.

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 проектной деятельности*» 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 (самоконтроля), ответы на тестовые задания);
- выполнение самостоятельного письменного домашнего задания (практико-ориентированного задания);
- выполнение курсового проекта;
- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Тема 1. Введение в управление проектами

1. В чем заключается суть концепции управления проектами?
2. Что представляет собой проект как процесс точки зрения системного подхода?
3. Назовите основные элементы проекта.
4. Перечислите этапы развития методов управления проектами (УП).
5. В чем сущность УП как методологии?
6. Охарактеризуйте проект как совокупность процессов.
7. В чем заключается взаимосвязь УП и управления инвестициями?
8. Какова взаимосвязь между управлением проектами и функциональным менеджментом.
9. Назовите предпосылки (факторы) развития методов УП.
10. Каковы перспективы развития УП?
11. Определите задачи и этапы перехода к проектному управлению.
12. Перечислите и определите базовые понятия УП.
13. Приведите принципы классификации типов проектов.

Тема 2. Система стандартов и сертификации в области управления проектами

1. Сделайте обзор стандартов в области УП.
2. Какие группы стандартов применяются к отдельным объектам управления проектами (проект, программа, портфель проектов)?
3. Дайте характеристику группе стандартов, определяющих требования к квалификации участников УП (менеджеры проектов, участники команд УП).
4. Какие стандарты, применяются к системе УП организации в целом и позволяющие оценить уровень зрелости организационной системы проектного менеджмента?
5. Каковы основы и принципы Международной сертификации по УП?
6. В чем заключается сертификация по стандартам IPMA, PMI?

Тема 3. Жизненный цикл проекта и его фазы

1. Каковы основные понятия, подходы к определению и структуре проектного цикла?
2. Назовите этапы реализации, состав основных предпроектных документов предынвестиционной фазы.

3. В чем заключается проектный анализ и оценка жизнеспособности и финансовой реализуемости в рамках предынвестиционной фазы?

4. Каково содержание инвестиционной и эксплуатационной фаз жизненного цикла проекта?

5. Охарактеризуйте состав и этапы разработки проектной документации строительной фазы проекта.

6. Каково содержание завершения инвестиционно - строительного этапа проекта. 7.

7. Назовите этапы эксплуатационной фазы, в чем ее содержание, как определяется период оценки?

Тема 4. Процессы и методы управления проектами

1. В чем заключается сущность планирования проекта?

2. Каковы могут быть основные цели и задачи проекта?

3. Каковы требования к информационному обеспечению планирования?

4. Назовите основные методы планирования.

5. В чем сущность методов управления проектом: диаграммы Гантта; сетевого графика?

6. Каковы цели и содержание контроля и регулирования проекта?

7. Как осуществляются: мониторинг работ по проекту; измерение процесса выполнения работ и анализ результатов, внесение корректив; принятие решений; управление изменениями?

8. В чем заключается управление стоимостью проекта, каковы основные принципы; методы оценки?

9. Какова сущность бюджетирования проекта и контроля стоимости?

10. Дайте характеристику процесса управления работами по проекту: взаимосвязью объектов, продолжительностью и стоимостью работ.

11. Каковы принципы эффективного управления временем?

12. Назовите формы контроля производительности труда.

13. Какова роль и сущность менеджмента качества в проектном управлении?

14. В чем заключается процесс управления ресурсами проекта?

15. Назовите процессы, принципы управления ресурсами в проекте - управления закупками и запасами?

16. Как осуществляется правовое регулирование закупок и поставок, проектная логистика?

17. В чем заключается управление командой проекта?

18. Определите основные понятия, принципы, организационные аспекты создания команды.

19. Как осуществляется управление взаимоотношениями в проекте?

20. В чем особенности формирования организационной культуры?

Тема 5. Информационное обеспечение проектного управления

1. В чем сущность управления коммуникациями проекта?

2. Что собой представляет информационная система управления проектами и каковы ее элементы?

3. Приведите ключевые определения и потребности ИСУП.

4. Какова структура ИСУП?

5. Проведите обзор рынка программного обеспечения управления проектами.

6. Каковы требования к информационному обеспечению на разных уровнях управления?

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Концепция управления проектами

- Проект
- Проектное управление.
- Проект как совокупность процессов.
- Переход к проектному управлению.
- Модель управления проектами (УП).
- Структуризация (декомпозиции) проекта.
- Фазы, функции и подсистемы УП.
- Классификационные признаки и виды проектов.
- Цель и стратегия проекта.
- Сценарии и стратегии развития проектного комплекса.
- Результат проекта.
- Управление параметрами проекта.
- Окружение проектов.
- Проектный цикл.
- Методы управления проектами.
- Организационные структуры УП.
- Участники проектов.

Тема 2. Международные стандарты и сертификация в области проектного управления

- Стандартизация и сертификация в проектном управлении
- Группы стандартов
- Международная сертификация по УП.
- Обзор стандартов проектного управления

Тема 3. Жизненный цикл проекта и его фазы

- Жизненный цикл проекта.
- Фазы, этапы разработки и осуществления инвестиционного проекта.
- Предынвестиционная фаза проекта.

- Состав основных предпроектных документов.
- Инвестиционная фаза проекта.
- Этапы разработки проектной документации.
- ТЭО проекта.
- Организации СМР.
- Эксплуатационная фаза проекта.

Тема 4. Процессы и методы управления проектами

- Планирования проекта
- Информационное обеспечение планирования
- Методы планирования.
- Диаграмма Гантта
- Сетевой график
- Контроль и регулирование проекта
- Мониторинг работ по проекту
- Управление изменениями
- Управление стоимостью проекта
- Бюджетирование проекта
- Управление работами по проекту
- Эффективное управление временем
- Менеджмента качества в проектном управлении
- Управление ресурсами проекта
- Управление закупками и запасами
- Правовое регулирование проекта
- Проектная логистика
- Управление командой проекта
- Управление взаимоотношениями в проекте
- Формирование организационной культуры

Тема 5. Инвестиционный проект как объект управления

- Инвестиции
- Инвестиционный проект
- Бизнес-план

- Источники и способы финансирования инвестиционных проектов
- Жизненный цикл инвестиционного проекта
- Предпроектные документы
- Оценка жизнеспособности и финансовой реализуемости проекта
- ТЭО проекта
- Организации СМР
- Денежный поток инвестиционного проекта
- Финансовый анализ инвестиционного проекта
- Система показателей финансовой состоятельности проекта
- Система показателей оценки экономической эффективности
- Ставка дисконтирования
- Коэффициент дисконтирования
- Чистый дисконтированный доход (ЧДД)
- Индекс доходности (ИД)
- Срок окупаемости
- Внутренняя норма доходности (ВНД)
- Запас финансовой устойчивости (ЗФУ)
- Методы учета инфляции

Тема 6. Информационное обеспечение проектного управления

- Управления коммуникациями проекта
- Информационная система управления проектами
- Структура ИСУП
- Рынок программного обеспечения управления проектами.
- Информационное обеспечение управления проектами

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 (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ (ВКР), а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• 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 и руководителями ВКР, 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 досконального 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 ДОКЛАДА С ПРЕЗЕНТАЦИЕЙ

Одной из форм текущего контроля является доклад с презентацией, который представляет собой продукт самостоятельной работы студента.

Доклад с презентацией - это публичное выступление по представлению полученных результатов решения определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной темы.

Как правило, в основу доклада ложится анализ литературы по проблеме. Он должен носить характер краткого, но в то же время глубоко аргументированного устного сообщения. В нем студент должен, по возможности, полно осветить различные точки зрения на проблему, выразить собственное мнение, сделать критический анализ теоретического и практического материала.

Подготовка доклада с презентацией является обязательной для обучающихся, если доклад презентацией указан в перечне форм текущего контроля успеваемости в рабочей программе дисциплины.

Доклад должен быть рассчитан на 7-10 минут.

Презентация (от англ. «presentation» - представление) - это набор цветных слайдов на определенную тему, который хранится в файле специального формата с расширением PP.

Целью презентации - донести до целевой аудитории полноценную информацию об объекте презентации, изложенной в докладе, в удобной форме.

Перечень примерных тем докладов с презентацией представлен в рабочей программе дисциплины, он выдается обучающимся заблаговременно вместе с методическими указаниями по подготовке. Темы могут распределяться студентами самостоятельно (по желанию), а также закрепляться преподавателем дисциплины.

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.

Для этого, остановитесь на теме, которая вызывает у Вас больший интерес; определите цель выступления; подумайте, достаточно ли вы знаете по выбранной теме или проблеме и сможете ли найти необходимый материал;

- осуществить сбор материала к выступлению.

Начинайте подготовку к докладу заранее; обращайтесь к справочникам, энциклопедиям, научной литературе по данной проблеме; записывайте необходимую информацию на отдельных листах или тетради;

- организовать работу с литературой.

При подборе литературы по интересующей теме определить конкретную цель поиска: что известно по данной теме? что хотелось бы узнать? для чего нужна эта информация? как ее можно использовать в практической работе?

- во время изучения литературы следует: записывать вопросы, которые возникают по мере ознакомления с источником, а также ключевые слова, мысли, суждения; представлять наглядные примеры из практики;

- обработать материал.

Учитывайте подготовку и интересы слушателей; излагайте правдивую информацию; все мысли должны быть взаимосвязаны между собой.

При подготовке доклада с презентацией особо необходимо обратить внимание на следующее:

- подготовка доклада начинается с изучения источников, рекомендованных к соответствующему разделу дисциплины, а также специальной литературы для докладчика, список которой можно получить у преподавателя;

- важно также ознакомиться с имеющимися по данной теме монографиями, учебными пособиями, научными информационными статьями, опубликованными в периодической печати.

Относительно небольшой объем текста доклада, лимит времени, отведенного для публичного выступления, обусловливает потребность в тщательном отборе материала, умелом выделении главных положений в содержании доклада, использовании наиболее доказательных фактов и убедительных примеров, исключении повторений и многословия.

Решить эти задачи помогает составление развернутого плана.

План доклада должен содержать следующие главные компоненты: краткое вступление, вопросы и их основные тезисы, заключение, список литературы.

После составления плана можно приступить к написанию текста. Во вступлении важно показать актуальность проблемы, ее практическую значимость. При изложении вопросов темы раскрываются ее основные положения. Материал содержания вопросов полезно располагать в таком порядке: тезис; доказательство тезиса; вывод и т. д.

Тезис - это главное основополагающее утверждение. Он обосновывается путем привлечения необходимых цитат, цифрового материала, ссылок на статьи. При изложении содержания вопросов особое внимание должно быть обращено на раскрытие причинно-следственных связей, логическую последовательность тезисов, а также на формулирование окончательных выводов. Выводы должны быть краткими, точными, достаточно аргументированными всем содержанием доклада.

В процессе подготовки доклада студент может получить консультацию у преподавателя, а в случае необходимости уточнить отдельные положения.

Выступление

При подготовке к докладу перед аудиторией необходимо выбрать способ выступления:

- устное изложение с опорой на конспект (опорой могут также служить заранее подготовленные слайды);
- чтение подготовленного текста.

Чтение заранее написанного текста значительно уменьшает влияние выступления на аудиторию. Запоминание написанного текста заметно сковывает выступающего и привязывает к заранее составленному плану, не давая возможности откликаться на реакцию аудитории.

Короткие фразы легче воспринимаются на слух, чем длинные.

Необходимо избегать сложных предложений, причастных и деепричастных оборотов. Излагая сложный вопрос, нужно постараться передать информацию по частям.

Слова в речи надо произносить четко и понятно, не надо говорить слишком быстро или, наоборот, растягивать слова. Надо произнести четко особенно ударную гласную, что оказывает наибольшее влияние на разборчивость речи.

Пауза в устной речи выполняет ту же роль, что знаки препинания в письменной. После сложных выводов или длинных предложений необходимо сделать паузу, чтобы слушатели могли вдуматься в сказанное или правильно понять сделанные выводы. Если выступающий хочет, чтобы его понимали, то не следует говорить без паузы дольше, чем пять с половиной секунд.

Особое место в выступлении занимает обращение к аудитории. Известно, что обращение к собеседнику по имени создает более доверительный контекст деловой беседы. При публичном выступлении также можно использовать подобные приемы. Так, косвенными обращениями могут служить такие выражения, как «Как Вам известно», «Уверен, что Вас это не оставит равнодушными». Выступающий показывает, что слушатели интересны ему, а это самый простой путь достижения взаимопонимания.

Во время выступления важно постоянно контролировать реакцию слушателей. Внимательность и наблюдательность в сочетании с опытом позволяют оратору уловить настроение публики. Возможно, рассмотрение некоторых вопросов придется сократить или вовсе отказаться от них.

После выступления нужно быть готовым к ответам на возникшие у аудитории вопросы.

Стоит обратить внимание на вербальные и невербальные составляющие общения. Небрежность в жестах недопустима. Жесты могут

быть приглашающими, отрицающими, вопросительными, они могут подчеркнуть нюансы выступления.

Презентация

Презентация наглядно сопровождает выступление.

Этапы работы над презентацией могут быть следующими:

- осмыслите тему, выделите вопросы, которые должны быть освещены в рамках данной темы;
- составьте тезисы собранного материала. Подумайте, какая часть информации может быть подкреплена или полностью заменена изображениями, какую информацию можно представить в виде схем;
- подберите иллюстративный материал к презентации: фотографии, рисунки, фрагменты художественных и документальных фильмов, материалы кинохроники, разработайте необходимые схемы;
- подготовленный материал систематизируйте и «упакуйте» в отдельные блоки, которые будут состоять из собственно текста (небольшого по объему), схем, графиков, таблиц и т.д.;
- создайте слайды презентации в соответствии с необходимыми требованиями;
- просмотрите презентацию, оцените ее наглядность, доступность, соответствие языковым нормам.

Требования к оформлению презентации

Компьютерную презентацию, сопровождающую выступление докладчика, удобнее всего подготовить в программе MS PowerPoint.

Презентация как документ представляет собой последовательность сменяющих друг друга слайдов. Чаще всего демонстрация презентации проецируется на большом экране, реже – раздается собравшимся как печатный материал.

Количество слайдов должно быть пропорционально содержанию и продолжительности выступления (например, для 5-минутного выступления рекомендуется использовать не более 10 слайдов).

На первом слайде обязательно представляется тема выступления и сведения об авторах.

Следующие слайды можно подготовить, используя две различные стратегии их подготовки:

1-я стратегия: на слайды выносится опорный конспект выступления и ключевые слова с тем, чтобы пользоваться ими как планом для выступления. В этом случае к слайдам предъявляются следующие требования:

- объем текста на слайде – не больше 7 строк;
- маркированный/нумерованный список содержит не более 7 элементов;

- отсутствуют знаки пунктуации в конце строк в маркированных и нумерованных списках;
- значимая информация выделяется с помощью цвета, кегля, эффектов анимации.

Особо внимательно необходимо проверить текст на отсутствие ошибок и опечаток. Основная ошибка при выборе данной стратегии состоит в том, что выступающие заменяют свою речь чтением текста со слайдов.

2-я стратегия: на слайды помещается фактический материал (таблицы, графики, фотографии и пр.), который является уместным и достаточным средством наглядности, помогает в раскрытии стержневой идеи выступления. В этом случае к слайдам предъявляются следующие требования:

- выбранные средства визуализации информации (таблицы, схемы, графики и т. д.) соответствуют содержанию;
- использованы иллюстрации хорошего качества (высокого разрешения), с четким изображением (как правило, никто из присутствующих не заинтересован вчитываться в текст на ваших слайдах и всматриваться в мелкие иллюстрации).

Максимальное количество графической информации на одном слайде – 2 рисунка (фотографии, схемы и т.д.) с текстовыми комментариями (не более 2 строк к каждому). Наиболее важная информация должна располагаться в центре экрана.

Обычный слайд, без эффектов анимации, должен демонстрироваться на экране не менее 10 - 15 секунд. За меньшее время аудитория не успеет осознать содержание слайда.

Слайд с анимацией в среднем должен находиться на экране не меньше 40 – 60 секунд (без учета времени на случайно возникшее обсуждение). В связи с этим лучше настроить презентацию не на автоматический показ, а на смену слайдов самим докладчиком.

Особо тщательно необходимо отнестись к оформлению презентации. Для всех слайдов презентации по возможности необходимо использовать один и тот же шаблон оформления, кегль – для заголовков - не меньше 24 пунктов, для информации - не менее 18.

В презентациях не принято ставить переносы в словах.

Наилучшей цветовой гаммой для презентации являются контрастные цвета фона и текста (белый фон – черный текст; темно-синий фон – светло-желтый текст и т. д.).

Лучше не смешивать разные типы шрифтов в одной презентации.

Рекомендуется не злоупотреблять прописными буквами (они читаются хуже).

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 задания 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.

ПОДГОТОВКА К ДИСКУССИИ

Современная практика предлагает широкий круг типов практических занятий. Среди них особое место занимает *дискуссия,* где в диалоге хорошо усваивается новая информация, видны убеждения студента, обсуждаются противоречия (явные и скрытые) и недостатки. Для обсуждения берутся конкретные актуальные вопросы, с которыми студенты предварительно ознакомлены. Дискуссия является одной из наиболее эффективных технологий группового взаимодействия, обладающей особыми возможностями в обучении, развитии и воспитании будущего специалиста.

Дискуссия (от лат. discussio - рассмотрение, исследование) - способ организации совместной деятельности с целью интенсификации процесса принятия решений в группе посредством обсуждения какого-либо вопроса или проблемы.

Дискуссия обеспечивает активное включение студентов в поиск истины; создает условия для открытого выражения ими своих мыслей, позиций, отношений к обсуждаемой теме и обладает особой возможностью воздействия на установки ее участников в процессе группового взаимодействия. Дискуссию можно рассматривать как *метод интерактивного обучения* и как особую технологию, включающую в себя другие методы и приемы обучения: «мозговой штурм», «анализ ситуаций» и т.д.

Обучающий эффект дискуссии определяется предоставляемой участнику возможностью получить разнообразную информацию от собеседников, продемонстрировать и повысить свою компетентность, проверить и уточнить свои представления и взгляды на обсуждаемую проблему, применить имеющиеся знания в процессе совместного решения учебных и профессиональных задач.

Развивающая функция дискуссии связана со стимулированием творчества обучающихся, развитием их способности к анализу информации и аргументированному, логически выстроенному доказательству своих идей и взглядов, с повышением коммуникативной активности студентов, их эмоциональной включенности в учебный процесс.

Влияние дискуссии на личностное становление студента обусловливается ее целостно - ориентирующей направленностью, созданием благоприятных условий для проявления индивидуальности, самоопределения в существующих точках зрения на определенную проблему, выбора своей позиции; для формирования умения взаимодействовать с другими, слушать и слышать окружающих, уважать чужие убеждения, принимать оппонента, находить точки соприкосновения, соотносить и согласовывать свою позицию с позициями других участников обсуждения.

Безусловно, наличие оппонентов, противоположных точек зрения всегда обостряет дискуссию, повышает ее продуктивность, позволяет

создавать с их помощью конструктивный конфликт для более эффективного решения обсуждаемых проблем.

Существует несколько видов дискуссий, использование того или иного типа дискуссии зависит от характера обсуждаемой проблемы и целей дискуссии.

Условия эффективного проведения дискуссии:

- информированность и подготовленность студентов к дискуссии,
- свободное владение материалом, привлечение различных источников для аргументации отстаиваемых положений;
- правильное употребление понятий, используемых в дискуссии, их единообразное понимание;
- корректность поведения, недопустимость высказываний, задевающих личность оппонента; установление регламента выступления участников;
- полная включенность группы в дискуссию, участие каждого студента в ней.

Подготовка студентов к дискуссии: если тема объявлена заранее, то следует ознакомиться с указанной литературой, необходимыми справочными материалами, продумать свою позицию, четко сформулировать аргументацию, выписать цитаты, мнения специалистов.

В проведении дискуссии выделяется несколько этапов.

Этап 1-й, введение в дискуссию: формулирование проблемы и целей дискуссии; определение значимости проблемы, совместная выработка правил дискуссии; выяснение однозначности понимания темы дискуссии, используемых в ней терминов, понятий.

Этап 2-й, обсуждение проблемы: обмен участниками мнениями по каждому вопросу. Цель этапа - собрать максимум мнений, идей, предложений, соотнося их друг с другом.

Этап 3-й, подведение итогов обсуждения: выработка студентами согласованного мнения и принятие группового решения.

Далее подводятся итоги дискуссии, заслушиваются и защищаются проектные задания. После этого проводится "мозговой штурм" по нерешенным проблемам дискуссии, а также выявляются прикладные аспекты, которые можно рекомендовать для включения в курсовые и дипломные работы или в апробацию на практике.

Семинары-дискуссии проводятся с целью выявления мнения студентов по актуальным и проблемным вопросам.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к экзамену по дисциплине «*Основы проектной 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 «*Основы проектной 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 экзамене 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 экзамене (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 экзамену 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»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Б1.О.25 ЭЛЕКТРОПРИВОД

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

форма обучения: очная

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией факультета
Электрификации горных предприятий	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Садовников М.Е.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 18.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

Оглавление

Введение
1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором
1.1 Обозначение электродвигателей
1.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по 4-м точкам
1.3 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса при помощи ПК
1.3.1 Мой компьютер
1.3.2 Электронная таблица – EXCEL
1.3.3 Уравнение Клосса
2. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором
2.1 Назначение электродвигателей
2.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором
2.3 Определение количества и величины секций пускового резистора АД с фазным ротором
3. Двигатель постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения
3.1 Обозначение ДПТ серии 4П
3.2 Основные формулы, используемые при решении задач
3.3 Определение количества и величины секций пускового резистора ДПТ с независимым возбуждением
4. Механика электропривода
4.1 Статические и механические нагрузки
4.2 Основное уравнение движения электропривода
4.3 Приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя
4.4 Приведение моментов инерции рабочей машины к валу электродвигателя
4.5 Расчёт времени пуска и торможения системы «электродвигатель-рабочая машина»
4.6 Графоаналитический метод определения времени пуска системы «АД с к.з. ротором-вентилятор»
Приложение А. Некоторые часто встречающиеся числа
Приложение Б. Приставки к обозначениям единиц
Приложение В. Единицы физических величин
Приложение Г. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ
Приложение Д. Основные технические данные электродвигателей серии АИ основного исполнения
Приложение Е. Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором
Приложение Ж. Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии 4П
Список литературы

Введение

Для обеспечения растущих потребностей человечества созданы, продолжают разрабатываться и совершенствоваться сотни тысяч рабочих машин, производственных и бытовых механизмов, подъёмно-транспортных средств и т.д.

Для функционирования рабочих машин и механизмов к их исполнительным органам от привода должна быть подведена механическая энергия, за счёт которой и совершается их движение. Характер этого движения может быть разнообразным: вращательным однонаправленным и реверсивным, поступательным однонаправленным и реверсивным, а также возвратно-поступательным. Основное назначение приводного электродвигателя заключается в преобразовании электрической энергии, потребляемой им из сети, в механическую, отдаваемую через вал двигателя.

Механические характеристики электроприводов необходимы для выбора рационального электропривода. Правильное сочетание механических характеристик электропривода и рабочей машины - одно из непременных условий высоких технико-экономических показателей работы производственного агрегата.

Механическими характеристиками электродвигателя называются зависимости частоты или скорости вращения от вращающего момента $n = f_1(M)$ или $\omega = f_1(M)$. Электромеханическими характеристиками электродвигателя называются зависимости частоты или скорости вращения от силы тока $n = f_3(I)$или $\omega = f_4(I)$.

Эти характеристики называются естественными, если они получены при номинальных условиях питания (при номинальных напряжении и частоте), номинальном возбуждении и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях ротора (или якоря) и статора. Характеристики двигателя называются искусственными при изменении любого из перечисленных выше факторов. Обычно при исследовании электроприводов механические характеристики изображают на графиках в виде функции $\omega = f(M)$. Однако в некоторых случаях (при теоретическом анализе механических характеристик) их изображают в виде функции $M = \varphi(\omega)$. При исследовании механических характеристик электродвигателей необходимо знать сопротивление их обмоток, а также значение вводимых в цепи обмоток пусковых, тормозных и других сопротивлений.

1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором

1.1 Обозначение электродвигателей

Наиболее распространённой электрической машиной, применяемой для привода сельскохозяйственных машин и механизмов, является трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Это обусловлено сравнительно небольшой его стоимостью, простотой конструкции и высокой надёжностью в эксплуатации.

Асинхронные электродвигатели в целях упорядочения их шкал мощностей, скоростей и т. д., а также унификации применения выпускаются сериями, как в основном исполнении, так и в различных модификациях, с учётом областей применения, климатических условий, степени защищённости и т, д.

Двигатели серии АИ - новая, разработанная совместно со странами Интерэлектро, унифицированная серия асинхронных двигателей, отвечающая перспективному уровню развития мирового электромашиностроения. Они предназначены для работы в зоне умеренного климата при температуре окружающей среды - 45...+40 °С и относительной влажности воздуха до 80% при температуре + 20 °С. По сравнению с двигателями серии 4АМ двигатели серии АИ имеют улучшенные энергетические показатели, снижен уровень шума, повышены надёжностные показатели.

Структура условного обозначения:

А И Х, X_2 X_3 X_4 X_5X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11}

А - асинхронный;

И - унифицированная серия (Интерэлектро);

X_1 - привязка мощности к установочным размерам или обозначение специального исполнения; Р - привязка мощности к установочным размерам по РС3031-71, габариты и шкала мощностей соответствует двигателям серии 4АМ; С - **при**вязка в соответствии с нормами CENELEK, при этом мощности в тех же габаритах снижены на одну-две **ступени** по сравнению с вариантом Р, предназначены только для поставок на экспорт. Отсутствие букв Р или С означает исполнение двигателя по варианту Р, М - взрывозащищённое исполнение; У - взрывозащищённое рудничное исполнение; Ф - с пристроенным вентилятором для охлаждения двигателя;

X_2 - буква - обозначение исполнения по виду защиты и охлаждения: закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором (не указывается), Б-закрытое с естественным охлаждением, **Н** — защищённое, Л — открытое, В- встраиваемое, П — закрытое продуваемое;

X_3 - буква - обозначение модификаций: С - с повышенным скольжением, Р- с повышенным пусковым моментом, Х - с регулируемой частотой вращения, Ф - с фазным ротором, У — однофазные с пусковым конденсатором, Е - однофазные с рабочим конденсатором, УЕ - однофазные с пусковым и рабочим конденсатором, Кр - для кратковременного режима работы.

X_4 - габарит (высота оси вращения), мм;

X_5 - установочный размер по длине станины: S, M, L;

X_6 - длина сердечника статора (А или В, отсутствие буквы означает только одну длину сердечника - первую);

X_7 - число полюсов: 2, 4, 6, 8, 10, 12 (в многоскоростных число полюсов указывается через дробь - 2/4; 2/6; 4/6; 4/8 и др.);

X_8 и **X_9** - дополнительные буквы для модификации двигателя (Б - со встроенной температурной защитой; П - с повышенной точностью по установочным размерам; Х2 - химически стойкие; С - сельскохозяйственные, УП - пылезащищённое исполнение; РЗ - для привода зубчатых редукторов; Ж - для моноблочных насосов; Е - с электромагнитным тормозом;

ЕЭ - с электромагнитным тормозом для электроталей; Ф - - фреоно-маслостойкие;

Н - малошумные);

X_{10} - климатическое исполнение (У, УХЛ, Т);

X_{11} - категория размещения (1,2, 3,4, 5) по ГОСТ 15150-69.

Правильное обозначение модификаций и исполнений серии важно для автоматической системы управления производством (АСУП), а также для создания системы ведения чертёжного хозяйства как части общей системы автоматизированного проектирования (САПР).

Серия АИ содержит значительное количество модификаций и исполнений, поэтому задача выбора обозначений является весьма сложной. Для обозначения серии АИ принята структура, в которой можно выделить три вида обозначения: ***базовое, основное, полное.***

Базовое обозначение - это сочетание элементов символов, определяющих серию АД, его мощность, частоту вращения (обозначение серии, вариант увязки мощности к установочным размерам, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и длина магнитопровода статора, число полюсов).

Например: АИР100М4 (серия АИ, увязка по варианту Р, высота оси вращения 100, длина корпуса по установочным размерам М. число полюсов 4).

Основное обозначение - это сочетание базового исполнения АД с видом защиты и охлаждения, с электрической и конструктивной модификацией, со специализированным исполнением и исполнением по условиям окружающей среды.

Например: АИРБС100М4НПТ2 (АИР100М4 - базовое обозначение, Б - закрытое исполнение с естественным охлаждением без обдува, С - с повышенным скольжением, Н - малошумные, П - с повышенной точностью установочных размеров, Т - для тропического климата, 2 - категория размещения).

Полное обозначение - сочетание основного обозначения с дополнительными электрическими и конструктивными характеристиками.

Например: АИРБС 100М4НПТТ2 220/380 В, 60 IM2181, КЗ-11-3, F 100, (АИРБС 100М4НПТ2 - основное обозначение, 220/380 В - напряжение, 60 - частота сети, IM2181 - исполнение по способу монтажа и по концу вала, КЗ-11-3 - исполнение выводного устройства и количество штуцеров, F100 - исполнение фланцевого щита).

Классификация конструктивных исполнений электрических машин ***по способу монтажа*** дана в Публикации МЭК 34-7 и в СТ СЭВ 246-76. Согласно этим документам конструктивное исполнение электрической машины обозначается символом IM и четырьмя цифрами.

Условное обозначение конструктивного исполнения расшифровывается так:

IM X_1 X_2X_3 X_4

IM - буквенная часть обозначения;

X_1 - первая цифра определяет группу конструктивных исполнений.

Серия АД Интерэлектро производится по трём группам исполнений (1 - на лапах, с подшипниковыми щитами; 2 - на лапах, с подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите или щитах; 3 - без лап, с подшипниковыми щитами и с фланцем на одном подшипниковом щите);

X_2X_3 - вторая и третья цифры обозначают способ монтажа.

Вторая цифра. Для группы IM1-0, Третья указывает на расположение вала двигателя в пространстве при монтаже. Для группы IM1 -третья цифра обозначает: 0 - вал горизонтальный, машина лапами вниз; 1- вал вертикальный, конец вала вниз; 3 - вал вертикальный, конец вала вверх; 5 - вал горизонтальный, конец вала влево, машина крепится лапами на вертикальной плоскости; 6 - вал горизонтальный, конец вала направо, машина крепится на вертикальной плоскости;

7 - вал горизонтальный, машина крепится на горизонталь ной плоскости лапами вверх; 8 - машина может работать при любом направлении конца вала;

X_4 - исполнение выступающего конца вала: 0 - без конца вала;

1 - с одним цилиндрическим концом вала; 2 - с двумя цилиндрическими; 3- с одним

коническим; 4 - с двумя коническими; 6, 7 и 9 - в асинхронных двигателях общего назначения не применяются.

Обозначение исполнений вводных устройств расшифровывается так К-3-I - с панелью выводов и одним штуцером; К-3-II - с панелью выводов и двумя штуцерами; К-3-М - с панелью выводов и удлинителем под сухую разделку кабеля или под эпоксидную заделку; К-2-1-без панели выводов с одним штуцером; К-2-Н-без панели выводов с двумя штуцерами.

Основным исполнением вводных устройств является устройство с панелью выводов и одним штуцером (К-3-I). По заказу потребителя заводы-изготовители двигателей устанавливают вводное устройство с двумя штуцерами. Два штуцера необходимо для ввода дополнительных проводов в двигатели с температурной защитой и др.

1.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по 4-м точкам

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется номинальными техническими данными, которые указываются в каталоге: **$P_н$,** кВт - номинальная мощность, $n_н$,об/мин- номинальная частота вращения вала электродвигателя при номинальной нагрузке, $U_н$, В -номинальное напряжение, $I_н$, А - номинальная сила тока, (~) — род тока, $f_н$, Гц - частота питающей сети,$cos\varphi_н$ - коэффициент мощности при номинальной нагрузке, $\eta_н$- коэффициент полезного действия, кроме того в каталоге задаются: n_c, об/мин- синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля статора)$\mu_п = \frac{M_{пуск}}{M_к}$ - кратность пускового момента,$M_к = \frac{M_{макс}}{M_н}$ - кратность максимального (или критического) момента.

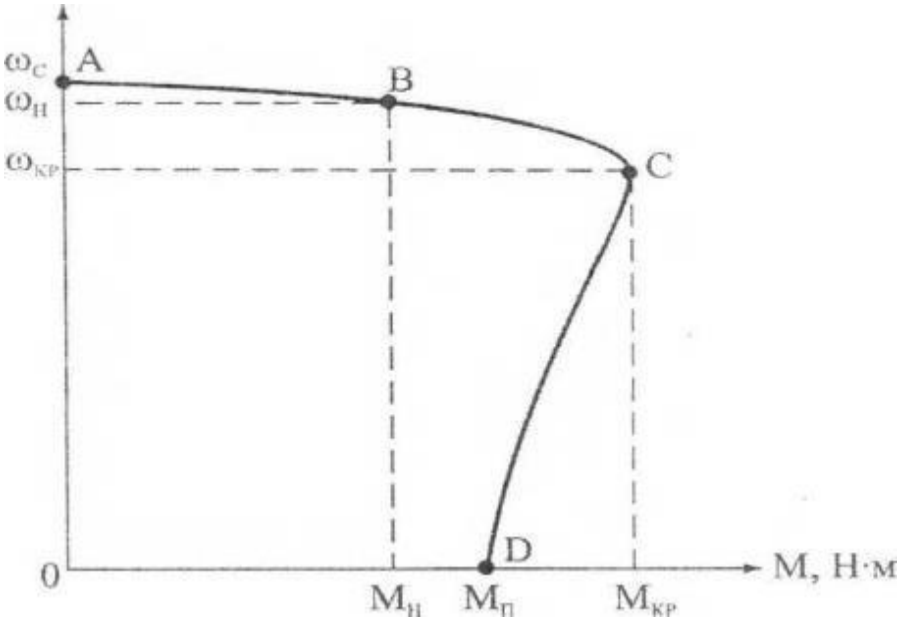
Естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с к.з. ротором $\omega = f(M)$ ориентировочно можно построить, используя его данные из каталога, по 4 - м характерным точкам (рисунок 1.1):

Координаты точек:

Точка А ($M = 0$; $\omega = \omega_c$); ω_c -синхронная скорость вращения, рад/с. $\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30}$ (1.1)

Точка В ($M = M_н$**;** $\omega = \omega_н$**);** $M_н$**- номинальный момент электродвигателя, Н м;** $\omega_н$ **-** номинальная скорость вращения, рад**/с.**

$M_н = 1000 \cdot \frac{P_н}{\omega_н}$; (1.2) $\omega_н = \frac{\pi \cdot n_н}{30}$. (1.3)



Точка С ($М = М_{кр}$; $\omega = \omega_{кр}$**);**); $М_{кр}$ - момент критический (или максимальный), Н·м; $\omega_{кр}$- критическая скорость вращения, рад/с.

$$М_{кр} = \mu_{кр} \cdot М_{н}; \quad (1.4)$$
$$\omega_{кр} = \omega_{с}(1 - S_{кр}), \quad (1.5)$$

где $S_{кр}$ - критическое скольжение, о.е.

$$S_{кр} = S_{н} \cdot (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^{2} - 1}). \quad (1.6)$$

Точка Д ($М = М_{пуск}$; $\omega = 0$); $М_{пуск}$ - пусковой момент электродвигателя, Н·м;

$$М_{пуск} = \mu_{п} \cdot М_{н}. \quad (1.7)$$

Примечание: Если нагрузка у АД с к.з. ротором номинальная и параметры сети соответствуют номинальным данным, то запуск электродвигателя осуществляется от точки Д далее точка С и рабочая точка - это точка В.

Задача 1.1. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИР225М2, имеющего следующие паспортные данные:

$Р_{н}$ = 55кВт; $n_{н}$ =2940 об/мин; $n_{с}$ = 3000 об/мин; $\mu_{п}$ =1,8; $\mu_{кр}$ = 2,6; построить естественную механическую характеристику по 4-м точкам:

1. Определяем синхронную скорость вращения $\omega_{сс}$, рад/с, по формуле

2. $$\omega_{с} = \frac{\pi \cdot n_{с}}{30} \quad (1.8)$$
$$\omega_{с} = \frac{3{,}14 \cdot 3000}{30} = 314 \frac{рад}{с}.$$

3. Определяем номинальную скорость вращения $\omega_{н}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{н} = \frac{\pi \cdot n_{н}}{30} \quad (1.9)$$
$$\omega_{н} = \frac{3{,}14 \cdot 2940}{30} = 307{,}7 \frac{рад}{с}.$$

4. Определяем номинальный момент $М_{н}$, Н·м, электродвигателя:

$$М_{н} = 1000 \cdot \frac{Р_{н}}{\omega_{н}} \quad (1.10)$$
$$М_{н} = 1000 \cdot \frac{55}{307{,}7} = 178{,}7 \text{ Н·м}.$$

5. Определяем критический момент $М_{кр}$, Н·м, электродвигателя:

$$М_{кр} = \mu_{кр} \cdot М_{н} \quad (1.11)$$
$$М_{кр} = 2{,}6 \cdot 178{,}7 = 464{,}6 \text{ Н·м}$$

6. Определяем номинальное скольжение $S_{н}$ о.е., электродвигателя:

$$S_{н} = \frac{(n_{с} - n_{н})}{n_{с}} \quad (1.13)$$

$$S_{\text{н}} = \frac{(3000 - 2940)}{3000} = 0.02$$

7. Определяем критическое скольжение $S_{\text{кр}}$, о.е., электродвигателя:

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{н}} \cdot (\mu_{\text{кр}} + \sqrt{\mu_{\text{кр}}{}^2 - 1}) \quad (1.13)$$

$$S_{\text{кр}} = 0.02 \cdot \left(2.6 + \sqrt{2.6^2 - 1}\right) = 0.1$$

8. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{\text{кр}}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{\text{кр}} = \omega_{\text{с}}(1 - S_{\text{кр}}) \quad (1.14)$$

$\omega_{\text{кр}} = 314(1 - 0.1) = 282.6$ рад/с

9. Определяем пусковой момент $\text{M}_{\text{пуск}}$, Н·м, электродвигателя:

$$\text{M}_{\text{пуск}} = \mu_{\text{п}} \cdot \text{M}_{\text{н}} \quad (1.15)$$

$\text{M}_{\text{пуск}} = 1.8 \cdot 178.7 = 321.66$ Н·м

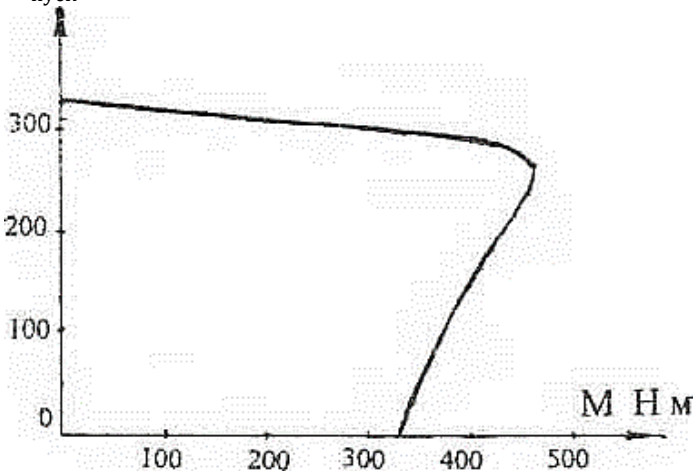


Рисунок 1.2 Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя типа АИР225М2

1.3 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса при помощи ПК

1.3.1 Мой компьютер

Персональный компьютер - это техническое средство, предлагающее сегодня пользователю всё, что необходимо для обработки информации на рабочем месте, и огромные по возможностям программные средства или математическое обеспечение для решения практически любых задач в самом доступном для пользователя виде.

Технические устройства ПК:

Стандартный комплект современного ПК включает в себя:

- системный блок
- монитор
- клавиатуру
- мышь с ковриком.

Системный блок - это основа ПК, в него входят устройства, определяющие всю работу по обработке информации.

Монитор - окно в ПК. Монитор даёт возможность ведения диалога с ПК, а диалог представляет основу работы пользователя на ПК.

Клавиатура - всю клавиатуру можно разбить на 4 зоны:

- основная (пишущая машинка);
- числовая (калькулятор);
- управления курсором;
- функциональная.

Основная. Расположение символов на основной части клавиатуры такое же, как и на пишущей машинке. Русские символы в соответствии с русскоязычной пишущей машинкой, а латинские символы- с англоязычной. Верхний ряд содержит цифры и специальные символы. Большая клавиша внизу - пробел (интервал между словами). Справа и слева - управляющие клавиши.

Ctrl - (контрол), правый и левый;

Alt - (альт), правый и левый;

Shift - (шифт), правый и левый.

У клавиатуры два регистра - нижний и верхний. В нижнем регистре находятся обычные символы, буквы и цифры. В верхнем регистре - заглавные буквы и некоторые специальные символы, которые, обычно, отображены на верху клавиши. Символ из верхнего регистраберётся при нажатой клавише Shift. Для закрепления верхнего регистра используется клавиша Caps Lock. Отключается верхний регистр повторным нажатием этой клавиши. Включённый верхний регистр отмечается включённым индикатором Caps на панели индикации в правом верхнем углу клавиатуры. Для переключения режимов клавиатуры (русский / латинский) в WINDOWS следует нажать одновременно Ctrl + Shift - левый или правый.

Клавиша Back Space стирает набранные символы (справа налево).

Клавиша Tab - табуляция.

Клавиша Enter - ввод, основная клавиша, вводит информацию в ОП для обработки, подтверждает выбор на экране, завершает выполнение команды.

Клавиша Esc (Escape) — в левом верхнем углу клавиатуры, отмена действия, отказ, сброс информации.

Числовая. (Правая часть клавиатуры). Расположение цифр подобно калькулятору. Эта часть клавиатуры может работать в двух режимах - для ввода чисел или для управления курсором. Режимы переключаются клавишей Num Lock. Включённый числовой режим отображается индикатором Num на табло индикации.

Курсор. - это указатель на экране. Символьный курсор - вертикальная мигающая чёрточка обозначает на экране место для ввода. Курсор-указатель - выделенный прямоугольник,перемещая который можно выбрать информацию на экране. Курсор перемещается по экрану клавишами-стрелками. Если информации много, то для перелистывания экранов используются клавиши PgUp и PgDn страница вверх и страница вниз. Ноте - перевод курсора в начало информации (списка, строки), End - перевод курсора в конец информации (списка, строки) Клавиша ins (Inset - вставить) переключает режимы « Вставка » / « Замена ». В режиме « Вставка» символ с клавиатуры вставляется в позицию слева от курсора, раздвигая текст.

Клавиша Del (Delete - удалить) удаляет символ справа от курсора.

Функциональная. 12 клавиш в верхней части клавиатуры - F1, F2 F12.

Эти клавиши имеют конкретное назначение в каждом пакете программ и описываются в инструкциях.

Управление Мышью. При работе на ПК мышь становится основным инструментом в руках пользователя.

Рабочие элементы Мыши - это шарик на её нижней стороне и две рабочие клавиши наверху. При перемещении Мыши по коврику шарик вращается и перемещает стрелку-указатель по экрану.

Левая клавиша - 3 основных действия:

Одинарный щелчок. Выбирает объект на экране, вызывает команду из меню, нажимает кнопку на графическом экране, и т. д.

Двойной щелчок. Открывает папку, вызывает документ, выполняет другие операции по инструкции.

Перетаскивание. Перемещает объект, для этого; установить указатель мыши на нужный объект, нажать левую клавишу и, удерживая её, переместить мышь в нужном направлении. Выбранный объект перемещается вместе с мышкой и остаётся там, где отпущена клавиша.

Правая клавиша.

Щелчок правой клавишей мыши вызывает контекстное меню.

Меню - это перечень команд для выбора пользователем. Контекстное меню всегда содержит только те команды, которые можно применить к выбранному мышкой объекту, работа с этим меню значительно упрощает поиск нужной команды.

1.3.2 Электронная таблица – EXCEL

Электронные таблицы сегодня являются самыми популярными программами для автоматизации обработки информации в любой сфере управления. Одних только математических, логических, бухгалтерских, статистических функций, которые Excel умеет выполнять над табличными данными, - более двухсот штук.

Рабочее поле Excel представляет собой не чистый лист, а пустую таблицу, которую предстоит заполнять.

Идея автоматизации расчётов в электронных таблицах очень простая:

В таблице добавляются номера строк и буквы столбцов, таблица становится адресной, т.е. у каждой клетки есть адрес, как на шахматной доске. Значит, у любой информации таблицы есть адрес, так же, как и у фигуры на шахматной доске. Теперь в таблице можно писать формулы расчёта, используя адреса с информацией.

	A	B	C	D	E
1	15	20	=A1+B1(35)	=10%*C1(3.5)	=C1-D1(31.5)
2					
3					

Когда исходные данные в адресах меняются, одновременно пересчитываются и все формулы с этими адресами.

Таким образом, надо только правильно задать формулы расчёта, и тогда достаточно ввести новые исходные данные и распечатать уже пересчитанную таблицу. Если при этом учесть, **ЧТО** размеры таблиц практически не ограничены, и в формулах можно использовать огромное количество функций, в том числе сложных математических функций и специальных функций EXCEL, и что работа в таблице полностью автоматизирована, то становится понятной растущая популярность этого пакета программ.

Вызов EXCEL

EXCEL входит в состав MS OFFICE и проще всего его вызвать щелчком мыши на кнопке с его значком на панели OFFICE в верхней части экрана Рабочего Стола.

Всегда можно вызвать EXCEL из списка программ через пусковое меню:

ПУСК - Программы - Microsoft Excel Экран EXCEL

Экран EXCEL - стандартное окно WINDOWS. Верхняя строка- заголовок, затем меню, под строкой меню находятся панели инструментов с кнопками-значками для быстрого вызова основных команд. По умолчанию, так же, как и в WORDe, на экране две основные панели - стандартная и форматирование. Другие панели можно устанавливать или убирать по мере необходимости, используя для этого команду:

Вид - Панели инструментов

Вызывается список панелей. Установленные панели отмечены слева галочкой. Нужная панель устанавливается или убирается щелчком мыши. Если необходимо полностью настроить панели инструментов, то следует выполнить:

Вид - Панели инструментов - Настройка

В окне запроса выбираются панели инструментов для постоянного отображения на экране.

Рабочее поле окна EXCEL - таблица. Сверху и слева от таблицы расположена рамка EXCEL с заголовками столбцов и строк. Имена столбцов - буквы латинского алфавита, имена строк - номера по порядку, таким образом, у каждой клетки есть адрес, например: Al, F34,-AN15 и т.д.

Клетка, выделенная прямоугольной рамкой, называется «Активной клеткой» или «Табличным курсором» -Активная клетка перемещается клавишами-стрелками или щелчком мыши.

- указатель мыши в рабочем поле. **Ноте** - перемещает Активную Клетку в начало строки; **Ctrl + Ноше** - в начало таблицы, в клетку A1; курсор имеет форму толстенького белого крестика.

Вся таблица - книга. В этой книге по умолчанию 3 листа. Количество листов можно уменьшить или увеличить практически без ограничений (до 255 листов). Номера листов обозначены на ярлычках под таблицей. Один лист - это 255 столбцов и 65580 строк.

Управление листами:

- **переход на другой лист** - щелчок мыши на ярлычке листа;
- **задать новое имя** - двойной щелчок мыши на ярлычке, задать на ярлычке новое имя с клавиатуры; (или из контекстного меню выполнить команду - **Переименовать**);
- **удалить** лист - из контекстного меню выполнить команду - **Удалить;**
- добавить новые листы - из контекстного меню выполнить команду - Вставить;

Листы можно перемещать, перетаскивая мышкой ярлычок, или копировать, перетаскивая мышкой при нажатии клавиши Ctrl. Между панелями инструментов и таблицей находится

Строка Формул. Эта строка устанавливается или убирается с экрана командой: **Вид - Строка Формул.**

Слева в Строке формул отображается адрес Активной клетки, а справа - содержимое Активной клетки в формульном виде, если эта информация - формула. Последняя строка экрана - строка состояния.

Виды информации в EXCEL:

3 основных вида информации в EXCEL:

Текстовая - эту информацию EXCEL различает самостоятельно. Числовое значение текстовой информации 0 или ошибка.

Числовая - это числа, целые или десятичные с разделителем десятичных знаков - запятая, например, 15,72.

Числа могут быть представлены в нормализованном виде (экспоненциальная форма числа). Этот формат называют ещё инженерным или научным, и используется он для представления очень больших или очень маленьких чисел, используя для этого степень десяти (экспоненту).

Например:

$1200000000 = 1{,}2 * 10^{9} = 1{,}2+ E9$
$0{,}0000000012 = 1{,}2*10^{-9} = 1{,}2\text{-}E9$

Формульная- всегда начинается с признака формулы, знака =. Без этого признака формула воспринимается как текст. Формулы могут содержать:

- числа,
- адресные ссылки (например: A1 + B1),

- текстуальные константы, текст в кавычках, т.е. « текст». Используется для ввода текста в формулы.
- функции EXCEL. Большое разнообразие функций даст возможность решения самых различных классов задач, это в свою очередь и определяет такую популярность данного пакета программ.

Вот далеко не полный перечень только классов функций: - математические;
- статистические;
- логические;
- финансовые;
- календарные и другие.

Для записи (построения) формулы используются следующие арифметические операции:

+ сложение
- вычитание
* умножение
./ деление
^ возведение в степень (например: A1^3),

% процент от числа или от адресной ссылки, используется со знаком умножения * (например: = 5%*A1);

() круглые скобки используются для изменения порядка вычислений. Стандартные правила порядка вычислений при расчёте формул EXCEL выполняет.

Если при вводе формулы допущена синтаксическая ошибка, то формула воспринимается как текст и выдаётся сообщение об ошибке. В формулах не допускаются пробелы.

Вид сообщений об ошибках:

ИМЯ? - в адресных ссылках формулы использованы русские буквы, или неверно записано имя функции.

#ЗНАЧ? - в формуле допущена адресная ссылка на клетку с текстом или с ошибкой.

#ССЫЛКА? - адресная ссылка на ошибку.

#ДЕЛ/0! - деление на 0.

В одной клетке таблицы может быть информация только одного вида, иначе она воспринимается как текст.

Ввод информации:

Информация всегда вводится в «Активную клетку», поэтому необходимо следить за её местоположением в таблице. Перед вводом информации Активную клетку необходимо установить в нужное место.

Размер информации в одной клетке таблицы ограничен до 255 символов. Если при вводе текст превышает размер клетки, то он автоматически переходит в клетки справа по строке, если они свободны. Если клетки справа заняты, то текст на экране обрывается, но при этом он полностью остаётся в оперативной памяти по адресу клетки ввода.

Информация при вводе отображается в активной клетке и в строке формул, чтобы её сбросить в процессе ввода, нужно нажать клавишу Esc. Информация считается введённой в указанный адрес только при завершении ввода: (Enter) - стандартный способ завершения ввода. Обязательно применяется при вводе и редактировании формул. После ввода «Активная клетка» автоматически переходит на одну клетку вниз.

Клавиши-стрелки - обычно завершают ввод исходных данных. После ввода «Активная клетка» автоматически перемещается в выбранном стрелкой направлении.

Щелчок мыши - используется тоже при вводе исходных данных, когда они разбросаны по таблице. «Активная клетка» перемещается по адресу щелчка мыши.

Если перед вводом щелкнуть мышкой в строке формул, то в ней появляется символьный курсор, и информация вводится непосредственно в строку формул. При этом в

строке формул появляются дополнительные кнопки, которые можно использовать для редактирования, удаления или для ввода. В этом случае « Активная клетка» при вводе никуда не перемещается.

Редактирование информации:

Информация стирается из «Активной клетки» или выделенного блока клеток клавишей Del.

Если информация вводится в занятую клетку, то новая информация заменяет старую, таким образом, нет необходимости стирать старую информацию при вводе новых исходных данных.

Если в занятую клетку информация вводится ошибочно, то клавиша Esc стирает набираемую информацию, восстанавливая старую. Для редактирования данных в клетке таблицы необходимо включить режим редактирования, который вызывается двойным щелчком мыши в клетке редактирования или клавишей F2: в клетке появляется текстовый курсор, который можно перемещать по информации в клетке и затем редактировать (удалять, вставлять или заменять символы).

Щелчок мыши в строке формул также вызывает режим редактирования информации Активной клетки, символьной курсор появляется прямо в строке формул, где и отображается процесс редактирования. Редактирование завершается клавишей Enter.

Выделение в таблице:

Практически все операции в EXCEL выполняются для выделенного блока клеток или только для «Активной клетки».

Основные приёмы выделения:

- с клавиатуры - Shift + стрелки управления курсором;
- мышкой - перетаскиванием по нужному блоку клеток.

*Дополнительные приёмы***:**

- **выделение столбца** - щелчок мыши на букве столбца в рамке таблицы, перетаскиванием мышки по буквам столбцов в рамке можно выделить несколько смежных столбцов;
- **выделение строки** - щелчок мыши на номере строки в рамке таблицы, перетаскиванием мыши по номерам строк можно выделить несколько смежных строк в таблице;
- **выделение всей таблицы** - щелчок мыши в левом верхнем углу рамки таблицы;
- **выделение таблицы пользователя** - поместить «Активную клетку» в А1 и нажать клавиши Scift + Ctrl + End;
- **выделение разрывного блока клеток** - EXCEL допускает выделение несмежных между собой блоков клеток, для этого выделить мышкой нужные блоки при нажатой клавише Ctrl. В выделенном блоке остаётся не закрашенной Активная клетка.

Перемещение и копирование мышкой:

- выделить блок клеток;
- установить указатель мыши строго на рамку блока или Активной клетки;
- для перемещения - перетащить мышкой блок в другое место таблицы;
- для копирования - перетащить мышкой при нажатой клавише

Ctrl. Эту клавишу отпустить после выполнения операции в последнюю очередь.

Если блок клеток перемещается или копируется в занятое место таблицы, то на экране появляется окно-предупреждение, что будет произведена замена информации. Если эта замена нежелательна, то надо отказаться от выполнения операции.

Использование некоторых функций EXCEL:

Возможности электронных таблиц значительно расширяются, если использовать функции. Все функции EXCEL можно просмотреть, если вызвать окно «Мастер функции». Это окно вызывается кнопкой fx на стандартной панели инструментов. В этом окне слева представлен список категорий (видов) функций, а справа - список функций выбранной категории. Общий вид функций, выбранной щелчком мыши, и краткая подсказка по ней отображается внизу окна. Чтобы получить подробную инструкцию по её применению

надо нажать кнопку с вопросом (или кнопку СПРАВКА в EXCEL-7).

Окно «Мастер функций» можно использовать при вводе сложных или незнакомых функций, тогда в режиме «шаг за шагом» вводится сначала имя выбранной функции, а затем её аргументы.

1.3.3 Уравнение Клосса

Уравнение механической характеристики АД записывается следующим образом:

$$M = \frac{2M_{макс}(1+aS_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}}+\frac{S_{кр}}{S}+2a\cdot S_{кр}} \quad (1.16)$$

Где $M_{макс}$ - максимальный (критический) момент электродвигателя, Н·м;

$S_{кр}$ - критическое скольжение, соответствующее критическому моменту, о.е.

$$2a = \frac{R_1^I}{R_2^{II}}$$

Задача 1.2. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АНР100L6, имеющего следующие паспортные данные:

$P_н$ = 2.2кВт; $n_н$ =945 об/мин; n_c = 1000 об/мин; $\mu_{кр}$ = 2,2; $R_1^I = 0.09$; $R_2^{II} = 0.067$; построить естественную механическую характеристику по уравнению Клосса при помощи персонального компьютера.

Решение:

1. Составляем блок-схему алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя к.з. ротором типа АИР100L6 (рисунок 1.3).
2. Составляем инструкцию по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики АД с к.з. ротором типа АНР100L6.
3. Заполняем электронную таблицу EXCEL согласно инструкции и получаем механическую характеристику $M = f(S)$ для электродвигателя типа АИР100L6 (рисунок 1.4).

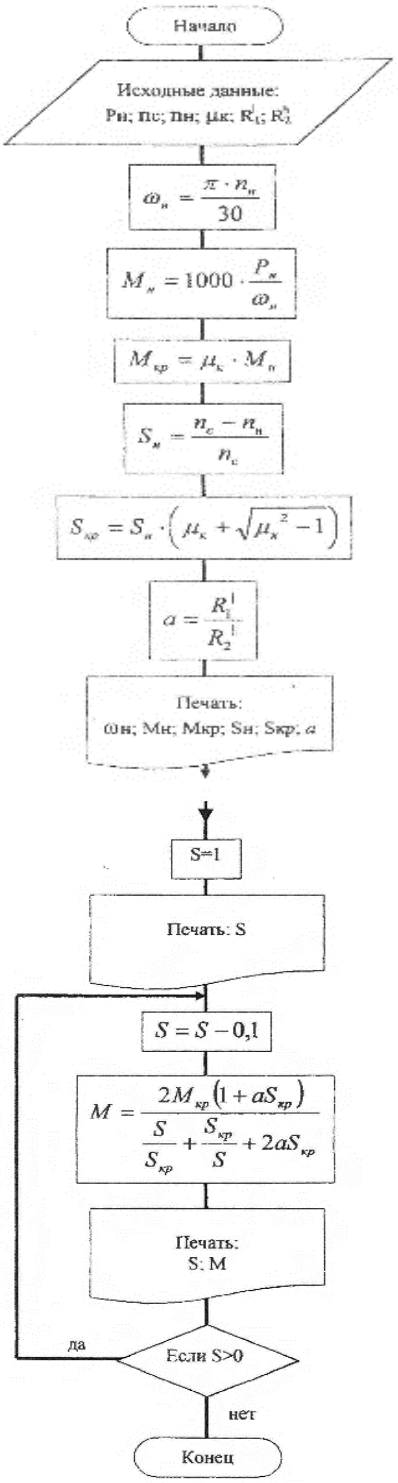


Рисунок 1.3 Блок-схема алгоритма расчета координат для построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором

Таблица 1.2

Инструкция по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма определения координат для построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором

Ячейка	Значение
A1 (A1-G1)	"Построение механической характеристики"
A2 (A2-G2)	"асинхронного электродвигателя с к.з. "
A3 (A3-G3)	"ротором по уравнению Клосса"
B6 (B6-E6)	"Исходные данные"
A8	"Тип двигателя"
B8	"$P_н$. кВт"
C8	"n_c, об/мин"
D8	"$n_н$ об/мин"
E8	"$\mu_к$"
F8	"R_1^I"
G8	"R_2^{II}"
B12 (B 12-E 12)	"Промежуточные расчеты"
B14	"$\omega_н$, рад/с"
C14	"$M_н$, Н*м"
D14	"$M_{кр}$, Н*м"
E14	"$S_н$"
F14	"$S_{кр}$"
G14	"a"
B15	=3,14*D9/30
C15	= 1000*B9/B15
D15	=E9*C15
E15	=(C9-D9)/C9
F15	=E15*(E9+КОРЕНЬ(СТЕПЕНЬ(E9;2)-1))
G15	=F9/G9
A18 (A18-D18)	"Данные для построения"
A1 9 (A19-D19)	"механической характеристики:"
A21	"S"
B21	"M, Н*м"
A22	=0
B22	=0
A23	=A24-0,1
B23	=2*D15*(1+G15*F15)/(A23/F15+F15/A23+2*G15*F15)
A24	=A25-0,1
B24	=2*D15*(1+G15*F15 V(A24/F 15+F15/A24+2*G 15*F
A25	=A26-0,1
B25	=2*D15*(1+G15*F15)/(A25/F15+F15/A25+2*G15*F15)
A26	=A27-0,1
B26	=2*D15*(1+G15*F15)/(A26/F15+F15/A26+2*G15*F15)
A27	=A28-0,1
B27	=2*D15*(1+G15*F15)/(A27/F15+F 15/A27+2*G
A28	=A29-0,1
B28	=2*D15*(1+G15*F15)/(A28/F15+F15/A28+2*G15*F15)
A29	=A30-0,1
B29	=2*D15*(1+G15*F15)/(A29/F15+F15/A29+2*G15*F15)
A3O	=A3 1-0,1
B3O	=2*D15*(1+G15*F15)/(A30/F15+F15/A30+2*G15*F15)
A31	=A32-0,1
B31	=2*D15*(1+G15*F15)/(A31/F15+F15/A31+2*G15*F15)
A32	=1
B32	=2*D15*(1+G15*F15)/(A32/F15+F15/A32+2*G15*F15)

B37 (B37-G37) (B40-G40)	"Рисунок 1.4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с к.з. ротором”
Объект	=ВНЕДРИТЬ(”диаграмма Microsoft Graph”) ="M(S)" Значения X: “=Лист1 !$A$22:$A$32” Значения Y: “ =Лист1!$B$22:$B$32”

Построение механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором по уравнению Клосса

Ф.И.О.	группа, курс
Иванов Иван Иванович	1,1

Исходные данные:

Тип двигателя	$P_н$, кВт	n_c об/мин	n_c об/мин	$\mu_к$	R_1^I	R_2^{II}
АНР100L6	2,2	1000	945	2,2	0,09	0,067

Промежуточные расчеты:

$\omega_н$, рал/с	$M_н$, Н*м	$M_{кр}$, Н*м	$S_н$	$S_{кр}$	a
98,91	22,242443	48,933374	0,055	0,2288	1,3433

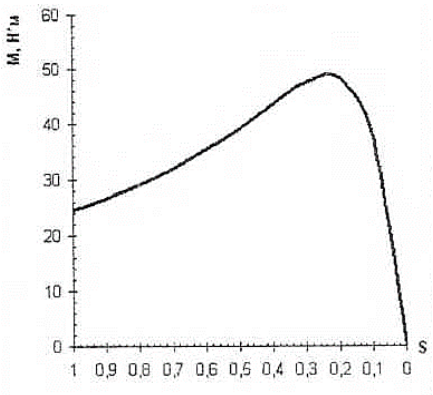


Рисунок 1.4 Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с к.з. ротором

Данные для построения механической характеристики

s	M, Н-м
0	0
0,1	38,31178
0,2	48,59697
0,3	47,58817
0,4	43.59209
0,5	39,27374
0.6	35,35732
0,7	31,97609
0.8	29,09473

0,9	26,63928
1	24,53608

2. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором

2.1 Назначение электродвигателей

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются при тяжёлых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения вниз от номинальной. Они используются для рабочих машин, требующих большой пусковой момент. Двигатели с фазным ротором являются модификацией АД с короткозамкнутым ротором. Главным достоинством таких АД - возможность пуска при малых пусковых токах, что особенно важно для работы от слабых сетей. Кроме того, фазный АД можно регулировать по частоте вращения, вводя в ротор резистор. В ряде случаев фазные асинхронные электродвигатели работают в режиме генератора, как нагружающие устройства. Иногда они используются в асинхронном вентильном каскаде, допускающем плавную регулировку частоты вращения в широком диапазоне при высоком коэффициенте мощности.

Выводные концы обмотки ротора, соединённой обычно в звезду, подключены к трём контактным кольцам. С помощью щёток через кольца в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор или добавочную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств электродвигателя. Щётки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочный резистор вводится в обмотку ротора только для облегчения пуска АД, так как в этом случае увеличивается момент и уменьшается ток. При работе АД пусковой резистор должен быть полностью выведен, а обмотка ротора замкнута накоротко.

Двигатели с фазным ротором выполняются с теми же степенями защиты, что и АД с короткозамкнутым ротором, -IP54 (IP44) и IP23 по СТ СЭВ 247-76.

В серии АИ на базе вариантов АИР, АИС, АИРН, АИСН разработаны соответственно следующие модификации АД с фазным ротором: **АИРФ** - со степенью защиты IP54 (IP44); **АИСФ** - со степенью защиты IP54 (IP44); **АИРНФ** - со степенью защиты IP23; АИСНФ -со степенью защиты IP23.

2.2 Построение естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором характеризуется номинальными техническими данными, которые указываются в каталоге:

$Р_н$**,кВт** -номинальная мощность; $U_н$, **В** - номинальное напряжение; $n_н$, об/мин - номинальная частота вращения вала электродвигателя (или $S_н$-номинальное скольжение); $I_н$ А —номинальный ток; $f_н$, Гц -частота питающей сети; $cos\varphi_н$-коэффициент мощности при номинальной нагрузке; $\eta_н$ -номинальный коэффициент полезного действия; n_c, об/мин - синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля статора); $\mu_н = \frac{М_{макс}}{М_н}$ кратность максимального (или критического момента); $I_{2н}$, А-номинальный ток обмотки фазы ротора; $E_{2н}$, В - э.д.с. номинальная ротора (линейное напряжение на кольцах разомкнутой цепи неподвижного ротора).

Естественную механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором $\omega = f(М)$ ориентировочно можно построить, используя его данные по каталогу по 3 -м характерным точкам: А; В; С, координаты которых рассчитываются аналогично координатам точек для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.з. ротором (см. п.п. 1.2.). Пусковой момент ($М_1$) рассчитывается

при введённом пусковом сопротивлении в цепи ротора согласно законов коммутации по формуле:

$$M_1 = (0{,}8 \dots 0{,}85)M_{макс} \quad (2.1)$$

Естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя с фазным ротором можно построить по уравнению Клосса по формуле (1.16), задаваясь скольжением в пределах от S=0 до $1 > S > S_{кр}$

Задача 2.1. Для асинхронного электродвигателя с к.з. ротором типа АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные:

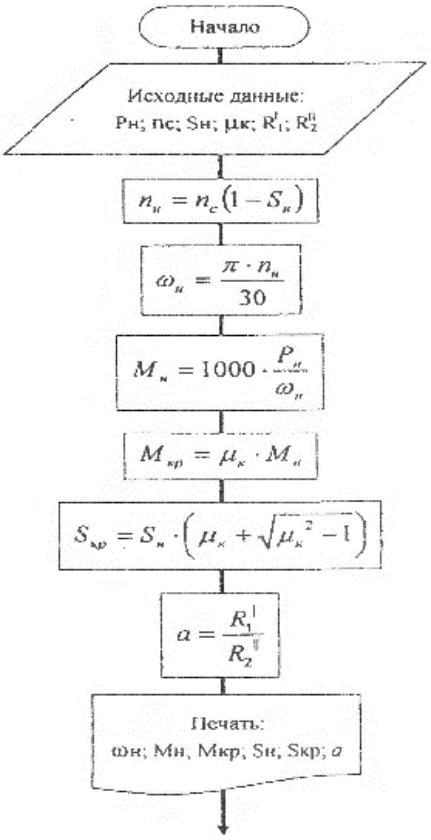
$P_н$ = 22кВт; n_c = 1500 об/мин; $S_н = 0.025$; $\mu_{кр}$ = 2,2;Параметры схемы замещения $R_1^I = 0.024$; $R_2^{II} = 0.026$; построить естественную механическую характеристику по уравнению Клосса при помощи персонального компьютера.

Решение:

1. Составляем блок-схему алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя к.з. ротором типа АИРФ200М4 (рисунок 2.1).

2. Составляем инструкцию по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма расчёта координат для построения естественной механической характеристики АД с к.з. ротором типа АИРФ200М4.

3. Заполняем электронную таблицу EXCEL согласно инструкции и получаем механическую характеристику $M = f(S)$ для электродвигателя типа АИРФ200М4 (рисунок 2.2).



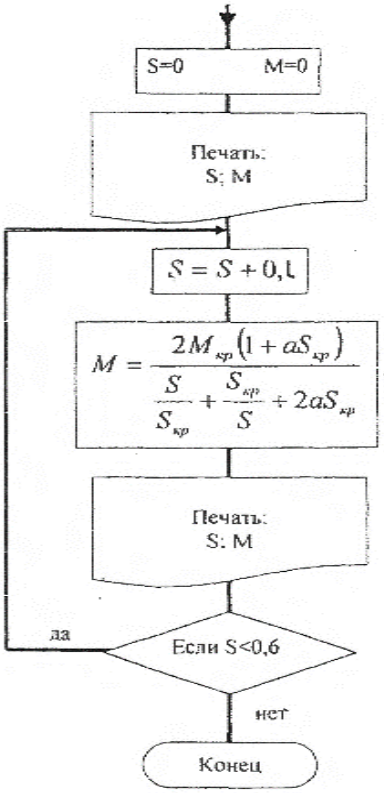


Рисунок 2.1 Блок-схема алгоритма расчета координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Таблица 2.1

Инструкция по заполнению электронной таблицы EXCEL для реализации вычислительного алгоритма определения координат для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Ячейка	Значение
A1 (A1-G1)	"Построение механической характеристики”
A2 (A2-G2)	"асинхронного электродвигателя с фазным[7]’
A3 (A3-G3)	"ротором по уравнению Клосса”
B6 (B6-E6)	’’Исходные данные”
A8	’’Тип двигателя”
B8	"$P_н$. кВт"
C8	"n_c, об/мин"
D8	”"$S_н$ о.е.”
E8	"$\mu_к$"
F8	"R_1^I"
G8	"R_2^{II}"
B12 (B12-E12)	’’Промежуточные расчеты"
B14	"$n_н$ об/мин"
C14	"$\omega_н$, рад/с"
D14	"$M_н$, Н*м"
E14	"$M_{кр}$, Н*м"
F14	"$S_{кр}$"

G14	”a ”
B15	=C9*(1-D9)
C15	=3.14*B15/30
D15	=1000*B9/C15
E15	=E9*D15
F15	=09*(E9+K0РЕНЬ(СТЕПЕНЬ(,E9;2)-1))
G15	=F9/G9
A18 (A18-D1S)	’’Данные для построения”
A19 (A19-D19)	’’механической характеристики:”
A21	”S”
B21	”M, Н·м”
A22	=0
B22	=0
A23	=A22+0.1
B23	=2*E15*(1+G15*F15)/(A23/F15+F15/A23+2*G15*F15)
A24	=A 23+0,1
B24	=2*E15*(1+G15*F15)/(A24/F15+F15/A24+2*G15*F15)
A25	=A24+0,1
B25	=2*E15*(1+G15*F15)/(A25/F15+F15/A25+2*G15*F15)
A26	=A25+0,1
B 26	=2*E 15 *(1 +G15*F 15)/(A26/F 15+F 15/A26+2*G 15*F 15)
A27	=A26+0,1
B27	=2*E15*(1+G15*F15)/(A27/F15+F15/A27+2*G15*F15)
A28	=A27+0,1
B28	=2*E 15*(1 +G15 * F15)/(A2 8/F15+F15/A28+2*Gl 5*F 15)
(B37-G37) (B40-G40)	’’Рисунок 2.2 Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором”
Объект 13	=ВНЕДРИТЬ (”MSGraph.Chart.8”;” ”)

Построение механической характеристики асинхронного электродвигателя с фазным ротором по уравнению Клосса

Исходные данные:

Тип двигателя	$P_н$, кВт	n_c об/мин	S_H, о.е.	$\mu_к$	R_1^I	R_2^{II}
АИРФ200М4	22	1500.	0,025	2,5	0,024	0,026

Промежуточные расчеты:

$n_н$,об/мин	$\omega_н$, рал/с	$M_н$, Н*м	$M_{кр}$, Н*м	$S_{кр}$	***a***
| 1462,50	153,08	143,72	359,30	0,12	0,92

Данные для построения механической характеристики:

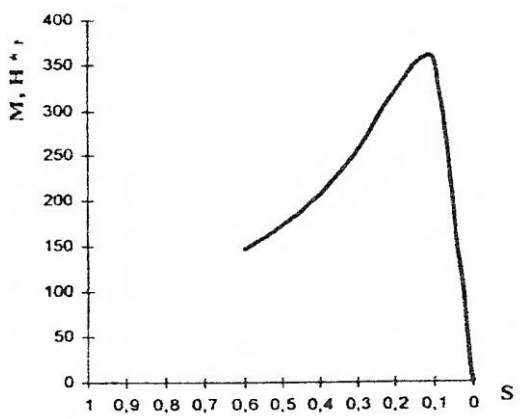


Рисунок 2.2 Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя с фазным ротором

S	M, Н·м
0	0
0,1	354,09
0,2	320,54
0,3	255,38
0,4	206,75
0,5	172,18
0,6	146,98

2.3 Определение количества и величины секций пускового резистора АД с фазным ротором

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором запускается при полностью введённом пусковом резисторе (реостате), который состоит из секций. Пусковой реостат служит для ограничения пускового тока АД с фазным ротором. Определить количество и величины сопротивлений секций пускового реостата можно графическим и аналитическим способами.

Графический метод:

Для определения количества и величины сопротивлений секций пускового реостата необходимо построить пусковую диаграмму АД с фазным ротором (рисунок 2.3).

1. Строим механическую характеристику АД с фазным ротором по 3-м точкам или по уравнению Клосса;
2. Определяем искусственный пусковой момент M_1 Н·м, согласно законов коммутации:

$$M_1 = (0{,}8 \dots 0{,}85)M_{макс} \quad (2.2)$$

3. Определяем момент переключения M_2, Н·м, секций пускового реостата:

$$M_2 = (1 \dots 1{,}5)M_н \quad (2.3)$$

4. Строим прямые M = M, и M = M_2;
5. Соединяем точку 1 и точку А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 2, из точки 2 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 3; соединяем точку 3 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 4, из точки 4 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$ и обозначаем эту точку цифрой 5; соединяем точку 5 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 6, из точки 6 опускаем перпендикуляр на прямую $M = M_1$и обознача-

ем эту точку цифрой 7.

(Цифра 7 обязательно должна находиться на пересечении естественной механической характеристики АД и прямой $M = M_1$ -это может быть достигнуто путём подбора коэффициентов от 1 до 1,5 у момента переключения M_2 и коэффициентов от 0,8 до 0,85 у пускового момента M_1).

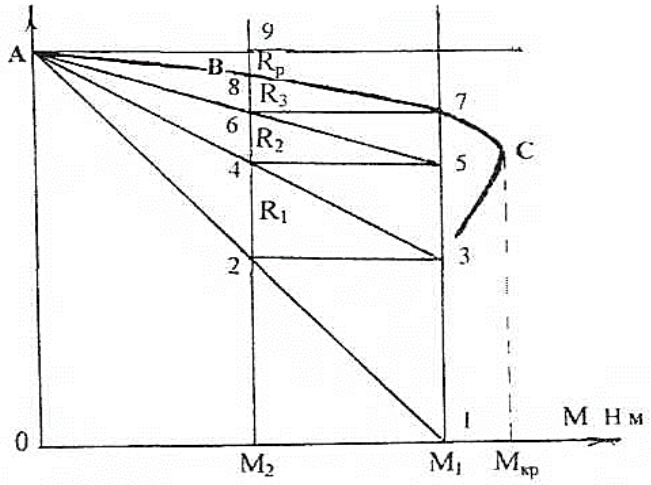


Рисунок 2.3 - Пусковая диаграмма АД с фазным ротором

6. Проводим прямую СО ⁼С0с параллельную оси моментов и обозначаем точку пересечения с прямой M = M2 цифрой 9, а точку пересечения механической характеристики с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 8. По пусковой диаграмме определяем количество ступеней пускового реостата (m). Согласно рисунка 2.3. m = 3

пределяем номинальное активное сопротивление $R_{2н}$. Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} \quad (2.4)$$

где$E_{2н}$ - Э.Д.С. номинальная ротора, В, $I_{2н}$- номинальный ток обмотки фазы ротора, А.

7. Определяем активное сопротивление $R_р$, Ом, обмотки фазы ротора при $M_c = M_н$:

$$R_р = R_{2н} \cdot S_н \quad (2.5)$$

8. Определяем масштаб сопротивлений m_R, **Ом/мм,** замеряем расстояние отрезка (8 - 9) в мм:

$$m_R = \frac{R_р}{(8-9)} \quad (2.6)$$

9. Определяем величину сопротивления первой секции R_1 ?Om, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (2-4) в мм.

$$R_1 = m_R \cdot (2-4) \quad (2.7)$$

10. Определяем величину сопротивления второй секции R_2, Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (4 - 6) в мм.

$$R_2 = m_R \cdot (4-6) \quad (2.8)$$

11. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3**,Ом,** пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (6 - 8) в мм.

$$R_3 = m_R \cdot (6-8) \quad (2.9)$$

12. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_n,Ом, при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_\text{р} + R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.10)$$

Аналитический метод:

Так как стоит задача определить число и величину сопротивлений ступеней пускового реостата, следовательно, задаются M_1 и M_2.

1. Задаёмся $\text{M}_1 = (0{,}8 \dots 0{,}85)\text{M}_\text{макс}$, $\text{M}_2 = (1 \dots 1{,}5)\text{M}_\text{н}$
2. Определяем номинальное активное сопротивление $\text{R}_{2\text{н}}$. Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_{2\text{н}} = \frac{E_{2\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{н}}} \quad (2.11)$$

3. Определяем активное сопротивление $\text{R}_\text{р}$, Ом, обмотки фазы ротора при $\text{M}_c = \text{M}_\text{н}$:

$$R_\text{р} = R_{2\text{н}} \cdot S_\text{н} \quad (2.12)$$

4. Определяем колебания момента при пуске:

$$\lambda = \frac{\text{M}_1}{\text{M}_2} \quad (2.13)$$

5. Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{lg\frac{\text{M}_\text{н} R_{2\text{н}}}{R_p \, \text{M}_1}}{lg\lambda} \quad (2.14)$$

6. Принимаем m целым числом:
7. Рассчитываем уточнённое значение λ

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_{2\text{н}}\text{M}_\text{н}}{R_p \text{M}_1}} \quad (2.15)$$

8. Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата:

$$R_m = R_p(\lambda - 1) \quad (2.16)$$
$$R_{m-1} = R_p \cdot \lambda(\lambda - 1) = R_m \cdot \lambda \quad (2.17)$$
$$R_1 = R_p \cdot \lambda^{m-1}(\lambda - 1) = R_2 \cdot \lambda \quad (2.18)$$

9. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_N, Ом, при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_\text{р} + R_1 + R_2 + R_m \quad (2.19)$$

Задача 2.2. Определить число и величины сопротивлений секций пускового реостата для АД с фазным ротором типа АИРФ200М4, имеющего следующие паспортные данные:

$P_н$ = 22кВт; n_c = 1500 об/мин; $S_н = 2{,}5\%$; $\mu_{кр}$ = 2,5; Данные ротора: $E_{2н}$ = 340 В, $I_{2н}$ = 45 А.

Графический метод:

1. Строим естественную механическую характеристику АД типа АИРФ200М4 по 3-м характерным точкам: А; В; С. (рисунок 2.4).
2. Рассчитываем координаты точек:

- определяем синхронную скорость вращения:

$$\omega_с = \frac{\pi \cdot n_с}{30} \tag{2.20}$$

$$\omega_с = \frac{3{,}14 \cdot 1500}{30} = 157 \frac{рад}{с}.$$

3. Определяем номинальную частоту вращения:

$$n_н = n_с(1 - S_н) \tag{2.21}$$

$$n_н = 1500(1 - 0{,}025) = 1462{,}5 \frac{об}{мин}$$

4. Определяем номинальную скорость вращения $\omega_н$, рад/с, электродвигателя

$$\omega_н = \frac{\pi \cdot n_н}{30} \tag{2.22}$$

$$\omega_с = \frac{3{,}14 \cdot 1462{,}5}{30} = 153 \frac{рад}{с}.$$

5. Определяем номинальный момент $M_н$, Н · м, электродвигателя:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н} \cdot 10^3 \tag{2.23}$$

$M_н = \frac{22}{153} \cdot 10^3 = 143{,}7$ Н · м;

6. Определяем максимальный (критический) момент $M_{макс}$, Н · м. электродвигателя:

$$M_{макс} = \mu_{кр} \cdot M_н; \tag{2.24}$$

$M_{макс} = 2{,}5 \cdot 143{,}7 = 359{,}25$ Н · м;

7. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$, о.е., по формуле:

$$S_{кр} = S_н \cdot (\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}{}^2 - 1}) \tag{2.25}$$

$$S_{кр} = 0{,}025 \cdot \left(2{,}5 + \sqrt{2.5^2 - 1}\right) = 0.12$$

8. Определяем критическую скорость вращения $\omega_{кр}$, рад/с, электродвигателя:

$$\omega_{кр} = \omega_с(1 - S_{кр}) \tag{2.26}$$

$\omega_{кр} = 157(1 - 0.12) = 138{,}2$ рад/с

9. Определяем пусковой момент M_1, Н·м, электродвигателя:

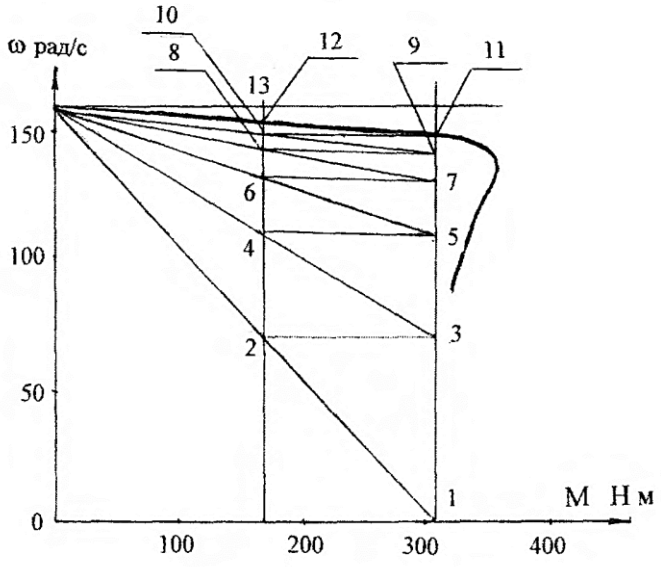
$$M_1 = 0{,}85 \cdot M_{кр} \quad (2.27)$$

$M_1 = 0{,}85 \cdot 359{,}25 = 305{,}4$ Н · м

10. Определяем момент переключения M_2, Н · м, электродвигателя:

$$M_2 = (1 \dots 1{,}5)M_н; \quad (2.28)$$

$M_2 = 1{,}17 \cdot 143{,}7 = 168$ Н · м;



11. Определяем номинальное активное сопротивление $R_{2н}$. Ом, обмотки фазы ротора:

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}}; \quad (2.29)$$

$R_{2н} = \frac{340}{1{,}73 \cdot 45} = 4{,}6$ Ом;

12. Определяем активное сопротивление $R_р$, Ом, обмотки фазы ротора при $M_c = M_н$:

$$R_р = R_{2н} \cdot S_н; \quad (2.30)$$

$R_р = 4{,}36 \cdot 0{,}025 = 0{,}1$ Ом;

13. Определяем масштаб m_R, Ом/мм, сопротивлений:

$$m_R = \frac{R_р}{(12-13)}; \quad (2.31)$$

$m_R = \frac{0{,}1}{2} = 0{,}05$ Ом;

14. Определяем величину сопротивления первой секции R_1, Ом, пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot (2-4); \quad (2.32)$$

$R_1 = 0{,}05 \cdot 19 = 0{,}95$ Ом;

15. Определяем величину сопротивления второй секции R_2, Ом, пускового рео-

стата:

$$R_2 = m_R \cdot (4-6); \quad (2.33)$$

$R_2 = 0{,}05 \cdot 11 = 0{,}5$ Ом;

16. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3,Ом**,** пускового реостата:

$$R_3 = m_R \cdot (6-8); \quad (2.34)$$

$R_3 = 0{,}05 \cdot 5 = 0{,}25$ Ом;

17. Определяем величину сопротивления четвёртой секции R_4, Ом, пускового реостата:

$$R_4 = m_R \cdot (8-10); \quad (2.35)$$

$R_4 = 0{,}05 \cdot 3 = 0{,}15$ Ом;

18. Определяем величину сопротивления пятой секции R_5, Ом, пускового реостата:

$$R_5 = m_R \cdot (10-12); \quad (2.36)$$

$R_5 = 0{,}05 \cdot 2 = 0{,}1$ Ом;

19. Определяем суммарное сопротивление R_n, Ом, роторной цепи при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_\text{р} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5; \quad (2.37)$$

$R_n = \Sigma R = 0{,}1 + 0{,}95 + 0{,}5 + 0{,}25 + 0{,}15 + 0{,}1 = 2{,}05$ Ом;

Аналитический метод:

1. Дано: $\text{М}_1 = 305{,}4$ Н · м; $\text{М}_2 = 168$ Н · м; $\text{М}_\text{н} = 143{,}7$ Н · м; $R_\text{р} = 0{,}1$ Ом; $R_{2\text{н}} = 4{,}36$ Ом;

2. Определяем колебания момента при пуске:

$$\lambda = \frac{\text{М}_1}{\text{М}_2}; \quad (2.38)$$

$\lambda = \frac{305{,}4}{168} = 1{,}82;$

3. Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{lg\frac{\text{М}_\text{н} R_{2\text{н}}}{R_p\,\text{М}_1}}{lg\lambda} \quad (2.39)$$

$$m = \frac{lg\frac{143{,}7}{0{,}1}\frac{4{,}36}{305{,}4}}{lg1{,}82} = \frac{1{,}31}{0{,}26} = 5{,}03$$

4. Принимаем m целым числом: m=5
5. Рассчитываем уточнённое значение λ

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_{2\text{н}}\text{М}_\text{н}}{R_p\text{М}_1}} \quad (2.40)$$

$$\lambda = \sqrt[5]{\frac{143{,}7 \cdot 4{,}36}{0{,}1 \cdot 305{,}4}} = 1{,}83$$

6. Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата:

$$R_5 = R_p(\lambda - 1); \quad (2.41)$$

$R_5 = 0{,}1(1{,}83 - 1) = 0{,}083$ Ом;

$$R_4 = R_5 \cdot \lambda; \quad (2.42)$$

$R_4 = 0{,}083 \cdot 1{,}83 = 0{,}15$ Ом;

$$R_3 = R_4 \cdot \lambda; \quad (2.43)$$

$R_3 = 0{,}15 \cdot 1{,}83 = 0{,}27$ Ом;

$$R_2 = R_3 \cdot \lambda; \quad (2.44)$$

$R_2 = 0{,}27 \cdot 1{,}83 = 0{,}49$ Ом;

$$R_1 = R_2 \cdot \lambda; \quad (2.45)$$

$R_1 = 0{,}49 \cdot 1{,}83 = 0{,}896$ Ом;

7. Определяем суммарное сопротивление роторной цепи R_N, Ом, при полностью введённом пусковом реостате:

$$R_n = \Sigma R = R_\text{р} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5; \quad (2.46)$$

$R_n = \Sigma R = 0{,}1 + 0{,}896 + 0{,}49 + 0{,}27 + 0{,}15 + 0{,}083 = 1{,}989$ Ом.

Примечание:

Расхождение значений величин секций пускового реостата, полученных графическим методом и аналитическим объясняются тем, что аналитический метод предполагает, что рабочая часть механической характеристики АД с фазным ротором представляет собой прямую линию.

Рабочая часть механической характеристики АД с фазным ротором построенная по уравнению Клосса максимально приближенна к прямой линии, поэтому и величины сопротивлений секций пускового реостата полученные графическим методом максимально приближены к величинам сопротивлений, рассчитанных аналитическим методом.

3.1 Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения

3.2 Обозначение ДПТ серии 4П

Двигатели постоянного тока стоят в 3 – 5 раз дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели, и требуют больших расходов на обслуживание. Поэтому они находят применение в тех случаях, когда их особые свойства (широкие пределы регулирования частоты вращения и возможность получения специальных механических характеристик) играют решающее значение. Постоянный ток для питания ДПТ получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

Двигатели постоянного тока серии 4П с высотами оси вращения 80, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 355, 450 мм с номинальными вращающими моментами от 1,2 до 15000 Н*м предназначены для регулируемых электроприводов, питаемых как от полупроводниковых преобразователей, так и от иных источников питания (генераторов, аккумуляторных батарей). Электродвигатели изготавливаются для различных отраслей народного хозяйства климатических исполнений УХЛ4, 04 по ГОСТ 15150-69 и для поставки на экспорт в страны с умеренным и тропическим климатом.

Структура условного обозначения:

3.3 П X_1 М С $X_2X_3X_4$ X_5 X_6 X_7 X_8X_9

3.4 **–** порядковый номер серии**;**

П – наименование вида двигателя – постоянного тока;

X_1 – исполнение по степени защиты и способу охлаждения:

(О – закрытое с наружным обдувом от вентилятора на валу двигателя IP44, IC0141;

Н-защищённое с самовентиляцией IP23, IC01;

Ф — защищённое с независимой вентиляцией от постороннего источника;

П-закрытое продуваемое от постороннего источника);

М – модификация;

С – смешанное возбуждение; отсутствие буквы С указывает на параллельное или независимое возбуждение;

X_2 X_3 X_4 – высота оси вращения;

X_5 – условная длина корпуса по МЭК 72 – I;

X_6 – условная длина сердечника якоря (1 – первая длина; 2 – вторая длина). Отсутствие цифры означает совпадение количества длин якорей и корпусов;

X_7 – наличие тахогенератора: Г – с тахогенератором; отсутствие буквы – без тахогенератора;

X_8 – климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69;

X_9 – категория размещения по ГОСТ 15543-70.

3.5 Основные формулы, используемые при решении задач

Уравнение электрического равновесия цепи якоря электродвигателя постоянного тока (ДПТ) записывается следующим образом:

$$U = E + I \cdot R = K \cdot \Phi \cdot \omega + 1(R_я + R_д); \quad (3.1)$$

где U - напряжение, приложенное к цепи ДПТ, В.

Е - ЭДС, наведённая в обмотке якоря ДПТ, В;

I - ток в цепи якоря ДПТ, А;

R - общее сопротивление цепи якоря. Ом;

К - безразмерный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами электродвигателя;

Ф - магнитный поток ДПТ, Вб;

ω - угловая скорость вращения якоря ДПТ, рад/с;

$R_я$ - сопротивление добавочного резистора, включаемого последовательно в цепь якоря, Ом;

$R_д$ - внутреннее сопротивление цепи якоря ДПТ, состоящее из сопротивлений последовательно соединённых обмоток якоря $r_{оя}$, дополнительных полюсов $r_{дп}$ и компенсационной обмотки $r_{ко}$, щёточного контакта $r_щ$, а также сопротивления последовательной обмотки возбуждения $r_{ов}$(для ДТП последовательного возбуждения);

Внутреннее сопротивление цепи якоря R, Ом, ДПТ с независимым возбуждением рассчитывается по формуле:

$$R_я \approx 0{,}5(1 - \eta_н)\frac{U_н}{I_н} = 0{,}5(1 - \eta_н)R_н; \quad (3.2)$$

Где $\eta_н, U_н, I_н, R_н$ - соответственно номинальные КПД, напряжение, В, ток. А, и сопротивление, Ом.

Электродвижущая сила $E_н$, В, (ЭДС), наведённая в обмотке ДПТ при номинальной скорости вращения $\omega_н$ и номинальном магнитном потоке $\Phi_н$ рассчитывается по формуле:

$$E_н = C_н \cdot \omega_н = U_н - I_н \cdot R_я = U_н - \Delta U_я; \quad (3.3)$$

где $C_н$ - коэффициент пропорциональности между ЭДС и скоростью вращения, а также между электромагнитным моментом и током якоря в ДПТ при неизменном магнитном потоке возбуждения $Ф_н$.

Номинальный электромагнитный вращающий момент $М_{эн}$, Н-м, ДПТ рассчитывается по формуле:

$$М_{эн} = K \cdot Ф_н \cdot I_н = C_н \cdot I_н = М_н + М_{хх} \quad (3.4)$$

где $М_н$ - номинальный вращающий момент на валу электродвигателя, Н · м;

$М_{хх}$.-момент холостого хода (момент потерь) двигателя Н · м.

Этот момент ($М_{хх}$) мал относительно момента на валу электродвигателя, поэтому в приближённых расчётах им можно пренебречь и считать, что момент на валу двигателя равен его электромагнитному моменту.

Уравнение электромеханической характеристики ДПТ независимого возбуждения (параллельного) записывается следующим образом:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{C} = \omega_0 - \Delta\omega \quad (3.5)$$

где ω_0—скорость якоря при идеальном холостом ходе ДПТ, рад/с; $\Delta\omega$ - статическое падение скорости якоря, рад/с.

Уравнение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения записывается следующим образом:

$$\omega = \frac{U}{C} - \frac{М \cdot R}{C^2} = \omega_0 - \Delta\omega \quad (3.6)$$

где М - вращающий момент на валу двигателя, Н-м;

Мощность, потребляемая двигателем из электрической сети $Р_{эн}$., Вт, при номинальной нагрузке:

$$Р_{эн} = U_н \cdot I_н = \frac{Р_н}{\eta_н} = \frac{М_н \cdot \omega_н}{\eta_н} \quad (3.7)$$

где $Р_н$ - номинальная механическая мощность на валу электродвигателя, Вт;

$\omega_н$- номинальная скорость вращения якоря, рад/с;

$\eta_н$ - номинальная частота вращения электродвигателя, об /мин.

Номинальный вращающий момент$М_н$ Н · м, на валу электродвигателя:

$$М_н = 1000\frac{Р_н}{\omega_н} = 9550\frac{Р_н}{n_н} \quad (3.8)$$

Скорость вращения идеального холостого хода ω_0, рад/с:

$$\omega_0 = \frac{U_н}{C_н} = \frac{\omega_н \cdot U_н}{U_н - I_н \cdot R_н} = \frac{\omega_н \cdot U_н}{E_н} \quad (3.9)$$

Полные потери мощности $\Delta Р_н$, Вт, в двигателе при $Р = Р_н$:

$$\Delta Р_н = \Delta Р_н - \Delta Р_н = \Delta Р_н(\frac{1-\eta_н}{\eta_н}) \quad (3.10)$$

Задача 3.1. Для ДПТ независимого возбуждения, используя следующие его паспортные (номинальные) данные: $Р_н$ = 2,5 кВт; $U_н$ = 110 В; $\eta_н$= 72%; $n_н$ = 1000 об /мин, определить величины, характеризующие его работу в номинальном режиме, и построить

естественную механическую характеристику.

Решение:

1. Определяем номинальный ток $I_{\text{н}}$, А, электродвигателя:

$$I_{\text{н}} = 1000\frac{\text{P}_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} \tag{3.11}$$

$$I_{\text{н}} = 1000\frac{2{,}5}{110 \cdot 0{,}72} = 31{,}6 \text{ А}$$

2. Определяем номинальное сопротивление $R_{\text{н}}$, Ом, электродвигателя:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} \tag{3.12}$$

$$R_{\text{н}} = \frac{110}{31{,}6} = 3{,}48 \text{ Ом}$$

3. Определяем внутреннее сопротивление цепи якоря R,, Ом по формуле:

$$R_{\text{я}} = 0{,}5(1 - \eta_{\text{н}})R_{\text{н}} \tag{3.13}$$

$$R_{\text{я}} = 0{,}5 \cdot (1 - 0{,}72) \cdot 3{,}48 = 0{,}487 \text{ Ом}$$

4. Определяем потерю напряжения $\Delta U_{\text{я}}$, В, в цепи якоря:

$$\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} \tag{3.14}$$

$$\Delta U_{\text{я}} = 31{,}6 \cdot 0{,}487 = 15{,}4 \text{ В}$$

5. Определяем номинальную ЭДС $E_{\text{н}}$, В, якоря

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{я}} \tag{3.15}$$

$$E_{\text{н}} = 110 - 15{,}4 = 94{,}6 \text{ В}$$

6. Определяем номинальную скорость вращения $\omega_{\text{н}}$, рад/с, якоря:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} \tag{3.16}$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3{,}14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с}$$

7. Определяем номинальный вращающий момент $\text{M}_{\text{н}}$, $\text{Н} \cdot \text{м}$, на валу электродвигателя:

$$\text{M}_{\text{н}} = 1000\frac{\text{P}_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} \tag{3.17}$$

$$\text{M}_{\text{н}} = 1000\frac{2{,}8}{105} = 23{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8. Определяем номинальную мощность $\text{P}_{\text{эн}}$., кВт, потребляемую электродвигателем из электрической сети:

$$\text{P}_{\text{эн}} = \frac{\text{P}_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \tag{3.18}$$

$$\text{P}_{\text{эн}} = \frac{2{,}5}{0{,}72} = 3{,}47 \text{ кВт}$$

9. Определяем полные номинальные потери мощности $\Delta\text{P}_{\text{н}}$, кВт, в электродвигателе:

$$\Delta\text{P}_{\text{н}} = \text{P}_{\text{н}}\left(\frac{1-\eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}\right) \tag{3.19}$$

$$\Delta P_н = 2{,}5\left(\frac{1-0{,}72}{0{,}72}\right) = 0{,}97 \text{ кВт}$$

10. Определяем скорость идеального холостого хода ω_0, рад/с, при номинальном напряжении

$$\omega_0 = \frac{U_н \cdot \omega_н}{E_н} \tag{3.20}$$

$$\omega_0 = \frac{110 \cdot 105}{94{,}6} = 122 \text{ рад/с}$$

11. Определяем коэффициент пропорциональности $C_н$ Вб

$$C_н = \frac{E_н}{\omega_н} \tag{3.21}$$

$$C_н = \frac{94{,}6}{105} = 0{,}9 \text{ Вб}$$

12. Определяем номинальный электромагнитный момент $M_{эн}$., Н · м, по формуле

$$M_{эн} = C_н \cdot I_н \tag{3.22}$$

$$M_{эн} = 0{,}9 \cdot 31{,}6 = 28{,}4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

13. Определяем перепад скорости вращения:

$$\delta_н = \frac{\omega_0 - \omega_н}{\omega_0} \tag{3.23}$$

$$\delta_н = \frac{122 - 105}{122} = 0{,}14$$

14. Определяем момент холостого хода $M_{хх}$., Н · м. (момент потерь):

$$M_{хх} = M_{эн} - M_н \tag{3.24}$$

$$M_{хх} = 28{,}4 - 23{,}8 = 4{,}6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

15. Определяем скорость вращения $\omega_{хх}$, рад/с, реального холостого хода

$$\omega_{хх} = \frac{U_н}{C_н} - M_{хх}\frac{R_я}{C_н^2} \tag{3.25}$$

$$\omega_{хх} = \frac{110}{0{,}9} - 4{,}6 \cdot \frac{0{,}487}{0{,}81} = 119{,}2 \text{ рад/с}$$

Анализируя уравнение (3.6), можно сделать вывод о том, что механическая характеристика ДПТ параллельного или независимого возбуждения при U =const; Ф = const; R =const представляет собой прямую линию.

Для построения естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения в двигательном режиме достаточно знать две точки с координатами: А ($M = 0; \omega = \omega_0$);В ($M = M_н; \omega = \omega_н$). (рисунок 3.1)

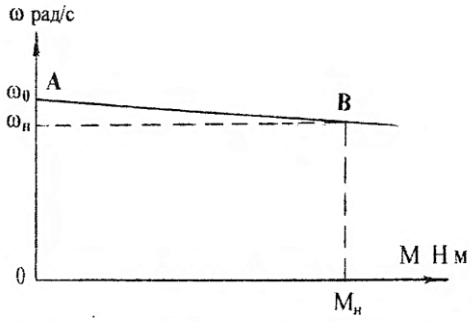


Рисунок 3.1- Построение естественной механической характеристики ДПТ независимого возбуждения

3.3 Определение количества и величины секций пускового резистора ДПТ с независимым возбуждением

Двигатель постоянного тока (ДПТ) запускается при полностью введённом пусковом резисторе (реостате), который служит для ограничения пускового тока при подаче номинального напряжения в якорную цепь. Пусковой ток ($I_{\text{пуск}}$) превышает номинальный ток ($I_{\text{н}}$) в 30-40 раз, поэтому без пускового реостата обмотки ДПТ сгорят. Пусковой реостат состоит из секций.

Определить количество и величины сопротивлений секций пускового реостата можно графическим и аналитическим способами.

Графический метод:

Для определения количества и величины секций пускового реостата графическим способом необходимо построить пусковую диаграмму ДПТ с независимым возбуждением (рисунок 3.2).

1) Строим естественную механическую характеристику ДПТ НВ по двум точкам: А и В;

2) Определяем искусственный пусковой момент $\mathrm{M}_1, \mathrm{Н} \cdot \mathrm{м}$, согласно законов коммутации:

$$\mathrm{M}_1 = (2 - 2{,}5)\mathrm{M}_{\text{н}} \tag{3.26}$$

3) Определяем момент переключения M_2, Н-м, секций пускового реостата:

$$\mathrm{M}_2 = (1{,}1 - 1{,}5)\mathrm{M}_{\text{н}} \tag{3.27}$$

4) Строим прямые $\mathrm{M} = \mathrm{M}_1$ и $\mathrm{M} = \mathrm{M}_2$

5) Соединяем точку 1 и точку А, точку пересечения с прямой $\mathrm{M} = \mathrm{M}_2$ обозначаем цифрой 2, из точки 2 опускаем перпендикуляр на прямую $\mathrm{M} = \mathrm{M}_1$ и обозначаем эту точку цифрой 3; соединяем точку 3 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 4, из точки 4 опускаем перпендикуляр на прямую $\mathrm{M} = \mathrm{M}_1$ и обозначаем эту точку цифрой 5; соединяем точку 5 с точкой А, точку пересечения с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 6, из точки 6 опускаем перпендикуляр на прямую $\mathrm{M} = \mathrm{M}_1$ и обозначаем эту точку цифрой 7.

(Цифра 7 обязательно должна находиться на пересечении естественной механической характеристики ДПТ и прямой $\mathrm{M} = \mathrm{M}_1$ -это может быть достигнуто путём подбора коэффициентов от 1 до 1,5 у момента переключения M_2 и коэффициентов от 2,0 до 2,5 у пускового момента M_1. По пусковой диаграмме определяем количество ступеней пускового реостата (m).

6) Проводим прямую $\omega = \omega_0$ параллельную оси моментов и обозначаем точку

пересечения с прямой $M = M_2$ цифрой 9, точку пересечения механической характеристики с прямой $M = M_2$ обозначаем цифрой 8, а точку пересечения прямых $M = M_1$ и $\omega = \omega_0$ цифрой 10.

7) Определяем масштаб m_R, Ом/мм, сопротивлений: замеряем расстояние отрезка (7-10) в мм.

$$m_R = \frac{R_я}{7-10} \tag{3.28}$$

8) Определяем величину сопротивления первой секции R_1 Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (1 - 3) в мм.

$$R_1 = m_R \cdot (1-3) \tag{3.29}$$

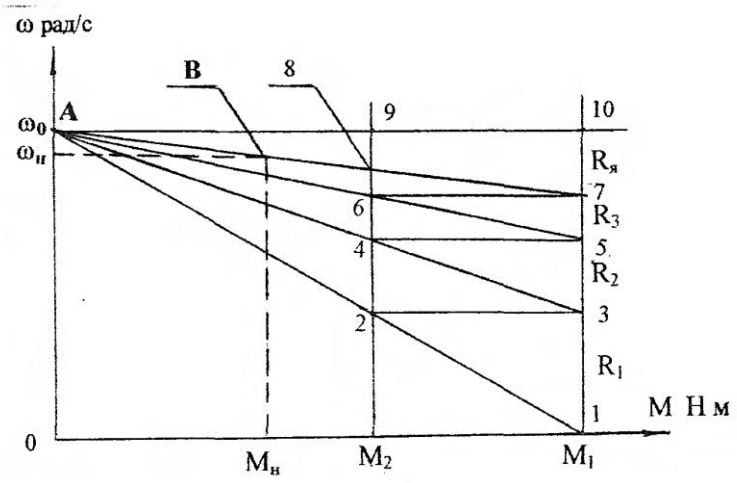


Рисунок 3.2-Пусковая диаграмма ДПТ независимого возбуждения

9) Определяем величину сопротивления второй секции R_2, Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (3 - **5)** в мм.

$$R_2 = m_R \cdot (3-5) \tag{3.30}$$

10) Определяем величину сопротивления второй секции R_3, Ом, пускового реостата: замеряем расстояние отрезка (5 - 7**)** в мм.

$$R_3 = m_R \cdot (5-7) \tag{3.31}$$

11) Определяем суммарное сопротивление £R, Ом, якорной цепи при полностью введённом пусковом реостате

$$\Sigma R = R_я + R_1 + R_2 + R_3 \tag{3.32}$$

Аналитический метод:

При аналитическом методе расчёта сначала определяется колебание момента при пуске λ.

а) Если заданы число ступеней m и момент переключения при пуске M_2

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{R_н M_н}{R_я M_2}} \tag{3.33}$$

б) Если заданы число ступеней m и максимальный момент при пуске M_1

$$л = \sqrt[m]{\frac{R_н M_н}{R_я M_1}} \quad (3.34)$$

с) Если заданы M_1 и M_2, сначала определяется $л = \frac{M_1}{M_2}$ а затем определяется число пусковых ступеней:

$$m = \frac{lg\frac{M_н R_н}{R_я M_1}}{lgл} \quad (3.35)$$

Так как стоит задача определить число и величину сопротивлений ступеней пускового реостата, следовательно, задаются M_1 и M_2.

1) Задаёмся $M_1 = (2-2{,}5)M_н$, соответственно $I_1 = (2-2{,}5)I_н$, А; $M_2 = (1{,}1-1{,}5)M_н$

где I_1- пусковой ток ДПТ НВ соответствующий M_1.

2) Определяем сопротивление цепи якоря R_N, Ом, при полностью включённом пусковом резисторе

$$R_N = \Sigma R = \frac{U_н}{I_1} \quad (3.36)$$

$$R_N = \frac{M_н \cdot R_н}{M_1} \quad (3.37)$$

3) Определяем колебания момента (тока) при пуске:

$$л = \frac{M_1}{M_2} \quad (3.38)$$

4) Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{lg\frac{R_н}{R_я}}{lgл} \quad (3.39)$$

5) Принимаем m целым числом

6) Рассчитываем уточнённое значение л

$$л = \sqrt[m]{\frac{R_N}{R_я}} \quad (3.40)$$

7) Определяем величины сопротивлений секций пускового реостата

$$R_m = R_я(л-1) \quad (3.41)$$

$$R_{m-1} = R_я \cdot л \cdot (л-1) = R_m \cdot л \quad (3.42)$$

$$R_1 = R_я \cdot л^{m-1} \cdot (л-1) = R_2 \cdot л \quad (3.43)$$

Задача 3.2 Определить графически и аналитически величины и число ступеней пускового реостата для ДПТ НВ типа 4ПНМ180Ь, имеющего следующие паспортные данные:

$P_н$ = 10 кВт; $U_н$ = 220 В; $I_н$ = 53 А; $n_н$ = 1100 об/мин; $з_н$ = 83,6%.

Решение:

1. Определяем внутреннее сопротивление $R_я$, Ом, цепи якоря:(3-44)

$$R_я \approx 0{,}5(1-з_н)\frac{U_н}{I_н} \quad (3.44)$$

$$R_я = 0{,}5(1-0{,}836)\frac{220}{53} = 0{,}34 \text{ Ом}$$

$$R_н = \frac{U_н}{I_н} \quad (3.45)$$

$$R_н = \frac{220}{53} = 4{,}15 \text{ Ом}$$

2. Определяем номинальную скорость вращения $щ_н$, рад/с, электродвигателя:

$$щ_н = \frac{р \cdot n_н}{30} \quad (3.46)$$

$$щ_н = \frac{3{,}14 \cdot 1100}{30} = 115{,}1 \text{ рад/с}$$

3. Определяем скорость вращения идеального холостого хода $щ_0$, рад/с, ДПТ

4.

$$щ_0 = \frac{U_н \cdot щ_н}{U_н - I_н \cdot R_я} \quad (3.47)$$

$$щ_0 = \frac{220 \cdot 115{,}1}{220 - 53 \cdot 0{,}34} = 124{,}3 \text{ рад/с}$$

5. Определяем коэффициент пропорциональности

$$С_н = \frac{U_н - I_н \cdot R_я}{щ_н} \quad (3.48)$$

$$С_н = \frac{220 - 53 \cdot 0{,}34}{115{,}1} = 1{,}7$$

6. Определяем номинальный электромагнитный момент $М_н$ Н · м,

$$М_н = С_н \cdot I_н \quad (3.49)$$

$$М_н = 1{,}7 \cdot 53 = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Определяем пусковой момент $М_1$ Н · м, (задаёмся крайним правым пределом - 2,5)

$$М_1 = 2{,}5 \cdot М_н \quad (3.50)$$

$$М_1 = 2{,}5 \cdot 90 = 225 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8. Строим пусковую диаграмму ДПТ, варьируя пределами $М_2$ от 1,1 до 1,5, устанавливаем истинное значение коэффициента- 1,5 и количество ступеней пускового реостата:

Согласно рисунка 3.3: $m_r = 3$;

9. Определяем момент $М_2$ Н · м, переключения

$$М_2 = 1.5 \cdot М_н \quad (3.51)$$

$$М_2 = 1{,}5 \cdot 90 = 135 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

10. Определяем момент $М_2$, Н-м, переключения

$$m_R = \frac{R_я}{7-10} \quad (3.52)$$

$$m_R = \frac{0.34}{13} = 0.027 \text{ Ом/мм}$$

11. Определяем величину сопротивления первой секции R_1, Ом, пускового реостата:

$$R_1 = m_R \cdot (1 - 3); \quad (3.53)$$

$R_1 = 0{,}027 \cdot 25 = 0{,}67$ Ом;

12. Определяем величину сопротивления второй секции R_2, Ом, пускового реостата:

$$R_2 = m_R \cdot (3 - 5); \quad (3.54)$$

$R_2 = 0{,}027 \cdot 15 = 0{,}4$ Ом;

13. Определяем величину сопротивления третьей секции R_3**,**Ом**,** пускового реостата:

$$R_3 = m_R \cdot (5-7);. \tag{3.55}$$

$R_3 = 0{,}027 \cdot 9 = 0{,}24$ Ом;

14. Определяем суммарное сопротивление R_n, Ом, роторной цепи при полностью введённом пусковом реостате:

15.

$$\Sigma R = R_я + R_1 + R_2 + R_3; \tag{3.56}$$

$\Sigma R = 0{,}34 + 0{,}67 + 0{,}4 + 0{,}24 = 1{,}65$ Ом;

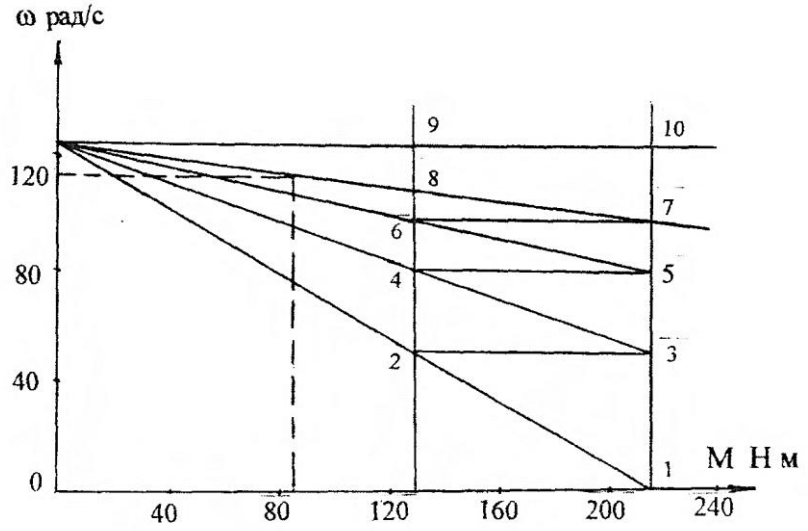


Рисунок 3.3 - Пусковая диаграмма ДПТ типа 4ПНМ180L

Аналитический метод.

1) Дано: $\mathrm{M}_1 = 2{,}5 \cdot \mathrm{M}_н = 225$ Н · м; $\mathrm{M}_2 = 1{,}5 \cdot \mathrm{M}_н = 135$ Н · м; $I_1 = 2.5 \cdot I_н = 132{,}5$ А;

2) Определяем величину сопротивления второй ступени R_2, Ом, пускового реостата

$$R_N = \frac{U_н}{I_1} \tag{3.57}$$

$$R_N = \frac{220}{132.5} = 1.66 \text{ Ом}$$

$$R_N = \frac{\mathrm{M}_н \cdot R_н}{\mathrm{M}_1} \tag{3.58}$$

$$R_N = \frac{90 \cdot 4.15}{225} = 1.66 \text{ Ом}$$

3) Определяем колебания момента (тока) при пуске:

$$л = \frac{\mathrm{M}_1}{\mathrm{M}_2} \tag{3.59}$$

$$л = \frac{225}{135} = 1{,}66$$

4) Определяем количество ступеней пускового реостата:

$$m = \frac{lg\frac{R_н}{R_я}}{lgл} \quad (3.60)$$

$$m = \frac{lg\frac{1,66}{0,34}}{lg1,66} = 3,09$$

5) Принимаем m=3. Рассчитываем уточнённое значение л

$$л = \sqrt[m]{\frac{R_N}{R_я}} \quad (3.61)$$

$$л = \sqrt[з]{\frac{1.66}{0.34}} = 1.69$$

6) Определяем величины сопротивлений ступеней пускового реостата

7)

$$R_З = R_я \cdot (л - 1) \quad (3.62)$$

$$R_З = 0.34 \cdot (1.69 - 1) = 0.24 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_З \cdot л \quad (3.63)$$

$$R_2 = 0.24 \cdot 1,69 = 0,4 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R_2 \cdot л \quad (3.64)$$

$$R_1 = 0.4 \cdot 1,69 = 0,67 \text{ Ом}$$

Анализ результатов расчёта показывает, что графический метод расчёта пусковых резисторов ДПТ независимого возбуждения более прост и нагляден, но менее точен, чем аналитический.

4. Механика электропривода

При выборе параметров электродвигателя, приводящего в движение рабочую машину, очень важно разрешение вопроса о совместном действии вращающего момента, развиваемого электродвигателем, и момента сопротивления рабочей машины.

4.1 Статические и динамические нагрузки

Вращающий момент. Соотношение между полезной мощностью электродвигателя $Р_{дв}$, Вт, его вращающим моментом $М_{дв}$ Н · м, и скоростью вращения $щ_{дв}$, рад/с, определяется следующей зависимостью:

$$Р_{дв} = М_{дв} \cdot щ_{дв} \quad (4.1)$$

Если вал электродвигателя соединён непосредственно с валом рабочей машины, то частота вращения вала электродвигателя равна частоте вращения вала рабочей машины, и мощность, развиваемая электродвигателем в установившемся режиме, равна мощности, потребляемой рабочей машиной $Р_м$, Вт, то есть

$$Р_{дв} = Р_м \quad (4.2)$$

Эту мощность на валу, на основании формулы (4.1), можно выразить произведением момента на скорость вращения

$$М_{дв} \cdot щ_{дв} = М_с \cdot щ_м \quad (4.3)$$

где $М_с$- момент сопротивления рабочей машины, Н · м; $щ_м$ - скорость вращения рабочей машины, рад/'с

следовательно

$$М_{дв} = М_с \quad (4.4)$$

Момент сопротивления, приложенный к валу электродвигателя со стороны рабочей машины $М_с$, в установившемся режиме работы называется ***статическим моментом сопротивления.*** При неизменной скорости вращения и неизменной нагрузки момент статического сопротивления является величиной постоянной.

Если же скорость вращения системы, состоящей из электродвигателя и рабочей машины, изменяется, то в этом случае появляется динамическая нагрузка $Р_{дин}$**,** Вт. которая определяется по формуле

$$Р_{дв} - Р_м = Р_{дин} \quad (4.5)$$

Это уравнение мощностей справедливо при вращении системы с любой скоростью вращения.

Динамическую нагрузку $Р_{дин}$**,** Вт можно выразить через динамический момент $М_{дин}$. Н м и скорость вращения вала электродвигателя

$$Р_{дин} = М_{дин} \cdot щ \quad (4.6)$$

В свою очередь динамический момент можно определить по формуле

$$М_{дин} = J_{сис} \frac{dщ}{dt} \quad (4.7)$$

где $J_{сис}$- момент инерции системы, приведённый к валу электродвигателя кг · $м^2$;

$\frac{dщ}{dt}$ -угловое ускорение системы, рад/$с^2$.

4.2 Основное уравнение движения электропривода

Механическая энергия, развиваемая электродвигателем при работе электропривода, расходуется на преодоление сопротивления рабочей машины.

При вращательном движении уравнение движения можно записать следующим образом:

$$М_{дв} - М_с = М_{дин} = J_{сис} \frac{dщ}{dt} \quad (4.8)$$

где $М_{дв}$— вращающий момент, развиваемый электродвигателем, Н-м; Мс-момент сопротивления рабочей машины, Н · м;

$М_{дин}$ - динамический момент, Н · м;

$J_{сис}$ - момент инерции системы, приведённый к валу электродвигателя, кг · $м^2$;

$\frac{dщ}{dt}$- угловое ускорение системы, рад/$с^2$.

Динамический момент -$М_{дин}$ появляется только во время переходных режимов, когда изменяется угловая скорость.

При поступательном движении уравнение движения системы по аналогии с вращательным движением можно записать следующим образом

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt} \quad (4.9)$$

где F - движущая сила, Н;

F_c - сила статического сопротивления, Н;

v - скорость поступательного движения, м/с;

m - масса движущего груза, кг;

$m\frac{dv}{dt}$ --динамическая сила, Н.

4.3 Приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя

Когда вал рабочей машины соединён непосредственно с валом электродвигателя, рабочая машина и вал электродвигателя вращаются с одинаковой угловой скоростью, в этом случае никакого приведения моментов не требуется.

Если рабочая машина соединена с электродвигателем при помощи передачи, то скорость вращения вала машины $щ_м$, рад/с, отличается от скорости вращения вала электродвигателя $щ_м$; рад/с, поэтому момент сопротивления рабочей машины $М_м$ необходимо привести к скорости вращения вала электродвигателя.

Если рабочая машина совершает вращательное движение, то момент сопротивления рабочей машины $М_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя, определяется по формуле:

$$М_{сн} = \frac{М_м}{i \cdot з_н} \quad (4.10)$$

где $М_м$ - момент сопротивления рабочей машины относительно своего вала, Н · м; i - передаточное отношение редуктора (передачи); $з_н$ - коэффициент полезного действия редуктора (передачи);

Передаточное отношение редуктора определяется по формуле:

$$i = \frac{щ_{дв}}{щ_v} \quad (4.11)$$

где $щ_{дв}$ - угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад/с; $щ_v$ - угловая скорость вращения вала рабочей машины, рад/с;

Если передача от электродвигателя к рабочей машине состоит из нескольких звеньев, то общее передаточное отношение передачи от электродвигателя к рабочей машине равняется произведению передаточных отношений отдельных звеньев

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \quad (4.12)$$

аналогично, общий коэффициент полезного действия передачи, состоящей из нескольких звеньев, определяется

$$з_п = з_1 \cdot з_2 \cdot з_3 \quad (4.13)$$

Если рабочая машина совершает поступательное движение, то момент сопротивления рабочей машины$М_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя, определяется по формуле:

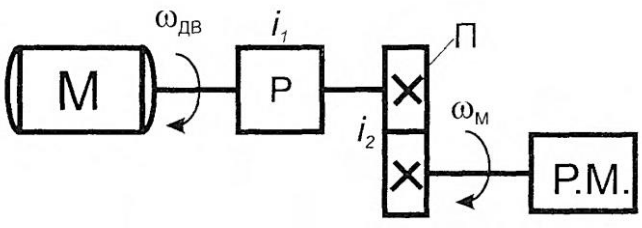
$$М_{сн} = \frac{F \cdot v}{щ_{дв} \cdot з_п} \quad (4.14)$$

где F-сила сопротивления рабочей машины, обусловленная массой груза m, кг; v - скорость поступательного движения груза, м/с;

$$F = 9.81 \cdot m \cdot f_{тр} \quad (4.15)$$

Где $f_{тр}$ – коэффициент трения;

Задача 4.1 Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_с$ = 1500 об/мин, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 4.1.



М – электродвигатель; Р – редуктор; П- клиноремённая передача; Р.М, - рабочая машины; i_1- передаточное отношение редуктора; i_2- передаточное отношение клиноременный передачи; щ$_{дв}$- угловая скорость вращения вала электродвигателя; щ$_м$ –угловая скорость вращения вала рабочей машины.

Рисунок 4.1 Кинематическая схема системы «электродвигатель – рабочая машина»

Момент сопротивления на валу рабочей машины: М$_м$= 1200 Н·м; Передаточное отношение редуктора i_1=28; передаточное отношение клиноремённой передачи, i_2- = 2; к.п.д. редуктора з$_р$= 0,86; к.п.д. клиноремённой передачи з$_{пер}$= 0,8.

Решение:

1. Определяем скорость вращения щ$_{дв}$, рад/с, электродвигателя

$$щ_{дв} = \frac{р \cdot n_с}{30} \qquad (4.16)$$

$$щ_{дв} = \frac{3{,}14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}.$$

2. Определяем общее передаточное отношение

$$i = i_1 \cdot i_2 = 28 \cdot 2 = 56 \qquad (4.17)$$

3. Определяем общий к.п.д. системы

$$з_п = з_р \cdot з_{пер} = 0{,}86 \cdot 0{,}8 = 0{,}69 \qquad (4.18)$$

4. Определяем момент сопротивления рабочей машины М$_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$М_{сн} = \frac{М_м}{i \cdot з_н} = \frac{1200}{56 \cdot 0{,}69} = 31 \text{ Н} \cdot \text{м} \qquad (4.19)$$

5. Определяем расчётную мощность Р$_{рас}$ -Вт, электродвигателя

$$Р_{рас} = М_{сн} \cdot щ_{дв} = 31 \cdot 157 = 4867 \text{ Вт} \qquad (4.20)$$

Задача 4.2. Определить потребную (расчётную) мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором с синхронной частотой вращения $n_с$ = 1000 об/мин, приводящего в движение рабочую машину. Кинематическая схема привода рабочей машины представлена на рисунке 4.2.

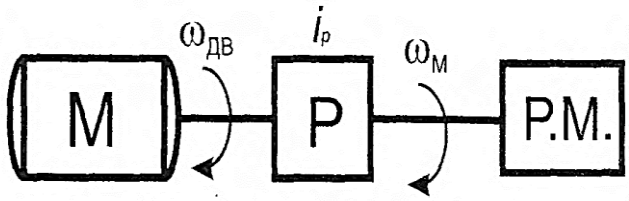


Рисунок 4.2 – Кинематическая схема системы «электродвигатель--рабочая машина»

Рабочая машина совершает поступательное движение и проходит расстояние S = 6 метров за 40 секунд; к.п.д. редуктора $n_р$ = 0,66; Усилие необходимое для передвижения механизма F = 36000 Н.

Решение:

1. Определяем скорость вращения $щ_{дв}$, рад/с, электродвигателя

$$щ_{дв} = \frac{р \cdot n_с}{30} \qquad (4.21)$$

$$щ_{дв} = \frac{3{,}14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с}.$$

2. Определяем скорость поступательного движения v, м/с, рабочей машины

$$v = \frac{S}{t} \qquad (4.22)$$

$$v = \frac{6}{40} = 0.15 \text{ м/с}$$

3. Определяем момент сопротивления рабочей машины $М_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$М_{сн} = \frac{F \cdot v}{щ_{дв} \cdot з_п} = \frac{36000 \cdot 0{,}15}{105 \cdot 0{,}66} = 78 \text{ Н} \cdot \text{м} \qquad (4.23)$$

4. Определяем расчётную мощность $Р_{рас}$ -Вт, электродвигателя

$$Р_{рас} = М_{сн} \cdot щ_{дв} = 78 \cdot 105 = 8190 \text{ Вт} \qquad (4.24)$$

4.4 Приведение моментов инерции рабочей машины к валу электродвигателя

Момент инерции системы $J_{сис}$ кг · м^2, «электродвигатель-рабочая машина», включающего в себя редуктор определяется по формуле:

$$J_{сис} = J_{дв} + J_р + J_м \qquad (4.25)$$

где $J_{дв}$ - момент инерции электродвигателя, кг·м^2; (даётся в паспорте электродвигателя);

$J_р$- момент инерции редуктора, кг·м^2;

$J_м$ - момент инерции рабочей машины, приведённый к валу электродвигателя, кг·м^2;

$$J_р = 1{,}1 \cdot J_{дв} \qquad (4.26)$$

Для вращательного движения рабочей машины её момент инерции, приведённый к валу электродвигателя $J_м$, кг·м^2, определяется по формуле:

$$J_м = \frac{J_с}{i^2} \text{ или } J_м = J_с \frac{щ_м^2}{щ_{дв}^2} \quad (4.27)$$

где $J_с$ - момент инерции рабочей машины на своём валу, кг·м^2; $щ_м$ - скорость вращения вала рабочей машины, рад/с; $щ_{дв}$- скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

Для поступательного движения рабочей машины её момент инерции, приведённый к валу электродвигателя $J_М$, кгм^2, определяется по формуле

$$J_м = m\frac{v^2}{щ_{дв}^2} \quad (4.28)$$

где m -масса поступательно движущихся частей рабочей машины, кг; v - скорость поступательного движения рабочей машины, м/с; $щ_{дв}$ - скорость вращения вала электродвигателя, рад/с;

Если рабочая машина включает поступательно и вращательно движущиеся части, то приведённый к валу электродвигателя момент инерции $J_м$, кг·м^2, определяется по формуле:

$$J_м = J_с \frac{щ_м^2}{щ_{дв}^2} + m\frac{v^2}{щ_{дв}^2} \quad (4.29)$$

Задача 4.3. Определить расчётную мощность асинхронного электродвигателя с к.з. ротором и момент инерции системы «электродвигатель- механизм подъёмной лебёдки», кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.3.

Дано:

Скорость вращения приводного электродвигателя $n_{дв}$ = 157 рад/с; момент инерции электродвигателя $J_{дв}$ = 0,08 кг·м^2; к.п.д. передачи $з_п$ = 0,92; масса барабана $m_б$ = 1400 кг; радиус барабана R = 1,25 м; масса груза $m_{гр}$ = 200 кг; скорость поступательного движения груза v = 0,22 м/с; коэффициент трения $f_{тр}$= 0,66.

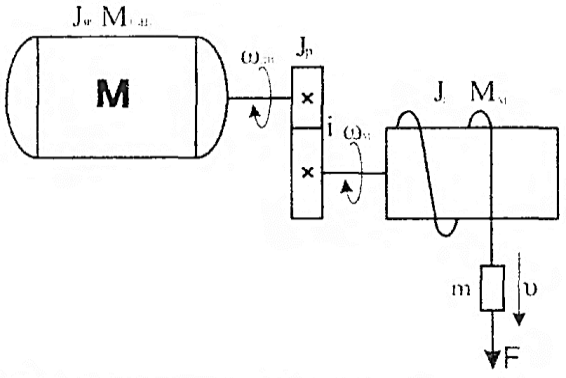


Рисунок 4.3- Кинематическая схема системы «электродвигатель- - подъёмная лебёдка»

Решение:

1. Определяем момент инерции барабана относительно своей оси $J_{бар}$, кг · м^2, как для сплошного цилиндра:

$$J_{бар} = m_б \cdot р^2 = m_б \cdot \frac{R^2}{2} \quad (4.30)$$

где $m_б$- масса барабана, кг;

р - радиус инерции сплошного цилиндра, м;
R- радиус барабана, м;

$$J_{\text{бар}} = 1400 \cdot \frac{1.25^2}{2} = 1093 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

2. Определяем скорость вращения $щ_{\text{дв}}$, рад/с, вала машины

$$щ_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot \text{р} \cdot v}{R} \quad (4.31)$$

$$щ_{\text{дв}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.22}{1.25} = 1.1 \text{ рад/с}$$

3. Определяем момент инерции машины, приведённый к валу электродвигателя

$$J_{\text{м}} = J_{\text{с}} \frac{n_{\text{м}}^2}{щ_{\text{дв}}^2} + m \frac{v^2}{щ_{\text{дв}}^2} \quad (4.32)$$

$$J_{\text{м}} = 1093 \frac{1{,}1^2}{157^2} + 200 \frac{0{,}22^2}{157^2} = 0{,}0544 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем момент инерции $J_{\text{р}}$, кг · м^2. Редуктора

$$J_{\text{р}} = 1{,}1 \cdot J_{\text{дв}} \quad (4.33)$$

$$J_{\text{р}} = 1{,}1 \cdot 0{,}08 = 0{,}088 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

5. Определяем момент инерции $J_{\text{сис}}$ кг · м^2 системы

$$J_{\text{сис}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{р}} + J_{\text{м}} \quad (4.34)$$

$$J_{\text{сис}} = 0{,}08 + 0{,}088 + 0{,}0544 = 0{,}222 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

6. Определяем передаточное отношение редуктора

$$i = \frac{щ_{\text{дв}}}{щ_{\text{м}}} = \frac{157}{1{,}1} = 142 \quad (4.35)$$

7. Определяем усилие F, Н, необходимое для поднятия груза

$$F = 9.81 \cdot m_{\text{гр}} \cdot f_{\text{тр}} \quad (4.36)$$

$$F = 9.81 \cdot 200 \cdot 0{,}66 = 1295 \text{ Н}$$

где $m_{\text{гр}}$ - масса груза, кг;
$f_{\text{тр}}$ - коэффициент трения ($f_{\text{тр}}$= 0,66);

8. Определяем вращающий момент механизма $\text{М}_{\text{м}}$ Н · м, подъёма груза на своём валу

$$\text{М}_{\text{м}} = F \cdot R \quad (4.37)$$

$$\text{М}_{\text{м}} = 1295 \cdot 1.25 = 1619 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9. Определяем вращающий момент $\text{М}_{\text{сн}}$ Н · м, механизма подъёма груза, приведённый к валу электродвигателя

$$\text{М}_{\text{сн}} = \frac{\text{М}_{\text{м}}}{i \cdot з_{\text{п}}} \quad (4.38)$$

$$\text{М}_{\text{сн}} = \frac{1619}{142 \cdot 0.92} = 12.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где $\text{М}_{\text{м}}$ - вращающий момент барабана относительно оси, проходящей через центр тяжести и проходящей параллельно длине барабана, Н · м;
i - передаточное отношение редуктора;
$з_{\text{п}}$-к.п.д. редуктора/

10. Определяем расчётную мощность $\text{Р}_{\text{рас}}$ Вт, приводного электродвигателя ме-

ханизма подъёма груза

$$P_{рас} = M_{сн} \cdot щ_{дв} Вт \quad (4.39)$$
$$P_{рас} = 12.4 \cdot 157 = 1947 \text{ Вт}$$

Задача 4.4 Грузоподъёмная лебёдка, кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.4 имеет грузоподъёмность: вес поднимаемого груза и крюка G = 22600 Н.

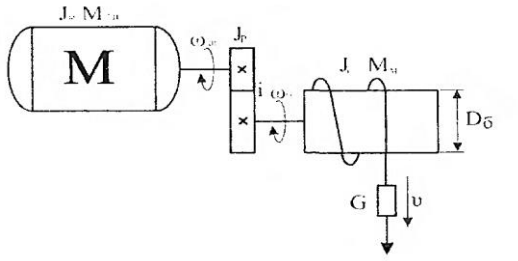


Рисунок 4.4 – Кинематическая схема грузоподъёмной лебёдки

Диаметр барабана $D_б$ = 0,4м; к.п.д. барабана $з_б$ = 0,97; к.п.д. редуктора $з_п$ = 0,96; скорость вращения электродвигателя $щ_{дв}$ = 104,5 рад/с; передаточное отношение редуктора i= 25; момент инерции электродвигателя $J_{дв}$ = 0,84 кг-м^2; момент инерции барабана на своём валу $J_б$ = 77,5 кг · м^2;

Определить:

а) скорость подъёма груза;

б) моменты на валах барабана и электродвигателя при подъёме и опускании груза;

в) мощность на валу электродвигателя при подъёме груза;

г) момент инерции системы «электродвигатель- механизм подъёма груза».

Решение:

1. Определяем скорость вращения $щ_м$, рад/с, барабана

$$щ_м = \frac{щ_{дв}}{i} \quad (4.40)$$
$$щ_м = \frac{104.5}{25} = 4.18 \text{ рад/с}$$

2. Определяем скорость поступательного движения v, м/с, перемещения груза

$$v = \frac{щ_м \cdot R}{2 \cdot р} \quad (4.41)$$
$$v = \frac{4.18 \cdot 0.4/2}{2 \cdot 3.14} = 0.133 \text{ м/с}$$

3. Определяем вращающий момент на валу барабана $M_м$ Н · м, при подъёме груза

$$M_м = \frac{G \cdot v}{щ_м \cdot з_б} \quad (4.42)$$
$$M_м = \frac{22600 \cdot 0.133}{4.18 \cdot 0.97} = 741.33 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4. Определяем вращающий момент механизма подъёма груза $M_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$М_{сн} = \frac{М_м}{i \cdot з_п} \quad (4.43)$$

$$М_{сн} = \frac{741.33}{25 \cdot 0.96} = 19.94 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Определяем вращающий тормозной момент на валу барабана $М_{тм}$ Н · м, при спуске груза

$$М_{тм} = М_м \cdot з_п^2 \quad (4.44)$$

$$М_{тм} = 741{,}33 \cdot 0{,}96^2 = 711.7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6. Определяем вращающий тормозной момент механизма опускания груза $М_т$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$М_т = \frac{М_{тм}}{i} з_п^2 \quad (4.45)$$

$$М_т = \frac{711.7}{25} 0{,}96^2 = 26.23 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Определяем мощность на валу электродвигателя $Р_{рас}$ Вт, при подъёме груза

$$Р_{рас} = М_{сн} \cdot щ_{дв} \quad (4.46)$$

$$Р_{рас} = 19.94 \cdot 104.5 = 2083.7 \text{ Вт}$$

8. Определяем момент инерции системы $J_{сис}$ кг · м^2, «электродвигатель- механизм подъёма груза

$$J_{сис} = J_{дв} + J_р + \frac{J_б}{i^2} \quad (4.47)$$

$$J_{сис} = 0.84 + 1.1 + \frac{77.5}{25^2} = 1.888 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4.5 Расчёт времени пуска и торможения системы «электродвигатель-рабочая машина»

Основное уравнение движения электропривода (4.48) даёт возможность определить продолжительность переходного процесса при пуске, торможении, а также при переходе от одной угловой скорости к другой.

$$М_{дв} - М_с = М_{дин} = J_{сис} \frac{dщ}{dt} \quad (4.48)$$

В простейшем случае, когда можно принять $М_{дв}$= const,

$М_с$ = const и $J_{сис}$= const (например, при пуске ДПТ посредством пускового реостата в цепи якоря или при пуске АД с фазным ротором при помощи пускового реостата в цепи ротора), уравнение движения (4.40) будет линейным и имеет решение:

$$t_{пуск} = J_{сис} \frac{щ_2 - щ_1}{М_{дв} - М_с} \quad (4.49)$$

где $щ_1$ - начальная угловая скорость вращения при пуске, рад/с; («1 = 0);

$щ_2$ - конечная угловая скорость вращения при пуске, рад/с, т.е. скорость, при которой работает электродвигатель, (®2 = ®раб);

$М_{дв}$- за значение вращающего момента электродвигателя принимается его среднее значение: $М_{ср} = б \cdot М_н$; б - коэффициент пропорциональности, ($б = 1{,}2 \div 2$);

$М_н$ - номинальный момент электродвигателя, Н · м;

Следовательно, время пуска $t_{пуск}$, с, рассчитывается по формуле

$$t_{пуск} = J_{сис} \frac{щ_{раб}}{1{,}2 \cdot М_н - М_с} \quad (4.50)$$

При электрическом торможении (генераторном, противовключении, динамическом) время торможения $t_{торм}$ с, рассчитывается по формуле:

$$t_{торм} = J_{сис} \frac{щ_{раб}}{М_{торм} + М_с} \quad (4.51)$$

Если торможение осуществляется за счёт сил сопротивления, т.е. электродвигатель отключен от сети $М_{дв} = 0$, время торможения рассчитывается по формуле

$$t_{торм} = J_{сис} \frac{щ_{раб}}{М_с} \quad (4.52)$$

Однако для многих электроприводов, когда моменты имеют определённую зависимость от угловой скорости (например, электропривод с АД с к.з. ротором) уравнение движения электропривода оказывается нелинейным и не поддаётся аналитическому решению. В таких случаях применяют для решения графоаналитические методы.

Задача 4.5. Определить время пуска системы «электродвигатель- рабочая машина», если рабочую машину, совершающую поступательное движение, приводит ДПТ с параллельным возбуждением типа: 4П42; $Р_н$ = 2,2 кВт; $U_н$ = 220 В; $I_н$ = 13,3 А; $n_н$ = 1000 об/мин; $з_н$= 0,75; $J_{дв}$ = 0,015 кг · м^2. Момент сопротивления и момент инерции рабочей машины на её валу составляют: $М_м$= 101,5 Н · м; $J_{рм}$ = 0,36 кг · м^2. Передаточное отношение редуктора i = 6; к.п.д. редуктора $n_р$ = 0,94.

Решение:

1. Определяем момент инерции редуктора $J_р$ кг · м^2, по формуле

$$J_р = 1{,}1 \cdot J_{дв} \quad (4.53)$$
$$J_р = 1{,}1 \cdot 0{,}015 = 0{,}0165 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

2. Определяем момент инерции рабочей машины $J_м$ кг · м^2, приведённый к валу электродвигателя

$$J_м = \frac{J_{рм}}{i^2} \quad (4.54)$$
$$J_м = \frac{0.36}{36} = 0.01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Определяем момент инерции системы $J_{сист}$ кг · м^2 по формуле

$$J_{сис} = J_{дв} + J_р + J_м \quad (4.55)$$
$$J_{сис} = 0{,}015 + 0{,}0165 + 0{,}01 = 0{,}041 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем момент сопротивления рабочей машины $М_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$М_{сн} = \frac{М_м}{i \cdot з_п} \quad (4.56)$$
$$М_{сн} = \frac{101{,}5}{6 \cdot 0{,}94} = 18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Определяем скорость вращения электродвигателя

$$щ_{дв} = \frac{р \cdot n_н}{30} \tag{4.57}$$
$$щ_{дв} = \frac{3{,}14 \cdot 1000}{30} = 104{,}6 \text{ рад/с.}$$

6. Определяем сопротивление якоря $R_я$ Ом, по формуле

$$R_я = 0{,}5(1 - з_н)\frac{U_н}{I_н} \tag{4.58}$$
$$R_я = 0{,}5(1 - 0.75)\frac{220}{13.3} = 2.06 \text{ Ом}$$

7. Определяем коэффициент пропорциональности

$$С = \frac{U_н - I_н \cdot R_я}{щ_н} \tag{4.59}$$
$$С = \frac{220 - 13{,}3 \cdot 2{,}06}{104{,}6} = 1{,}83$$

8. Определяем скорость идеального холостого хода $щ_0$, рад/с, электродвигателя по формуле

$$щ_0 = \frac{U_н \cdot щ_н}{U_н - I_н \cdot R_я} \tag{4.60}$$
$$щ_0 = \frac{220 \cdot 104{,}6}{220 - 13{,}3 \cdot 2{,}06} = 119{,}9 \text{ рад/с}$$

9. Определяем рабочую скорость вращения $щ_{раб}$, рад/с, решая совместно уравнение механической характеристики ДПТ и уравнение механической характеристики рабочей машины

$щ = щ_0 - \frac{R_я}{С^2} \cdot М$ - уравнение естественной механической характеристики ДПТ.

$М = М_{сн} = const$ - - уравнение механической характеристики рабочей машины, движущийся поступательно

$$щ_{раб} = щ_0 - \frac{R_я}{С^2} \cdot М_{сн}$$
$$щ_{раб} = 119{,}9 - \frac{2{,}06}{1{,}83^2} \cdot 18 = 108{,}9 \text{ рад/с}$$

10. Определяем номинальный момент $М_н$ Н · м, электродвигателя

$$М_н = С \cdot I_н \tag{4.61}$$
$$М_н = 1.83 \cdot 13.3 = 24.34 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

11. Определяем время пуска $I_{пуск}$ с, системы

$$t_{пуск} = 0{,}041 \cdot \frac{щ_{раб}}{a \cdot М_н - М_c} \tag{4.62}$$
$$t_{пуск} = J_{сис} \cdot \frac{щ_{раб}}{1.2 \cdot 24.34 - 18} = 0.398\ c$$

Задача 4.6. Определить время торможения системы «электродвигатель- рабочая

машина», если электродвигатель останавливается за счёт сил сопротивления от $оэ_{раб}$ = 153 рад/с. до нуля. Электродвигатель: АИРФ132М4; $J_{дв}$ = 0,027 кг · м^2; рабочая машина - железный сплошной цилиндр, ось вращения которого проходит через центр тяжести. Радиус цилиндра R = 0,4м; длина цилиндра l = 0,6 м; плотность железа г = 7,88-10^3 кг/м^3. Коэффициент полезного действия и передаточное отношение редуктора $з_р$ = 0,9; i=35. Вращающий момент рабочей машины относительно своей оси $М_м$ = 1323 Н · м.

Решение:

1. Определяем массу цилиндра $m_ц$, по формуле

$$m_ц = р \cdot R^2 \cdot l \cdot г \tag{4.63}$$
$$m_ц = 3.14 \cdot 0.4^2 \cdot 0.6 \cdot 7.88 \cdot 10^3 = 2375 \text{ кг}$$

2. Определяем момент инерции цилиндра $J_с$, кг-м^2, относительно своей оси

$$J_с = m_ц \cdot р^2 = m_ц \frac{R^2}{2} \tag{4.64}$$
$$J_с = 2375 \frac{0{,}4^2}{2} = 190 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Определяем момент инерции рабочей машины, приведённый к валу электродвигателя

$$J_м = \frac{J_с}{i^2} \tag{4.65}$$
$$J_м = \frac{190}{35^2} = 0{,}155 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем момент инерции системы $J_{сис}$ кг · м^2, по формуле

$$J_{сис} = J_{дв} + J_р + J_м \tag{4.66}$$
$$J_{сист} = 0{,}027 + 1{,}1 \cdot 0{,}027 + 0{,}155 = 0{,}2117 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

5. Определяем момент сопротивления рабочей машины $М_{сн}$ Н · м, приведённый к валу электродвигателя

$$М_{сн} = \frac{М_м}{i \cdot з_б} \tag{4.67}$$
$$М_{сн} = \frac{1323}{35 \cdot 0{,}9} = 42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6. Определяем время торможения $t_{торм}$ с, системы «электродвигатель-рабочая машина»

$$t_{торм} = J_{сис} \frac{щ_{раб}}{М_с} \tag{4.68}$$
$$t_{торм} = 0{,}2117 \frac{153}{42} = 0{,}771 \text{ с}$$

4.6 Графоаналитический метод определения времени пуска системы «АД с к.з. ротором - вентилятор»

Графоаналитический метод (или метод пропорций) анализа переходных процессов

электроприводов широко применяется во всех случаях, когда механические характеристики двигателя и рабочей машины нелинейные. Графоаналитический метод решения основного уравнения движения электропривода основан на том, что на небольшом участке приращения скорости вращения Δщ момент двигателя и момент сопротивлений принимаются постоянными, равными средним значениям на рассматриваемом участке.

Основное уравнение движения электропривода:

$$\frac{M_{дв}-M_c}{J_{сис}} = \frac{\Delta щ}{\Delta t} \tag{4.69}$$

Сущность этого метода заключается в следующем (рисунок 4.5)

1. Задаёмся масштабами по оси моментов ($м_м$, Н-м/мм), по оси скорости ($м_щ$, рад/с·мм), по оси времени ($м_t$ с/мм);
2. Строим естественную механическую характеристики АД с к.з. ротором по 4-м характерным точкам$M_{дв} = f(щ)$;
3. Строим механическую характеристику вентилятора по уравнению:

$$M_c = 0.2 \cdot M_{сн} + 0.8 \cdot M_{сн}\left(\frac{щ}{щ_н}\right)^2 \tag{4.70}$$

где M_c - статический момент сопротивления вентилятора, Н · м;

$M_{сн}$-момент сопротивления вентилятора при номинальной скорости вращения, Н · м; $щ_н$- номинальная скорость вращения электродвигателя, рад/с;

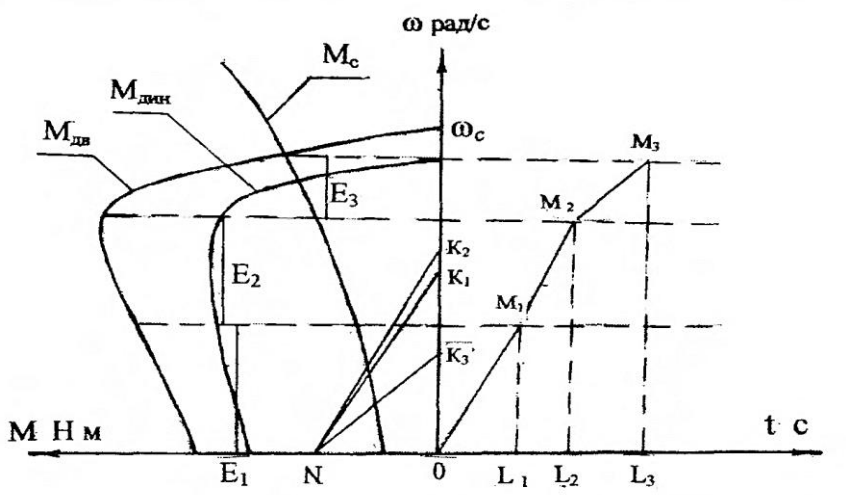


Рисунок 4.5 -Графоаналитический метод определения времени пуска системы «электродвигатель – вентилятор» до установившейся скорости вращения

Вычитая из графика момента двигателя график момента сопротивлений, получаем кривую динамического момента $M_{дин} = f(щ)$ и разбиваем её на ряд участков, для которых динамический момент можно принять постоянным, т.е. не зависящим от скорости.

При этом нужно стремиться к тому, чтобы площадки, лежащие вне кривой динамического момента, были примерно равны площадкам, лежащим внутри кривой. Далее по оси моментов откладываем отрезок ON, мм, - это в масштабе величина момента инерции системы $J_{сис}$

$$ON = \frac{J_{сис}}{м_J} \tag{4.71}$$

где $J_{сис}$-момент инерции системы электродвигатель - вентилятор, кг · м^2;
м$_J$ - масштаб момента инерции, кг · м^2/мм;

$$J_{сис} = J_{дв} + J_{вен} \tag{4.72}$$

где - $J_{дв}$ - момент инерции электродвигателя, кг · м^2 (задаётся в каталоге электродвигателя);
$J_{вен}$ - момент инерции вентилятора, кг · м^2

$$J_{вен} = 1{,}2 \cdot J_{дв} \tag{4.73}$$

Масштаб момента инерции, м$_J$ кг · м^2/мм, определяется по формуле:

$$м_J = \frac{м_м \cdot м_t}{м_щ} \tag{4.74}$$

Значение динамического момента на первом участке (OE_1) переносим на ось скорости и получаем точку K_1 ($OE_1 = OK_1$ = OKi). Соединяем точку K_1 с точкой N и из начала координат до конца первого участка проводим прямую OM_1 параллельную NK_1. Отрезок OL_1 в принятом масштабе представляет собой приращение времени на первом участке ($OL_1 = \Delta t_1$), а отрезок M_1L_1- приращение скорости ($M_1L_1 = \Delta щ_1$).

Для определения приращения времени на втором и последующих участках делаем аналогичные построения: перенося на ось скорости значение динамического момента на втором участке, полученную точку соединяем с точкой N, параллельно этой линии из конца первого участка (точка M_1) проводим линию, точка пересечения которой с линией конца второго участка и даёт приращение времени Δt_2 и т.д. Соединив расчётные точки, получаем ломаную кривую изменения скорости вращения во времени щ $= f_1(t)$.

Время пуска системы $t_{пуск}$ с, «электродвигатель-вентилятор» определяется:

$$t_{пуск} = \Sigma \Delta t_1 = м_t \cdot (OL_3) \tag{4.75}$$

Задача 4.7. Определить время пуска системы «АД с короткозамкнутым ротором-вентилятор», если дано:

М$_{сн} = 0{,}8 \cdot$ М$_н$; тип АД: АНР100L6: Р$_н$ = 2,2 кВт; $I_н$ = 5,58 А; $n_с$ = 1000 об/мин; $n_н$ = 945 об/мин; з$_н$= 81,5%; cosц$_н = 0{,}74$; i = 6.0; м$_п = 1{,}9$; м$_{кр} = 2{,}2$; $J_{дв}$ = 0,013 кг · м^2.

Решение:

1. Определяем синхронную скорость вращения щ$_с$ рад/с, электродвигателя:

$$щ_с = \frac{р \cdot n_с}{30} \tag{4.76}$$
$$щ_{дв} = \frac{3{,}14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с.}$$

2. Определяем номинальную скорость вращения щ$_н$ рад/с, электродвигателя

$$щ_н = \frac{р \cdot n_н}{30} \tag{4.77}$$
$$щ_{дв} = \frac{3{,}14 \cdot 945}{30} = 98{,}9 \text{ рад/с.}$$

3. Определяем номинальный момент $М_н$ Н · м, электродвигателя:

$$М_н = 1000\frac{Р_н}{щ_н} \quad (4.78)$$

$$М_н = 1000\frac{2,2}{98,9} = 22,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4. Определяем критический момент $М_{кр}$ Н · м, электродвигателя

$$М_{кр} = м_{кр} \cdot М_н \quad (4.79)$$

$$М_{кр} = 2,2 \cdot 22,2 = 48,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5. Определяем номинальное скольжение $S_н$, о.е., электродвигателя

$$S_н = \frac{n_c - n_н}{n_c} \quad (4.80)$$

$$S_н = \frac{1000 - 945}{1000} = 0.055$$

6. Определяем критическое скольжение $S_{кр}$ о.е., электродвигателя

$$S_{кр} = S_н(м_{кр} + \sqrt{м_{кр}^2 - 1}) \quad (4.81)$$

$$S_{кр} = 0,055\left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}\right) = 0,228$$

7. Определяем критическую скорость вращения $щ_{кр}$ рад/с, электродвигателя

$$щ_{кр} = щ_с(1 - S_{кр}) \quad (4.82)$$

$$щ_{кр} = 105(1 - 0,228) = 81 \text{ рад/с}$$

8. Определяем пусковой момент $М_{пуск}$ Н · м, электродвигателя

$$М_{пуск} = м_п \cdot М_н \quad (4.83)$$

$$М_{пуск} = 1,9 \cdot 22,2 = 42,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9. Строим естественную механическую характеристику электродвигателя по 4-м точкам (рисунок 4.6);

10. Определяем момент сопротивления номинальный $М_{сн}$ Н · м, вентилятора

$$М_{сн} = 0,8 \cdot М_н \quad (4.84)$$

$$М_{сн} = 0,8 \cdot 22,2 = 17,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

11. Задаёмся масштабами:

$$м_щ = 1\frac{\text{рад/с}}{\text{мм}};\ м_м = 0,5\frac{\text{Н·м}}{\text{мм}};\ м_t = 0.002\frac{\text{с}}{\text{мм}}$$

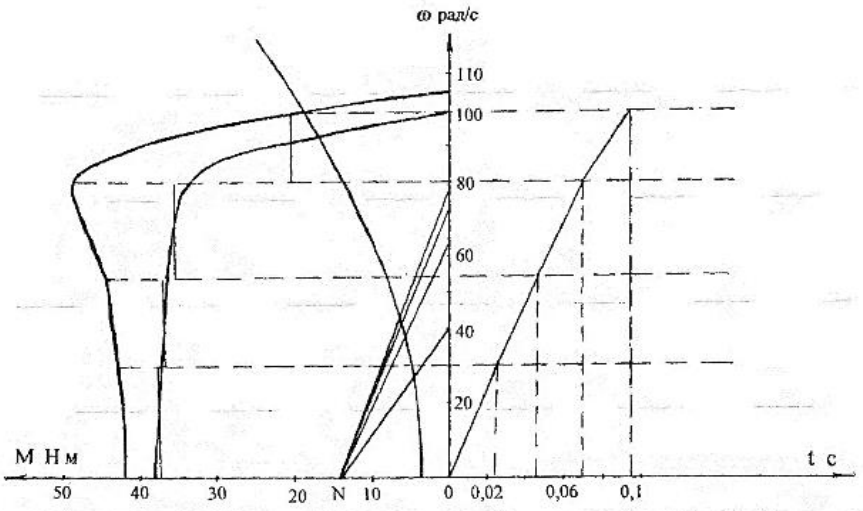


Рисунок 4.6 - Определение времени пуска системы «Электродвигатель типа АИР 100L6 – вентилятор» графоаналитическим методом

Строим механическую характеристику вентилятора:

$$M_c = 0.2 \cdot M_{сн} + 0.8 \cdot M_{сн}\left(\frac{щ}{щ_н}\right)^2 \quad (4.85)$$

Таблица 4.1

Координаты точек механической характеристики

щ	0	40	80	120
M_c	3,56	5,88	12,85	24,46

12. Разбиваем на 4 участка ось скорости вращения от 0 до $M = M_{сн}$, затем вычитаем из графика $M_{дв}$ график M_c, получаем кривую динамического момента $M_{дин}$, заменяем график динамического момента ступенчатым графиком;

13. Определяем масштаб момента инерции $м_J$ кг · м²/мм, по формуле:

$$м_J = \frac{м_м \cdot м_t}{м_щ} \quad (4.86)$$

$$м_J = \frac{0,5 \cdot 0,002}{1} = 0,001 \ \frac{кг \cdot м^2}{мм}$$

14. Определяем момент инерции системы $J_{сис}$ кг · м²

$$J_{сис} = J_{дв} + J_{вен} \quad (4.87)$$

15. Определяем величину отрезка ON, мм

$$ON = \frac{J_{сис}}{м_J} \quad (4.88)$$

$$ON = \frac{0,0286}{0,001} = 28,6 \text{ мм}$$

16. Далее осуществляем построение (см. выше);
17. Замеряем расстояние $OL_1 = 48$ мм;
18. Определяем время пуска:

$$t_{пуск} = м_t \cdot (OL_4) \quad (4.89)$$

$t_{пуск} = 0,002 \cdot 48 = 0,096$ с;

Приложение А
(справочное)

Некоторые часто встречающиеся числа

π= 3,141593	4π = 12,56637	$2/\pi$ = 0,63662
π^2 = 9,86960	$\sqrt{\pi}$= 1,77245	e= 2,718282
$\sqrt{2}$ = 1,41421	$\sqrt{3}$= 1,73205	1° = 0,017453

Приложение Б
(справочное)

Приставки к обозначениям единиц

Тера (Т)	10^{12}	Санти (с)	10^{-2}
Гига (Г)	10^{9}	Милли (м)	10^{-3}
Мега (М)	10^{6}	Микро (мк)	10^{-6}
Кило (к)	10^{3}	Нано (н)	10^{-9}
Деци (Э)	10^{-1}	Пико (п)	10^{-12}

Приложение В
(справочное)

Единицы физических величин ГОСТ 8.417-81

Наименование величины	Наименование	Обозначение	Выражение через единицы СИ
1	2	3	4
Длина	метр	м	м
Масса	килограмм	кг	КГ
Время	секунда	с	с
Сила электрического тока	ампер	А	А
Термодинамическая температура	кельвин	К	А
Температура	градус Цельсия	°С	°С=К
Количество вещества	моль	моль	моль
Сила света	кандела	кд	кд
Плоский угол	радиан	рад	рад
Телесный угол	стерадиан	ср	ср
Площадь	квадратный метр	$м^2$	$м^2$
Объём	кубический метр	$м^2$	$м^2$
Скорость	метр в секунду	м/с	м/с
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	рад/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$	$м/с^2$
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	$рад/с^2$	$рад/с^2$
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	$кг/м^3$
Удельный объём	кубический метр на килограмм	$м^3/кг$	$м^3/кг$
Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	$А/м^2$	$А/м^2$

Напряжённость магнитного поля	ампер на метр	А/м	А/м
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м^2	кд/м^2
Частота	герц	Гц	с$^{-1}$
Сила, вес	ньютон	Н	$м \cdot кг \cdot с^2 = Дж \cdot м^{-1}$
Давление	паскаль	Па	$м^{-1} \cdot кг \cdot с^2$
Энергия, работа	джоуль	Дж	$м^2 \cdot кг \cdot с^2$
Мощность	ватт	Вт	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} = Дж \cdot с^{-1}$
Количество	кулон	Кл	$с \cdot А$
Электрическое напряжение	вольт	В	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$
Электрическая ёмкость	фарад	ф	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^4 \cdot А^2$
Электрическое	ом	Ом	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$
Электрическая	сименс	См	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^3 \cdot А^2$
Магнитный поток	вебер	Вб	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Тл	$кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Индуктивность	генри	Гн	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$
Световой поток	люмен	лм	$кд \cdot ср$
Освещённость	люкс	лк	$м^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Момент силы	ньютон-метр	Н · м	$м^2 \cdot кд \cdot ср^{-2}$
Поверхностное натяжение	ньютон на метр	Н/м	$кг \cdot с^{-2}$
Динамическая вязкость	паскаль-секунда	Па -с	$м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-1}$
Напряжённость электрического	вольт на метр	В/м	$м \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^2$
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	Ф/м	$м^{-3} \cdot кг^{-1} \cdot с^4 \cdot А^2$
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м	$м \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$
Удельная энергия	джоуль на килограмм	Дж/кг	$м^2 \cdot с^{-2}$
Теплоёмкость	джоуль на кельвин	Дж/К	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot К^{-1}$
Удельная теплоёмкость	джоуль на килограмм-кельвин	$Дж/кг \cdot К)$	$м^2 \cdot с^{-2} \cdot К^{-1}$
Поверхностная плотность потока энергии	ватт на квадратный метр	Вт/м^2	$кг \cdot с^{-3}$
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	$Вт/м \cdot К$	$м \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot К^{-1}$
Энергетическая сила света	ватт на стерадиан	Вт/ср	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot ср^{-1}$

Приложение Г
(справочное)

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

1	2	3	4
Масса	тонна	т	10^3 кг
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Объём	литр	л	$м^3$
Плоский угол	градус		$(р/180)рад = 1{,}7453 \cdot 10^{-2}$
	минута		$(р/10800)рад = 2{,}9088 \cdot 10^{-4}$
	секунда		$(р/6480)рад = 4{,}8481 \cdot 10^{-6}$
Оптическая	диоптрия	дптр	$1 \cdot м^{-1}$
Площадь	гектар	га	$10^4 \cdot м^2$
Полная мощ-	вольт-ампер	$В \cdot А$	
Реактивная	вар	вар	
Длина	морская миля	миля	1852 м
	дюйм	ДМ	2,54 см
Масса	карат	кар	
	центнер	Ц	100 кг
Скорость	узел	уз	0,514 м/с
Частота враще-	оборот в секунду	об/с	$1 \cdot с^{-1}$
	оборот в минуту	об/мин	$1/60\ с^{-1} = 0{,}016\ с^{-1}$
Давление	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	9,80665 Па
	миллиметр ртутного столба	м рт. ст.	133,322 Па
	атмосфера	ат.	$9{,}81 \cdot 10^4$ Па
Мощность	лошадиная сила	л.с.	735.499 Вт
Угол поворота	оборот	об	$2р$ рад $= 6{,}28$ рад
Момент инерции (динамический момент	килограмм - квадратный метр	$кг \cdot м^2$	$кг \cdot м^2$
Яркость	нит	нт	$1\ кд/м^2$
Плотность	килограмм на	$кд/м^3$	$кд/м^3$
Магнитодви-	ампервиток	ав	1 А

Приложение Д
(справочное)

Основные технические данные электродвигателей серии АИР основного исполнения

№	Тип электродвигателя	Мощность $P_н$, кВт	Частота вращения $n_н$, об/мин	Ток статора $I_н$, А	КПД $з_н$, %	$cos ц_н$	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Параметры схемы замещения, о.е		Момент инерции ротора, кг · м^2	Масса кг
										R_1^I	R_2^{II}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9 1	10	11	12	13	14
Синхронная частота вращения 3000 об/мин													
1	АИР50А2	0,09	2655	0,30	60,0	0,75	4,5	2,2	2,2	0,, 15	0,14	0,000025	2,5
2	АИР50В2	0,12	2655	0,39	63,0	0,75	5,0	2,2	2,2	0,11	0,12	0,000028	2,8
3	АИР56А2	0,18	2730	0,52	68,0	0,78	5,0	2,2	2,2	0,17	0,094	0,00042	3,4
4	АИР56В2	0,25	. 2730	0,70	69,0	0,79	5,0	2,2	2,2	0,16	0,11	0,00047	3,9
5	АИР63А2	0,37	2730	0,91	72,0	0,86	5,0	2,2	2,2	0,14	0,096	0,00075	4,7
6	АИР63В2	0,55	2730	1,31	75,0	0,85	5,0	2,2	2,2	0,13	0,096	0,00095	5,5
7	АИР71А2	0,75	2820	1,75	79,0	0,80	6,0	2,6	2,7	0,12	0,064	0,00095	8,6
8	АИР71В2	1,1	2805	2,55	79,5	0,80	6,0	2,2	2,4	0,13	0,069	0,0011	9,3
9	АИР80А2	1,5	2850	3,3	81,0	0,85	6,5	2,2	2,6	0,084	0,049	0,0018	12,4
10	АИР80В2	2,2	2850	4,6	83,0	0,87	6,4	2,1	2,6	0,076	0,049	0,0021	15,0
11	АИР 90L2	3,0	2850	6,1	84,5	0,88	7,0	2,0	2,2	0,072	0,047	0,0035	19,0
12	АИР100S2	4,0	2850	7,9	87,0	0,88	7,5	2,0	2,4	0,054	0,036	0,0055	25,5
13	АИР100Ь2	5,5	2850	10,7	88,0	0,89	7,5	2,1	2,4	0,050	0,036	0,0070	31,0
14	АИР112М2	7,5	2895	14,7	88,0	0,88	7,5	2,0	2,2	0,046	0,048	0,010	49,0
15	АИР132М2	11,0	2910	21,1	88,0	0,90	7,5	1,6	2,2	0,040	0,025	0,023	77,5
16	АИР 160S2	15.0	2910	28,5	90,0	0,89	7,0	1,8	2,7	0,052	0,022	0,043	100
17	АИР160М2	18.5	2910	34,5	90,5	0,90	7,0	2,0	2,7	0,019	0,022	0,048	ПО
18	АИР 180S2	22.0	2920	41,5	90,5	0,89	7,0	2,0	2,7	0,030	0,020	0,063	160
19	АИР 180М2	30,0	2925	55,4	91,5	0,90	7,5	2,2	3,0	0,030	0,018	0,076	180
20	АИР200М2	37,0	2940	71,0	91,0	0,87	7,0	1,6	2,8	0,029	0,021	0,12	220
21	АНР200L2	45,0	2940	84,5	92,0	0,88	7,5	1,8	2,8	0,027	0,020	0,13	240
22	АИР225М2	55,0	2940	99,3	92,5	0,91	7,5	1,8	2,6.	0,026	0,019	0,20	320
23	АНР250S2	75,0	2940	134,6	93,0	0,91	7,5	1,8	3,0	0,021	0,015	0,47	425
24	АИР250М2	90,0	2940	160,0	93,0	0,92	7,5	1,8	3,0	0,016	0,016	0,52	455
Синхронная частота вращения 1500 об/мин.													
25	АИР50А4	0.06	1335	0,27	53.0	0.63	4.5	2.3	2.2	0.16	0.22	0.000032	2.6
26	АИР50В4	0.09	1335	0,37	57.0	0.65	4.5	2.3	2.2	0.13	0.21	0.000038	3.0
27	АИР56А4	0,12	1350	0,44	63,0	0,66	5,0	2,3	2,2	0,18	0,15	0,00070	3,4
28	АИР56В4	0,18	1350	0,63	64,0	0,68	5,0	2,3	2,2	0,18	0,16	0,00081	3,9
29	АИР63А4	0,25	1320	0,83	68,0	0,67	5,0	2,3	2,2	0,15	0,14	0,0012	4,7
30	АИР63В4	0,37	1320	1,18	68,0	0,70	5,0	2,3	2,2	0,17	0,14	0,0015	5,6
31	АИР71А4	0,55	1350	1,61	75,0	0,73	5,0	2,3	2,4	0,13	0,11	0,0013	8,3
32	АИР71В4	0,75	1350	1,90	75,0	0,80	5,0	2.5	2,6	0,11	0,11	0.0015	9,4
33	АИР80А4	и	1395	2,75	76,5	0,77	5.0	2.2	2.4	0.12	0.068	0.0034	11,9
34	АИР80В4	1,5	1395	3,52	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	0,12	0,061	0,0035	13,5
35	АИР 90L4	2,2	1395	4,98	81,0	0,81	6,5	2,2	2,4	0,098	0,060	0,0056	18,6
36	АИР100S4	3,0	1410	6,70	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2	0,078	0,053	0,0085	23,0
37	АИР100L4	4,0	1410	8,52	85,0	0,84	6,0	2,1	2,4	0,067	0,053	0,011	28,5
38	АИР112М4	5,5	1430	11,3	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5	0,054	0,041	0,016	49,0
39	АИР132S4	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5	0,048	0,033	0,027	70,0
40	АИР32М4	11,0	1450	22,2	88,5	0,85	7,5	2,2	3,1	0,043	0,042	0,048	83,5
41	АИР160S4	15,0	1455	28,5	90,0	0,89	7,0	1,9	2,9	0,047	0,025	0,080	100
42	АИР160М4	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	7,0	1,9	2,9	0,012	0,024	0,10	145
43	АИР180S4	22,0	1465	42,5	90,5	0,87	7,0	1,7	2,7	0,041	0,021	0,16	170
44	АИР180М4	30,0	1470	57,0	92,0	0,87	7,0	1,7	2,7	0,034	0,018	0,20	190
45	АИР200М4	37,0	1470	68,3	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,039	0,018	0,27	245
46	АНР200L4	45,0	1470	83,1	92,5	0,89	7,5	1,7	2,7	0,034	0,017	0,32	270
47	АИР225М4	55,0	1470	101	93,0	0,89	7,0	1,7	2,6	0,027	0,015	0,50	335

48	АМР250S4	75,0	1480	137,8	94,0	0,88	7,5	1,7	2,5	0,025	0,014	1,0	450
49	АИР250М4	90,0	1480	163,0	94,0	0,89	7,5	1,5	2,5	0,024	0,014	1,2	480
50	АИР280S4	110	1470	196	94,0	0,91	6,5	1,6	2,2	0,023	0,019	2,1	695
51	АИР280М4	132	1470	230	94,5	0,93	6,5	1,6	2,4	0,021	0,018	2,4	760
52	АИР315S4	160	1470	286	94,5	0,91	5,5	1,4	2,0	0,018	0,017	3,0	875
53	АИР315М4	200	1470	352	95,0	0,92	5,5	1,6	2,2	0,014	0,014	3,5	1000
54	АИР355S4	250	1470	437	94,5	0,92	7,0	1,5	2,3	0,013	0,013	6,0	1260
55	АИР355М4	315	1470	544	94,7	0,93	7,0	1,6	3,0	0,012	0,014	7,0	1460
Синхронная частота вращения 1000 об/мин													
56	АИР63А6	0,18	860	0,79	56,0	0,62	4,0	2,0	2,2	0,24	0,22	0,0019	4,55
57	АИР63В6	0,25	860	1,04	59,0	0,62	4,0	2,0	2,2	0,18	0,21	0,0023	5,40
58	АИР71А6	0,37	915	1,31	66,0	0,63	4,5	2,1	2,3	0,17	0,15	0,0019	8,1
59	АИР71В6	0,55	915	1,74	69,0	0,68	4,5	1,9	2,2	0,16	0,15	0,0022	9,7
60	АИР80А6	0,75	920	2,26	71,0	0,71	4,0	2,1	2,2	0,16	0,12	0,0033	12,3
61	АИР80В6	1,1	920	3,05	75,0	0,74	4,5	2,2	2,3	0,12	0,11	0,0048	15,3
62	АИР90L6	1,5	925	4,16	76,0	0,72	6,0	2,0	2,2	0,11	0,088	0,0073	19,0
63	АИРI00L6	2,2	945	5,58	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2	0,09	0,067	0,013	26,5
64	АИР112МА6	3,0	950	7,4	81,5	0,76	6,0	2,0	2,2	0,085	0,063	0,017	43,0
65	АИР112МВ6	4,0	950	9,1	82,5	0,81	6,0	2,0	2,2	0,077	0,062	0,021	48,0
66	АИР132S6	5,5	960	12,3	85,0	0,80	7,0	2,0	2,2	0,067	0,041	0,038	68,5
67	АИР132М6	7,5	960	16,5	85,5	0,81	7,0	2,0	2,2	0,060	0,040	0,055	81,5
68	АНРI60S6	11,0	970	22,9	88,0	0,83	6,5	2,0	2,7	0,073	0,030	0,12	125
69	АИР160М6	15,0	970	30,5	88,0	0,85	6,5	2,0	2,7	0,062	0,028	0,15	155
70	АИР180М6	18,5	980	36,9	89,5	0,85	6,5	1,8	2,4	0,056	0,026	0,24	180
71	АИР200М6	22,0	980	44,8	90,0	0,83	6,5	1,6	2,4	0,050	0,024	0,41	225
72	АИР200Ь6	30,0	975	59,6	90,0	0,85	6,5	1,6	2,4	0,046	0,022	0,46	250
73	АИР225М6	37,0	980	72,7	91,0	0,85	6,5	1,5	2,3	0,042	0,019	0,64	305
74	АИР250S6	45,0	980	87,0	92,5	0,85	6,5	1,5	2,3	0,037	0,015	1,1	390
75	АИР250М6	55,0	980	105	92,59	0,86	6,5	1,5	2,3	0,034	0,014	1,2	430
76	АИР280S6	75,0	980	137	93,0	0,90	6,5	1,3	2,2	0,032	0,021	2,8	645
77	АИР280М6	90,0	980	164	93,5	0,90	6,5	1,4	2,4	0,030	0,019	3,3	700
78	АИР315S6	ПО	980	200	93,5	0,90	6,0	1,4	2,3	0,026	0,018	4,0	850
79	АИР315М6	132	980	239	94,0	0,90	6,5	1,4	2,3	0,023	0,018	4,5	990
80	АИР355S6	160	980	288	94,0	0,90	6,5	1,7	2,3	0,020	0,015	7,3	ИЗО
81	АИР355М6	200	980	358	94,5	0,90	6,5	1.7	2,0	0,018	0,014	8.8	1280
Синхронная частота вращения 600 об/мин													
82	АИР71В8	0,25	690	1,04	61,0	0,60	4,0	1,8	1,9	0,22	0,23	0,0021	8,9
83	АИР80А8	0,37	700	1,53	63,5	0,59	3,5	2,0	2,3	0,19	0,16	0,0036	12,1
84	АИР80В8	0,55	700	2,07	65,0	0,60	3,5	2,0	2.1 '	0,17	0,15	0,0047	13,0
85	АИР90LА8	0,75	705	2,08	75,0	0,73	4,0	м	2,0	0,14	0,11	0,0075	18,5
86	АИР90LВ8	1,1	700	3,02	77,0	0,72	3,5	1,4	2,0	0,13	0,11	0,0096	22,0
87	АР100L8	1,5	705	3,95	76,0	0,75	3,7	1,6	2,0	0,11	0,093	0,012	23,5
88	АИР112МА8	2,2	710	6,16	76,5	0,71	6,0	1,8	2,2	0,093	0,083	0,017	43,5
89	АИР112МВ8	3,0	700	7,8	79,0	0,74	6,0	1,8	2,2	0,080	0,083	0,025	48,5
90	АИР132S8	4,0	720	10,5	83,0	0,70	6,0	1,8	2,2	0,068	0,058	0,042	68,5
91	АИР132М8	5,5	715	13,6	83,0	0,74	6,0	1,8	2,2	0,070	0,061	0,057	82,0
92	АИР160S8	7,5	730	17,5	87,0	0,75	5,5	1,6	2,4	0,075	0,032	0,12	125
93	АИР160М8	11,0	730	25,5	87,5	0,75	6,0	1,6	2,4	0,066	0,031	0,15	155
94	АИР180М8	15,0	730	31,3	89,0	0,82	5,5	1,6	2,2	0,064	0,030	0,25	180
95	АИР200М8	18,5	730	39,0	89,0	0,81	6,0	1,6	2,3	0,057	0,026	0,41	225
96	АИР200L8	22,0	730	45,9	90,0	0,81	6,0	1,6	2,3	0,062	0,029	0,46	250
97	АИР225М8	30,0	730	62,2	90,5	0,81	6,0	1,4	2,3 •	0,045	0,022	0,69	305
98	АИР250S8	37,0	735	77,9	92,5	0,78	6,0	1,5	2,3	0,047	0,017	1,2	400
99	АИР250М8	45,0	735	93,6	92,5	0,79	6,0	1,4	2,2	0,037	0,016	1,3	430
100	АИР280S8	55,0	730	106	92,5	0,86	6,0	1,3	2,2	0,035	0,022	3,2	650
101	АИР280М8	75,0	730	141	93,0	0,87	6,0	1,4	2,2	0,028	0,021	4,0	735

102	АИР315S8	90,0	740	173	93,5	0,85	6,0	1,2	2,2	0,023	0,019	4,6	875
103	АИР315M8	110	740	209	93,5	0,85	6,0	1,1	2,2	0,023	0,019	5,6	1010
104	АИР355S8	132	735	252	93,5	0,85	6,0	1,6	2,0	0,023	0,017	9,0	1170
105	АИР355M8	160	735	306	93,5	0.85	6,0	1,6	2,0	0,020	0,017	10.0	1270
Синхронная частота вращения 600 об/мин													
106	АИР250S10	22,0	580	45,8	89,0	0,82	5,0	1,2	2,2	0,050	0,019	1,4	370
107	АИР250M10	30,0	580	61,7	89,0	0,83	5,5	1,2	2,2	0,056	0,023	1,6	410
108	АИР280S10	32,0	580	78,2	91,5	0,79	6,0	1,3	2,3	0,031	0,027	3,7	605
109	АИР280M10	*~~45,0*	580	94,8	92,0	0,79	6,0	1,4	2,1	0,037	0,031	4,0	660
110	АИР315S10	55,0	585	115	92,5	0,79	6,5	1,2	1,9	0,028	0,026	5,2	785
111	АИР315M10	75,0	585	155	92,5	0,80	6,0	1,2	1.9	0,029	0,027	6,0	865
112	АИР355S10	90,0	590	178	92,5	0,83	6,0	1,1	1,9	0,028	0,021	9,3	1080
113	АИР355M10	110,0	590	217	93,0	0,83	6,0	1,1	1,9	0,024	0,021	11	1190
Синхронная частота вращения 500 об/мин													
114	АИР315S12	45,0	480	101	91,0	0,75	6,0	1Д	1,8	0,037	0,023	5,3	785
115	АИР315M12	55,0	480	123	91,5	0,75	6,0	1,1	1,8	0,033	0,032	6,2	865
116	АИР355S12	75,0	490	164	91,0	0,76	6,0	1,1	1,9	0,026	0,021	9,3	1080
117	АИР355M12	90,0	490	196	92,0	0,76	6,0	1.1	1.9	0,024	0,020	10,0	1190

Примечание: Электродвигатели габаритов (50-132) имеют класс нагревостойкости B;
Электродвигатели габаритов (160 - 355) имеют класс нагревостойкости F.

Приложение Е
(справочное)

Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором; степень защиты IP45(IP44)

№	Тип электродвигателя	$P_н$, кВт	Энергетические показатели		$I_{2н}$ А	$E_{2н}$ В	Механическая характеристика		Параметры схемы замещения, о.е	
			КПД, %	$cos\text{ц}_н$			$м_к$	$S_н$ %	R_1^I	R_2^{II}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Синхронная частота вращения 1500 об/мин										
1	АИР0100S4	2,2	75	0,70	22,5	84	2,2	5,2	0,058	0,054
2	АИРФ100Ь4	3,0	77	0,78	21,2	91	2,5	5,8	0,052	0,082
3	АИРФ112М4	4,0	80	0,80	24	126	2,5	4,6	0,052	0,012
4	АИРФ132S4	5,5	82	0,82	28	138	2,5	3,6	0,040	0,016
5	АИРФ132М4	7,5	85	0,78	64	185	2,5	3,5	0,032	0,029
6	АИРФ160Б4	11	86	0,86	22	305	2,5	4,4	0,038	0,051
7	АИРФ160М4	15	88	0,87	29	300	2,5	3,7	0,032	0,042
8	АИРФ180М4	18,5	89	0,88	38	295	2,5	2,9	0,022	0,034
9	АИРФ200М4	22	89,5	0,87	45	340	2,5	2,5	0,024	0,026
10	АИРФ200Ь4	30	90	0,87	55	350	2,5	2,5	0,026	0,030
11	АИРФ225М4	37	90,5	0,87	160	160	2,5	3,5	0,023	0,027
12	АИРФ250Б4	45	91	0,88	170	230	2,5	3,0	0,020	0,030
13	АИРФ250Б4	55	91,5	0,90	170	200	2,5	2,3	0,017	0,025
14	АИРФ250М4	75	92	0,86	170	250	2,5	2,5	0,015	0,021
15	АИРФ28084	90	92,5	0,84	210	250	2,2	4,2	0.022	0,014
16	АИРФ280М4	110	92,5	0,81	223	260	2,2	3,8	0,022	0,017
17	АИРФ31584	132	93	0,82	242	280	2,2	3,8	0,020	0,018
18	АИРФ315М4	160	93	0,87	257	310	2,2	3,6	0,017	0,016
19	АИРФ35554	200	93,5	0,87	330	300	2,2	3,5	0,014	0,012
20	АИРФ355М4	250	93,5	0,87	400	370	2,2	3,5	0,013	0,010
Синхронная частота вращения 1000 об/мин										
21	АИРФ100L6	1,5	65	0,80	12,8	118	2,5	5,8	0,088	0,072
22	АИРФ112М6	2,2	70	0,87	14,2	135	2,5	5,2	0,067	0,012
23	АИРФ112М6	3,0	72	0,87	12,2	186	2,5	4,8	0,085	0,062
24	АИРФ13286	4,0	78	0,88	16,1	262	2,5	4,6	0,074	0,061
25	АИРФ132М6	5,5	81	0,88	17,4	282	2,5	4,4	0,068	0,041
26	АИРФ16086	7,5	85	0,77	18	300	2,5	5,1	0,054	0,068
27	АИРФ160М6	11	86	0,76	20	310	2,5	4,3	0,043	0,058
28	АИРФ180М6	15	87,5	0,80	25	325	2,2	4,4	0,035	0,057
29	АИРФ200М6	18,5	88	0,81	35	360	2,5	3,5	0,030	0,038
30	АИРФ200Ь6	22	88,5	0,80	45	330	2,5	3,5	0,032	0,041
31	АИРФ225М6	30	89	0,85	150	140	2,5 '	3,5	0,029	0,030
32	АИРФ25086	37	89,5	0,84	165	150	2,5	3,5	0,026	0,024
33	АИРФ25056	45	90	0,87	160	180	2,5	2,5	0,029	0,024
34	АИРФ250М6	55	90,5	0,87	182	191	2,5	3,5	0,023	0,026
35	АИРФ280Я6	75	91	0,86	200	210	2,2	3,6	0,031	0,038
36	АИРФ280М6	90	91,5	0,88	270	230	2,2	3,6	0,034	0,031
37	АИРФ31586	110	92	0,87	292	291	2,2	3,6	0,036	0,039
38	АИРФ315М6	132	92,5	0,88	300	268	2,2	3,6	0,026	0,018
39	АИРФ35586	160	93	0,82	346	290	2,2	3,6	0.024	0,026
40	АИРФ355М6	200	93,5	0,88	400	302	2,2	2,8	0,026	0,028
Синхронная частота вращения 750 об/мин										
41	АИРФ160Б8	5,5	80	0,70	14	300	2,2	6,4	0,060	0,094
42	АИРФ160М8	7,5	82	0,70	16	290	2,2	5,5	0,053	0,079
43	АИРФ180М8	11	85	0,72	25	270	2,2	4,4	0,041	0,062
44	АИРФ200М8	15	86	0,70	28	360	2,2	3,5	0,040	0,048

45	АИРФ200Ь8	18,5	86,5	0,73	40	300	2,2	3,5	0,038	0,046
46	АИРФ225М8	22	87	0,82	140	102	2,2	4,5	0,039	0,043
47	АИРФ25088	30	88	0,81	155	125	2,2	4,0	0,033	0,034
48	АИРФ25088	37	89	0,80	155	148	2,2	3,5	0,031	0,031
49	АИРФ250М8	45	89,5	0,78	178	162	2,2	5,0	0,035	0,061
50	АИРФ28088	55	90	0,79	180	185	2,2	4,5	0,036	0,053
51	АИРФ280М8	75	90,5	0,80	221	217	2,2	4,5	0,036	0,052
53	АИРФ315М8	110	91,5	0,81	242	283	2,2	3,8	0,031	0,044
54	АИРФ35588	132	92	0,81	257	330	2,2	3,6	0,031	0,052
55	АИРФ355М8	160	92,5	0,87	330	310	2,2	3,5	0,034	0.050
Основные технические данные электродвигателей с фазным ротором; степень защиты IP23.										
Синхронная частота вращения 1500 об/мин.										
56	АИРНФ200	37	88,5	0,88	62	360	2,5.	3,0	0,029	0,035
57	АИРНФ200Ь	45	89	0,88	75	375	2,5	3,5	0,029	0,036
58	АИРНФ225	55	89,5	0,87	200	170	2,5	3,6	0,031	0,035
59	АИРНФ2508	75	90	0,88	250	180	2,5	4,5	0,028	0,039
60	АНРН0250S	90	90,5	0,87	260	220	2,5	4,0	0,021	0,031
61	АИРНФ250	110	91	0,90	260	250	2,5	3,5	0,022	0,031
62	АИРНФ2808	132	91,5	0,88	330	251	2,5	2,9	0,028	0,031
63	АИРНФ280	160	92	0,88	330	300	2,2	2,6	0,024	0,028
64	АИРНФ315S	200	92,5	0,89	396	312	2,2	2,5	0,022	0,026
65	АИРНФ315	250	93	0,90	425	360	2,2	2,5	0,022	0,025
66	АИРНФ3558	315	93,5	0,90	460	420	2,2	2,2	0,020	0,022
67	АИРНФ355	400	94	0,90	485	505	2,2	2,0	0,019	0,020
Синхронная частота вращения 1000 об/мин										
68	АИНФ200М	22	87,5	0,81	37	380	2,2	3,5	0,032	0,043
69	АИРНФ200Ь	30	88	0,82	46	375	2,2	4,0	0,032	0,042
70	АИРНФ225	37	88,5	0,86	180	140	2,2 '	4,0	0,032	0,038
71	АИРНФ2508	45	89	0,86	200	155	2,2	4,0	0,028	0,032
72	АИРНФ2508	55	89,5	0,88	185	190	2,2	3,5	0,024	0,027
73	АИРНФ250	75	90	0,85	200	250	2,2	3,0	0,022	0,025
74	АИРНФ2808	90	90,5	0,88	277	202	2,2	3,6	0,033	0,038
75	АИРНФ280	110	91	0,87	297	230	2,2	3,6	0,034	0,038
76	АИРНФ3	132	91,5	0,88	320	257	2 ">	3,0	0,026	0,029
77	АИРНФ3	160	92	0,88	352	291	2,2	3,0	0,024	0,024
78	АИРНФ355Ь	200	92,5	0,88	411	304	2,2	5	0,025	0,027
79	АИРНФ355	250	93	0,89	401	380	2,2	2,5	0,022	0,023
Синхронная частота вращения 750 об/мин										
80	АИРНФ200	18,5	85	0,78	30	380	2,2	4,5	0,046	0,054
81	АИРНФ2008	22	86	0,79	40	330	2,2 '	4,5	0,042	0,066
82	АИРНФ225	30	86,5	0,80	165	120	2,2	4,1	0,043	0,046
83	АНРН№250	37	87,5	0,80	190	115	2,2	5,5	0,044	0,047
84	АИРНФ250Б	45	88,5	0,82	190	140	2,2	4,0	0,036	0,040
85	АИРНФ250	55	89,5	0,83	185	190	2,2	3,5	0,029	0,031
86	АИРНФ280Ь	75	90	0,84	257	190	2,2	4,0	0,031	0,040
87	АИРНФ280	90	90,5	0,84	267	214	2,2	4,0	0,031	0,040
88	АИРНФ3	110	91	0,84	311	225	2,2	3,5	0,030	0,032
89	АИРНФ3	132	91,5	0,84	364	247	2,2	3,5	0,031	0,031
90	АИРНФ3558	160	92	0,86	353	285	2,2	2,7	0,024	0,026
91	АИРНФ355	.200	92,5	0,86	359	350	2,2	2,7	0,022	0,025

Приложение Ж
(справочное)

Основные технические данные электродвигателей постоянного тока серии 4П

№	Тип электродвигателя	Рн, кВт	1н. А	К.П.Д., %
1	2	3	4	5
Uн =220 В; $n_н$ = 3000 об/мин				
1	4П080А2	0,37	2,9	61,5
2	4П080А2	0.75	4,3	72,0
3	4П080В1	U	5,9	72.0
4	4П0100Sl	1,6	9,0	75,0
5	4П0100S2	2,2	12,5	79,0
6	4П0100L1	3,0	17,5	80.0
7	4П0112М2	5,5	24,5	83,0
Uн = 220 В; $n_н$ = 2200 об/мин				
8	4П080А2	0.25	1.8	58,0
9	4П080А2	0,55	2,8	70.0
10	4П080В1	0,75	4,2	67,0
11	4ПО100S1	1,1	5,1	74,0
12	4П0100S2	1,5	8,5	76,0
13	4ПО100L1	2,2	11.7	76,0
14	4П0112М2	4,0	21,4	79,0
Uн = 220 В; $n_н$ = 1500 об/мин				
15	4П080А2	0.37	2,1	61,5
16	4П080В2	0,55	2,9	66,0
17	4П0100S1	0,75	4.3	70,0
18	4П0100S2	1.1	5,9	75.0
19	4П0100Ll	1.5	8.7	74.0
20	4П0112М1	2,2	12.0	74,0
21	4П0112М2	3.0	18,4	74.0
Uн = 220 В; $n_н$ = 1000 об/мин				
22	4П080А2	0,25	1,4	58,0
23	4П080В1	0,37	2,1	65,0
24	4П0100S1	0,55	2,85	65,0
25	4П0100S2	0,75	4,25	66,0
26	4П0100Ll	1.1	5.25	68,0
27	4П0112М1	1,5	9,3	71,0
28	4ПОП2М2	2,2	13,3	70.0
Uн = 220 В; $n_н$ = 750 об/мин				
29	4П0100S1	0,37	1,95	60,5
30	4П0100S2	0,55	2,9	60,0
31	4П0100L1	0.75	4,2	67,0
32	4П0112М2	1,5	9,75	66,0
Uн =220 В; $n_н$ = 3000 об/мин				
33	4ПНМ132L04	3,5	16,5	74,0
34	4ПНМ112L04	5,3	21,2	83,0
35	4ПНМ160L04	6,3	26,9	82,0
36	4FIНМ200S04	9,0	36,1	86,0
37	4ПНМ132М04	10,6	44,8	84,0
38	4ПНМ180L04	11,0	47,8	83,0
39	4ПФМ200М04	22,0	78,4	85,5
40	4ПФМ200Б	45,0	216	86,0
41	4ПН225М	48.0	218	87,3
42	4ПФМ225М	55,0	287	87.6
43	4ПФМ225L	63,0	324	88.7
Uн = 220 В; $n_н$ = 2500 об/мин				
44	4ПНМ112L04	0.8	3,9	59,0
45	4FIНМ160L04	4.0	19,1	76,0
46	4I1НМ180L04	5,6	29,4	79,0
47	4ПНМ180S04	7.1	33,6	80,0

48	4F1H225S	16,0	76.0	80,5
49	4ПН225М	20,0	94,6	83.0
50	4FIH225S	22,0	112	83,5
51	4ПН225L	32,0	158	85,0
52	4ПН250L	40,0	202	85,0
53	4ПН250М	48,0	210	85,5
54	4ПФМ250М	55,0	274	87,6
55	4ПФМ250S	75,0	371	88,5
56	4ПФМ250L	90,0	486	88,7
Uн =220 В; $n_н$ = 1500 об/мин				
57	4ПНМ112М04	2,5	11,5	73,0
58	4ПНМ132М04	4,0	22.2	79,0
59	4ПНМ132L04	5,5	29,4	80.0
60	4ПОМ200S	14,0	73,5	88,0
61	4ПНМ180L04	15,0	84,6	86,0
62	4ПОМ200М	17,0	92,4	89,0
63	4ПНМ200L04	18,5	102	86,0
64	4ПНМ225L04	22.0	128	87.5
65	4ПНМ225М	30.0	164	88.5
66	4ПН280S	34.0	178	84,5
67	4ПН225S	37,0	188	86,5
68	4ПФМ225Б	45.0	217	86,8
69	4ПФМ225М	55,0	287	87,6
70	4ПН250S	60.0	356	87,1
71	4ПФМ225Ь	63,0	370	88,7
72	4ПФМ250S	67,0	382	88,2
73	4ПН250М	71.0	380	89.5
74	4ПФМ250М	80,0	405	88,5
75	4ПН280Б	110	508	89.0
76	4ПФМ280S	125	632	87,0
77	4ПФМ280М	140	784	88,4
Uн =220 В; $n_н$ = 1000 об/мин				
78	4ПНМ132М04	2,5	1,6	71,0
79	4I1НМ132L04	3.15	2,3	74,0
80	4ПНМ180L04	11,0	61,4	83,0
81	4ПНМ200L04	16,0	78,0	86,0
82	4ПФМ200М	22,0	132	85,5
83	4ПФМ225S	26,5	146	83,0
84	4ПФМ225L	45,0	219	85,0
85	4ПН250М	48,0	236	85,5
86	4ПФМ250М	55,0	286	87.5
87	4IIH280S	75,0	385	88,5
88	4ПФМ280S	90.0	480	88,0
89	4ПФМ280L	125	532	88,5
Uн =220 В; $n_н$ = 750 об/мин				
90	4ПНМ160М04	3,0	18,2	75.0
91	4ПОМ200S	6,0	39,5	81,5
92	4ПНМ180L04	7,1	48,2	80,0
93	4ПН225S	16,0	63.0	SO,5
94	4ПФМ200М	18.5	104	82,5
95	4ПФМ2258	21,0	131	80,1
96	4ПФМ225L	22.0	136	82,0
97	4ПФМ225М	27.0	164	82,0
98	4ПН250М	32.0	174	84,0
99	4ПФМ250L	33,5	180	82,3
100	4ПФМ250М	42,0	222	84.5
101	4ПН280S	45,0	245	87.0
102	4ПН280М	55,0	286	87.5
103	4ПФМ280М	71,0	346	88,0
Uн =220 В; $n_н$ = 600 об/мин				
104	4ПН225S	12,5	78	79,5
105	4ПН225М	15,0	94	79,0
106	4ПФМ225S	18,0	106	78,0

107	4ПФМ225М	20,0	128	79,0
108	4ПН225250М	24,0	134	82,0
108	4ПН225250М	24,0	134	82,0
109	4ПФМ225L	26,5	140	79,5
110	4ПН280S	34,0	172	84,5
111	4ПН280М	37,0	184	85,5
112	4ПФМ280S	45,0	223	87,5
113	4ПФМ280М	55,0	287	87.5
U_H =220 В; $n_н$ = 500 об/мин				
114	4ПН225S	8.5	48	77,0
115	4ПФМ225L	20,0	106	75,0
116	4ПФМ250L	36,0	174	85,0
117	4ПФМ280L	55.0	288	88,0

Список литературы

1. Электрический привод : учебник / Георгий Борисович Онищенко Г. Б. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с. : ил. - Библиогр.: с. 307.
2. Красовский, А.Б. Основы электропривода [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Б. Красовский. — Электрон. дан. — Москва : , 2015. — 405 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/106384
3. Красовский, А.Б. Расчет характеристик электропривода [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Б. Красовский. — Электрон. дан. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 36 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/52245 Бастрон А.В. и др. Электропривод. Лабораторный практикум. Красноярск.: КрасГАУ, 2005, 228 с.
4. Маругин А.П. Основы электропривода [Текст] : учебно-методические указания к расчетным заданиям для студентов всех форм обучения по направлению подготовки бакалавриата 15.03.02 - "Технологические машины и оборудование" / А. П. Маругин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург : УГГУ, 2018. - 26 с.
5. ГОСТ 8.417-81. Единицы физических величин: М.: Изд-во стандартов, 1981, 40 с.
6. ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам: Минск.: ИПК Изд-во стандартов, 1998, 36 с.
7. Двигатели постоянного тока серии 4П /Сводный отраслевой каталог Информэлектро. М.: Информэлектро, 1993, 28 с.
8. Епифанов А.П. Основы электропривода, СПб.: Лань, 2008. 191 с.
9. Епифанов А.П., Гущинский А.Г., Малайчук Л.М. Электропривод в сельском хозяйстве, СП.б.: Лань, 2010. 223 с.
10. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В, Электропривод. Энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 202 с.
11. Коломиец А.П. и др. Электропривод и электрооборудование, М.: КолосС, 2008. 328 с.
12. Левин А.А. Самоучитель работы на компьютере. 5 изд. М.: Нолидж, 1999. 617 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Академия, 2007. 361 с.
14. Рычкова Л.П. Электропривод. Примеры решения типовых задач: Учебное пособие рекомендованное УМО.- Иркутск.: ИрГСХА, 2004, 102 с.
15. Унифицированная серия асинхронных двигателей ИНТЕР- ЭЛЕКТРО./ Под редакцией доктора технических наук В.И. Радина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 67 с.
16. Шичков Л.П. Электрический привод, М.: КолосС, 2006. 279.