В. Т. Трапезников

Электрический привод горных машин

конспект лекций

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 00899356C4B8E7194321D0149160B2398C
Владелец: Зубов Владимир Владимирович
Действителен: с 26.06.2024 до 19.09.2025

Екатеринбург 2022

ВВЕДЕНИЕ

В течение продолжительного периода времени для привода общепромышленных механизмов и транспортных машин использовались паровые машины и двигатели внутреннего сгорания. Основными недостатками этих двигателей являются большие габариты и вес, сложность в обслуживании, невозможность использования индивидуального и взамосвязанного привода и низкий КПД.

Несомненные преимущества использования электрической энергии перед другими привело к тому, что основным типом двигателя в промышленности в настоящее время является электрический двигатель. Работы по электрификации промышленных предприятий в России начались в 20-е годы прошлого столетия в соответствии с планом ГОЭЛРО. За 15 лет было введено в строй районных электростанций общей мощностью 4,5 миллионов кВт; в 1970 г. мощность электростанций составляла около 120 миллионов кВт.

Из основных преимуществ электрических двигателей перед другими следует отметить их высокий КПД, который составляет $98 \div 99{,}5$ % для самых мощных двигателей, для двигателей мощностью 10 Вт он составляет $20 \div 40$ %; КПД паровой машины не превышает 8 %, а мощной паровой турбины – 30 %.

Возможность передачи электрической энергии на большие расстояния с малыми потерями, удобство распределения её между потребителями, простота в обслуживании и управлении обусловили повсеместное использование электрических двигателей во всех отраслях промышленного производства.

Внедрение электропривода оказало существенное влияние на конструкцию рабочих машин. Прежде всего, это привело к отказу от группового привода, в котором от одного двигателя с помощью трансмиссии движение получала

группа рабочих машин. Это позволило существенно упростить управление приводом, повысить безопасность работ, а также – вести технологический процесс (например, обработку детали) на оптимальных скоростях.

Основное назначение электропривода – приводить в движение исполнительный орган рабочей машины. Однако современный электропривод выполняет более сложную задачу: оптимальное управление технологическим процессом; пуск и торможение с заданным ускорением и замедлением; плавное изменение скорости в определенном диапазоне регулирования; преодоление кратковременных перегрузок и защиту электродвигателя от аварийных режимов работы.

Выполнение перечисленных требований осуществляется с помощью использования специальных двигателей, получающих питание от преобразователей различного типа. Из специальных двигателей, используемых в настоящее время в промышленности, следует отметить шаговые двигатели, линейные асинхронные двигатели, двигатели постоянного тока с постоянными магнитами, вентильные двигатели и т. д.

Преобразователи электрической энергии можно разделить на электромашинные и вентильные. Вентильные (тиристорные и транзисторные) преобразователи являются наиболее перспективными, поскольку обладают большим быстродействием, меньшими габаритами и весом, более высоким КПД по сравнению с электромашинными. Однако наряду с достоинствами вентильный привод обладает рядом недостатков, основными из которых являются сравнительно высокая стоимость, недостаточная в производственных условиях (температура, вибрация, наличие агрессивной среды) надежность, чувствительность к перегрузкам по току, отрицательное влияние преобразователей на сеть и низкий коэффициент мощности. Создание достаточно надежного и экономически целесообразного плавно-регулируемого электропривода остается актуальной задачей электротехнической промышленности до настоящего времени.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

1.1. Определение понятия “электропривод”

Одним из основных элементов производственного агрегата является привод, назначение которого – приводить в движение рабочий орган машины. Привод состоит из двигателя и передаточного механизма (редуктора). На различных этапах развития производительных сил использовались ветряные и водяные двигатели, паровые машины, двигатели внутреннего сгорания и электрические двигатели. Несравненные преимущества электрической энергии привели к тому, что основным видом привода в настоящее время является электрический привод, или электропривод.

Электроприводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов, состоящее из преобразовательного, электродвигательного, передаточного и управляющих устройств. Преобразовательное и передаточное устройства в отдельных случаях могут отсутствовать. В зависимости от способа распределения механической энергии от электродвигателя к исполнительным органам производственных машин все электроприводы делятся на три основных типа: групповой, индивидуальный и взаимосвязанный. Групповым электроприводом называется такой электропривод, в котором исполнительные органы нескольких энергетических машинных устройств приводятся в движение одним электродвигателем. Необходимым элементом такого привода является трансмиссия, с помощью которой движение передается на группу рабочих машин, поэтому такой привод иногда называют трансмиссионным. Вследствие своего технического несовершенства (сложность кинематической цепи, громоздкость, низкий КПД и т. д.) этот тип привода в настоящее время почти не применяется. Он уступил место индивидуальному и взаимосвязанному электроприводам.

Индивидуальный электропривод – это такой электропривод, в котором исполнительные органы одного энергетического машинного устройства приводятся в движение одним электродвигателем. Индивидуальный привод нашел широкое применение в простых установках небольшой мощности, таких, как сверлильный станок, простейший металлообрабатывающий станок, насосы, вентиляторы, лебедки и т.д. Обычно для данного типа привода применяются двигатели общепромышленного назначения, однако иногда применяются специальные двигатели (фланцевые или встроенные), такой привод называется индивидуальным. Индивидуальный электропривод позволяет существенно упростить кинематическую схему рабочей машины, уменьшить ее габариты, вес, увеличить надежность ее работы, КПД и улучшить качество продукции за счет ведения технологического процесса на оптимальных режимах. В настоящее время это самый распространенный тип привода.

Взаимосвязанным электроприводом называется такой электропривод, в котором каждый исполнительный орган энергетического машинного устройства приводится в движение одним или несколькими электродвигателями. Такие электроприводы применяются в сложных металлообрабатывающих станках, прокатных станах, экскаваторах, буровых установках. Данный тип привода включает в себя две интерпретации: во – первых, это привод для создания движения исполнительного органа по различным координатам (например, в сложных металлообрабатывающих станках существует механизм резания и механизм подачи; в экскаваторах – механизмы напора, подъема и поворота; в буровых станках – механизм вращателя и механизм подачи бурового инструмента на забой скважины); во – вторых, это привод, в котором один и тот же исполнительный орган приводится в движение несколькими двигателями (например, в механизмах поворота мощных экскаваторов, конвейеров большой протяженности и т. д.).

Кроме приведенной, существуют следующие классификации типов электроприводов:

1) по видам движения исполнительных органов (вращательного, поступательного, непрерывного и дискретного движения);

2) по видам передаточных устройств (редукторный, безредукторный);

3) по роду тока (постоянного и переменного тока);

4) по видам преобразовательных устройств (электромашинные, дроссельные, вентильные и т.д.);

5) по степени управления (односкоростные, многоскоростные, полноуправляемые и неполноуправляемые);

6) по уровню автоматизации (неавтоматизированный, автоматизированный, автоматический);

7) по видам усилительных элементов (с релейно-контакторным управлением, с электромашинным управлением, с бесконтактным управлением).

Поскольку питание электроустановок осуществляется от сети трехфазного переменного тока с постоянными значениями частоты и амплитуды напряжения, то для обеспечения необходимых статических и динамических свойств электроприводов необходимо применять преобразовательные устройства, которые преобразуют переменное напряжение сети в постоянное или также в переменное, но другой частоты и амплитуды. В настоящее время в промышленности используются электромашинные преобразователи (система генератор – двигатель), дроссельные преобразователи постоянного и переменного тока, вентильные (тиристорные и транзисторные) .

Для обеспечения плавного пуска и торможения привода, регулирования скорости, а также для защиты двигателя от ненормальных режимов работы служит система управления электроприводом. Система управления содержит датчики, командоаппараты и реле защиты и управления.

В общем случае электропривод содержит все четыре указанных устройства: преобразователь, двигатель, редуктор и систему управления, однако в отдельных установках могут отсутствовать преобразователь и передаточное устройство, а система управления предельно упрощается, например, в электроприводе маслонасоса трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором управляется с помощью кнопочного поста и магнитного пускателя.

1.2. Основные направления в развитии электропривода

Несомненные преимущества электропривода по сравнению с другими видами приводов (высокая надежность, большой срок службы, небольшие габариты и вес, простота управления, возможность полной механизации и автоматизации производственного процесса, широкий диапазон регулирования скорости и др.) привели к тому, что электропривод занял главенствующее место во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве, строительстве и в быту. Развитие электропривода обусловливает новые области его применения в народном хозяйстве; основной тенденцией развития электропривода можно считать расширение области его применения.

Следующим направлением в совершенствовании электропривода является отказ от группового и развитие индивидуального и многосвязанного электропривода, при этом существенно упрощается кинематическая схема, уменьшаются габариты и вес промышленного агрегата, увеличивается КПД установки и улучшается качество продукции за счет работы на оптимальных (по технологическим требованиям) скоростях вращения вала рабочей машины. Дальнейшее развитие индивидуального электропривода приводит к созданию электроорудия, когда двигатель и исполнительный орган машины

представляют единое целое. Примером электроорудия может служить двигатель-ролик, применяемый в металлургической промышленности для перемещения слитков металла.

Расширение области применения электроприводов требует повышения его надежности, экономичности, снижения габаритов и веса, повышения КПД; совершенствуются и создаются новые электрические двигатели (шаговые, линейные и вентильные). Разработана новая серия двигателей постоянного тока с гладким якорем, имеющих восьмикратную перегрузочную способность и высокое быстродействие.

Современная промышленность требует от приводов большого диапазона скоростей от нескольких оборотов в минуту (лентопротяжные механизмы регистрирующих приборов) до сотен тысяч оборотов в минуту (центрифуги).

Значительное количество промышленных установок требует плавного регулирования угловой скорости с высокой степенью точности и в большом диапазоне, в связи с этим стоит задача увеличения диапазона регулирования угловой скорости, что позволит упростить конструкцию рабочей машины, повысить ее производительность и качество продукции. Здесь намечено два пути развития: электродвигатель постоянного тока, получающий питание от управляемого статического преобразователя, и электропривод с бесколлекторным двигателем с питанием от статического преобразователя частоты. В настоящее время разработаны и широко применяются в практике преобразователи постоянного и переменного тока, построенные на полупроводниковых приборах – тиристорах.

Наиболее прогрессивным путем развития электропривода в настоящее время является использование автоматизированного электропривода, представляющего собой сложную электромеханическую систему, которая может управлять механизмами огромной мощности (до нескольких десятков тысяч киловатт). Системы управления таких приводов часто содержат ЭВМ,

что позволяет увеличить производительность, улучшить качество продукции и сократить обслуживающий персонал.

В соответствии с требованием промышленной практики развитие электропривода идет как в сторону увеличения единичной мощности привода, так и в сторону создания карликовых приводов. Наряду с двигателями в десятки тысяч киловатт (для привода мощных насосов, вентиляторов аэродинамических труб и т.д.) используются двигатели мощностью до 1 Вт.

Большой вклад в развитие электропривода внесли русские и советские ученые. В 1834 г. русский академик Якоби Б. С. построил и испытал первый электродвигатель постоянного тока, основанный на принципе вращательного движения и предназначенный для практической работы. Якоби Б. С. разработал конструкцию коллектора, которая сохранилась почти в неизмененном виде до наших дней. Якоби Б. С. занимался также вопросами, касавшимися эксплуатационных характеристик электрической машины, и в особенности ее КПД. Выявилось, что работа электродвигателя неразрывно связана с условиями его питания. Чтобы проверить свой электродвигатель в работе, Якоби Б. С. применил его для движения судов. Первый электроход начал плавать по Неве в 1838 г. Двигатель развивал мощность около 1 л. с., питание осуществлялось от гальванических батарей; электроход вмещал 12 – 14 человек и развивал скорость около 4 км/ч против течения. Привод, предложенный Якоби Б. С., не получил применения в промышленности из-за несовершенства электродвигателя и неэкономичности источника питания.

Первую установку переменного тока демонстрировал в 1878 г. Яблочков П. Н. для питания изобретенных им “свечей Яблочкова”. Созданный Яблочковым П. Н. генератор переменного тока был прообразом современной синхронной машины. Генератор Яблочкова П. Н. получил широкое применение и явился толчком для изучения явлений в цепях переменного тока. Инженер Доливо-Добровольский в 1889 – 1891 годах предложил и

обосновал несомненные преимущества системы трехфазного переменного тока; им в 1889 г. был изобретен трехфазный асинхронный двигатель, который получил широкое применение в промышленных странах Европы и Америки в конце прошлого века.

Мощность электродвигателей по отношению к общей мощности установленных двигателей составляла в 1890 г. 5 %, в 1927 г. 75 %, в настоящее время эта цифра практически равна 100 %.

Развитие электропривода в России началось после того, как в 1920 г. на VIII съезде Советов был принят план ГОЭЛРО. Большой вклад в теорию электропривода внесли советские ученые. Первым трудом по теории и практике электропривода явилась книга проф. Ринкевича С. А. “Электрическое распределение механической энергии”. Дальнейшее развитие теории электропривода нашло свое отражение в работе Попова В. К. “Применение электродвигателей в промышленности”, а также в трудах Аронова Р. Л., Голована А. Т., Морозова Д. П., Андреева В. П., Чиликина М. Г., Ключева В. И., Сандлера А. С. и других.

3. Особенности эксплуатации электрических двигателей

Высокие технико-экономические показатели электрических машин, удобство преобразования и распределения электрической энергии по потребителям, возможность её передачи на большие расстояния, простота в управлении и обслуживании обусловило их повсеместное применение в промышленности, сельском хозяйстве и быту. Электрооборудование, в том числе и двигатели, должны надежно работать в сложных условиях: резкие перепады температуры, высокая влажность и запыленность воздуха, наличие химически агрессивных и взрывоопасных сред. При работе электрических двигателей в химически агрессивной и взрывоопасной среде (морские суда,

горные выработки, предприятия химической промышленности и т. д.) вредному влиянию подвергается не только изоляция обмоток двигателей, но и корпуса и валы двигателей, а также коробки передач и другое оборудование. Поэтому для бесперебойной работы электропривода необходимо уже при проектировании учитывать условия его эксплуатации и выбирать тип его исполнения, исходя из свойств окружающей среды. Например, для привода погружных насосов необходимо применять электродвигатели герметичного исполнения, для работы в жарких и пыльных помещениях – двигатели с принудительной вентиляцией. Необходимо учитывать, что при выборе типа электрооборудования необходимо исходить не только из технических условий его эксплуатации, но также принимать во внимание и экономические показатели. Применение электрооборудования, имеющего большую степень защиты от окружающей среды, чем это требуется по объективным условиям, приводит к увеличению габаритов и веса установки, а также к росту капитальных затрат.

Все электроаппараты подразделяются по степени их защиты от окружающей среды, конструктивно они имеют оболочки, предохраняющие обслуживающий персонал от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями и попадания внутрь посторонних тел и воды. Степень защиты обозначается латинскими буквами IP и двумя цифрами, первая из которых (от 0 до 6) указывает на степень защиты персонала и от попадания твердых тел, а вторая (от 0 до 8) – степень защиты от проникновения влаги. Например, электродвигатели, работающие в пыльных и влажных помещениях, имеют исполнение IP54, а на морских судах – IP56; у погружаемых в воду электродвигателей исполнение IP57.

По способу охлаждения двигатели обозначают латинскими буквами IC с последующим кодом характеристики цепи охлаждения. Код состоит из прописной буквы, обозначающий вид хладоагента (H – водород, F – фреон, W – вода и т. д.), буква опускается, если охлаждение производится воздухом.

Две последние цифры означают: первая (от 0 до 9) – тип и цепи для циркуляции хладоагента, вторая (от 0 до 9) – способ его перемещения. Например, IC01 – с самовентиляцией (лопатки вентилятора находятся на валу); IC06 – с пристроенным вентилятором с собственным электродвигателем.

По исполнению электрические аппараты различают также в зависимости от климатических факторов и категории размещения при эксплуатации. Виды климатического исполнения обозначаются буквами: У – умеренный; Х – холодный; Т – тропический; О – для всех климатических районов на суше; М – с умеренно холодным морским климатом; ОМ – для неограниченного района плавания; В – на суше и на море для всех макроклиматических районов.

Категории размещения разбиты на пять групп, обозначаемых цифрами от 1 до 5. Категории 1 соответствуют двигатели, работающие на открытом воздухе; 2, 3, 4, и 5 – в помещениях, различающихся температурой и влажностью среды, условиями вентиляции и отопления помещения.

Кроме того, электродвигатели различают по роду тока (постоянного тока и переменного тока), по напряжению (до 1000 В и свыше 1000 В), по мощности (мелкие, малой мощности, средние, крупные и мощные), по скорости вращения (тихоходные до 250 об/мин, средней скорости до 1000 об/мин и быстроходные – более 1000 об/мин); по классу вибрации, уровню шума и другим признакам.

Основные требования, предъявляемые к современному приводу промышленных механизмов, можно сформулировать следующим образом. Привод должен обеспечивать надежную работу всех механизмов рабочей машины. Привод должен быть индивидуальным или многодвигательным и обеспечивать высокий диапазон и плавность регулирования скорости и иметь достаточное быстродействие и перегрузочную способность для обеспечения устойчивой работы механизма при кратковременных перегрузках.

Управление приводом должно быть безопасно в обслуживании, просто в исполнении и надежно в работе.

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятию “электропривод”.
2. Перечислить типы электроприводов, отличающихся по способу передачи механической энергии от двигателя производственной машины.
3. Назвать основные направления развития электропривода.
4. Назвать диапазон мощностей электродвигателей, используемых в промышленности.
5. Перечислить пути развития электропривода.
6. Назвать отечественных ученых, внёсших существенный вклад в развитие электропривода.

2. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Основное уравнение движения электропривода

Основной функцией электропривода является приведение в движение рабочего органа производственной машины. Для самого электродвигателя направление вращения не играет существенной роли; другое дело – производственная машина. Конвейерная лента, центробежный насос, валки дробилки, подъемный сосуд (при выемке полезного ископаемого) и т. д. должны иметь строго определенное направление движения. Ввиду этого одно из возможных направлений вращения вала электродвигателя следует считать за положительное, это же направление принимают за положительное и для других величин, характеризующих состояние электропривода (угол поворота, момент двигателя и т. д.). При совпадении направления момента и скорости вращения вала электрическая машина работает в двигательном режиме (потребляет из сети электрическую энергию и преобразует ее в механическую энергию на валу двигателя). Если же знаки момента и скорости не совпадают, то электрическая машина работает в тормозном режиме, т. е. потребляет механическую энергию с вала и преобразует ее в электрическую энергию.

Движение исполнительного органа производственной машины происходит под воздействием двух моментов: момента, развиваемого двигателем, и момента сопротивления, который возникает при взаимодействии исполнительного органа производственной машины с обрабатываемым материалом (рудой, углем, породой, металлом и т. д.).

По своему характеру моменты статического сопротивления бывают активными и реактивными. Активные моменты сопротивления вызываются потенциальными силами (силами веса, упругих деформаций при растяжении,

сжатии и кручении). Направление активного момента статического сопротивления не зависит от направления движения привода. Реактивный момент статического сопротивления вызывается силами трения и пластических (неупругих) деформаций; он всегда направлен навстречу движению. Таким образом, при изменении направления движения исполнительного органа рабочей машины реактивный момент меняет свое направление.

Исследование закона движения исполнительного органа машины производят на основе решения уравнения движения. Основное уравнение движения электропривода может быть получено на основе законов теоретической механики. Например, при поступательном движении исполнительного органа рабочей машины можно воспользоваться теоремой об изменении количества движения: производная по времени от количества движения равна сумме внешних сил, действующих на систему:

$$\frac{d}{dt}\left(m\bar{v}\right)=\sum\overline{F}, \qquad (2.1)$$

где m – масса поступательно движущихся элементов, кг;

v – скорость движения, м/с;

$\sum\overline{F}=\overline{F}-\overline{F_{\text{ñ}}}$ – сумма сил, действующих на систему (исполнительный орган рабочей машины);

$\overline{F}$ – движущая сила, Н;

$\overline{F_{\text{ñ}}}$ – сила сопротивления движению, Н.

При постоянной массе выражение (2.1) принимает следующий вид:

$$\overline{F}-\overline{F_{\text{ñ}}}=m\frac{d\bar{v}}{dt}. \qquad (2.2)$$

Выражение (2.2) называют основным уравнением привода при поступательном движении. Если направления движения и сил совпадают, то знаки векторов в выражении (2.2) опускают:

$$F - F_{\text{с}} = m\frac{dv}{dt}. \qquad (2.3)$$

Более характерным для электропривода является вращательное движение. Основное уравнение при вращательном движении исполнительного органа может быть получено на основании теоремы об изменении момента количества движения; производная по времени от момента количества движения равна сумме моментов, действующих на систему:

$$\frac{dL}{dt} = \sum \overline{M}, \qquad (2.4)$$

где $L = J \cdot \omega$ – момент количества движения, Н·м·с;

$\sum \overline{M} = \overline{M} - \overline{M_{\text{с}}}$ – суммарный момент, действующий на систему, Н·м;

$\overline{M}$ – движущий момент, Н·м;

$\overline{M_{\text{с}}}$ – момент сопротивления, Н·м;

J – момент инерции исполнительного органа, кг·м²;

ω – угловая скорость вращения исполнительного органа, рад/с.

При постоянном моменте инерции $J = \text{const}$ выражение (2.4) принимает следующий вид:

$$\overline{M} - \overline{M_{\text{с}}} = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.5)$$

Уравнение (2.5) называют основным уравнением при вращательном движении привода. Если направления моментов и угловой скорости вращения совпадают, то знаки векторов в выражении, (2.5) опускают:

$$M - M_{\text{с}} = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.6)$$

Уравнение (2.6) может служить для анализа режима работы привода. Левая часть уравнения (2.6) представляет избыточный момент, а правая часть - динамический момент, направление которого всегда совпадает с направлением ускорения привода. В зависимости от знака динамического момента различают следующие режимы работы:

1. $M - M_{\text{ñ}} > 0;\ J\dfrac{d\omega}{dt} > 0 -$ ускорение.

2. $M - M_{\text{ñ}} < 0;\ J\dfrac{d\omega}{dt} < 0;\ d\omega < 0 -$ замедление.

3. $M - M_{\text{ñ}} = 0;\ J\dfrac{d\omega}{dt} = 0;\ d\omega = 0,\ \omega = \text{const} -$ установившийся режим работы привода.

В уравнение (2.6) входит момент инерции исполнительного органа машины J. Под моментом инерции тела относительно оси, проходящей через центр тяжести, понимают сумму произведений элементарных масс на квадрат их расстояния до оси вращения 0, взятую для всей массы тела $m_{\text{ï}}$:

$$J_0 = \sum m_i r_i^2 . \qquad (2.7)$$

Для тела с непрерывным распределением масс:

$$J_0 = \int_0^{m_{\text{ï}}} r^2 dm . \qquad (2.8)$$

Если ось вращения A не проходит через центр тяжести, то момент инерции определяют из выражения:

$$J_A = J_0 + m_{\text{ï}} l^2, \qquad (2.9)$$

где $J_A -$ момент инерции относительно оси *A;*

$J_0 -$ момент инерции относительно центра тяжести 0;

$m_{\text{ï}} -$ полная масса тела;

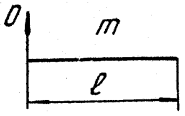
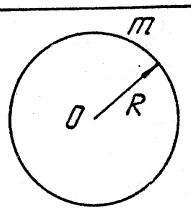
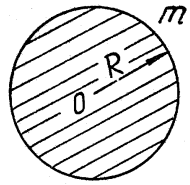
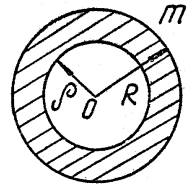
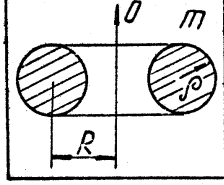
$l -$ расстояние между осями 0 и A .

Значение моментов инерции некоторых тел с равномерным распределением масс приведено в табл. 2.1. В каталогах на электродвигатели и справочниках иногда приводят значения не моментов инерции, а значения маховых моментов GD^2, кгс·м^2 (G - вес ротора или якоря, D - диаметр инерции). Переход от махового момента к моменту инерции производят по выражению:

$$J = \frac{GD^2}{4} . \qquad (2.10)$$

Таблица 2.1

Значения моментов инерции некоторых тел

Эскиз	Наименование	Момент инерции
	Тонкий стержень	$J_0 = \frac{1}{3} m\ell^2$
	Обруч	$J_0 = mR^2$
	Цилиндр	$J_0 = \frac{1}{2} mR^2$
	Полый цилиндр	$J_0 = \frac{1}{2} m(R^2+\rho^2)$
	Тор	$J_0 = m(R^2+\frac{3}{4}\rho^2)$

Момент двигателя и момент статического сопротивления могут иметь различные направления по отношению к угловой скорости вращения вала, для которого написано основное уравнение движения. В основном уравнении движения перед моментом ставится знак $(+)$, если момент совпадает с угловой скоростью, и ставится знак $(-)$, если момент направлен навстречу угловой скорости. Исходя из этого правила знаков, основное уравнение движения привода для всех режимов работы записывается следующим образом:

$$\pm M \pm M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.11)$$

Рассмотрим работу привода при поступательном движении исполнительного органа рабочей машины. Если действующая сила и перемещение совпадают по направлению, то дифференциал работы равен:

$$dA = F \cdot dS \qquad (2.12)$$

или с учетом выражения (2.3):

$$dA = F_{\text{с}} dS + m \frac{dv}{dt} \cdot dS. \qquad (2.13)$$

Первая составляющая правой части выражения (2.13) представляет дифференциал работы сил статических, вторая составляющая – дифференциал работы сил динамических. При $F_{\text{с}} = \text{const}$ после интегрирования (2.13) получим:

$$A = F_{\text{с}}(S_2 - S_1) + \frac{1}{2} m\left(v_2^2 - v_1^2\right), \qquad (2.14)$$

т. е. работа привода равна изменению потенциальной $F_{\text{с}}(S_2 - S_1)$ и кинетической $\frac{1}{2} m\left(v_2^2 - v_1^2\right)$ энергии системы.

При вращательном движении исполнительного органа дифференциал работы равен:

$$dA = Md\varphi . \qquad (2.15)$$

или с учетом выражения (2.6)

$$dA = M_{\text{ñ}} d\varphi + J\frac{d\omega}{dt}d\varphi . \qquad (2.16)$$

После интегрирования (2.16) при постоянном $M_{\text{ñ}}$ получим:

$$A = M_{\text{ñ}}(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{1}{2}J\left(\omega_2^2 - \omega_1^2\right) . \qquad (2.17)$$

Мощность определяется количеством работы, совершаемой приводом в единицу времени:

$$P = \frac{dA}{dt} . \qquad (2.18)$$

Для поступательного движения:

$$P = F\frac{dS}{dt} = Fv . \qquad (2.19)$$

Для вращательного движения:

$$P = M\frac{d\varphi}{dt} = M\omega . \qquad (2.20)$$

Здесь A – работа привода, Дж;

S – перемещение исполнительного органа, м;

S_1 – начальное положение исполнительного органа, м;

S_2 – конечное положение исполнительного органа, м;

v – скорость движения исполнительного органа, м/с;

v_1 – начальная скорость исполнительного органа, м/с;

v_2 – конечная скорость исполнительного органа, м/с;

m – масса исполнительного органа, кг;

φ – угол поворота исполнительного органа;

P – мощность привода, Вт.

Таким образом, основное уравнение движения электропривода может быть использовано для анализа характера режима работы (ускорение, замедление, установившийся режим работы). Кроме того, интегрируя основное уравнение движения электропривода, можно получить зависимости угловой скорости вращения от времени, для чего необходимо знать функции $M(\omega)$ и $M_{\text{с}}(\omega)$, т. е. механические характеристики электродвигателя и рабочей машины.

2.2. Механические характеристики рабочих механизмов

При расчетах и проектировании электроприводов в первую очередь необходимо выявить соответствие механических свойств электрического двигателя и производственной машины как в установившихся, так и в переходных режимах. Поэтому для правильного проектирования и экономичной эксплуатации привода необходимо предварительно изучить эти свойства производственных машин. Свойства производственных машин в установившемся режиме работы описываются их механическими характеристиками. Механическая характеристика производственной машины - это зависимость между скоростью вращения вала и моментом статического сопротивления, развиваемого машиной: $\omega = f(M_{\text{с}})$. Обратная зависимость $M_{\text{с}} = f(\omega)$ также является механической характеристикой производственной машины. Механические характеристики производственных машин обладают большим разнообразием форм и часто представляются графическим способом. Однако при расчетах переходных процессов необходимо иметь аналитическую зависимость механической характеристики. Для этой цели чаще всего используют эмпирическую характеристику вида:

$$M_{\text{с}} = M_0 + \left(M_{\text{ñí}} - M_0\right)\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{í}}}\right)^x, \qquad (2.21)$$

где $M_{\text{ñ}}$ – полный момент сопротивления производственного механизма;

M_0 – момент сопротивления при работе без нагрузки;

$M_{\text{ñí}}$ – момент сопротивления при номинальной скорости вращения вала

машины;

$\omega_{\text{í}}$ – номинальное значение угловой скорости вращения вала машины;

ω – текущее значение угловой скорости вращения вала машины:

x – показатель степени.

Приведенное выражение позволяет разделить производственные механизмы на несколько основных групп:

1. Механические характеристики с постоянным моментом статического сопротивления. В этом случае $x = 0$. Такой механической характеристикой обладают подъемные механизмы, поршневые насосы при неизменной высоте подачи, конвейеры с постоянной массой передвигаемого груза; сюда же можно отнести все механизмы, у которых основным моментом сопротивления является момент трения.

2. Механические характеристики с линейно возрастающим моментом статического сопротивления. В этом случае $x = 1$. Такой характеристикой обладает привод генератора постоянного тока с неизменным возбуждением и постоянным сопротивлением нагрузки.

3. Механическая характеристика с моментом статического сопротивления, изменяющимся по параболическому закону. В этом случае $x = 2$. Такие характеристики иногда называют вентиляторными. К

механизмам, обладающим такими характеристиками, относятся центробежные вентиляторы, компрессоры, гребные винты и т. д.

4. Механические характеристики с нелинейно-ниспадающим моментом статического сопротивления ($x = -1$). Момент сопротивления и угловая скорость обратно пропорциональны, а мощность, потребляемая механизмом, остается примерно постоянной. Такой характеристикой обладают металлообрабатывающие станки. Рассмотренные механические характеристики представлены на рис. 2.1.

Необходимо отметить, что показатель степени x может принимать не только целые, но и любые промежуточные значения. Таким образом, приведенные механические характеристики не исчерпывают все возможные в практике случаи, но дают представление о наиболее типичных механических характеристиках производственных машин. Следует также отметить, что момент статического сопротивления производственных машин может быть функцией не только угловой скорости, но и пути (угла поворота вала машины) и времени. В этом случае даже при постоянной скорости вращения величина момента статического сопротивления будет изменяться, а равновесие момента двигателя и производственной машины будет нарушено; установившийся режим работы для данных механизмов невозможен. Кроме того, момент статического сопротивления может изменяться случайным образом; к механизмам, обладающим случайным моментом статического сопротивления, относятся горные машины: буровые станки, экскаваторы, очистные комбайны, дробилки и т. д.

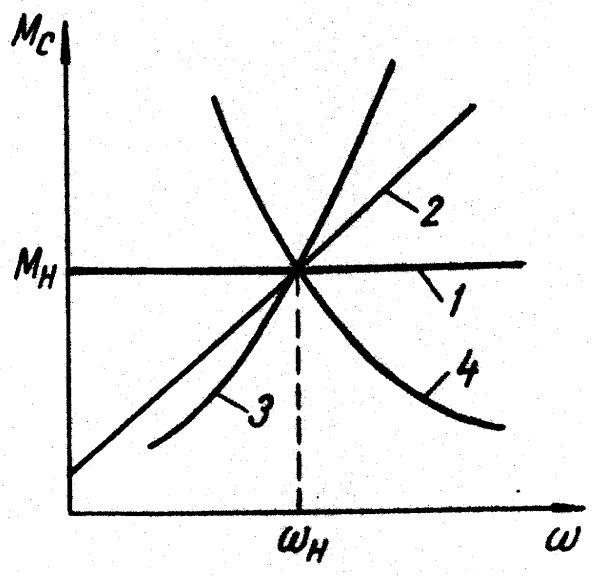


Рис. 2.1. Механические характеристики рабочих механизмов:

1 – при *x*=0; *2* – при *x*=1; *3* – при *x*=2; *4* – при *x*= -1

2.3. Механические характеристики электрических машин

Механической характеристикой электрической машины называется зависимость угловой скорости вращения вала машины от развиваемого ею момента: $\omega = f(M)$. Механическая характеристика электрической машины отображает ее свойства в установившемся режиме работы, и сниматься они должны также в установившемся режиме. Различают естественные и искусственные механические характеристики. Естественной характеристикой называют характеристику, полученную при номинальных параметрах режима питания, отсутствии дополнительных сопротивлении и нормальной схеме включения двигателя в сеть. К номинальным параметрам режима питания относятся следующие величины: номинальное напряжение U_{i},

номинальный поток возбуждения $\Phi_н$, номинальная частота питающего напряжения $f_н$. При отклонении любой из перечисленных величин от номинального значения или введения дополнительного сопротивления будет получена искусственная механическая характеристика. На практике часто используют искусственные механические характеристики электрических машин.

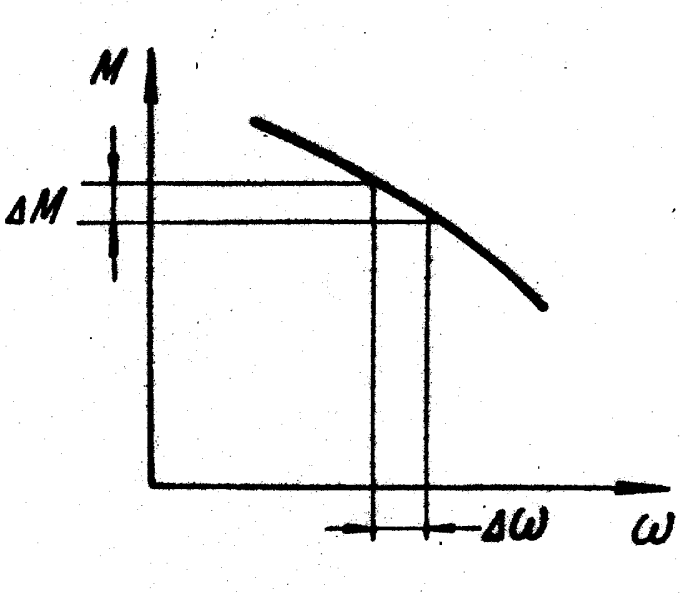


Рис. 2.2. График для определения коэффициента жесткости механической характеристики

Почти все механические характеристики электрических машин обладают тем свойством, что с увеличением момента нагрузки их угловая скорость уменьшается. Степень падения угловой скорости с увеличением момента для двигателей различна и характеризуется жесткостью механической характеристики. Коэффициент жесткости механической характеристики двигателя $\beta_д$ это отношение приращения момента к соответствующему приращению угловой скорости вращения (рис. 2.2):

$$\beta_д = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta\omega}. \qquad (2.22)$$

Понятие жесткости может быть применено и к механической характеристике производственной машины:

$$\beta_{\text{ñ}} = \frac{dM_{\text{c}}}{d\omega} \approx \frac{\Delta M_{\text{c}}}{\Delta\omega} . \qquad (2.23)$$

По жесткости механические характеристики электрических двигателей классифицируются на следующие группы (рис. 2.3):

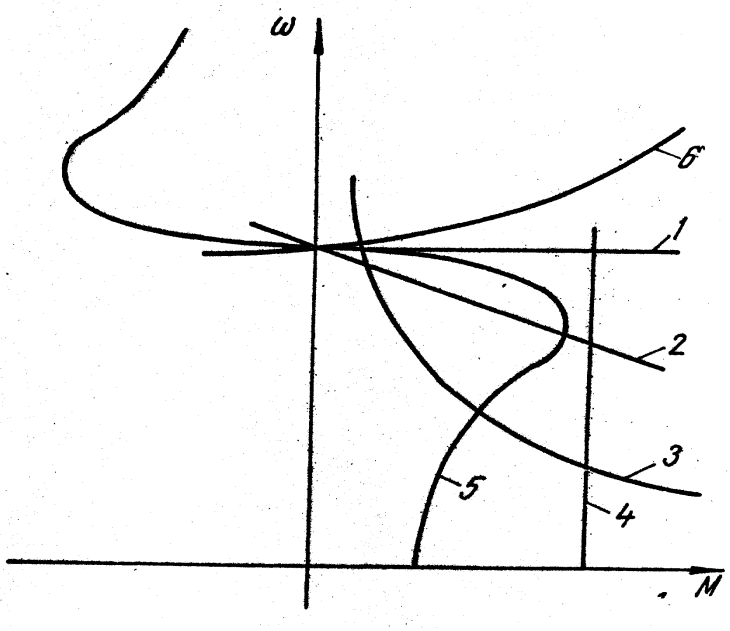


Рис. 2.3. Механические характеристики электрических двигателей

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика (1). С изменением нагрузки угловая скорость вращения вала двигателя остается постоянной, коэффициент жесткости механической характеристики равен бесконечности. Такой механической характеристикой обладает синхронный двигатель.

2. Жесткая механическая характеристика (2). С увеличением нагрузки угловая скорость вращения вала двигателя уменьшается незначительно. Коэффициент жесткости механической характеристики постоянен и меньше нуля. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока параллельного и независимого возбуждения.

3. Мягкие механические характеристики (3), у которых с изменением момента двигателя угловая скорость вращения вала изменяется значительно, особенно при малых нагрузках. Коэффициент жесткости механической характеристики – здесь величина отрицательная и переменная. Такой характеристикой обладает двигатель постоянного тока последовательного возбуждения.

4. Абсолютно мягкая механическая характеристика (4). Это характеристика, у которой момент двигателя остается постоянным при изменении угловой скорости вращения его вала. Коэффициент жесткости механической характеристики (4) равен нулю. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании якоря от источника тока или при работе в замкнутых системах электропривода в режиме стабилизации тока якоря.

5. Асинхронная механическая характеристика (5). Жесткость механической характеристики изменяется как по величине, так и по знаку. Это характеристика асинхронного двигателя. Часть асинхронной характеристики (от холостого хода до критического момента) может быть аппроксимирована прямой линией, т. е. на рабочем участке асинхронную механическую характеристику можно считать жесткой.

6. Возрастающая механическая характеристика (6). С увеличением момента угловая скорость вращения вала двигателя несколько возрастает, т. е. коэффициент жесткости положителен. Такая характеристика может быть получена для двигателя независимого возбуждения, питающегося от генератора с сильной положительной обратной связью по току. Работа двигателя на такой механической характеристике статически неустойчива.

Механические характеристики электрических двигателей изображаются в четырех квадрантах на плоскости в системе координат M и ω (рис. 2.4). Положение точки на плоскости изображает тот или иной режим работы электрической машины, которая обладает свойством обратимости, т.

е. может работать в режиме электродвигателя (потреблять электрическую энергию из сети и преобразовывать ее в механическую на валу) или в режиме генератора (преобразовывать механическую энергию с вала в электрическую энергию). В первом и в третьем квадрантах момент и угловая скорость вращения совпадают по направлению, т. е. $P\omega > 0$, и машина работает двигателем; во втором и четвертом квадрантах момент двигателя направлен навстречу угловой скорости (препятствует движению), т. е. $P\omega < 0$, и электрическая машина работает в генераторном (тормозном) режиме. Следовательно, электрическая машина может работать в одном из двух режимов: в двигательном, когда электрическая энергия преобразуется в механическую, и в тормозном, когда механическая энергия преобразуется в электрическую (обратное направление энергии). В отличие от двигательного режима тормозных режимов может быть несколько, в зависимости от того, как используется преобразованная энергия.

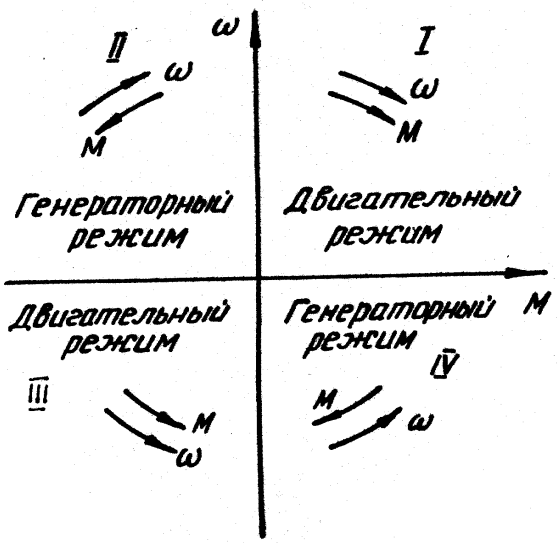


Рис. 2.4. Режимы работы электрического двигателя

Тормозные режимы классифицируются следующим образом:

1. Генераторный режим с отдачей энергии в сеть. В этом режиме преобразованная энергия (за вычетом потерь) отдается в электрическую сеть. Баланс мощностей выражается следующим образом:

$$P_{\text{і}} = P_{\text{ý}} + \Delta P, \qquad (2.24)$$

где $P_{\text{і}}$ – механическая мощность на валу машины;

$P_{\text{ý}}$ – электрическая мощность, поступающая в сеть;

ΔP – потери мощности при преобразовании энергии.

Переход из двигательного режима в режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть возможен лишь при превышении угловой скорости двигателя его скорости идеального холостого хода. Поскольку преобразованная энергия не теряется, а отдается в сеть, то этот режим считается экономичным.

2. Режим торможения противовключением. В этом случае электрическая машина потребляет как механическую энергию с вала, так и электрическую энергию из сети. Баланс мощности для торможения противовключением:

$$P_{\text{і}} + P_{\text{ý}} = \Delta P. \qquad (2.25)$$

Машина работает как генератор, преобразуя механическую энергию с вала в электрическую. При этом вся энергия (из сети и преобразованная с вала машины) преобразуется в потери и выделяется в виде тепла в силовых цепях машины. Такой режим работы является неэкономичным.

3. Режим электродинамического (динамического) торможения. Машина преобразует механическую энергию с вала в электрическую энергию, которая в свою очередь рассеивается в силовых цепях машины. В этом случае машина отключена от сети и не получает электрической энергии. Баланс мощности для режима электродинамического торможения:

$$P_{\text{і}} = \Delta P. \qquad (2.26)$$

Режим электродинамического торможения экономичнее торможения противовключением, т. к. происходит без потребления энергии из сети.

Таким образом, во всех тормозных режимах электрическая машина работает как генератор, однако только один режим сопровождается отдачей энергии в сеть.

2.4. Совместная механическая характеристика электропривода и производственной машины

При работе привода в установившемся режиме имеет место равенство момента производственной машины и момента, развиваемого двигателем. Однако момент статического сопротивления рабочей машины со временем может измениться, в этом случае равенство моментов нарушается и начинается переходный процесс выравнивания нагрузок, при котором происходит автоматическое изменение момента и угловой скорости электрического двигателя. После окончания переходного процесса привод будет работать устойчиво при другом значении момента и угловой скорости двигателя. Для установления равновесия между изменившимися значениями моментов сопротивления и двигателя во всех неэлектрических приводах требуется применение специальных регуляторов, которые воздействуют на источник энергии, увеличивая или уменьшая подачу воды, топлива или пара (например, регулятор Уатта). В электрических приводах роль регулятора выполняет электродвижущая сила двигателя. Эта способность электродвигателя автоматически поддерживать равновесие системы при изменении момента сопротивления является весьма ценным свойством

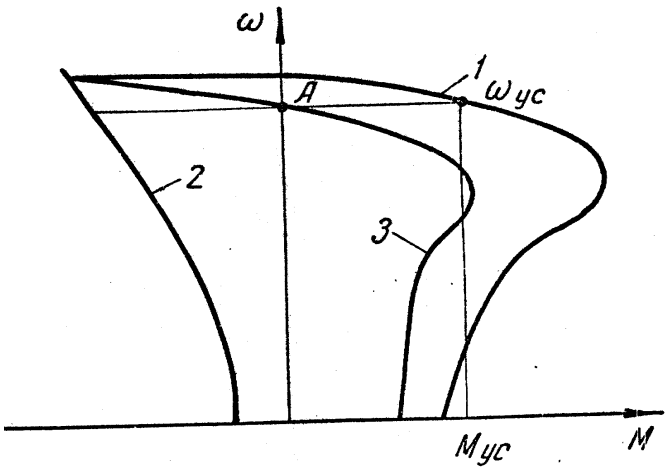


Рис. 2.5. Совместная механическая характеристика двигателя и рабочей машины

электрического двигателя, поскольку на практике момент статического сопротивления чаще всего изменяется с течением времени. Для определения параметров установившегося режима работы часто используют совместную механическую характеристику электрического двигателя и производственной машины, под которой понимают алгебраическую сумму моментов двигателя и производственной машины (при одинаковых скоростях вращения).

На рис. 2.5 представлены механическая характеристика двигателя (1), механическая характеристика рабочей машины (вентилятора) (2) и совместная механическая характеристика привода (3). В установившемся режиме работы двигатель развивает момент, равный моменту статического сопротивления, в этом случае момент на совместной механической характеристике привода равен нулю (точка А), двигатель преодолевает момент $M_{\text{óñ}}$ и развивает скорость $\omega_{\text{óñ}}$.

2.5. Критерий статической устойчивости электропривода

Эксплуатировать производственный агрегат можно только в случае, если его работа статически устойчива. Под статической устойчивостью привода понимают его способность приходить в состояние устойчивого равновесия, после того как под действием внешнего возмущения привод был выведен из этого состояния. Устойчивая работа привода может быть получена соответствующим подбором параметров и характеристик исполнительного механизма, электродвигателя и преобразователя, от которого получает питание электродвигатель.

Анализ статической устойчивости привода требует значительно меньшей затраты времени, чем расчет и построение графиков переходного процесса. В простейших случаях, когда рассматриваются лишь механические переходные процессы, достаточно бывает исследовать лишь статическую устойчивость привода. Производственный агрегат обладает статической устойчивостью только в том случае, если при нарушении равновесного состояния привода в нем возникают моменты, стремящиеся вернуть агрегат в состояние равновесия. При неустойчивой работе любое отклонение от установившегося режима приводит к изменению состояния привода – он уже не возвращается в прежнее состояние равновесия.

Для определения статической устойчивости привода может быть использована совместная механическая характеристика электрического двигателя и производственного механизма. Критерий статической устойчивости выражается следующим образом: привод статически устойчив, если выполняется условие:

$$\frac{\partial M_{\text{ñì}}}{\partial \omega} < 0, \qquad (2.27)$$

где $M_{\text{ñì}}$ – момент совместной механической характеристики (по определению $M_{\text{ñì}} = M - M_{\text{ñ}}$);

M – момент двигателя;

$M_{\text{с}}$ – момент сопротивления;

ω – угловая скорость вращения двигателя.

Выражение (2.27) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{\text{с}}}{\partial \omega} < 0, \text{ или } \beta - \beta_{\text{с}} < 0, \qquad (2.28)$$

где β и $\beta_{\text{с}}$ – жесткости механических характеристик двигателя и рабочей

машины соответственно.

Таким образом, работа привода статически устойчива, если совместная механическая характеристика имеет отрицательный наклон (падающая). Понятие статической устойчивости применимо и к двигателю, работающему без нагрузки, в этом случае говорят о статической устойчивости механической характеристики двигателя.

Критерий статической устойчивости для механической характеристики двигателя выражается следующим образом:

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} < 0, \ \beta < 0.$$

Следовательно, возрастающая механическая характеристика двигателя является статически неустойчивой. Для примера на рис. 2.6 представлены механические характеристики асинхронного двигателя (1), статическая характеристика подъемной машины (2) и совместная механическая характеристика привода (3). Совместная механическая характеристика пересекает ось угловой скорости в двух точках A и B. Установившийся режим работы привода в этих точках возможен, если только совместная механическая характеристика в окрестностях точек A и B статически устойчива. Очевидно, что в точке A $\frac{\partial M_{\text{сì}}}{\partial \omega} < 0$, т. е. характеристика в точке A статически устойчива, и установившийся режим работы в этой точке воз-

можен; в точке B $\frac{\partial M_{\text{ñì}}}{\partial \omega} > 0$, следовательно, условие критерия статической устойчивости привода не выполняется, и в точке B устойчивая работа привода невозможна.

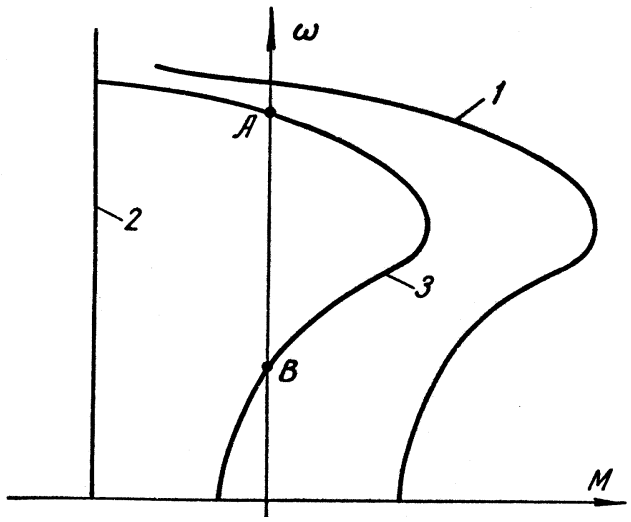


Рис. 2.6. К определению статической устойчивости привода

Следует отметить, что критерий статической устойчивости определяет устойчивость системы «в малом», т. е. при малых значениях отклонения момента статического сопротивления; для определения устойчивости системы «в целом» (при неограниченном изменении параметров) необходимо применять другие критерии устойчивости: Михайлова, Гурвица и т. д.

2.6. Приведение моментов и сил сопротивления, моментов инерции и инерционных масс к валу двигателя

Обычно двигатель приводит рабочую машину через систему передач (зубчатый редуктор, вариатор, цепную передачу и т. д.). Отдельные элементы передаточного механизма и сама рабочая машина вращаются с угловыми скоростями, отличными от скорости вращения двигателя, имеют свои

моменты инерции, передают различные усилия и моменты, т. е. их динамическое воздействие на двигатель различное. Основное уравнение движения привода (2.6) справедливо лишь для исследования движения какого-то одного механического элемента (вала, зубчатого колеса и т. д.). Для решения задач о передаче движения от двигателя к рабочей машине необходимо записать основное уравнение движения для каждого элемента, входящего в систему «привод» (двигателя, каждого вала редуктора и рабочей машины). Одно и то же уравнение (2.6) будет переписано многократно, после чего методом исключения переменных полученная система может быть сведена к одному уравнению (для скорости одного вала, например, двигателя). Ввиду громоздкости такого решения всю систему заменяют, когда это возможно, одним динамическим звеном, т. е. приводят к скорости вращения какого-то одного вала, например, вала двигателя.

Приведение основано на законе сохранения энергии. На рис. 2.7 представлены упрощенные кинематические схемы приводов при вращательном и поступательном движении исполнительного органа рабочей машины. Между двигателем *M* и рабочим органом машины *PM* имеется редуктор *P,* который характеризуется коэффициентом полезного действия передачи $\eta_{ï}$ и передаточным числом $i_{ïåð}$. В установившемся режиме работы момент, развиваемый двигателем, равен моменту статического сопротивления ($M = M_{ñ}$). Рабочий орган машины вращается со скоростью $\omega_{ì}$ (рис. 2.7, *а)* и создает момент сопротивления $M_{ì}$; потери в редукторе учитываются с помощью коэффициента полезного действия передачи. На основании равенства мощностей имеем:

$$M_{ñ}\omega \cdot \eta_{ïåð} = M_{ì} \cdot \omega_{ì},$$

откуда:

$$M_{ñ} = M_{ì} \cdot \frac{\omega_{ì}}{\omega} \cdot \frac{1}{\eta_{ïåð}} = M_{ì} \cdot \frac{1}{i_{ï}} \cdot \frac{1}{\eta_{ïåð}} . \qquad (2.29)$$

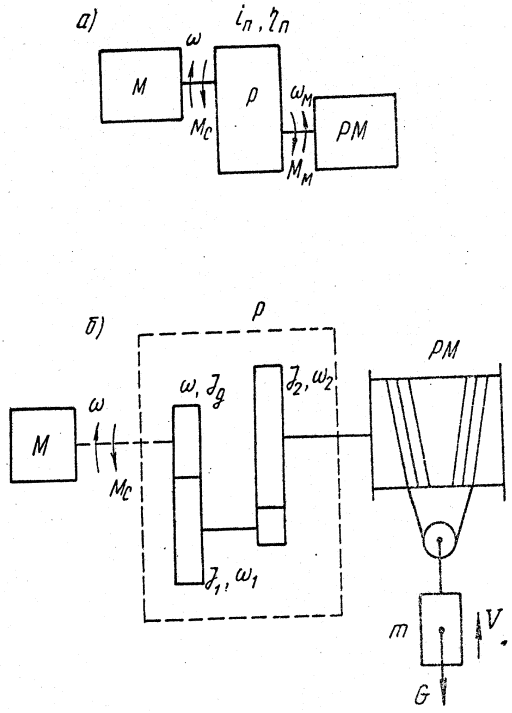


Рис. 2.7. Кинематическая схема электропривода:

а – при вращательном движении рабочей машины; *б* – при поступательном движении

рабочей машины; *М* – двигатель; *Р* – редуктор; *РМ* – рабочая машина

Аналогично для поступательного движения рабочего органа, (рис. 2.7, б):

$$M_{ñ}\omega \cdot \eta_{ï} = Gv ,$$

после преобразований получим:

$$M_{ñ} = G\left(\frac{v}{\omega}\right)\frac{1}{\eta_{ïåð}} . \qquad (2.30)$$

При наличии нескольких ступеней передач коэффициент полезного действия и передаточное число определяются следующим образом:

$$\eta_{ïåð} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 ... \eta_n ; \; i_{ïåð} = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 ... i_n , \qquad (2.31)$$

где $\eta_1, \eta_2, \eta_3 ... \eta_n$; $i_1, i_2, i_3 ... i_n$ – коэффициенты полезного действия и передаточ-

ные числа каждой ступени.

Приведение моментов инерции и поступательно движущихся масс к одной оси вращения также основано на законе сохранения энергии. Считают, что кинетическая энергия приведенного звена, обладающего моментом инерции $J_{\text{ïð}}$ и вращающегося с угловой скоростью двигателя ω, равна суммарному запасу кинетической энергии всех элементов привода, обладающих моментами инерции $J_{\text{äâ}}, J_1, J_2 ... J_n$ и вращающихся с угловыми скоростями $\omega, \omega_1, \omega_2, \omega_3 ... \omega_n$ и массой m, движущейся со скоростью v. Таким образом:

$$\frac{1}{2} J_{\text{ïð}}\, \omega^2 = \frac{1}{2} J_{\text{äâ}}\, \omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 + ... + \frac{1}{2} J_n \omega_n^2 + \frac{1}{2} m v^2 .$$

После преобразований получим:

$$J_{\text{ïð}} = J_{\text{äâ}} + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + ... + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 + m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 ,$$

или

$$J_{\text{ïð}} = J_{\ddot{a}\hat{a}} + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + ... + J_n \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot ... \cdot i_n^2} + m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 . \qquad (2.32)$$

Такое представление системы «привод» одним механическим звеном возможно, если пренебречь упругостью всех кинематических звеньев, т. е. считать все валы абсолютно жесткими и недеформируемыми. В этом случае мы имеем одномассовую систему, в которой, зная закон движения какого-то одного элемента, можно определить закон движения любого другого элемента электропривода.

2.7. Упругое механическое звено

На практике встречаются кинематические звенья, упругостью которых пренебречь нельзя; к ним относятся канаты подъемных установок, конвейерные ленты большой протяженности, валы прокатных станов и гребных винтов. В данном случае пренебречь величиной деформации такого элемента не представляется возможным, а кинематическая схема не может быть заменена одним динамическим звеном. Такие системы называются многомассовыми, в них один элемент по отношению к другому может совершать колебательные движения, т. е. появляется некоторая свобода в движении отдельных элементов; поэтому по закону движения одного элемента нельзя определить закон движения элемента, связанного с первым упругим механическим звеном. При решении задач динамики в многомассовых системах необходимо записывать основное уравнение движения для каждого звена, которое вращается со своей угловой скоростью. Различают коэффициенты жесткости упругого элемента при растяжении и сжатии и коэффициент жесткости упругого элемента при кручении. Согласно закону Гука воздействие и деформация тел в пределах упругости пропорциональны друг другу:

$$F = C_1 \cdot \Delta l; \qquad (2.33)$$

$$M = C_2 \cdot \Delta\varphi; \qquad (2.34)$$

где C_1 – коэффициент жесткости при растяжении и сжатии, Н/м;

C_2 – то же при кручении, Н·м;

Δl, $\Delta\varphi$ – деформация при растяжении – сжатии и при кручении, соответсвенно.

Для прямолинейного стержня равного сечения коэффициент жесткости при растяжении – сжатии равен:

$$C_1 = \frac{E \cdot S}{l}, \qquad (2.35)$$

где S – площадь поперечного сечения стержня, м^2;

E – модуль упругости растяжения или сжатия, Па;

l – длина стержня, м.

Для цилиндрического вала существует аналогичная зависимость для коэффициента жесткости при кручении:

$$C_2 = \frac{J \cdot G}{l}, \qquad (2.36)$$

где J – момент инерции поперечного сечения вала, м^4;

G – модуль упругости при кручении, Па;

l – длина стержня, м.

Чем больше коэффициент жесткости, тем меньше величина деформации. На практике валы двигателей, звенья редукторов и т.д. выполняют таким образом, что возникающие в них деформации невелики и могут не учитываться. В отдельных случаях жесткость элементов привода может быть мала, возникающие при этом деформации искажают движение звеньев привода. Примером могут быть установки, в которых двигатель соединен с большими маховыми массами через явно выраженный упругий элемент, длинный вал, канат, ленту в конвейерах большой протяженности. Система может содержать несколько упругих элементов, соединенных последовательно или параллельно (рис. 2.8). При последовательном соединении элементов (рис. 2,8, а) имеем:

$$F = C_{11}\Delta l_1 = C_{12}\Delta l_2 = ... = C_{1a}\Delta l_n; \quad \Delta l_i = \frac{F}{C_{1i}};$$

$$\Delta l = \sum \Delta l_i = \sum \frac{F}{C_{1i}} = F \sum \frac{1}{C_{1i}};$$

$$C_{1i} = \frac{F}{\Delta l_i},$$

откуда определяем эквивалентную жесткость системы $C_{1э}$:

$$C_{1э} = \frac{F}{\Delta l},$$

$$C_{1э} = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_{1i}}}. \qquad (2.37)$$

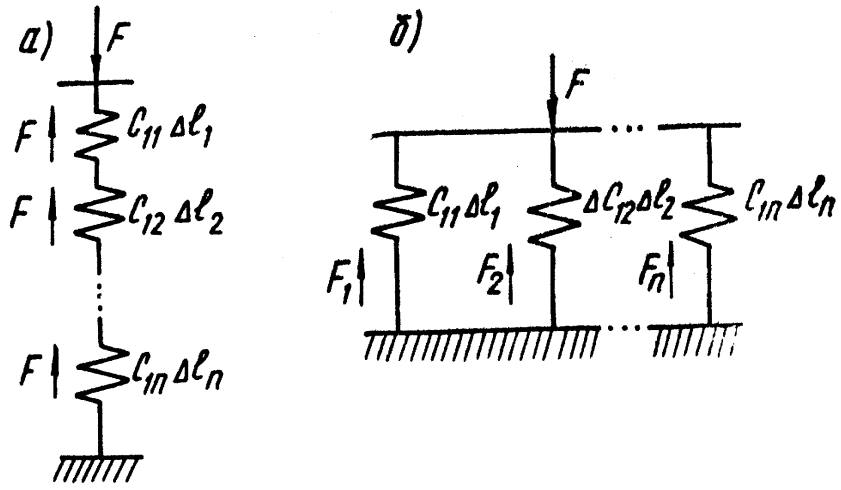


Рис. 2.8. Схема соединения упругих элементов

а – последовательное соединение упругих элементов;

б – параллельное соединение упругих элементов

При параллельном соединении элементов (рис. 2.8, б) имеем:

$$\Delta l = \Delta l_1 = \Delta l_2 = ... = \Delta l_n;$$

$$F = \sum F_i;\ F_i = \Delta l \cdot C_{1i};\ F = \sum \Delta l \cdot C_{1i};$$

$$C_{1э} = \frac{F}{\Delta l} = \sum C_{1i}. \qquad (2.38)$$

Таким образом, эквивалентная жесткость параллельно соединенных элементов равна алгебраической сумме жесткостей всех элементов системы.

2.8. Оптимальное передаточное число редуктора. Время пуска и торможения электропривода

Под оптимальным передаточным числом редуктора могут пониматься разные величины, в зависимости от того, какой показатель необходимо оптимизировать в данной задаче: например, для заданного момента механизма $M_{\text{ì}}$ и постоянного момента двигателя M определить передаточное число редуктора, обеспечивающее минимальное время разгона привода. Передаточное число редуктора также может быть оптимальным по времени перехода исполнительного органа рабочей машины из одного положения в другое, т. е. за минимальное время привод должен отработать заданный угол поворота вала рабочей машины и т. д. Решим первую задачу, которую можно сформулировать следующим образом: определить передаточное число редуктора, обеспечивающего максимальное ускорение привода при заданных (и постоянных) значениях моментов двигателя и механизма. В данном случае движение приводим к валу рабочей машины, поэтому основное уравнение движения привода запишется следующим образом:

$$M \cdot i - M_{\text{ì}} = \left(J \cdot i^2 + J_{\text{ì}}\right) \frac{d\omega_{\text{ì}}}{dt}, \qquad (2.39)$$

где M – момент, развиваемый двигателем;

$\grave{I}_{\text{ì}}$ – момент на валу рабочей машины;

J – момент инерции двигателя;

$J_{\text{ì}}$ – момент инерции рабочей машины;

$\omega_{\text{ì}}$ – угловая скорость вращения вала рабочей машины.

Из выражения (2.39) определяем угловое ускорение вала рабочей машины:

$$\varepsilon_{\text{ì}} = \frac{d\omega_{\text{ì}}}{dt} = \left(\frac{M \cdot i - M_{\text{ì}}}{J \cdot i^2 + J_{\text{ì}}} \right) = \frac{M}{J} \cdot \frac{\left(i - \frac{M_{\text{ì}}}{M} \right)}{\left(i^2 + \frac{J_{\text{ì}}}{J} \right)}. \qquad (2.40)$$

Взяв производную $\frac{d\varepsilon_{\text{ì}}}{di}$ и приравняв ее к нулю, получим:

$$\frac{d\varepsilon_{\text{ì}}}{di} = \frac{i_2 + \frac{J_{\text{ì}}}{J} - 2i\left(i - \frac{M_{\text{ì}}}{M} \right)}{\left(i^2 + \frac{J_{\text{ì}}}{J} \right)^2} \cdot \frac{M}{J} = 0 \qquad (2.41)$$

Решив уравнение (2.41), получим выражение для оптимального передаточного числа редуктора:

$$i_{\text{opt}} = \frac{M_{\text{ì}}}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{ì}}}{M} \right)^2 + \frac{J_{\text{ì}}}{J}}. \qquad (2.42)$$

При разгоне вхолостую оптимальное передаточное число редуктора равно:

$$i_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{J_{\text{ì}}}{J}}. \qquad (2.43)$$

После преобразований выражение (2.43) принимает вид:

$$\frac{1}{2} J\omega^2 = \frac{1}{2} J_{\text{ì}}\, \omega_{\text{ì}}^2,$$

т. е. при разгоне вхолостую оптимальное передаточное число редуктора обеспечивает равенство кинетических энергий, запасенных двигателем и рабочим механизмом.

Время пуска и торможения электропривода оказывает существенное влияние на производительность рабочей машины, особенно для часто пускаемых и останавливаемых механизмов, поэтому изучение переходных процессов при пуске и торможении с целью сокращения непроизводительных затрат времени имеет большое практическое значение.

Для определения времени пуска и торможения привода используют основное уравнение движения (2.11).

При пуске:

$$M - M_{\text{c}} = J\frac{d\omega}{dt}.$$

После разделения переменных последнее уравнение примет вид:

$$dt = J\frac{d\omega}{M - M_{\text{c}}}. \qquad (2.44)$$

Интегрируя выражение (2.44) (при постоянных значениях J, M и M_C), получим:

$$t_{\text{ï}} = J\left(\frac{\omega_{\text{ê}} - \omega_{\text{í÷}}}{M - M_{\text{c}}}\right), \qquad (2.45)$$

где $t_{\text{ï}}$ – время пуска

$\omega_{\text{ê}}$ – конечная угловая скорость вращения двигателя;

$\omega_{\text{í÷}}$ – начальная угловая скорость вращения двигателя.

Основное уравнение движения привода для режима торможения запишется в следующем виде:

$$-M - M_{\text{c}} = J\frac{d\omega}{dt}.$$

Разделяя переменные и интегрируя при тех же допущениях, что и в случае пуска, получим:

$$t_{\text{ò}} = J\left(\frac{\omega_{\text{í÷}} - \omega_{\text{ê}}}{M + M_{\text{c}}}\right), \qquad (2.46)$$

где $t_{\text{ò}}$ – время торможения привода.

Сравнивая выражения (2.45) и (2.46), можно сделать вывод о том, что при одинаковом перепаде скоростей $|\omega_{\text{ê}} - \omega_{\text{í÷}}|$ всегда выполняется условие $t_{\text{ï}} > t_{\text{ò}}$, т. е. время пуска всегда больше времени торможения. Способы

определения времени пуска и торможения привода при переменных значениях M и $M_{\text{с}}$ приведены в гл. 5.

Контрольные вопросы

1. Написать основное уравнение привода при поступательном и вращательном движении.

2. Дать определение момента инерции тела.

3. Чему равна мощность при поступательном и вращательном движении исполнительного органа рабочей машины?

4. Дать определение механической характеристики рабочей машины.

5. Что понимают под механической характеристикой электродвигателя?

6. Как различаются механические характеристики электродвигателей по жесткости?

7. Дать определение совместной механической характеристики электродвигателя и рабочей машины.

8. Что понимают под установившимся режимом работы двигателя?

9. Дать определение статической устойчивости привода.

10. С какой целью осуществляется приведение моментов сил и моментов инерции к валу двигателя?

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

3.1. Механические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения в двигательном и тормозном режимах работы

На рис. 3.1 представлена обычная схема включения в сеть двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Якорь двигателя *M* и обмотка возбуждения *LM* получают питание от различных источников напряжения. Ток нагрузки I и электродвижущая сила обмотки якоря *E* направлены встречно, что соответствует двигательному режиму работы (ток протекает под воздействием напряжения сети, а электродвижущая сила направлена против напряжения).

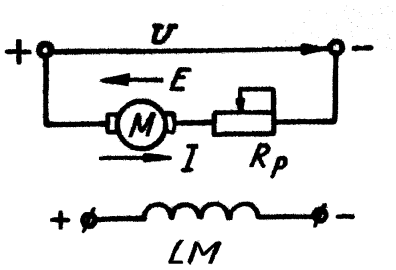


Рис. 3.1. Схема включения в сеть двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Для получения аналитического выражения механической характеристики двигателя необходимо написать следующие уравнения:

– второй закон Кирхгофа для якорной цепи в установившемся режиме работы:

$$U = E + IR\,, \qquad (3.1)$$

т. е. напряжение, приложенное к якорю двигателя, уравновешивается электродвижущей силой *E* и падением напряжения в якорной цепи *IR;*

– выражение для электродвижущей силы обмотки якоря:

$$E = k\Phi\omega; \qquad (3.2)$$

– выражение для электромагнитного момента:

$$M = k\Phi I, \qquad (3.3)$$

где R – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом;

k – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров двигателя;

Φ – поток возбуждения двигателя, Вб;

ω – угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с;

M – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Из выражения электромагнитного момента двигателя (3.3) следует, что реверс (изменение направления движения двигателя) можно осуществить двумя способами: изменением направления тока якоря или изменением потока возбуждения. Если одновременно изменить направление тока якоря и потока возбуждения, то знак электромагнитного момента не изменится.

Решая совместно (3.1) и (3.2) относительно угловой скорости вращения вала двигателя, получим:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - I\frac{R}{k\Phi}. \qquad (3.4)$$

Выражение (3.4) называют скоростной, или электромеханической характеристикой двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Для получения механической характеристики необходимо значение тока из выражения (3.3) подставить в (3.4):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M\frac{R}{k^2\Phi^2}. \qquad (3.5)$$

При постоянном значении напряжения питания обмотки якоря и потока возбуждения механическую характеристику можно представить следующим образом:

$$\omega = \omega_0 - M\frac{R}{C^2}, \qquad (3.6)$$

где $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ – скорость идеального холостого хода двигателя;

$C = k\Phi$ – коэффициент, принимаемый постоянным, если у двигателя имеется компенсационная обмотка или если пренебречь реакцией якоря.

Из выражения (3.5) можно определить коэффициент жесткости механической характеристики:

$$|\beta| = \left|\frac{\Delta M}{\Delta\omega}\right| = \frac{k^2\Phi^2}{R}. \qquad (3.7)$$

Очевидно, что коэффициент жесткости (наклон) механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения пропорционален квадрату потока возбуждения и обратно пропорционален сопротивлению якорной цепи двигателя. С учетом коэффициента жесткости уравнение механической характеристики принимает вид:

$$\omega = \omega_0 - \frac{1}{\beta}M. \qquad (3.8)$$

Механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения при неизменных значениях напряжения, потока возбуждения и сопротивления якорной цепи представляется прямой линией. При номинальных значениях параметров режима питания: $U = U_{\text{í}}$, $\Phi = \Phi_{\text{í}}$, нормальной схеме включения двигателя в сеть и отсутствии дополнительного сопротивления $R_{\text{ä}} = 0$ будет получена естественная характеристика двигателя. Если значение какого-либо параметра режима питания отклонится от номинальной величины или в цепь якоря будет введено добавочное сопротивление $R_{\text{ä}} \neq 0$, то полученная при этом механическая характеристика называется искусственной. На рис. 3.2 представлены естественная *(е)* и искусственные *(и1, и2, и3)* механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения,

полученные при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря. Эти характеристики называются реостатными; все они проходят через точку идеального холостого хода ω_0. Реостатные характеристики так же линейны, как и естественная характеристика, но обладают меньшей жесткостью, что подтверждается выражением (3.7).

Двигатель независимого возбуждения обладает свойством обратимости, он может работать как в двигательном режиме (преобразовывать электрическую энергию в механическую), так и в тормозных режимах (преобразуя механическую энергию с вала в электрическую, которая либо отдается в электрическую сеть, либо выделяется в виде тепла в якорной цепи двигателя). В приводе тормозные режимы применяются для остановки или реверса (изменения направления движения) механизма, а также для удержания груза в неподвижном состоянии либо ограничения скорости движения механизмов, подверженных активным моментам статического сопротивления. Часто необходимо экстренно остановить механизм при появлении аварии или исчезновении напряжения сети.

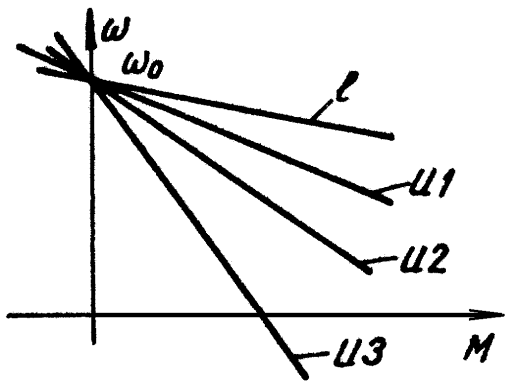


Рис. 3.2. Естественная и семейство искусственных механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения

В приводе используются три способа электрического торможения: генераторное торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное),

торможение противовключением и электродинамическое (динамическое) торможение.

В тормозном режиме работы электрическая машина преобразует механическую энергию в электрическую, следовательно, происходит убыль механической энергии, т. е. механическая мощность отрицательна $M\omega < 0$; момент, развиваемый двигателем, и его угловая скорость не совпадают по знаку: момент двигателя препятствует движению.

Рассмотрим режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть. Переход в этот режим возможен, когда на вал электрической машины, работающей в двигательном режиме, со стороны механизма действует момент, направленный согласно с моментом машины. Под действием суммарного положительного момента привод разгоняется, угловая скорость увеличивается. Из выражения (3.1) определяем ток для двигательного режима работы:

$$I = \frac{U - E}{R}. \qquad (3.9)$$

С увеличением угловой скорости увеличивается электродвижущая сила: $E = k\Phi\omega$, а ток и электромагнитный момент двигателя уменьшаются согласно механической характеристике (рис. 3.3).

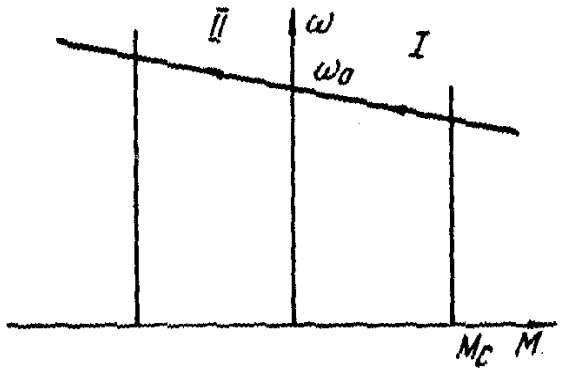


Рис. 3.3. График механической характеристики двигателя
в генераторном режиме

Когда угловая скорость вращения достигает скорости идеального холостого хода, электродвижущая сила $E = k\Phi\omega_0$ будет равна напряжению, приложенному к якорю $E = U$, а ток и электромагнитный момент будут равны нулю. Система продолжает разгоняться теперь только под действием момента, развиваемого рабочей машиной. Скорость двигателя становится больше скорости идеального холостого хода, а электродвижущая сила – больше приложенного напряжения, поэтому ток изменяет свой знак:

$$I = -\frac{E - U}{R}. \qquad (3.10)$$

Теперь ток протекает под действием электродвижущей силы навстречу напряжению сети, а момент двигателя направлен навстречу движению, т. е. $M\omega < 0$. Электрическая машина работает в режиме генератора, преобразуя механическую энергию с вала в электрическую и отдавая ее в сеть.

Действительно, из выражения (3.10) следует:

$E = U + IR,$

умножая обе части выражения на ток *I,* получим

$EI = UI + RI^2$

или

$P_{\text{i}} = P_{\text{ý}} + \Delta P,$

где $P_{\text{i}} = EI$ – механическая мощность с вала двигателя;

$P_{\text{ý}} = UI$ – электрическая мощность, отдаваемая в сеть;

$\Delta P = RI^2$ – потери мощности в якоре двигателя.

Механические характеристики электрической машины в режиме генераторного торможения с отдачей энергии в сеть являются продолжением характеристики двигательного режима в область второго квадранта (см. рис. 3.3). Этот способ применяется в механизмах с активным моментом статического сопротивления, к которым относятся подъемные установки.

На практике режим генераторного торможения получают при опускании грузов (рис. 3.4). Двигатель включают на направление «назад». В момент пуска угловая скорость равна нулю, момент равен моменту короткого замыкания $M_{к}$ (точка *а).* Момент двигателя совпадает по направлению с моментом статического сопротивления $M_{с}$. Под действием суммарного отрицательного момента система разгоняется в отрицательном направлении. В третьем квадранте момент двигателя совпадает с направлением угловой скорости вращения, и машина работает в двигательном режиме. При переходе скорости идеального холостого хода $(-\omega_0)$ момент двигателя изменяет знак, он становится положительным и направлен навстречу угловой скорости, т. е. электрическая машина препятствует движению (развивает тормозной момент). Установившийся режим работы имеет место в точке *с,* где момент двигателя и момент сопротивления равны по величине, а суммарный момент равен нулю. Машина работает в режиме генераторного торможения с отдачей энергии в сеть.

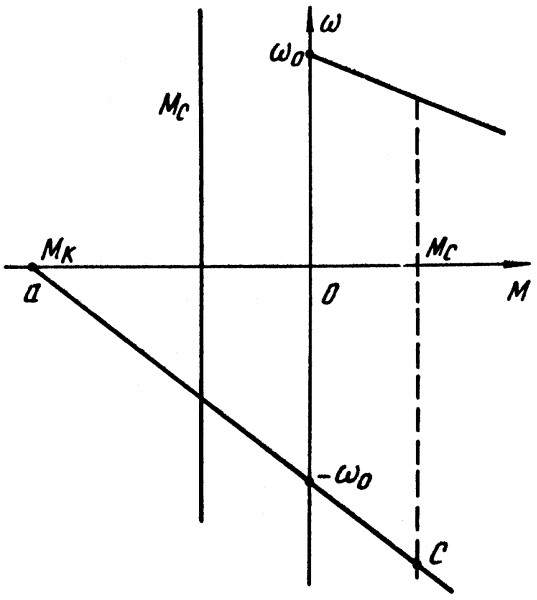


Рис. 3.4. Генераторный режим работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения при опускании груза

Генераторное торможение является весьма экономичным, поскольку оно сопровождается отдачей в сеть электрической энергии; однако этот способ имеет и недостаток: торможение осуществляется при высоких скоростях $\omega > \omega_0$ и непригодно для остановки привода.

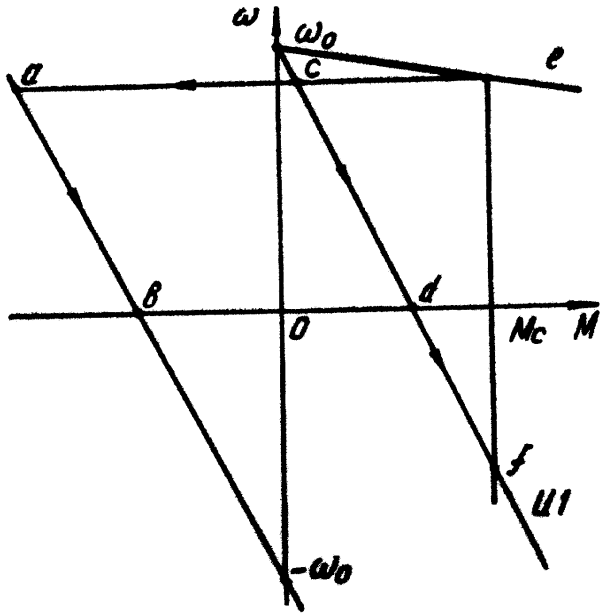


Рис. 3.5. Механические характеристики двигателя
в режиме торможения противовключением

Торможение противовключением – это такой режим работы, когда обмотки двигателя включены на одно направление вращения, а вал двигателя под действием внешнего момента или момента инерции вращается в противоположную сторону. Режим торможения противовключением может быть получен двумя способами. Первый способ пригоден лишь для активного момента статического сопротивления, когда в цепь якоря двигателя включается большое дополнительное сопротивление. Двигатель с естественной характеристики переходит работать на искусственную характеристику (при неизменной угловой скорости вращения в точку *c*), рис. 3.5. Момент двигателя уменьшился, а момент статического сопротивления

остался прежним, поэтому на привод действует избыточный отрицательный момент, который тормозит систему. В точке *d* угловая скорость двигателя равна нулю, а момент сопротивления больше момента, развиваемого двигателем. Под действием момента статического сопротивления угловая скорость двигателя меняет свое направление (привод реверсируется). Установившийся режим работы привода наступает в точке *f,* когда момент двигателя равен моменту статического сопротивления и направлен ему навстречу (суммарный момент, действующий на систему, равен нулю). На части механической характеристики *df* угловая скорость двигателя и его момент не совпадают по направлению; двигатель включен на направление «вперед», но под действием активного момента статического сопротивления вращается в направлении «назад». Имеет место торможение противовключением. Поскольку угловая скорость двигателя изменила свое направление, электродвижущая сила обмотки якоря изменила свой знак, теперь ее направление совпадает с направлением напряжения сети. Напряжение сети и ЭДС обмотки якоря складываются и уравновешивают падение напряжения в якорной цепи, обусловленное нагрузкой, что является характерной особенностью режима торможения противовключением.

Второй способ получения режима торможения противовключением применим как для активного, так и реактивного характера момента статического сопротивления. С этой целью на ходу переключают обмотку якоря, т. е. изменяют полярность напряжения, подводимого к обмотке якоря. Теперь электродвижущая сила обмотки якоря и напряжение сети складываются (как и в первом способе). Для ограничения тока в цепь якоря вводят большое дополнительное сопротивление. Второй закон Кирхгофа в этом случае записывается следующим образом:

$$-U = E + IR\,. \qquad (3.11)$$

Из выражения (3.11) определяем ток якоря двигателя:

$$I = -\frac{U + E}{R}.$$

Из последнего выражения видно, что ток якоря изменил свое направление, электромагнитный момент также изменил свой знак; угловая скорость из-за инерции привода не может сразу изменить свое направление. Привод переходит работать в точку *a* на характеристику, проходящую через точку $-\omega_0$ (см. рис. 3.5). В точке *a* момент двигателя и его угловая скорость направлены встречно (тормозной режим); двигатель включен на направление «назад», но по инерции продолжает вращаться «вперед» (торможение противовключением). В этом случае характеристика режима торможения противовключения (отрезок *ab)* расположена во втором квадранте. Под действием момента двигателя и момента статического сопротивления привод интенсивно тормозится. В точке *b* угловая скорость двигателя равна нулю; якорь двигателя отключают от сети и ставят привод на механический тормоз. Если это не произвести, то двигатель изменит направление угловой скорости вращения (реверсируется) и перейдет работать в третий квадрант (двигательный режим работы). Умножив обе части уравнения (3.11) на ток нагрузки *I*, после преобразований получим:

$$-UI - EI = I^2 R$$

или

$$P_{\acute{y}} + P_{\text{i}} = \Delta P, \qquad (3.12)$$

где $P_{\acute{y}} = U \cdot I -$ электрическая мощность из сети;

$P_{\text{i}} = E \cdot I -$ механическая мощность с вала двигателя;

$\Delta P = -I^2 R -$ потери в якорной цепи двигателя.

Из выражения (3.12) видно, что двигатель потребляет электрическую мощность из сети UI, преобразует механическую мощность с вала в электрическую EI, и вся энергия, полученная из сети и преобразованная с

вала, рассеивается в виде тепла в якорной цепи двигателя. Таким образом, режим торможения противовключением является весьма неэкономичным, но обеспечивает интенсивное торможение привода и используется в практике в качестве аварийного.

Режим электродинамического торможения осуществляется при соблюдении трех условий: двигатель отключается от сети и замыкается на сопротивление; двигатель возбужден; вал двигателя вращается под действием внешних моментов или момента инерции движущихся элементов привода (рис. 3.6, *а*). Внешнее напряжение (задание) отсутствует, поэтому второй закон Кирхгофа запишется в следующей форме:

$$0 = E + IR, \tag{3.13}$$

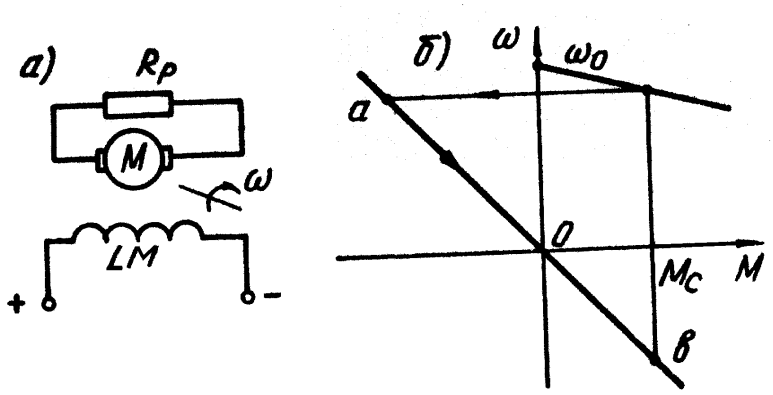


Рис. 3.6. Электродинамическое торможение двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

а - электрическая схема; *б* – механическая характеристика

откуда ток якоря: $I = -\frac{E}{R}$, т. е. ток двигателя меняет свое направление (по отношению к двигательному режиму работы) и протекает под действием электродвижущей силы обмотки якоря. Момент двигателя также изменяет свое направление и направлен навстречу угловой скорости вращения якоря, которая сразу измениться не может. Двигатель переходит работать в точку *а* характеристики, проходящей через начало координат (рис. 3.6, *б*). В ре-

жиме электродинамического торможения механическая мощность $M\omega$ преобразуется в электрическую EI и выделяется в виде потерь I^2R в якорной цепи двигателя. Машина работает как генератор на внешнее сопротивление. Режим электродинамического торможения протекает без потребления энергии из сети (мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, мала и не принимается во внимание); в этом отношении он экономичнее, чем режим торможения противовключением.

3.2. Построение механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Как видно из выражений (3.5), (3.6) и (3.8), механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения описываются уравнением прямой линии, которая может быть построена по двум точкам. Для более точного построения механической характеристики двигателя в рабочей зоне изменения нагрузок следует воспользоваться точкой идеального холостого хода $(0, \omega_0)$ и номинальным режимом работы $(M_н, \omega_н)$. В паспорте машины (щиток на корпусе двигателя) указаны следующие номинальные величины: $P_н$ - номинальная мощность на валу двигателя, кВт; $n_н$ - номинальная скорость вращения вала машины, об/мин; $U_н$ - номинальное напряжение питания обмотки якоря, В; $I_н$ - номинальный ток якоря. А; $\eta_н$ - номинальный коэффициент полезного действия машины, %. Расчет производим в системе СИ, в паспортных данных машины только скорость вращения является внесистемной величиной, ее необходимо перевести в систему СИ; номинальная угловая скорость равна:

$$\omega_н = \frac{\pi n_н}{30}. \qquad (3.14)$$

Если номинальное значение коэффициента полезного действия не указано в паспорте, то его можно определить из выражения:

$$\eta_н = \frac{P_н \cdot 10^3}{U_н I_н}. \qquad (3.15)$$

Сопротивление обмотки якоря берут из каталогов или определяют ориентировочно по выражению:

$$R_я \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U_н}{I_н}(1 - \eta_н). \qquad (3.16)$$

Затем определяется коэффициент $C = k\Phi$, В·с:

$$C = \frac{U_н - I_н R_я}{\omega_н}. \qquad (3.17)$$

Скорость идеального холостого хода: $\omega_0 = \frac{U_н}{C}$.

Номинальный электромагнитный момент $M_н = C \cdot I_н$, Н·м.

По двум точкам: идеальному холостому ходу $(0, \omega_0)$ и номинальному режиму работы $(M_н, \omega_н)$ строим естественную механическую характеристику двигателя (рис. 3.7, *а)*.

Перейдем теперь к построению пусковой диаграммы и расчету пусковых сопротивлений. Определяем пусковой ток:

$$I_1 = \lambda I_н,$$

где $I_1 -$ пусковой ток;

$\lambda -$ перегрузочная способность двигателя постоянного тока, $2 \le \lambda \le 2{,}5$.

Пусковому току соответствует пусковой момент $M_1 = CI_1$.

Пусковое сопротивление (при угловой скорости, равной нулю):

$$R_п = \frac{U_н}{I_1}.$$

Задаемся числом ступеней n и определяем коэффициент γ:

$$\gamma = \sqrt[n]{\frac{R_{\text{ï}}}{R_{\text{ÿ}}}}.$$

Ток и момент переключения:

$$I_2 = \frac{I_1}{\gamma}; \quad M_2 = CI_2.$$

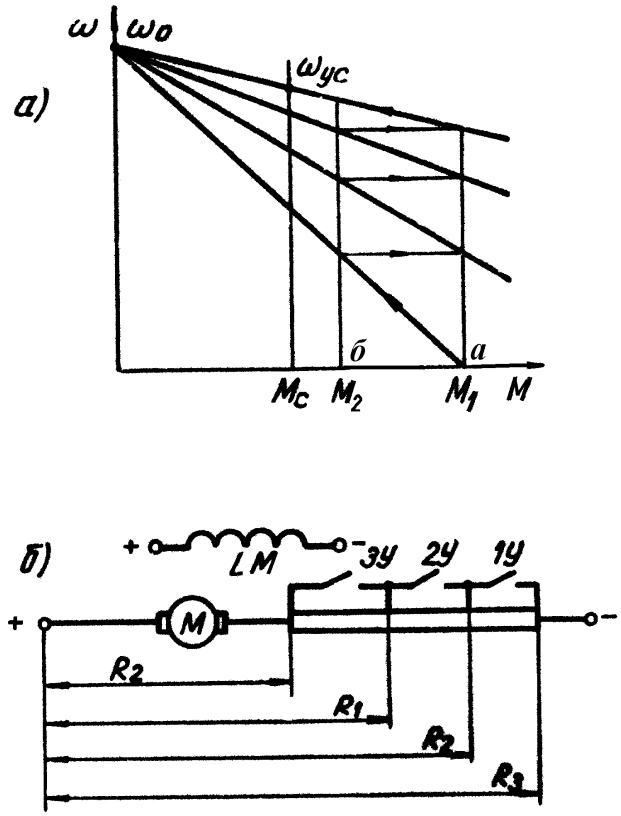


Рис. 3.7. Реостатный пуск двигателя независимого возбуждения:
а – пусковая диаграмма; *б* – схема включения сопротивлений в цепь якоря

Необходимо выполнение условия: $M_2 > M_{\text{с}}$. Если это условие не выполняется, то увеличиваем число ступеней на единицу и производим расчет, начиная с коэффициента γ. Строим пусковую диаграмму (см. рис. 3,7, *а*), для чего отмечаем на оси моментов значения пускового момента M_1

(точка *a*) и момента переключения M_2 (точка *b).* Соединяем точку *a* с точкой идеального холостого хода ω_0 и получаем искусственную характеристику. Точку пересечения этой характеристики с моментом M_2 проецируем на прямую, соответствующую моменту M_1, и т. д. Если расчет произведен верно, то последняя горизонталь пересечет естественную характеристику в точке при моменте, равном M_1. Сопротивление якорной цепи для первой искусственной характеристики $R_1 = R_{\text{ÿ}}\gamma;$ для второй $R_2 = R_1\gamma;$ для третьей $R_3 = R_2\gamma$. Если расчет произведен без арифметических ошибок, то (для $n = 3$) должно быть $R_3 = R_{\text{ï}}$. Схема включения пусковых сопротивлений приведена на рис. 3.7, *б*.

3.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения в двигательном и тормозном режимах работы

Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения представлена на рис. 3.8.

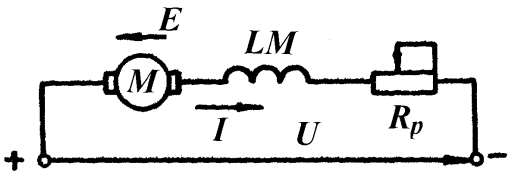


Рис. 3.8. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Обмотка якоря *M* и обмотка возбуждения *LM* машины включены последовательно, что накладывает особенности на ее конструкцию: обмотка возбуждения имеет малое число витков, выполнена из медного провода

большого сечения, обладает малым сопротивлением. Таким образом, ток нагрузки является током возбуждения, и снижение угловой скорости вращения вала машины при увеличении нагрузки происходит как за счет падения напряжения в цепи якоря, так и за счет увеличения потока возбуждения. Это обусловливает малую жесткость механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Уравнение электромеханической характеристики двигателя можно получить, используя второй закон Кирхгофа для якорной цепи и выражения для электродвижущей силы якорной цепи:

$$\left.\begin{aligned} U &= E + IR; \\ E &= k\Phi\omega. \end{aligned}\right\} \qquad (3.18)$$

Решая систему (3.18) относительно угловой скорости, получим выражение электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - I\frac{R}{k\Phi}, \qquad (3.19)$$

где R – сопротивление цепи, состоящее из сопротивления обмотки якоря $R_{\text{яя}}$, обмотки возбуждения $R_{\text{ов}}$, дополнительных полюсов и сопротивления реостата $R_{\text{р}}$; Ом;

Φ – поток возбуждения двигателя, Вб.

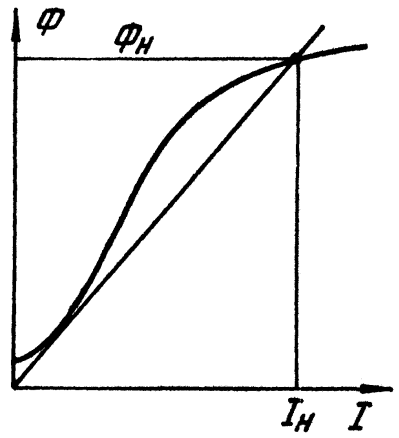


Рис. 3.9. Кривая намагничивания двигателя постоянного

тока последовательного взбуждения

В отличие от двигателя независимого возбуждения магнитный поток, входящий в выражение (3.19), является функцией тока нагрузки: $\Phi = f(I)$. Эта зависимость обычно представляется графически и называется кривой намагничивания (рис. 3.9). Аналитической зависимости для этой кривой не существует, поэтому нет и аналитического выражения для механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Упрощенное уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения можно получить, если принять магнитный поток пропорциональным току нагрузки, т. е. заменить действительную кривую намагничивания прямой линией (см. рис. 3.9). Тогда поток равен:

$$\Phi = aI,$$

а электромагнитный момент:

$$M = k\Phi I = kaI^2.$$

Из последнего выражения определяем ток нагрузки:

$$I = \sqrt{\frac{M}{ka}}.$$

Подставив выражения тока и потока в выражение электромеханической характеристики (3.19), получим уравнение механической характеристики идеализированного двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, т. е. такого двигателя, у которого отсутствует насыщение магнитной системы (рис. 3.10).

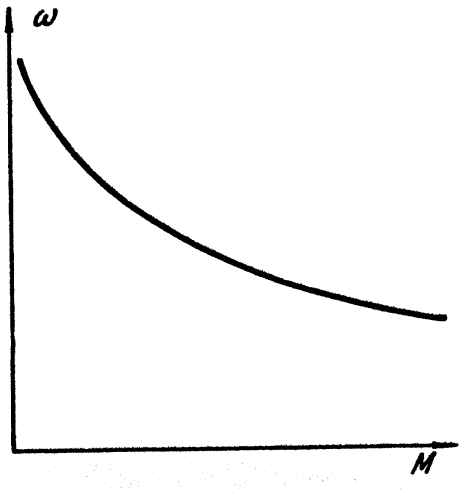


Рис. 3.10. Механическая характеристика идеализированного двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Особенностью этой характеристики является ее малая жесткость при небольших нагрузках, при уменьшении момента угловая скорость вращения двигателя стремится к бесконечности, т. е. характеристика не имеет скорости идеального холостого хода. Уравнение механической характеристики идеализированного двигателя постоянного тока последовательного возбуждения имеет вид:

$$\omega = \frac{A}{\sqrt{M}} - B, \tag{3.20}$$

где $A = \frac{U}{\sqrt{ka}}$, $B = \frac{R}{ka}$ – постоянные коэффициенты.

Уравнение (3.20) дает лишь общее представление о свойствах механической характеристики двигателя последовательного возбуждения, при расчетах этим уравнением пользоваться нельзя, т. к. они дают слишком приближенные результаты. На практике для различного рода расчетов пользуются графическими и графоаналитическими методами, с этой целью применяют зависимости: $n = f(I)$ и $M = \varphi(I)$, которые приводятся в виде графиков в каталогах и справочниках. Это так называемые рабочие характеристики

двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; они учитывают насыщение магнитной системы двигателя, реакцию якоря и потери в двигателе. Момент на рабочей характеристике – это момент на валу двигателя, а не электромагнитный момент, как у двигателя независимого возбуждения.

Для двигателя последовательного возбуждения возможны два тормозных режима: режим торможения противовключением и режим электродинамического (динамического) торможения. Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть не может быть получено по двум причинам: во-первых, при уменьшении момента нагрузки угловая скорость вращения вала двигателя достигает недопустимых значений по условиям прочности обмоток якоря; во-вторых, при изменении направления тока якоря изменяется и направление магнитного потока, а направление момента не изменяется. Поэтому при переходе в тормозной режим необходимо переключить концы обмотки возбуждения. Если двигатель все же будет переведен в режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть, то его параллельная работа с генераторами постоянного тока независимого возбуждения будет неустойчивой. На практике для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть не применяется.

Режим торможения противовключением может быть получен следующими способами:

1) введением большого дополнительного сопротивления в цепь якоря двигателя (только при активном моменте статического сопротивления);

2) изменением полярности напряжения, подводимого к обмотке якоря (момент сопротивления может носить как активный, так и реактивный характер), для ограничения тока в цепь якоря вводится дополнительное сопротивление.

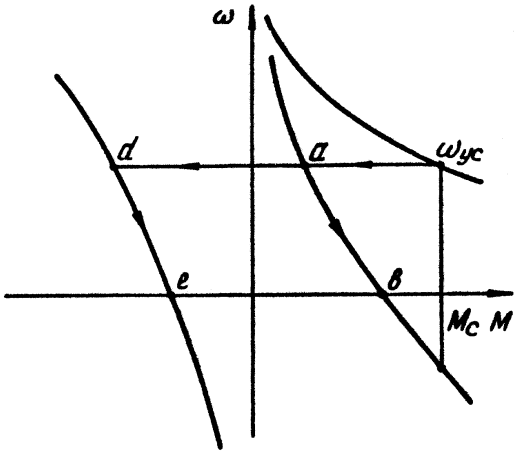


Рис. 3.11. Механические характеристики двигателей последовательного возбуждения в режиме торможения противовключением

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в режиме торможения противовключением являются продолжением двигательного режима во второй и четвертый квадрант (рис. 3.11). Если при работе двигателя в установившемся режиме ($M = M_{\text{ñ}},\ \omega = \omega_{\text{óñ}}$) в цепь якоря включить большое дополнительное сопротивление, то двигатель переходит работать на искусственную (реостатную) характеристику в точку *a.* Момент двигателя стал меньше момента статического сопротивления, угловая скорость вращения двигателя уменьшается в соответствии с характеристикой *ab.* В точке *b* скорость двигателя равна нулю, а момент меньше момента статического сопротивления. При активном моменте статического сопротивления привод начинает разгоняться в противоположном направлении; момент и скорость двигателя на участке характеристики *be* имеют разные знаки; двигатель был включен на направление «вперед», но под действием момента статического сопротивления вращается в направлении «назад», имеет место режим торможения противовключением.

При переключении обмотки якоря двигатель переходит с характеристики на вращение «вперед» на характеристику на направление «назад» (точка *d*); переход осуществляется при постоянной скорости вращения. В точке *d* на

привод действуют два отрицательных момента: момент двигателя и момент статического сопротивления. Под воздействием суммарного отрицательного момента скорость двигателя уменьшается в соответствии с характеристикой *de.* На этом участке характеристики двигатель включен на направление «назад», но по инерции продолжает вращаться в направлении «вперед», т. е. имеет место торможение противовключением.

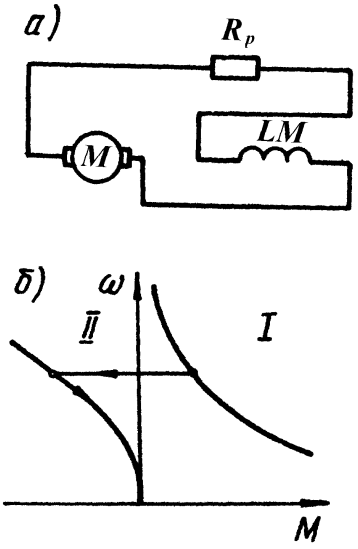


Рис. 3.12. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения в режиме электродинамического торможения
с самовозбуждением:
а – электрическая схема; *б* – механическая характеристика

Режим электродинамического торможения двигателя последовательного возбуждения может быть осуществлен двумя способами: с самовозбуждением и с независимым возбуждением. При торможении с самовозбуждением двигатель отключается от сети и замыкается на сопротивление (рис. 3,12, *а*). Необходимо отметить, что в этом случае во избежание размагничивания машины следует изменить полярность обмотки якоря, чтобы при изменении направления тока в обмотке якоря ток в обмотке возбуждения не изменил свое направление. Механическая характеристика машины для этого тормозного режима представлена на рис. 3.12, *б* во втором квадранте. Как

видно из графика рисунка, при малых угловых скоростях тормозной момент мал.

С увеличением угловой скорости тормозной момент резко возрастает, процесс торможения получается не плавным. Достоинством этого способа является то, что он может использоваться при исчезновении напряжения сети.

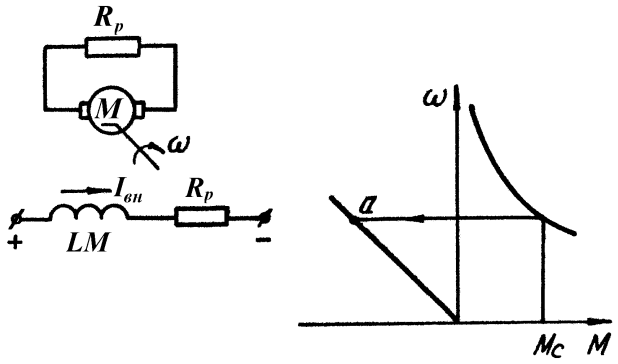


Рис. 3.13. Электродинамическое торможение двигателя последовательного возбуждения с независимым возбуждением

а – электрическая схема; *б* – механическая характеристика

Для получения плавного торможения применяют динамическое торможение с независимым возбуждением (рис. 3.13, *а*): якорь двигателя замыкают на дополнительное сопротивление $R_д$, а обмотка возбуждения подключается к сети через дополнительное сопротивление, ограничивающее ток возбуждения до номинального значения. Машина работает как генератор независимого возбуждения на дополнительное сопротивление, поэтому полученные характеристики подобны механическим характеристикам двигателя независимого возбуждения, работающего в режиме электродинамического торможения. Эти характеристики линейны и проходят через начало координат (рис. 3.13, *б).* Этот способ торможения является неэкономичным, поскольку двигатель потребляет из сети номинальную

мощность, которая рассеивается в сопротивлении, включенном в цепь обмотки возбуждения.

3.4. Построение характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Рассмотрим графический метод построения искусственных (реостатных) характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Основой расчета является естественная (рабочая) характеристика двигателя. Первоначально определим зависимость угловой скорости вращения вала двигателя от сопротивления якорной цепи при неизменном токе нагрузки. В этом случае в уравнении электромеханической характеристики двигателя

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - I\frac{R}{k\Phi} \qquad (3.21)$$

величины $I;\quad \frac{U}{k\Phi} = a;\quad \frac{I}{k\Phi} = b$ будут постоянны, и уравнение (3.21) принимает вид:

$$\omega(R) = a - bR. \qquad (3.22)$$

Выражение (3.22) представляет уравнение прямой линии, которая может быть построена по двум точкам. Построение производится в двух квадрантах: в первом квадранте задана рабочая характеристика $\omega = f(I)$, во втором квадранте строим характеристику $\omega(R)$ (рис. 3.14). Построение производится следующим образом. В первом квадранте на оси абсцисс отмечаем токи $I_1, I_2 \ldots I_6$ и получаем соответствующие этим токам скорости на естественной характеристике $l_1, l_2 \ldots l_6$. Во втором квадранте откладывается по оси абс-

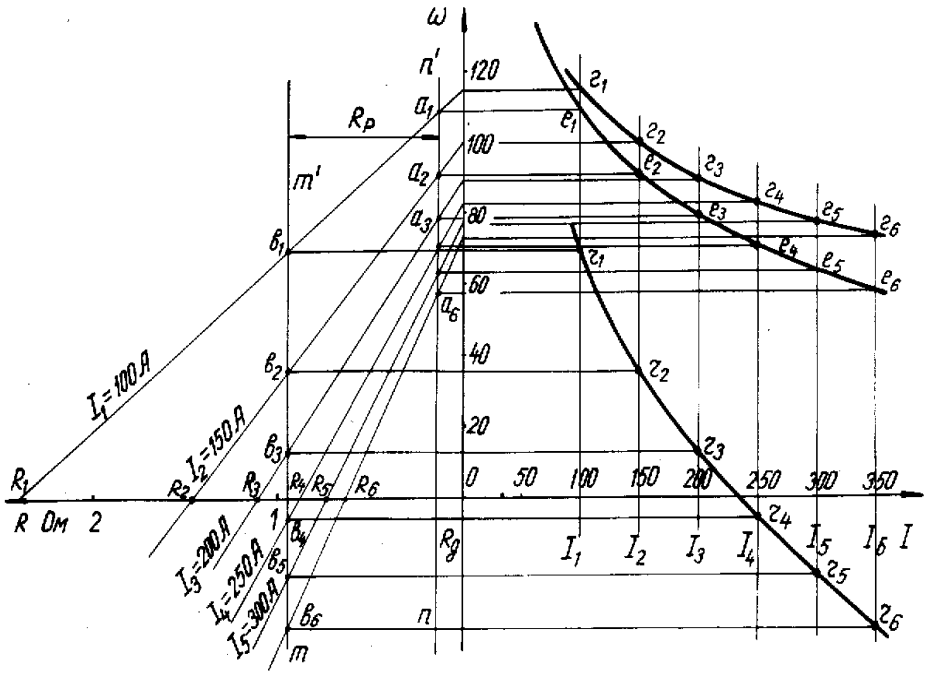


Рис. 3.14. Графическое построение искусственной скоростной характеристики двигателя последовательного возбуждения

цисс собственное сопротивление двигателя $R_{\text{я}}$ и проводится прямая nn' параллельно оси скорости. Точки $l_1, l_2 \cdots$ проектируются на прямую nn' (точки $a_1, a_2 \cdots$). На оси сопротивлений откладываются величины: $R_1 = \frac{U}{I_1}, R_2 = \frac{U}{I_2}$ и т. д. Полученные точки соединяем с точками $a_1, a_2 \ldots$ прямыми линиями постоянного тока $I_1 = \text{const}, I_2 = \text{const} \ldots$ Теперь можно построить искусственную (реостатную) характеристику двигателя при любом наперед заданном сопротивлении. Например, отложив сопротивление реостата $R_{\text{д}}$ (прямая mm'), получим точки пересечения с линиями постоянного тока $b_1, b_2 \cdots$; проецируя эти точки на соответствующие токи $I_1, I_2 \cdots$ в первом квадранте, получим точки $r_1, r_2 \cdots$ для построения реостатной характеристики.

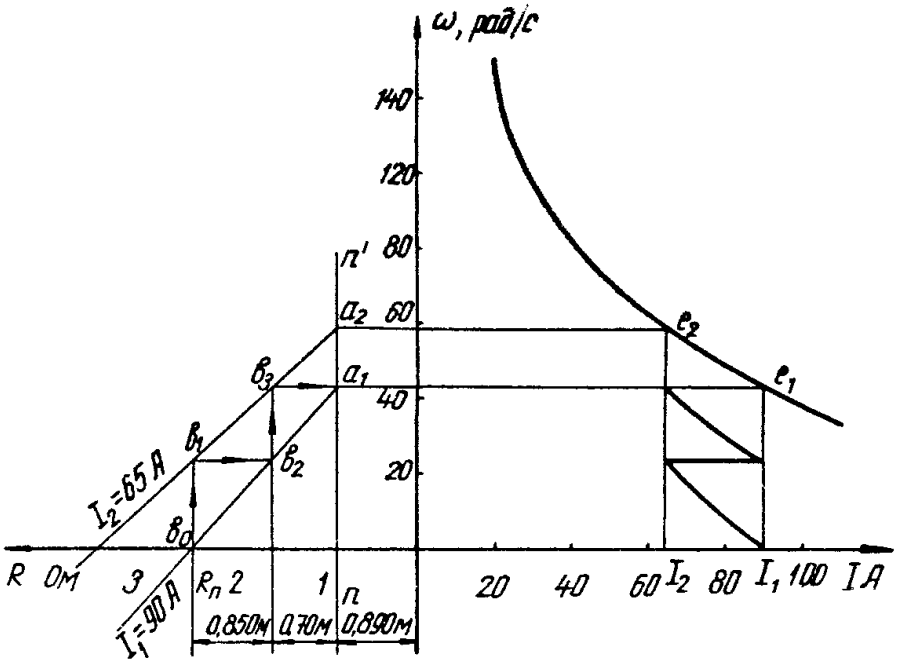


Рис. 3.15. Графический расчет пусковых сопротивлений для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Из всего многообразия искусственных характеристик двигателя последовательного возбуждения особый интерес представляет характеристика, отвечающая идеализированному двигателю с обмотками, не обладающими сопротивлением. Такая характеристика называется граничной. Граничная характеристика получается изложенным методом при продолжении линий постоянных токов до оси угловой скорости. Если полученные при этом точки спроектировать на соответствующие токи в первом квадранте, то будет получена граничная характеристика $\tilde{a}_1, \tilde{a}_2 \ldots$.

Изложенная методика позволяет рассчитать пусковые сопротивления двигателя последовательного возбуждения графическим методом. Для этой цели используют рабочую характеристику (рис. 3.15).

Задаемся пусковым током I_1 и током переключения I_2 и получаем точки l_1 и l_2 на рабочей характеристике. Проектируя точки l_1 и l_2 на прямую *nn'*,

получим точки a_1 и a_2. На оси сопротивлений откладываем значения $R_1 = R_{\text{п}} = \frac{U}{I_1}$ и $R_2 = \frac{U}{I_2}$. Проводим прямые постоянных токов $I_1 = \text{const}$ и $I_2 = \text{const}$. Из точки $R_{\text{п}}$ проводим вертикаль до прямой $I_2 = \text{const}$ в точке b_1, затем проводим прямую, параллельную оси абсцисс до точки b_2; аналогично проводят прямые $b_2 b_3$ и $b_3 a_1$. Построение будет удачным, если последняя горизонталь пройдет через точку a_1. Если этого не произойдет, то изменяют значение тока переключения и повторяют построение. С помощью графического метода получено две ступени пускового реостата. Отрезок $b_1 b_2$ соответствует сопротивлению первой секции пускового реостата r_1, а $b_3 a_1$ - второй секции пускового реостата r_2.

3.5. Механические характеристики двигателей постоянного тока смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: обмотку параллельного возбуждения *LM1* и обмотку последовательного возбуждения *LM2* (рис. 3.16, *а*), поэтому его механические характеристики занимают промежуточное положение по жесткости: они более жесткие, чем характеристики двигателя последовательного возбуждения, и менее жесткие, чем характеристики двигателей независимого возбуждения. Магнитный поток двигателя имеет две составляющие:

$$\Phi = \Phi_{\text{ø}} \pm \Phi_{\text{ñ}}, \qquad (3.23)$$

где $\Phi_{\text{ø}}$ – поток, создаваемый обмоткой параллельного возбуждения (шунтовой);

$\Phi_{\text{ñ}}$ – поток, создаваемый обмоткой последовательного возбуждения (се-

риесной).

Знак (+) соответствует согласованному включению обмоток; знак (–) соответствует встречному включению обмоток.

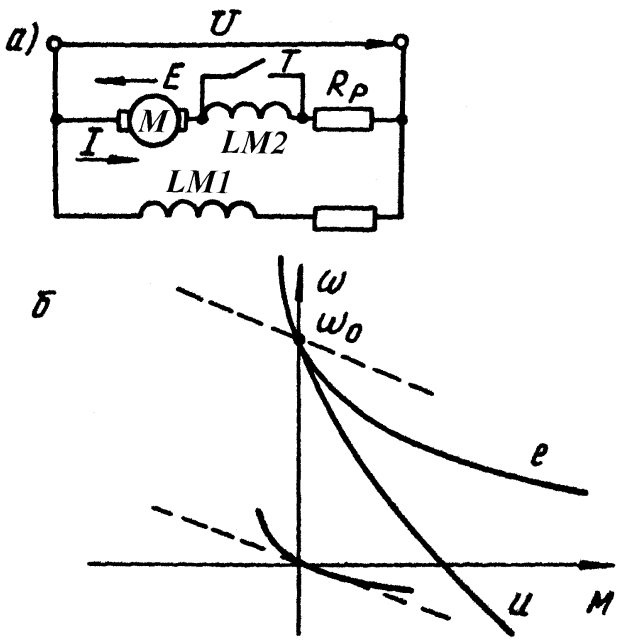


Рис.3.16. Схема включения (*а*) двигателя смешанного возбуждения и механические характеристики (*б*) двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Двигатели со смешанным возбуждением выпускаются со значительным насыщением магнитной системы, поток возбуждения их зависит от тока нагрузки; поэтому двигатели смешанного возбуждения не имеют аналитического выражения для механической характеристики. В отличие от двигателей последовательного возбуждения эти двигатели имеют допустимое значение угловой скорости вращения идеального холостого хода, которая определяется напряжением питания и потоком, создаваемым шунтовой обмоткой: $\omega_0 = \frac{U}{k\hat{O}_ø}$.

Двигатели смешанного возбуждения конструируют таким образом, что при номинальной нагрузке обмотки последовательного и параллельного

возбуждения создают одинаковые потоки. Характеристика двигателя (рис. 3.16, б) при малых нагрузках мягкая; при увеличении нагрузки характеристика становится более жесткой. Это происходит из-за того, что с увеличением нагрузки наступает насыщение машины, и магнитный поток практически не изменяется с увеличением намагничивающей силы обмотки последовательного возбуждения.

Двигатель смешанного возбуждения может работать в трех тормозных режимах: в режиме генераторного торможения с отдачей энергии в сеть, в режиме торможения противовключением и в режиме электродинамического торможения. С изменением направления тока якоря при работе в тормозных режимах обмотка последовательного возбуждения начинает размагничивать машину; поток возбуждения и тормозной момент уменьшаются, а механическая характеристика становится мягкой. Чтобы исключить размагничивающее действие обмотки последовательного возбуждения в тормозных режимах, ее шунтируют (контакт *Т*). При этом получаются линейные механические характеристики, как у двигателя независимого или параллельного возбуждения; на рис. 3.16, *б* они показаны пунктиром.

Расчет искусственных (реостатных) характеристик и пусковых сопротивлений производится на основе рабочих характеристик двигателей с использованием рассмотренного выше графического метода для двигателей последовательного возбуждения.

3.6. Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя в двигательном и тормозном режимах работы

Асинхронные двигатели получили в промышленности весьма широкое применение благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими типами двигателей. Асинхронный двигатель прост и надежен в

эксплуатации, т. к. не имеет коллектора; асинхронные машины дешевле и значительно легче (на единицу мощности) двигателей постоянного тока, требуют меньшего расхода цветных металлов, обладают высоким коэффициентом полезного действия и меньшим моментом инерции. Схема включения асинхронного двигателя в сеть представлена на рис. 3.17, *а.*

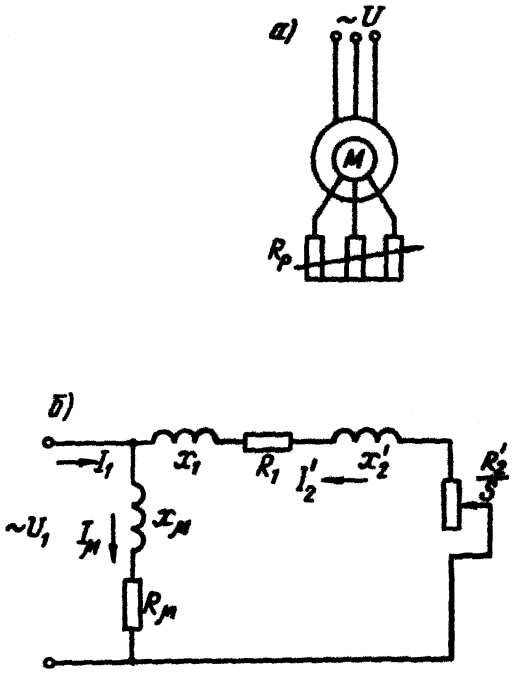


Рис. 3.17. Схема включения *(а)* трехфазного асинхронного двигателя и схема замещения *(б)* трехфазного асинхронного двигателя

Для исследования статических характеристик асинхронной машины в двигательном и тормозном режимах работы используют схемы замещения; наиболее удобной для этих целей является Г-образная схема замещения, представленная на рис. 3.17, *б*, где приняты следующие обозначения: $U_{1\text{ô}}$ – фазное напряжение статора; I_1 – фазный ток статора; I'_2 – приведенный ток ротора; x_1, R_1 – индуктивное и активное сопротивления фазы статора; x'_2, R'_2 – индуктивное и активное сопротивления фазы ротора, приведенные к обмотке статора; x_μ, R_μ – индуктивное и активное сопротивления контура

намагничивания; I_μ – ток контура намагничивания; s – скольжение, выражающее перепад скорости в относительных единицах, $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$; $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ – синхронная скорость асинхронного двигателя; f_1 – частота напряжения сети (в Европе частота напряжения питания промышленных предприятий принята 50 Гц); p – число пар полюсов асинхронной машины.

Выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя может быть получено на основе баланса мощности:

$$P_{э} = P_{м} + \Delta P, \tag{3.24}$$

где $P_{э}$ – электромагнитная мощность, $P_{э} = M \cdot \omega_0$;

$P_{м}$ – механическая мощность, $P_{м} = M \cdot \omega$;

ΔP – мощность потерь в меди ротора, $\Delta P = mI_2'^2 R_2'$;

m – число фаз (m = 3).

С учетом принятых обозначений выражение (3.24) можно переписать следующим образом:

$$M\omega_0 = M\omega + mI_2'^2 R_2', \tag{3.25}$$

откуда

$$M = \frac{mI_2'^2 R_2'}{\omega_0 - \omega}.$$

Перепад скорости можно выразить через скольжение:

$$\omega_0 - \omega = \omega_0 \cdot s.$$

Подставляя последнее выражение в (3.25), получим:

$$M = \frac{mI_2'^2 R_2'}{\omega_0 s}. \tag{3.26}$$

Из схемы замещения (см. рис. 3.17) можно получить выражение для приведенного тока ротора:

$$I_2' = \frac{U_{1ф}}{\sqrt{\left(x_1 + x_2'\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}}. \qquad (3.27)$$

Выражение для электромагнитного момента с учетом зависимости (3.27) принимает вид:

$$M = \frac{m \cdot U_{1ф}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 s\left[\left(x_1 + x_2'\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2\right]}. \qquad (3.28)$$

При номинальных значениях режима питания ($U_{1ф} = U_н$, $f_1 = f_н$) и постоянных сопротивлениях статора и ротора электромагнитный момент асинхронной машины является сложной функцией одного параметра - скольжения, $M = f(s)$. Эта функция имеет два экстремума: максимум в двигательном режиме работы и минимум – в генераторном режиме. Взяв производную $\frac{dM}{ds}$ и приравняв ее к нулю, получим критическое скольжение:

$$s_к = \pm\frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}} = \pm\frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_к^2}}, \qquad (3.29)$$

где $x_к = x_1 + x_2'$ – индуктивное сопротивление машины при коротком замыкании.

Подставив выражение (3.29) в (3.28), получим выражение для критического момента:

$$M_к = \frac{mU_{1ф}^2}{2\omega_0\left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_к^2}\right)}. \qquad (3.30)$$

Знак (+) выражениях (3.29) и (3.30) относится к двигательному режиму асинхронной машины, знак (–) – к генераторному режиму.

Из выражения (3.30) следует, что критический момент асинхронной машины в генераторном режиме работы по абсолютной величине больше, чем в двигательном:

$$\left|\frac{M_{\text{êã}}}{M_{\text{êä}}}\right| = \frac{\sqrt{R_1^2 + x_{\text{ê}}^2} + R_1}{\sqrt{R_1^2 + x_{\text{ê}}^2} - R_1} > 1,$$

что обусловлено падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора R_1.

Выражения (3.28) и (3.30) могут быть приведены к следующему виду:

$$M = \frac{2M_{\text{ê}}\left(1 + as_{\text{ê}}\right)}{\left(\frac{s}{s_{\text{ê}}} + \frac{s_{\text{ê}}}{s} + 2as_{\text{ê}}\right)}, \qquad (3.31)$$

где $a = \frac{R_1}{R_2'}$.

Если пренебречь активным сопротивлением статора $R_1 = 0$, то a=0, и критические моменты асинхронной машины в двигательном и генераторном режимах работы будут равны. В этом случае получается упрощенное уравнение механической характеристики асинхронного двигателя, которым чаще всего пользуются в практических расчетах:

$$M = \frac{2M_{\text{ê}}}{\left(\frac{s}{s_{\text{ê}}} + \frac{s_{\text{ê}}}{s}\right)}. \qquad (3.32)$$

Из полученных выражений можно сделать следующие выводы. Критическое скольжение пропорционально сопротивлению ротора, а критический момент не зависит от сопротивления ротора. Критические скольжения в двигательном и генераторном режимах работы равны по абсолютной величине, а критический момент в генераторном режиме работы по модулю больше критического момента в двигательном режиме: $\left|M_{\text{êã}}\right| > \left|M_{\text{êä}}\right|$. Критический момент пропорционален квадрату приложенного напряжения,

поэтому асинхронный двигатель чувствителен к изменению напряжения сети, например, при изменении напряжения сети на 10 % критический момент изменяется на 20 %. Это существенный недостаток асинхронного двигателя.

На графике механической характеристики асинхронного двигателя *M=f(s)* (рис. 3.18) можно выделить следующие характерные точки:

1) $s = 0,\ \omega = \omega_0,\ M_0 = 0$ – режим идеального холостого хода;

2) $s = s_{\text{í}}$, $\omega = \omega_{\text{í}}$, $M = M_{\text{í}}$ - номинальный режим работы;

3) $s = s_{\text{ê}}$, $M = M_{\text{ê}}$ - машина развивает критический момент в двигательном режиме работы;

4) $s = 1,\ \omega = 0,\ M = M_{\text{í}}$ - двигатель развивает пусковой момент при неподвижном роторе.

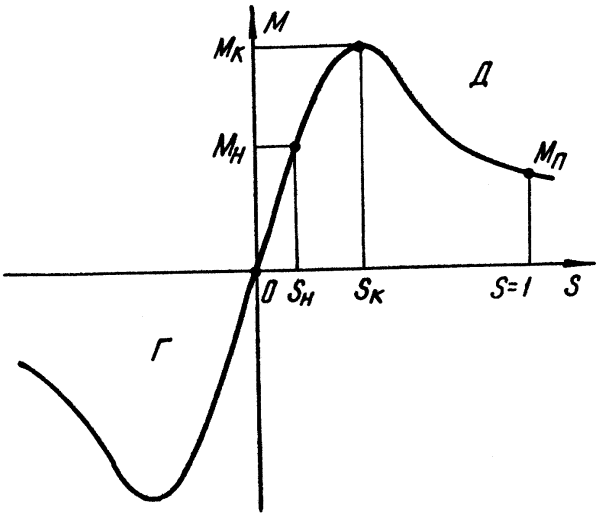


Рис. 3.18. График механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя

При $s > 1$ скорость двигателя отрицательна $\omega < 0,$ а момент положителен; $M > 0;$ имеет место торможение противовключением. Если скольжение отрицательное $s < 0,$ то скорость больше синхронной $\omega > \omega_0,$ а

электромагнитный момент машины отрицателен $M < 0$; в этом случае машина работает в генераторном режиме с отдачей энергии в сеть.

С увеличением скольжения от нуля до критического значения электромагнитный момент асинхронной машины возрастает, при дальнейшем увеличении скольжения ($s > s_к$) момент уменьшается, что объясняется уменьшением активной составляющей тока двигателя.

Чтобы получить механическую характеристику асинхронного двигателя в обычной форме: $\omega = \varphi(M)$, необходимо к выражению (3.32) добавить зависимость между угловой скоростью и скольжением: $\omega = \omega_0(1 - s)$. Совокупность двух выражений даст механическую характеристику двигателя в параметрической форме. Исключив из них параметр *s,* получают график механической характеристики $\omega = \varphi(M)$. На рис. 3.19 представлены графики естественной и искусственных (реостатных) механических характеристик асинхронной машины в двигательном и тормозных режимах работы. Как видно из графиков этих рисунков, с увеличением сопротивления ротора увеличивается критическое скольжение и пусковой момент до критического значения; при дальнейшем увеличении сопротивления пусковой момент начинает убывать. Критический момент остается неизменным.

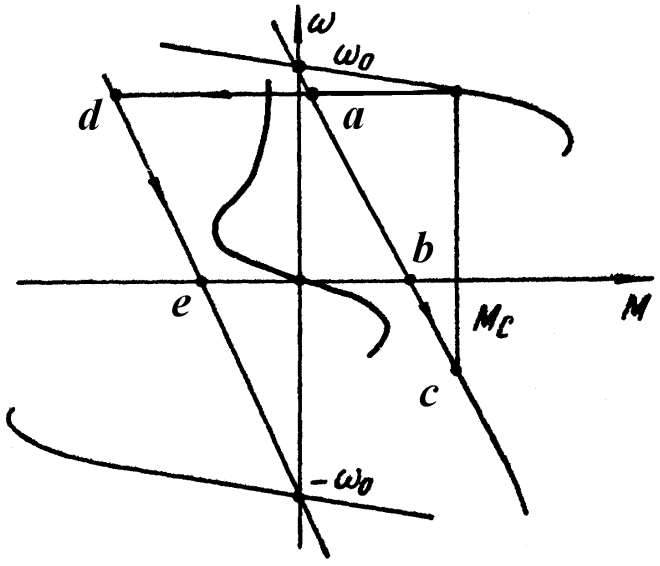


Рис. 3.19. Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя в тормозных режимах

Для двигателей с короткозамкнутьш ротором нет возможности изменять сопротивление ротора и увеличивать его пусковой момент. В этом случае важной характеристикой двигателя является показатель, называемый кратностью начального пускового момента: $K_{\text{ï}} = \frac{M_{\text{ï}}}{M_{\text{í}}}$. Для двигателей с короткозамкнутым ротором в каталогах указывается кратность начального пускового момента; двигатель нормального исполнения обладает кратностью начального пускового момента в пределах $1{,}0 \le K_{\text{ï}} \le 1{,}9$; крановометаллургические $2{,}5 \le K_{\text{ï}} \le 3{,}3$.

С введением сопротивления в цепь ротора изменяется начальный пусковой ток асинхронного двигателя, значение которого можно определить из выражения (3.27) при $s = 1$:

$$I_{ï} = \frac{U_{1\hat{o}}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2)^2}}. \qquad (3.33)$$

Для короткозамкнутых двигателей в каталогах приводится кратность начального пускового тока $K_I = \frac{I_{\text{ï}}}{I_{í}}$, величина которой колеблется в пределах $5{,}5 \le K_I \le 7{,}0$.

Важной характеристикой асинхронной машины является кратность максимального (критического) момента, определяемая отношением критического момента к номинальному моменту:

$\lambda = \frac{M_{\hat{e}}}{M_{\text{í}}}$.

Кратность максимального момента у двигателей с фазным ротором нормального исполнения должна быть не ниже 1,8; а у короткозамкнутых двигателей 1,7; для краново-металлургических двигателей $\lambda = 2{,}3 \div 3{,}4$.

Реостатные характеристики асинхронного двигателя обладают меньшей жесткостью, чем естественные. В рабочей зоне изменения нагрузки механическая характеристика асинхронного двигателя может быть представлена прямой линией. С этой целью в выражении (3.32) пренебрегают членом $\frac{s}{s_{\hat{e}}}$, тогда:

$$M = \frac{2M_{\hat{e}}}{s_{\hat{e}}} s. \qquad (3.34)$$

Подставив в последнее выражение зависимость скольжения от скорости, после простых преобразований получим уравнение прямой линии:

$$\omega = \omega_0 - \frac{1}{|\beta|} M, \qquad (3.35)$$

где $|\beta| = \frac{2M_{\hat{e}}}{\omega_0 s_{\hat{e}}}$ – жесткость рабочей части механической характеристики асинхронного двигателя в точке идеального холостого хода.

Жесткость механической характеристики асинхронного двигателя зависит от скольжения, в общем виде она может быть определена из выражения:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{dM}{ds} \cdot \frac{ds}{d\omega} = -\frac{2M_{\hat{e}} s_{\hat{e}}}{\omega_0} \cdot \frac{\left(s_{\hat{e}}^2 - s^2\right)}{\left(s_{\hat{e}}^2 + s^2\right)^2}. \qquad (3.36)$$

В рабочей зоне изменения нагрузки $\left(s < s_{\hat{e}}\right)$ жесткость отрицательна и механическая характеристика статически устойчива; в нерабочей части характеристики $\left(s > s_{\hat{e}}\right)$ жесткость положительна, на этой части характеристики устойчивая работа двигателя невозможна.

Асинхронная машина может работать в следующих тормозных режимах: в режиме генераторного торможения с отдачей энергии в сеть, в режиме торможения противовключением и в режиме электродинамического торможения. Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть возможно при скорости выше синхронной, при этом скольжение отрицательное. Механическая энергия с вала двигателя преобразуется в электрическую и отдается в сеть, т.е. электромагнитная мощность меняет свой знак, что видно из выражения:

$$P_{ý} = M\omega_0 = \frac{mI_2'^2 R_2'}{s} \qquad (3.37)$$

при $s < 0,\ P < 0.$

Реактивная мощность ротора равна:

$$Q = mU_{1ô} I_2' \sin\psi_2, \qquad (3.38)$$

где

$$I_2' = \frac{U_{1ô}}{z};$$

$$\sin\psi_2 = \frac{x_ê}{z};$$

$$z = \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_ê^2}.$$

После преобразований выражение (3.38) принимает вид:

$$Q = \frac{mU_{1ô}^2 \cdot x_ê \cdot s^2}{\left[\left(R_1 s + R_2'\right)^2 + x_ê^2 s^2\right]}. \qquad (3.39)$$

Из выражения (3.39) следует, что реактивная мощность асинхронного двигателя всегда положительна, т. е. он потребляет реактивную энергию из сети, которая идет на создание магнитного поля машины, как в двигательном, так и в генераторном режиме работы. Таким образом, генераторный режим для асинхронной машины возможен только при

наличии сети, способной снабжать ее реактивной энергией. Отсюда следует также вывод, что коэффициент мощности ($\cos\varphi$) асинхронного двигателя никогда не может быть равным единице.

На практике режим генераторного торможения используется в установках с активным моментом статического сопротивления (при опускании больших грузов в шахту, колонны бурильных труб в скважину и т.д.). Тормозные режимы асинхронного двигателя представлены на рис. 3.19. В первом квадранте имеет место двигательный режим работы, по мере приближения угловой скорости машины к скорости идеального холостого хода (синхронной) ее момент стремится к нулю. При дальнейшем увеличении скорости под действием внешнего момента, когда $\omega = \omega_0$, электрическая машина переходит в режим генераторного торможения. Механическая характеристика режима генераторного торможения является продолжением характеристики двигательного режима из первого во второй квадрант.

Торможение противовключением имеет значительно большее применение для асинхронной машины, чем генераторное с отдачей энергии в сеть. Режим торможения противовключением может быть получен, как и для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, введением большого дополнительного сопротивления в цепь ротора. В этом случае момент статического сопротивления должен быть активным. Этому режиму работы соответствует участок механической характеристики *bc* (см. рис. 3.19).

Режим торможения противовключением может быть получен также путем переключения на ходу двух фаз обмотки статора (сменой порядка чередования фаз), что ведет к изменению направления вращения магнитного поля машины. Ротор при этом вращается против направления движения магнитного поля машины и постепенно замедляется. Этому режиму соответствует участок механической характеристики *de* (см. рис. 3.19). Когда угловая скорость асинхронной машины снижается до нуля (точка *e*), двигатель отключают от сети, иначе он может снова перейти в двигательный

режим в третьем квадранте, причем ротор будет вращаться в направлении, обратном предыдущему, т.е. произойдет реверс двигателя.

При этом способе торможения с целью увеличения тормозного момента и уменьшения тормозного тока в цепь ротора включается значительное активное сопротивление.

Электродинамическое торможение асинхронной машины может быть осуществлено отключением обмотки статора от сети переменного тока и подключением к источнику постоянного тока, обмотка ротора в этом случае замыкается на сопротивление. Постоянный ток, протекая по обмотке статора, образует неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора его обмотки пересекают магнитные силовые линии поля статора. В обмотках ротора наводится электродвижущая сила, под действием которой в роторе протекает ток. Взаимодействие тока ротора и поля статора обусловливает тормозной момент, величина которого зависит от величины постоянного тока статора, сопротивления ротора и скорости вращения вала машины. Механическая характеристика асинхронной машины в режиме электродинамического торможения проходит через начало координат и представлена на рис. 3.19. На рис. 3.20 представлены различные схемы включения обмоток статора к сети постоянного тока, с целью получения режима электродинамического торможения. Этот способ электродинамического торможения называется торможением с независимым возбуждением.

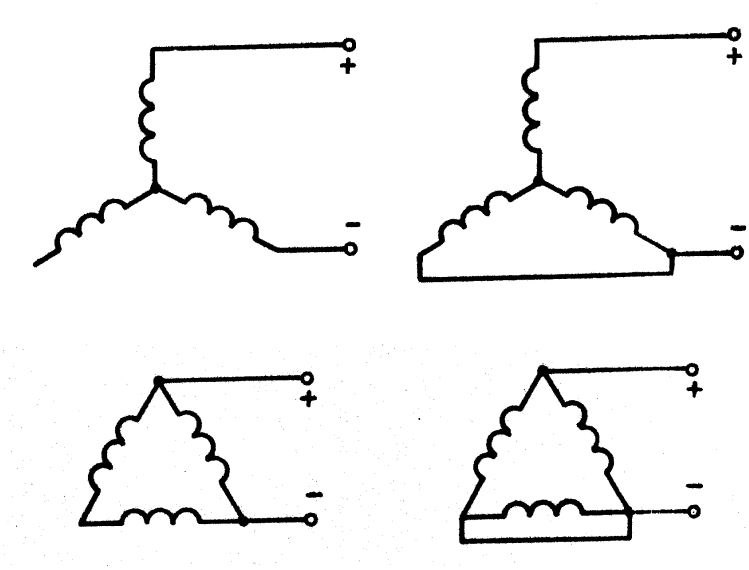


Рис. 3.20. Схемы включения обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя для получения режима электродинамического торможения

На практике иногда применяют режим электродинамического торможения с самовозбуждением. С этой целью к статору асинхронной машины подключают батарею статических конденсаторов. В этом случае при отключении машины от сети энергия, запасенная конденсаторами, идет на создание магнитного поля статора. Схема электродинамического торможения асинхронной машины с самовозбуждением ввиду высокой стоимости бумажных конденсаторов не нашла широкого применения на практике.

3.7. Построение механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя

Для построения механических характеристик трехфазного асинхронного двигателя используются его паспортные и каталожные данные: $P_{\text{í}}$ - номинальная мощность на валу двигателя; $n_{\text{í}}$ - номинальная скорость вала двигателя; λ - перегрузочная способность; $E_{2\hat{e}}$ - напряжение на кольцах ротора при неподвижном двигателе; $I_{2\text{í}}$ - номинальный ток ротора.

Определяют угловую номинальную и синхронную скорость вращения асинхронного двигателя: $\omega_{í} = \frac{\pi n_{í}}{30}; \quad \omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}.$ Критическое скольжение определяют из выражения (3.32) при $M = M_{í}$ и $s = s_{í}$:

$$M_{í} = \frac{2M_{ê}}{\left(\frac{s_{í}}{s_{ê}} + \frac{s_{ê}}{s_{í}}\right)}. \qquad (3.40)$$

Решая (3.40) относительно $s_{ê}$ и заменяя $\frac{M_{ê}}{M_{í}} = \lambda$,получают выражение для критического скольжения:

$$s_{ê} = s_{í}\left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}\right). \qquad (3.41)$$

Номинальный момент двигателя: $M_{í} = \frac{P_{í} \cdot 10^3}{\omega_{í}}.$

Критический момент: $M_{ê} = M_{í} \cdot \lambda.$

Величина сопротивления ротора: $R_2 = \frac{E_{2ê} \cdot s_{í}}{\sqrt{3} I_{2í}}.$

Задаваясь значениями скольжения $0 \le s \le 1$, по выражениям (3.32) и $\omega = \omega_0(1 - s)$ определяют момент и угловую скорость вращения двигателя; расчеты сводят в табл. 3.1.

Взяв две последние строчки из табл. 3.1, строят естественную характеристику трехфазного асинхронного двигателя $\omega = f(M).$ Для построения искусственной (реостатной) характеристики асинхронного двигателя при заданном сопротивлении реостата $R_ð$ необходимо в табл. 3.1 пересчитать первую и третью строки (при тех же значениях момента) по выражениям:

$$s_{è} = \frac{s\left(R_2 + R_ð\right)}{R_2} \quad \text{и} \quad \omega_{è} = \omega_0\left(1 - s_{è}\right).$$

Таблица 3.1

Расчет механической характеристики асинхронной машины

s	0	...	$s_{\text{í}}$	$s_{\text{ê}}$	...	1
M	0		$M_{\text{í}}$	$M_{\text{ê}}$		$M_{\text{ê}}$
ω	ω_0		$\omega_{\text{í}}$			0

Построение пусковой диаграммы и расчет пусковых сопротивлений могут быть произведены на основании естественной характеристики трехфазного асинхронного двигателя (рис. 3.21), для чего проводят прямые $M_1 = 0{,}85M_{\text{ê}}$ и $M_2 = (1{,}2 \div 1{,}5)M_{\text{c}}$ до пересечения с естественной характеристикой в ее рабочей части, точки *b* и *b′*. Через полученные точки проводят прямую до пересечения с линией синхронной скорости в точке *t,* которую называют полюсом. Полюс соединяют прямой с точкой $(M_1, 0)$ точка *e.* Дальнейшее построение, аналогичное построению пусковой диаграммы для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, показано на рис. 3.21. Последняя горизонталь должна проходить через точку *b* на естественной характеристике; если этого не произойдет, то необходимо изменить значение момента переключения M_2 (при том же значении пускового момента M_1) в ту или иную сторону и повторить построение. Сопротивление секции пускового реостата определяется по выражениям: $r_{\text{c}1} = R_2 \dfrac{de}{ab}$; $r_{\text{c}2} = R_2 \dfrac{dc}{ab}$; $r_{\text{c}3} = R_2 \dfrac{bc}{ab}$, значения *de, dc* и *be* берутся в мм из графика рис. 3.21. Число ступеней пускового реостата может быть любым наперед заданным, в данном случае (рис. 3.21) пуск асинхронного двигателя производится в три ступени.

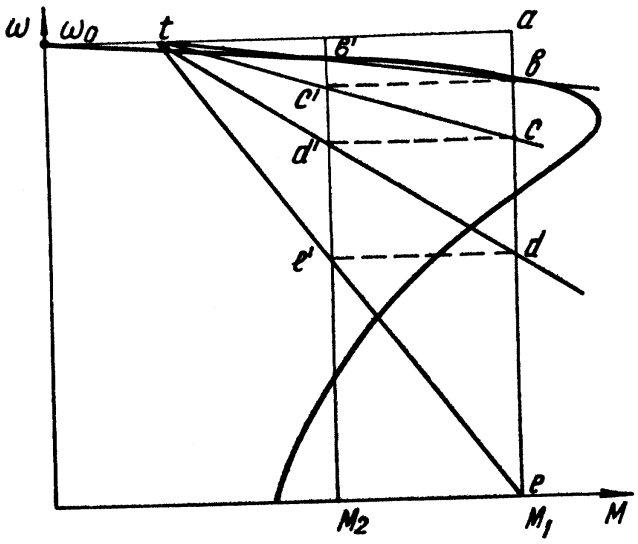


Рис. 3.21. Пусковая диаграмма трехфазного асинхронного двигателя

3.8. Механическая и угловая характеристики синхронного двигателя

На рис. 3.22, *а* представлена схема включения синхронного двигателя в электрическую сеть. Синхронная машина имеет обмотку статора, которая включается в сеть трехфазного переменного тока, и обмотку ротора, получающую питание от источника постоянного тока; кроме того, на роторе расположена пусковая обмотка.

Трехфазная обмотка статора создает магнитный поток, вращающийся с синхронной угловой скоростью, которая определяется частотой сети и числом пар полюсов обмотки. Постоянный ток, протекая по обмотке ротора, создает основной магнитный поток синхронной машины, неподвижный относительно ротора. Синхронная машина развивает момент только при постоянном взаимодействии полей статора и ротора, когда эти поля жестко сцеплены, т.е. при синхронной скорости машины. Это накладывает особенности на механическую характеристику синхронной машины, которая в пределах изменения нагрузки от $-M_{\text{êã}}$ до $+M_{\text{êä}}$ работает с постоянной скоростью вращения (см. рис. 3.22, *б*). Синхронные машины применяются в

приводах механизмов, не требующих регулирования скорости, к которым относятся компрессоры, холодильные машины, насосы, вентиляторы, дробилки и др. Синхронные машины имеют высокий коэффициент полезного действия и могут работать с высоким и опережающим коэффициентом мощности, что обусловило их широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Однако синхронные машины дороже асинхронных, сложнее в обслуживании, имеют тяжелые условия пуска.

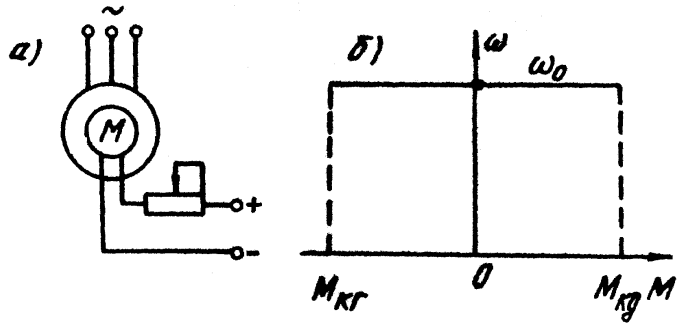


Рис. 3.22. Схема включения (*а*) и механическая характеристика (*б*) синхронного двигателя

Синхронная машина развивает момент только при синхронной угловой скорости; при неподвижном роторе вращающий момент отсутствует. Поэтому синхронная машина запускается как асинхронная, для чего снабжается специальной пусковой короткозамкнутой обмоткой. При пуске обмотка возбуждения ротора замыкается на разрядное сопротивление, которое в $10 \div 12$ раз превышает сопротивление обмотки возбуждения; обмотка статора включается в сеть трехфазного переменного тока и двигатель разгоняется как асинхронный. Синхронная машина имеет пусковую характеристику как у короткозамкнутого асинхронного двигателя. Пусковой момент, создаваемый взаимодействием поля статора с током ротора, разгоняет машину. Когда угловая скорость ротора достигнет значения подсинхронной скорости ($\omega = 0{,}95\omega_0$), в обмотку возбуждения подают постоянный ток, и машина автоматически втягивается в синхронизм.

Если этого не произойдет, то через определенный промежуток времени защита отключит обмотку статора от сети.

Пусковая характеристика синхронной машины имеет две характерные точки: пусковой момент $M_{\text{п}}$, развиваемый в неподвижном состоянии, и входной, или подсинхронный, момент $M_{\text{вх}}$, развиваемый двигателем при подсинхронной угловой скорости. Синхронные машины могут иметь пусковые характеристики двух типов: с большим сопротивлением пусковой обмотки, у которых большой пусковой и малый входной моменты; и с малым сопротивлением пусковой обмотки, у которых большой входной, но малый пусковой момент. В зависимости от требований, предъявляемых к приводу, и от условий работы применяются синхронные машины с разными пусковыми характеристиками.

Среднее значение угловой скорости синхронной машины (за период) постоянно и определяется частотой питающего напряжения и числом ее пар полюсов. Мгновенное же значениее угловой скорости может изменяться под влиянием пульсации момента статического сопротивления. Эти колебания происходят за счет изменения угла между вектором питающего напряжения и вектором электродвижущей силы обмотки статора. Колебания угловой скорости практически сказываются на работе синхронной машины на пульсирующую нагрузку, например, на поршневой компрессор. В таких случаях устойчивость работы синхронной машины определяют на основе ее угловой характеристики, под которой понимают зависимость момента синхронной машины от угла между векторами напряжения и электродвижущей силы обмотки статора, выраженного в электрических градусах. На рис. 3.23, *а* этот угол обозначен через θ.

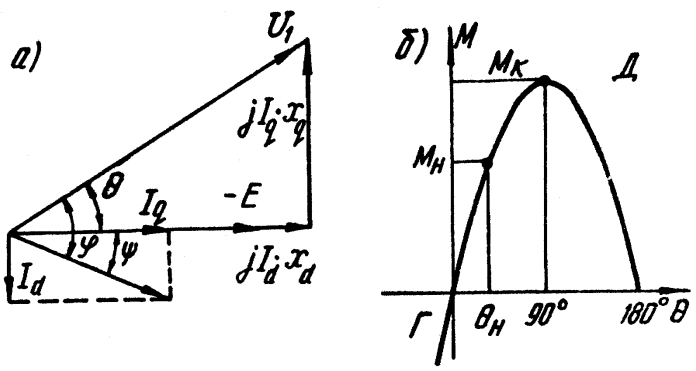


Рис. 3.23. Векторная диаграмма (*а*) и угловая характеристика (*б*) синхронного двигателя

Для вывода уравнения угловой характеристики синхронной машины воспользуемся ее упрощенной векторной диаграммой (см. рис. 3.23, *а*), которая получается, если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора. Используя геометрические соотношения векторной диаграммы и выражение для электромагнитной мощности двигателя, получим систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= mU_1 I_1 \cos\varphi; \\ \varphi &= \theta + \psi; \\ I_1 \sin\psi &= I_{d;} \\ I_1 \cos\psi &= I_q; \\ U_1 \cos\theta &= E + I_d x_{d;} \\ U_1 \sin\theta &= I_q x_q, \end{aligned}\right\} \qquad (3.42)$$

где P_1 – электромагнитная мощность машины;

φ – угол между током и напряжением обмотки статора;

U_1 – напряжение фазы статора;

I_1 – ток фазы статора;

I_d, I_q – составляющие тока по продольной и поперечной осям;

x_d, x_q – синхронные индуктивные сопротивления по продольной и попереч-

ной осям соответственно;

E – электродвижущая сила обмотки статора;

ψ – угол между током и электродвижущей силой статора;

M – электромагнитный момент синхронной машины;

ω_0 – синхронная скорость синхронной машины.

Решая систему (3.42) относительно момента, получим уравнение угловой характеристики синхронной машины:

$$M = \frac{m}{\omega_0}\left[\frac{U_1 E}{x_d}\sin\theta + \frac{U_1^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta\right]. \qquad (3.43)$$

Электромагнитный момент состоит из двух составляющих: синхронного момента, пропорционального ЭДС и $\sin\theta$, и реактивного момента, пропорционального $\sin 2\theta$ и возникающего в двигателе без возбуждения из-за наличия явнополюсного ротора. Машины с неявнополюсным ротором имеют $x_d = x_q$, и реактивный момент, равный нулю. В мощных явнополюсных синхронных машинах реактивный момент составляет $10 \div 20$ % от общего момента, поэтому им часто пренебрегают. Уравнение угловой характеристики для неявнополюсного синхронного двигателя имеет вид:

$$M = \frac{mU_1 E}{\omega_0 x}\sin\theta = M_{\hat{e}}\sin\theta, \qquad (3.44)$$

где $M_{\hat{e}}$ - критический момент.

Как видно из выражения (3.44), критический момент синхронной машины зависит от величины питающего напряжения в первой степени, т. е. она менее чувствительна к колебаниям напряжения сети, чем асинхронный двигатель. Кроме того, в случае больших нагрузок критический момент синхронной машины может быть увеличен за счет электродвижущей силы E (путем увеличения тока возбуждения ротора), что невозможно для асинхронного двигателя.

Угловая характеристика неявнополюсной синхронной машины представляет синусоиду (рис. 3.23, *б*); максимальное (критическое) значение момента достигается при угле $\theta = 90^\circ$. Характеристика проходит через начало координат; с увеличением нагрузки увеличивается момент, развиваемый двигателем, и угол θ, что удовлетворяет условию устойчивой работы двигателя. Когда угол $\theta > 90^\circ$, условие устойчивости нарушается, т.к. с увеличением нагрузки угол θ растет, а момент двигателя уменьшается, вследствие чего двигатель выпадает из синхронизма. Номинальному моменту двигателя соответствует номинальное значение угла $\theta_{i} = 25 \div 30^\circ.$

Перегрузочная способность синхронной машины:

$$\lambda = \frac{M_{\hat{e}}}{M_{i}} = \frac{1}{\sin\theta_{i}} = 2{,}0 \div 2{,}5.$$

Существуют специальные синхронные двигатели с повышенной перегрузочной способностью, доходящей до $3{,}5 \div 4.$ При отрицательных углах $\theta < 0$ момент синхронной машины отрицателен, она работает в режиме генераторного торможения.

Для синхронной машины возможны все три тормозных режима. Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть практического применения не имеет, т.к. двигатель работает с постоянной скоростью и не может быть заторможен, а для получения электрической энергии используют более экономичные синхронные генераторы. Торможение противовключением также не применяется на практике, т. к. оно сопровождается большими токами из сети и может привести к выходу из строя пусковой аппаратуры и сильному нагреву пусковой обмотки.

Наиболее применяемым для синхронной машины является режим электродинамического торможения, при котором обмотка статора отключается от сети и замыкается на тормозное сопротивление, а ротор получает питание от источника постоянного тока. Интенсивность

торможения зависит от величины сопротивления включенного в цепь статора и величины тока возбуждения ротора. Время торможения при питании ротора от собственного возбудителя, находящегося на валу машины, больше, чем при питании от независимого источника постоянного тока. Машина работает генератором переменного тока переменной частоты на добавочное сопротивление. Кинетическая энергия, запасенная вращающимися частями привода, превращается в электрическую и рассеивается в виде тепла в сопротивлениях статорных цепей синхронной машины.

Контрольные вопросы

1. Что называют механической характеристикой электрического двигателя?
2. Написать уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
3. Перечислить тормозные режимы электрических машин.
4. Начертить механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в четырех квадрантах.
5. Начертить механическую характеристику двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
6. Перечислить тормозные режимы двигателя последовательного возбуждения.
7. Начертить схему замещения асинхронного двигателя.
8. Написать уравнение механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя.
9. Перечислить достоинства и недостатки асинхронного двигателя.
10. От каких параметров зависят критический момент и критическое скольжение асинхронного двигателя?
11. С какой целью при пуске асинхронного двигателя вводят в цепь ротора добавочное сопротивление?
12. Перечислить тормозные режимы работы асинхронного двигателя.

13. Дать определение угловой характеристики синхронного двигателя.

14. От каких параметров зависит критический момент синхронного двигателя?

15. Начертить векторную диаграмму и угловую характеристику синхронного двигателя.

4. РЕГУЛИРОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

4.1. Цели и задачи регулирования угловой скорости вращения электроприводов. Показатели регулирования скорости

Большое количество приводов в промышленности требует регулирования угловой скорости вращения исполнительного органа рабочей машины. К ним относятся приводы металлообрабатывающих станков, подъемных машин, экскаваторов, буровых станков, бумагоделательных и текстильных машин, лентопротяжных механизмов и т. д. В металлорежущих станках необходимо изменять угловую скорость вращения при переходе от черновой к чистовой обработке детали или при изменении диаметра детали для поддержания необходимой скорости резания. В подъемных машинах скорость следует снижать при остановках, чтобы обеспечить необходимое значение замедления и точную остановку подъемного сосуда в заданном положении. При бурении глубоких скважин регулирование угловой скорости позволяет проходить различные породы при оптимальных значениях режимных параметров и добиться высокой стойкости породоразрушающего инструмента.

Регулированием угловой скорости называется ее принудительное изменение в зависимости от требований технологического процесса и независимо от нагрузки. Регулирование угловой скорости может быть обеспечено либо механическим путем (коробки скоростей, вариаторы), либо путем электрического воздействия на привод. Механические способы регулирования получили распространение при переходе от нерегулируемого привода к регулируемому. В настоящее время все большее распространение получают электрические способы регулирования угловой скорости. Понятие

регулирования угловой скорости не следует смешивать с естественным изменением скорости, вызванным изменением нагрузки на валу рабочей машины. Регулирование угловой скорости осуществляется дополнительным воздействием со стороны оператора или системы управления на приводной двигатель. Регулирование угловой скорости имеет целью улучшение качества продукции, увеличение производительности агрегата, снижение затрат электроэнергии и улучшение условий труда.

В настоящее время существует много различных методов регулирования угловой скорости, которые отличаются как по сложности реализации, так и по результатам. Для сравнения эффективности применения того или иного метода регулирования угловой скорости вращения вала рабочей машины или выбора типа регулируемого электропривода существуют следующие показатели регулирования скорости: диапазон регулирования, плавность, экономичность, стабильность работы на заданной скорости, направление регулирования, допустимая нагрузка при различных скоростях.

Диапазоном регулирования угловой скорости называется отношение максимальной $\omega_{\max}$ к минимальной $\omega_{\min}$ угловой скорости вращения при номинальной нагрузке:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}. \qquad (4.1)$$

Обычно диапазон регулирования выражается в целых числах (например, 2:1, 10:1, 1000:1). Современная промышленность требует от приводов различные диапазоны регулирования угловой скорости вращения. При изготовлении низких сортов бумаги необходимо иметь диапазон регулирования скорости 3:1, а высших - 20:1; механизмы металлорежущих станков работают с диапазоном регулирования скорости $4{:}1 \div 100{:}1$, а для сверхточной обработки деталей требуется диапазон регулирования угловой скорости 1000:1 и выше. При бурении геологоразведочных скважин твердосплавным породоразрушающим инструментом диапазон регулирования скорости

вращения породоразрушающего инструмента для поддержания оптимальных режимов бурения составляет 10:1, а для алмазных коронок— 100:1. Диапазон регулирования зависит от способа, целей и задач регулирования угловой скорости вращения электроприводов.

Плавность регулирования характеризуется числом устойчивых скоростей, получаемых в данном диапазоне регулирования. Коэффициент плавности $K_{пл}$ может быть определен как отношение двух соседних скоростей при регулировании:

$$K_{пл} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}, \tag{4.2}$$

где ω_i, ω_{i-1} - угловые скорости на *i-й* и *(i-1)-й* ступенях регулирования.

Плавность регулирования тем выше, чем больше устойчивых скоростей в заданном диапазоне регулирования. Плавный переход с одной скорости вращения на другую определяет качество продукции. Наименьшей плавностью регулирования скорости обладают двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Значительная плавность регулирования скорости достигается в приводе постоянного тока при регулировании потоком возбуждения или изменении величины напряжения, подводимого к обмотке якоря.

Экономичность регулирования угловой скорости определяется затратами на его осуществление, эксплуатационными затратами и эффектом от регулирования скорости. Затраты на проектирование и изготовление регулируемого привода определяются в основном способом регулирования и типом преобразователя, питающего электродвигатель. Эксплуатационные затраты косвенно определяются коэффициентом полезного действия привода:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

(4.3)

где P_2 - мощность на валу привода;

ΔP - потери мощности при регулировании скорости.

При работе двигателя на различных скоростях необходимо подсчитать средневзвешенный за регулировочный цикл коэффициент полезного действия. Если цикл состоит из m ступеней, то средневзвешенный КПД определяется следующим образом:

$$\eta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{m} P_{2i} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{m} \left(P_{2i} + \Delta P_i\right) \cdot t_i} \qquad (4.4)$$

Потери энергии различны для разных способов регулирования; они велики там, где регулирование осуществляется в силовых цепях машин, и значительно ниже, если регулирование производится в цепях возбуждения, т. к. мощность возбуждения составляет $1 \div 5$ % мощности силовых цепей.

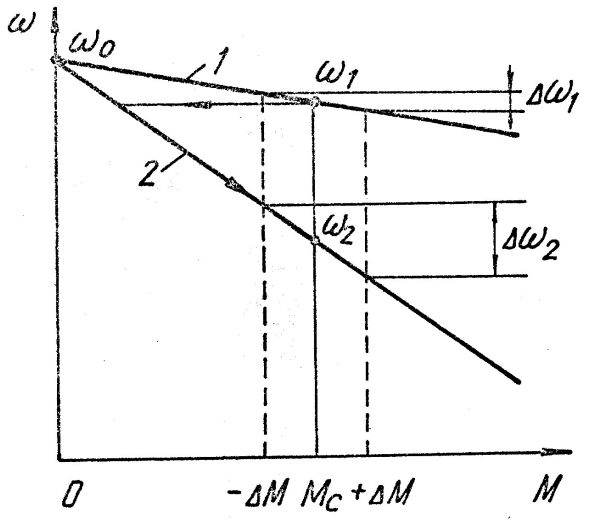


Рис. 4.1. Графическое определение стабильности работы на заданной скорости

Стабильность работы на заданной скорости характеризуется изменением угловой скорости вращения при заданном отклонении момента нагрузки и зависит от жесткости механической характеристики. Она тем выше, чем больше коэффициент жесткости механической характеристики двигателя. Если при регулировании скорости величина жесткости механической характеристики изменяется, то изменяется и перепад скорости $\Delta\omega$ при изменении нагрузки (рис. 4.1). Как видно из графика рис. 4.1, при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря двигателя и неизменном значении нагрузки M_c двигатель перейдет работать с характеристики 1 на характеристику 2, жесткость которой ниже, чем для характеристики 1. При том же значении изменения момента $\pm\Delta M$ колебания угловой скорости будут больше для характеристики, имеющей меньшую жесткость, т.е. $\Delta\omega_2 > \Delta\omega_1$. Это обстоятельство во многих случаях ограничивает пределы регулирования скорости данным методом (введением сопротивления в силовую цепь двигателя).

Направление, в котором регулируется угловая скорость, зависит от способа регулирования. Например, при регулировании скорости введением сопротивления в силовую цепь двигателя скорость изменяется вниз от основной, а при уменьшении магнитного потока (в пределах рабочей зоны изменения нагрузок) угловая скорость вращения изменяется вверх от основной.

Допустимая нагрузка двигателя при регулировании угловой скорости также зависит от способа регулирования. Зависимости момента нагрузки от скорости вращения вала (механическая характеристика производственной машины) для различных механизмов существенно отличаются друг от друга. Существуют механизмы с постоянным моментом статического сопротивления (подъемные машины), с моментом статического

сопротивления, изменяющимся по гиперболе (металлообрабатывающие станки) и по параболе (центробежные насосы и вентиляторы). Путем выбора двигателя соответствующей мощности можно удовлетворить любому изменению нагрузочного момента при изменении угловой скорости. Однако такое регулирование скорости часто является неэкономичным, т. к. при работе двигателя на некоторых скоростях он окажется недогружен. Недогрузка двигателя влечет ухудшение показателей работы привода: уменьшение КПД, а для двигателей переменного тока - уменьшение коэффициента мощности. Наоборот, перегрузка двигателя вызывает повышенный нагрев его обмоток и преждевременный выход из строя. Нагрев двигателя определяется главным образом током, протекающим по его обмоткам.

Таким образом, условием полного использования двигателя при работе на разных скоростях является постоянство нагрузочного тока. При этом предполагается, что условия охлаждения двигателя остаются неизменными во всем диапазоне регулирования угловой скорости вращения.

Существующие методы регулирования угловой скорости электроприводов могут быть грубо разбиты на следующие основные группы: параметрические методы и методы, связанные с питанием двигателя от отдельного регулируемого источника энергии (преобразователя).

В основу параметрических методов регулирования угловой скорости положены изменения тех или иных параметров электродвигателя или его отдельных цепей: активных или индуктивных сопротивлений, числа витков обмоток, числа полюсов и т.д. Выражение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M\frac{R}{k^2\Phi^2} \qquad (4.5)$$

показывает, что для принудительного изменения угловой скорости (при постоянном моменте) можно воздействовать на один или сразу несколько

параметров, определяющих скорость, а именно: на сопротивление в цепи якоря или величину магнитного потока двигателя.

Уравнение механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя:

$$M = \frac{2M_к}{\left(\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{ы}\right)},$$

$$M_к = \frac{mU_{1ф}^2}{2\omega_0\left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_к^2}\right]};$$

$$s_к = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_к^2}}; \qquad (4.6)$$

$$s = \frac{s_e\left(R_2' + R_p'\right)}{R_2'};$$

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p}\left(1 - s\right),$$

где s_e - скольжение на естественной характеристике;

R_p - добавочное сопротивление в цепи ротора;

p - число пар полюсов обмотки статора.

Очевидно, что угловую скорость асинхронного двигателя можно регулировать следующими параметрическими методами: изменением активного сопротивления ротора, изменением полного сопротивления в цепи статора, изменения полного сопротивления в цепи ротора, изменением числа пар полюсов, периодическим отключением обмоток статора и ротора (импульсное регулирование).

Регулирование скорости вращения привода при питании от отдельного источника основано на применении специальных генераторов или преобразователей электрической энергии, в которых возможно изменение напряжения или частоты тока, питающего двигатель. К числу этих методов,

применяемых для двигателя постоянного тока, относятся: изменение напряжения на зажимах якоря двигателя с помощью электромашинного преобразователя (система генератор—двигатель); изменение напряжения на зажимах якоря двигателя с помощью статических преобразователей (тиристорных, ионных, магнитных). Для асинхронных двигателей могут быть использованы следующие методы: питание двигателя от источника переменной частоты (и напряжения), каскадные установки, обеспечивающие введение добавочных ЭДС в цепь ротора.

4.2. Реостатное и импульсное параметрическое регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения

В цепь якоря двигателя (рис. 4,2, *а*) вводится дополнительное сопротивление, все остальные параметры (напряжение, поток возбуждения) остаются неизменными. Если считать, что для всех значений угловой скорости ток якоря, допустимый по условиям нагрева, остается постоянным и равным номинальному, то допустимый момент также постоянен:

$$M = k\Phi_н I_н = M_н = const.$$

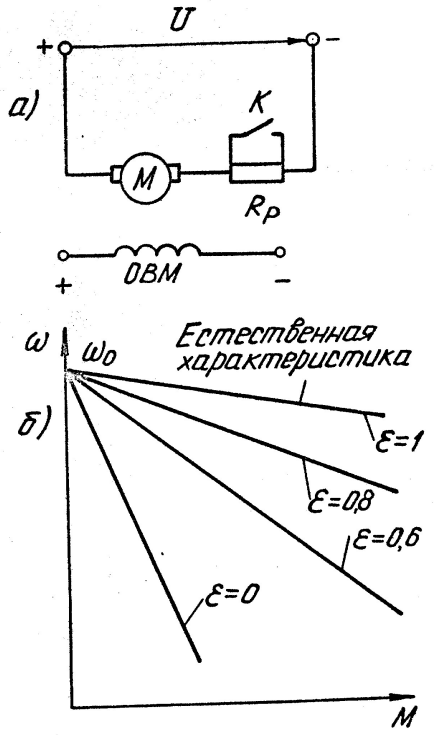


Рис. 4.2. Импульсное регулирование угловой скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

а – электрическая схема; б – механические характеристики

Таким образом, данный способ регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока (независимого или параллельного возбуждения) применяя ется при постоянном моменте статического сопротивления. Диапазон регулирования скорости не превосходит 2:1 и зависит от момента нагрузки.

Плавность регулирования зависит от числа ступеней реостата: чем больше ступеней, тем выше плавность; однако число ступеней не может быть велико из-за усложнения схемы и снижения надежности работы.

Данный способ регулирования угловой скорости является неэкономичным, т. к. потери пропорциональны мощности из сети и перепаду скорости в относительных единицах. Это видно из следующих энергетических соотношений:

потери мощности равны:

$$\Delta P = UI - EI = I(U - E) = {}_{k\Phi I}(\omega_0 - \omega)$$

или

$$\Delta P = k\Phi I \omega_0 \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = UI \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = P_1 \Delta v,$$

где $\Delta v = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ - перепад скорости в относительных единицах.

Ориентировочно коэффициент полезного действия привода для данного способа регулирования скорости может быть подсчитан по формуле

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_0}. \qquad (4.7)$$

С увеличением сопротивления в якорной цепи жесткость механической характеристики двигателя уменьшается, что приводит к ухудшению стабильности работы на заданной скорости.

Направление регулирования угловой скорости для данного способа - вниз от основной скорости.

Большим недостатком данного способа регулирования угловой скорости является наличие контактной системы и то, что скорость изменяется ступенчато, поэтому данный способ не обеспечивает плавного регулирования. Для двигателей малой мощности плавное регулирование скорости может быть обеспечено использованием жидкостного или ползункового реостата. В этом случае плавного регулирования скорости введением резисторов в цепь якоря добиваются при использовании импульсного параметрического регулирования, которое может применяться для поддержания заданного значения угловой скорости в автоматизированном электроприводе.

Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при импульсном регулировании добавочного сопротивления в цепи якоря показана на рис. 4.2, *а.* Добавочный резистор R_p либо полностью включается последовательно с якорем двигателя, либо замыкается ключом K.

Коммутация ключа K осуществляется периодически. При замкнутом ключе K ток в цепи якоря и угловая скорость вращения вала двигателя увеличиваются, а при разомкнутом положении ключа K ток и угловая скорость снижаются. Угловая скорость при этом колеблется около некоторого среднего значения, определяемого соотношением длительности замкнутого состояния ключа к периоду коммутации и моментом нагрузки. Отношение длительности замкнутого состояния к величине периода коммутации называют скважностью управляющих импульсов:

$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}, \tag{4.8}$$

где ε - скважность управляющих импульсов;

t_1 - длительность замкнутого состояния ключа;

t_2 - длительность разомкнутого состояния ключа.

Очевидно, что при неизменном моменте статического сопротивления с увеличением скважности управляющих импульсов угловая скорость двигателя будет возрастать, а при $\varepsilon = 1$ двигатель работает на естественной характеристике $t_2 = 0$ (ключ K постоянно замкнут), наоборот, при $\varepsilon = 0$ (ключ К постоянно разомкнут) двигатель работает на реостатной характеристике, соответствующей постоянно включенному резистору R_p. Для промежуточных значений ε эквивалентное (усредненное) сопротивление в цепи якоря определяется выражением:

$$R_{рэ} = K_p(1 - \varepsilon), \tag{4.9}$$

а механическая характеристика двигателя (рис. 4.2,б):

$$\omega_{ср} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_{ср}}{k^2\Phi^2}\left(R_я + R_{рэ}\right), \tag{4.10}$$

т.е. механические характеристики имеют те же свойства, что и при чисто реостатном регулировании угловой скорости, однако при плавном изменении скважности управляющих импульсов коэффициент плавности регулирования угловой скорости достигает единицы.

Высокая плавность изменения скважности управляющих импульсов обеспечивается применением бесконтактных ключей, выполненных на базе транзисторов (при токе якоря до 20 А) или тиристоров (при токе якоря до 150 А).

При импульсном регулировании сопротивления в цепи якоря двигателя энергетические показатели привода несколько ниже, чем при ступенчатом его изменении, что обусловлено наличием в якоре переменной составляющей тока, вызванной коммутацией ключа; переменная составляющая тока якоря влечет увеличение потерь энергии.

4.3. Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением магнитного потока

Принципиальные схемы электропривода при регулировании потоком (током) возбуждения двигателя представлены на рис. 4.3. Ток возбуждения регулируется с помощью резистора R в случае двигателя малой мощности (рис. 4,3, *а*) или посредством регулятора напряжения *РН* для мощных двигателей (рис. 4.3, *б*). При этом остальные параметры (напряжение, прикладываемое к якорю, и сопротивление якорной цепи) остаются постоянными. Магнитный поток двигателя равен:

$$\Phi = \frac{U - IR}{k\omega},$$

(4.11)

а при постоянном значении тока нагрузки:

$$\Phi = \frac{A_1}{\omega}.$$

(4.12)

Электромагнитный момент двигателя равен:

$$M = k\Phi I = \frac{kA_1}{\omega} I = \frac{A_2}{\omega}.$$

(4.13)

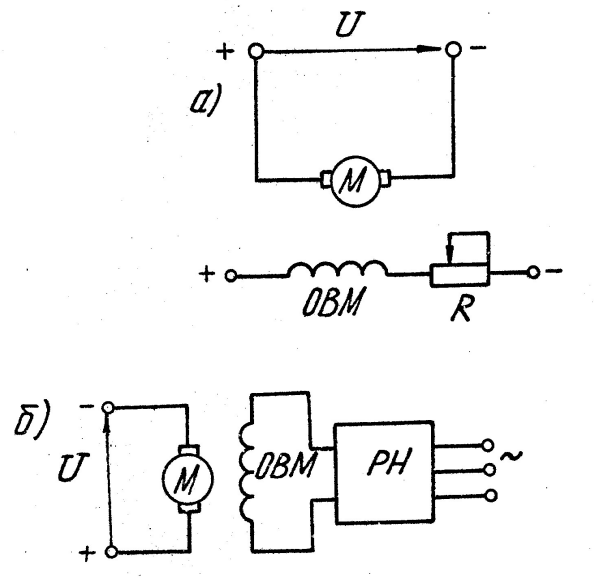


Рис. 4.3. Принципиальные схемы регулирования потока двигателя:
а – с помощью резистора; б – с помощью регулятора напряжения РН

Поскольку выпускаемые промышленностью двигатели в номинальном режиме работают со значительным насыщением магнитной системы, существенное изменение магнитного потока возможно лишь в сторону его уменьшения. Тогда из выражения (4.12) видно, что угловая скорость при этом изменяется вверх от основной скорости вращения вала двигателя. Как видно из выражения (4.12) и (4.13), магнитный поток и момент при регулировании скорости изменяются по гиперболическому закону. Из выражения (4.13) можно получить выражение для мощности, развиваемой двигателем:

$$P = M\omega = A_2 = const.$$

(4.14)

Таким образом, регулирование угловой скорости вращения изменением магнитного потока является регулированием при постоянной мощности двигателя.

При уменьшении потока (тока) возбуждения скорость идеального холостого хода электромеханической характеристики двигателя увеличивается, что видно из уравнения

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}.$$

(4.15)

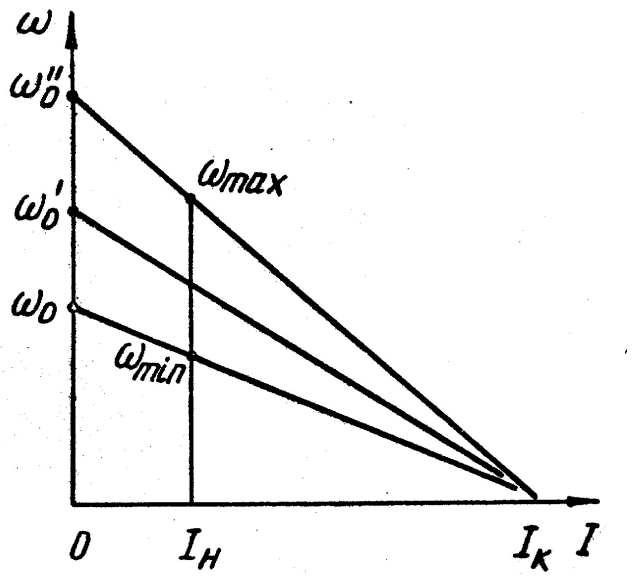


Рис 4.4. Скоростные характеристики двигателя независимого возбуждения при

регулировании потока возбуждения

Ток короткого замыкания $I_к = \frac{U}{R}$ не зависит от потока возбуждения, поэтому все электромеханические характеристики пересекаются с осью токов в одной точке. На рис. 4.4 показаны электромеханические характеристики двигателя

постоянного тока независимого возбуждения при регулировании угловой скорости изменением потока возбуждения. Механические характеристики двигателей при регулировании потоком возбуждения имеют те же значения скоростей идеального холостого хода, что и электромеханические; однако они не пересекаются в одной точке на оси моментов, поскольку момент короткого замыкания $M_к = k\Phi I_к$ изменяется вместе с изменением потока. Все механические характеристики (рис. 4.5) при регулировании угловой скорости потоком возбуждения пересекаются в первом квадранте. На рис. 4,5 пунктиром показана линия постоянного тока $I = I_н = const,$ ей соответствует номинальная мощность двигателя. При работе на скоростях, соответствующих точкам левее указанной линии, двигатель будет недогружен; при работе на скоростях, соответствующих точкам правее этой кривой, двигатель будет перегружен.

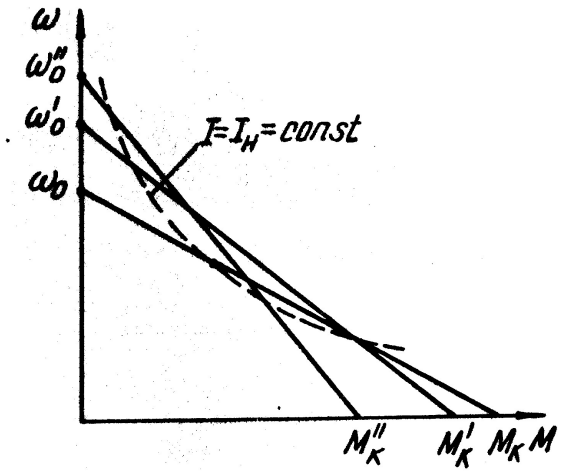


Рис 4.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого
возбуждения при регулировании при регулировании потока возбуждения

При токах нагрузки $I < 0{,}5I_к$ с уменьшением потока угловая скорость двигателя увеличивается, при токах нагрузки $I > 0{,}5I_к$ с уменьшением потока

скорость уменьшается. Это явление называется опрокидыванием регулирования (реакция на воздействие противоречит цели регулирования).

Диапазон регулирования скорости ограничивается механической прочностью бандажей, крепящих обмотку якоря, и условиями коммутации (с увеличением скорости увеличивается реактивная ЭДС, обусловливающая искрение щеток якоря). Для специальных двигателей диапазон регулирования угловой скорости составляет 5:1. За рубежом ряд фирм выпускает двигатели для регулирования угловой скорости магнитным потоком с диапазоном регулирования до 10:1. Нижний предел регулирования скорости ограничивается насыщением машины. Данный способ регулирования угловой скорости обеспечивает высокую плавность.

Мощность, затрачиваемая на возбуждение машины, невелика, потери мощности на регулирование скорости незначительны, поэтому данный способ регулирования угловой скорости весьма экономичный (при работе двигателя с постоянной мощностью).

Коэффициент жесткости механической характеристики двигателя $\beta = \frac{k^2 \Phi^2}{R}$ с уменьшением потока уменьшается, поэтому стабильность работы двигателя при ослабленном поле нарушается.

Направление регулирования угловой скорости (до опрокидывания регулирования) - вверх от основной скорости.

4.4. Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением подводимого к якорю напряжения

Так как напряжение питающей сети поддерживается на постоянном уровне, то реализация данного способа регулирования угловой скорости возможна при использовании источника питания, напряжение на выходе которого

может изменяться в широких пределах. В качестве таких источников используются различного рода управляемые преобразователи электрической энергии переменного тока в электрическую энергию постоянного тока. Наиболее широкое распространение получили электромашинные и вентильные преобразователи. Электромашинный преобразователь представляет собой генератор постоянного тока, приводимый во вращение синхронной или асинхронной машиной. Изменение напряжения на зажимах генератора производится за счет изменения его потока возбуждения. В этих преобразователях осуществляется двукратное преобразование энергии: электрической переменного тока в механическую (сетевой двигатель, приводящий во вращение генератор) и механической в электрическую постоянного тока (в генераторе). На передвижных установках или в удаленных районах, где отсутствуют электрические сети, генератор постоянного тока приводится от двигателя внутреннего сгорания.

Регулирование величины напряжения вентильных преобразователей осуществляется изменением угла открывания вентилей в случае управляемого преобразователя или изменением величины переменного напряжения при использовании неуправляемого преобразователя. В последнем случае для регулирования напряжения служат автотрансформаторы, трансформаторы с переменным коэффициентом трансформации и магнитные усилители.

Общим для перечисленных методов является наличие преобразователя, расчетная мощность которого должна быть равна или несколько больше потребляемой мощности двигателя. На рис. 4.6 приведена эквивалентная схема привода с регулированием напряжения на зажимах якоря двигателя. Преобразователь показан источником $E_{пр}$, величина которого изменяется в процессе регулирования скорости, и эквивалентным сопротивлением $R_{пр}$. На схеме также показаны сопротивления соединительных проводов R_c и цепи

якоря двигателя $R_я$. Для представленной эквивалентной схемы второй закон Кирхгофа записывается в следующей форме:

$$E_{пр} - E = I_я \cdot R_\Sigma,$$

(4.16)

где $R_\Sigma = R_{пр} + R_c + R_я$ - суммарное сопротивление.

Электромагнитный момент и электродвижущая сила равны соответственно:

$$M = k_д \Phi_д \cdot I_я; \qquad (4.17)$$

$$E = k_д \Phi_д = \omega.$$

(4.18)

Решая совместно уравнения (4.16), (4.17) и (4.18) относительно угловой скорости, получим уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{E_{пр}}{k_д \Phi_д} - M \frac{R_\Sigma}{k_д^2 \Phi_д^2}.$$

(4.19)

Из выражения (4.19) следует, что при изменении электродвижущей силы преобразователя (другие параметры считаем неизменными) изменяется только скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{E_{пр}}{k_д \Phi_д}. \qquad 4.20)$$

Жесткость механических характеристик при неизменном сопротивлении и потоке возбуждения остается постоянной. В этом случае механические характеристики представляют собой семейство параллельных прямых, каждая из которых отсекает от оси ординат скорость идеального холостого хода, соответствующую ЭДС преобразователя (рис. 4.7). Поскольку суммарное сопротивление R_Σ превышает сопротивление якоря двигателя, то модуль жесткости механической характеристики будет меньше, чем у естественной механической характеристики электрического двигателя, полу-

чающего питание от сети. Однако по сравнению с параметрическими методами регулирования угловой скорости данный привод имеет более жесткие механические характеристики, что позволяет существенно увеличить диапазон регулирования и получить более высокую стабильность работы при малых скоростях.

Другим достоинством данного способа регулирования скорости является то, что для изменения электродвижущей силы преобразователя необходимо воздействовать не на главные цепи, а на цепи управляющих устройств - возбуждения (в электромашинных преобразователях), регулирования угла включения вентилей (в управляемых вентильных преобразователях). Мощность этих цепей во много раз меньше мощности регулируемого двигателя и главной цепи преобразователя, поэтому просто решается вопрос об увеличении числа регулировочных ступеней, а значит, и плавности регулирования угловой скорости. По этой же причине проще осуществляется формирование специального вида механических характеристик привода.

С целью расширения диапазона регулирования угловой скорости можно использовать ослабление магнитного потока двигателя. Однако одновременно изменять поток возбуждения и напряжение нецелесообразно, т. к. при этом снижается величина допустимого момента и модуль жесткости механической характеристики. Поэтому регулирование от номинальной угловой скорости до нуля (вниз от основной) осуществляется изменением величины подводимого к якорю напряжения, а вверх от основной — с помощью уменьшения потока возбуждения двигателя. Таким образом, схема позволяет осуществить двухзонное регулирование угловой скорости.

В практике получили распространение электромашинные преобразователи на основе генератора постоянного тока - системы Г - Д (генератор—двигатель). Принципиальная схема системы Г - Д представлена на рис. 4.8. Якорь двигателя непосредственно (без дополнительных сопротивлений) подключен к зажимам якоря генератора.

Генератор *G* приводится во вращение с помощью сетевого двигателя СМ, в качестве которого используется асинхронная или синхронная машина. Обмотки возбуждения двигателя М и генератора G получают питание от независимого источника постоянного тока, в качестве которого может использоваться возбудитель, находящийся на валу сетевого двигателя. В ряде случаев обмотки возбуждения генератора и двигателя имеют различные источники питания. Второй закон Кирхгофа для якорной цепи системы Г — Д:

$$E_г - E = IR_\Sigma,$$

(4.21)

где $R_\Sigma = R_г + R_д$ - суммарное сопротивление якорной цепи;

$E_г = k_г \Phi_г \cdot \omega_г$ - электродвижущая сила генератора;

$\Phi_г$ - поток возбуждения генератора;

$\omega_г$ - угловая скорость вращения вала генератора;

I - ток якорной цепи;

$R_г, R_д$ - сопротивление якоря генератора и двигателя соответственно.

Электромагнитный момент и электродвижущая сила двигателя могут быть получены из выражений (4.17) и (4.18). Уравнение механической характеристики привода по системе Г - Д:

$$\omega = \frac{E_г}{k_д \Phi_д} - M \frac{R_\Sigma}{k_д^2 \Phi_д^2}. \qquad (4.22)$$

Скорость идеального холостого хода привода по системе Г - Д:

$$\omega_0 = \frac{E_г}{k_д \Phi_д} = \frac{k_г \Phi_г \omega_г}{k_д \Phi_д}. \qquad (4.23)$$

Обычно угловая скорость вращения генератора постоянна, что справедливо, если в качестве сетевого двигателя используется синхронная машина. В

случае применения асинхронного двигателя с изменением нагрузки генератора угловая скорость его изменяется незначительно.

При постоянном потоке возбуждения двигателя механические характеристики системы Г - Д представляют собой семейство параллельных прямых, жесткость которых определяется общим сопротивлением якорной цепи (см. рис. 4.7). Поскольку мощность двигателя примерно равна мощности генератора, то сопротивление якоря двигателя незначительно отличается от сопротивления якоря генератора. Модуль жесткости обратно пропорционален сопротивлению якорной цепи. Очевидно, что модуль жесткости механических характеристик системы Г - Д примерно вдвое ниже по сравнению с модулем жесткости естественной характеристики двигателя, получающего питание от сети.

Достоинством системы Г - Д является то, что двигатель может работать в тормозных режимах при любом направлении угловой скорости.

В простейших системах Г – Д (для небольшой мощности привода) диапазон регулирования скорости составляет 8:1 и достигается изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя. Диапазон регулирования может быть расширен за счет изменения потока возбуждения двигателя до значения 16:1. С помощью системы Г - Д добиваются высокой плавности регулирования угловой скорости.

К недостаткам системы Г - Д следует отнести ее высокую стоимость, большие габариты и вес установки, шум при работе. Потери энергии в цепях управления (возбуждение генератора и двигателя) невелики, однако КПД установки мал из-за трехкратного преобразования энергии. Номинальный КПД системы Г - Д равен произведению номинальных значений КПД сетевой машины, генератора и двигателя:

$$\eta_{н_{Г-Д}} = \eta_{см} \cdot \eta_{нг} \cdot \eta_{нд}. \qquad (4.24)$$

При работе на пониженной угловой скорости КПД будет еще ниже. Система Г - Д обеспечивает стабильную работу привода, поскольку ее механические характеристики довольно жесткие. Для увеличения жесткости механических характеристик и расширения диапазона регулирования скорости вращения применяют замкнутые системы Г - Д с использованием обратных связей и усилителей с большим коэффициентом усиления (электронных). Примером такой схемы может служить система Г - Д с отрицательной обратной связью по скорости (рис. 4.9). Здесь на одном валу с двигателем *М* расположен тахогенератор *GT,* напряжение на выходе которого пропорционально угловой скорости вращения двигателя. Напряжение тахогенератора сравнивается с задающим напряжением $U_з$. Разность задающего напряжения и напряжения тахогенератора усиливается усилителем *У* и подается на обмотку возбуждения *0В* генератора *G*. Сущность действия жесткой отрицательной обратной связи по скорости заключается в следующем. С ростом нагрузки на валу двигателя уменьшается его угловая скорость и понижается напряжение тахогенератора, находящегося на одному валу с двигателем. Так как задающий сигнал остается постоянным, то сигнал на входе усилителя возрастает, следовательно, возрастает и ЭДС генератора, что автоматически приводит к компенсации падения угловой скорости двигателя. Степень компенсации зависит от коэффициента усиления усилителя, с увеличением которого возрастает приращение ЭДС генератора и повышается жесткость механической характеристики двигателя. Система описывается следующими уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} U_в &= (U_з - \gamma\omega)\cdot k_1; \\ E_г &= U_в k_2; \\ E_г &= c\omega + IR_\Sigma, \end{aligned}\right\} \qquad (4.25)$$

где k_1 - коэффициент пропорциональности между напряжением на выходе усилителя и напряжением на его входе - коэффициент усиления усилителя;

k_2 - коэффициент усиления генератора.

Решая систему (4.25) относительно угловой скорости, получим уравнение механической характеристики системы Г - Д с отрицательной обратной связью по угловой скорости:

$$\omega = \frac{U_з k}{1+\gamma k} - M\frac{R_\Sigma}{(1+\gamma k)c^2}, \qquad (4.26)$$

где $k = k_1 \cdot k_2 \cdot c^{-1}$ - коэффициент усиления системы.

С увеличением коэффициента усиления системы модуль жесткости механической характеристики возрастает. Введением обратных связей можно существенно расширить диапазон регулирования скорости двигателя, доведя его до 500:1 и выше. Системы с обратными связями обладают значительными преимуществами в отношении плавности, диапазона регулирования скорости и жесткости механических характеристик перед разомкнутыми системами, благодаря чему они находят широкое применение в промышленности. Однако и замкнутым системам Г - Д присущи недостатки электромашинных преобразователей: низкий КПД из-за двукратного преобразования энергии, большие габариты и вес, шум при работе, высокая стоимость.

В последнее время в практике получили широкое применение полупроводниковые (тиристорные) преобразователи, с помощью которых осуществляется преобразование энергии переменного тока в энергию постоянного тока регулируемого напряжения. Основным элементом тиристорного преобразователя является тиристор - полууправляемый полупроводниковый прибор, имеющий четырехслойную структуру, смежные слои которой обладают различной проводимостью типа *p-n-p-n.* Тиристор имеет два устойчивых состояния: открытое и закрытое. В открытом состоя-

нии сопротивление тиристора мало и составляет десятые доли Ома; а в закрытом состоянии - более тысячи Ом.

Тиристорный привод по сравнению с ионным вентильным (ртутным) и системой Г - Д имеет следующие преимущества: высокий КПД, равный 0,98 ÷ 0,99, малые габариты и вес; большой срок службы, большой коэффициент усиления по мощности (несколько тысяч); отсутствие вращающихся частей, высокое быстродействие, нечувствительность к вибрации.

В электроприводе тиристоры применяют в качестве преобразователей переменного тока в постоянный, бесконтактных коммутирующих аппаратов и статических преобразователей частоты.

Прямым направлением тока в тиристоре является направление от анода к катоду. Переход тиристора из закрытого состояния в открытое осуществляется подачей на управляющий электрод положительного (по отношению к катоду) сигнала. Переход в закрытое состояние осуществляется при подаче на анод отрицательного напряжения или при снижении анодного тока до значения тока удержания. После подачи отпирающего сигнала на управляющий электрод его управляющее свойство исчезает. Поэтому тиристор называют полууправляемым элементом.

Принцип регулирования среднего выпрямленного напряжения показан на схеме рис. 4.10. На рис. 4.10, *а* представлена схема включения тиристора *VS1* к источнику напряжения. Тиристор имеет три электрода: анод *А,* катод *К* и управляемый электрод *УЭ*. Тиристор может пропускать ток только тогда, когда на его аноде положительный потенциал. Отпирающие импульсы напряжения U_y *с* определенными для каждого типа тиристора амплитудой, длительностью и крутизной переднего фронта подаются на *УЭ* от импульсного трансформатора *ИТ,* диод *VД* служит для того, чтобы к управляющему электроду подводился только положительный потенциал (относительно катода). Если изменять время t_0 подачи управляющего

импульса U_y (отсчитываемого от момента перехода анодного напряжения из отрицательного значения в положительное), то изменяется момент открывания тиристора и площадь заштрихованной части синусоиды, т.е. среднее выпрямленное напряжение на нагрузке $R_н$.

Графики изменения напряжения и тока во времени в выпрямленной цепи имеют сложный вид, они содержат постоянные и гармонические составляющие. С целью уменьшения гармонических составляющих тока, оказывающих отрицательное влияние на процесс коммутации и нагрев машины постоянного тока, в цепь якоря двигателя постоянного тока включают сглаживающий реактор.

Средние значения выходного напряжения и тока вентильного преобразователя зависят от его параметров и схемы соединения тиристоров. Все существующие схемы соединения тиристоров можно разделить на два класса: схемы выпрямления с нулевым проводом, в которых выпрямляется одна полуволна синусоидального напряжения сети, и мостовые схемы, в которых выпрямляются обе полуволны напряжения сети.

Рассмотрим две основные схемы нереверсивных тиристорных преобразователей постоянного тока: трехфазную с нулем и трехфазную мостовую. На рис. 4.11 представлены принципиальная силовая схема (*а*), эквивалентная схема замещения (*б*), графики фазных ЭДС (*в*), ЭДС и напряжений преобразователя *(г)* и токов в вентилях (*д*). Преобразователь получает питание от силового трехфазного трансформатора *T,* вторичные обмотки которого соединены в звезду с нулевым проводом. Тиристоры *VS1, VS2, VS3* собраны по схеме с общим катодом *K.* Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением *M* через сглаживающий дроссель L_d подсоединяется к нулевому проводу и общему катоду преобразователя.

На рис. 4.11, *б* представлена эквивалентная схема замещения преобразователя. Вторичные обмотки силового трансформатора *T* заменены

источниками ЭДС e_{2a}, e_{2b}, e_{2c}, а также активными сопротивлениями трансформатора R_T и индуктивными сопротивлениями трансформатора x_T. К якорной цепи двигателя приложено средневыпрямленное напряжение U_d, средний выпрямленный ток равен i_d.

На рис. 4.11, *в* показаны графики ЭДС вторичных обмоток трансформатора. Угол α, отсчитываемый от угла естественного открытия, называется углом запаздывания или углом регулирования; угол γ называется углом коммутации. Из-за индуктивности вторичной обмотки трансформатора переход тока от одного тиристора к другому происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени, которому соответствует угол коммутации. В течение этого времени работающий тиристор не закрылся, а вступающий в работу тиристор еще не открылся полностью. В период коммутации выпрямленное напряжение преобразователя становится меньше и равно полусумме напряжений фаз, участвующих в коммутации: $U_d = 0{,}5(U_{2a} + U_{2b})$. Снижение напряжения зафиксировано на рис. 4.11, *г* заштрихованной площадкой.

На графиках рис. 4.11, *г* показаны кривые ЭДС вторичных обмоток трансформатора e_2 и мгновенное значение выпрямленного напряжения U_d. Мгновенное значение напряжения выпрямителя в межкоммутационный период меньше ЭДС трансформатора на величину падения напряжения в преобразователе, которое складывается из падения напряжения на активном сопротивлении трансформатора и падения напряжения на вентиле в проводящий период, которое практически не зависит от тока тиристора и составляет 0,5÷1,0 В.

На рис. 4.12 представлена эквивалентная схема замещения тиристорного преобразователя. Схема содержит источник выпрямленной ЭДС U_d, идеальный вентиль *ИВ*, источник ЭДС $\Delta U_в$, эквивалентное сопротивление

преобразователя $R_{эпр}$, активное сопротивление сглаживающего дросселя R_p; электрический двигатель представлен источником ЭДС обмотки якоря E и сопротивлением обмотки якоря $R_я$.

Параметры эквивалентной схемы преобразователя:

$E_d = E_{d0} \cdot \cos\alpha$;

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi}\sqrt{2}E_{2\phi} \cdot \sin\frac{\pi}{m};$$

$$R_T = R_2 + R_1\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2;$$

$$x_T = x_2 + x_1\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2;$$

$$R_э = R_T + \frac{m}{2\pi}x_T,$$

где m - число выпрямленных фаз;

R_1, x_1 - активное, индуктивное сопротивления первичной обмотки силового трансформатора;

w_1, w_2 - число витков первичной и вторичной обмоток силового трансформатора;

$E_{2\phi}$ - действующее фазное значение ЭДС вторичной обмотки силового трансформатора.

В соответствии с эквивалентной схемой преобразователя второй закон Кирхгофа может быть записан следующим образом:

$$E_d - U_в = E + \left(R_{эпр} + R_р + R_я\right) I_я .$$

(4.27)

Уравнение механической характеристики двигателя, получающего питание от тиристорного преобразователя, имеет вид:

$$\omega = \frac{E_{d0}\cos\alpha - \Delta U_в}{k\Phi} - M\frac{R_\Sigma}{k^2\Phi^2}, \qquad (28)$$

где $R_\Sigma = R_{эпр} + R_р + R_я$.

На рис. 4.13 представлены механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, получающего питание от тиристорного преобразователя; эти характеристики напоминают характеристики системы Г - Д, но отличаются рядом особенностей. Характеристики имеют меньшую жесткость, чем в системе Г - Д, за счет большого падения напряжения в якорной цепи, но наклон их остается практически постоянным при различных значениях угла регулирования. При конечных значениях индуктивности сглаживающего реактора и малых нагрузках наступает режим прерывистых токов, при котором характеристики теряют жесткость и резко возрастают. Явление прерывистых токов обусловлено тем, что с уменьшением нагрузки уменьшается энергия, запасенная сглаживающим дросселем, и наступает момент, когда создаваемая ею ЭДС самоиндукции недостаточна для поддержания тока якоря при отрицательных напряжениях на анодах тиристоров, что приводит к увеличению среднего выпрямленного напряжения, следовательно, и к возрастанию угловой скорости двигателя при холостом ходе. Зона прерывистых токов на рис. 4.13 заштрихована. Очевидно, что с увеличением глубины регулирования угловой скорости (с увеличением угла регулирования) увеличивается ток, при котором начинается, резкий подъем угловой скорости (зона прерывистых токов).

Характерной особенностью однополупериодной схемы выпрямления является то, что за исключением периода коммутации вентилей, т.е. периода, когда прекращается работа одного вентиля и вступает в работу другой вентиль, ток нагрузки равен току одного работающего тиристора. Следовательно, ток нагрузки определяется ЭДС работающей фазы трансформатора, а падение напряжения в преобразователе - падением напряжения в этой фазе. В каждый момент времени (за исключением периода коммутации) работает один тиристор, число выпрямляющихся фаз равно трем.

В приведенной схеме двигатель может работать в двигательном режиме и режиме торможения противовключением (за счет активного момента сопротивления) при неизменном направлении тока в цепи якоря. Реверс двигателя можно производить изменением полярности напряжения на якоре при неизменном направлении тока возбуждения.

В мостовых схемах одновременно работают два вентиля (за исключением периода коммутации). При этом ток нагрузки проходит последовательно через два вентиля и две фазы трансформатора под действием разности двух соответствующих фазных ЭДС (рис. 4.14). За полный период изменения переменного напряжения работают все шесть вентилей преобразователя. Поскольку в мостовой схеме выпрямляется и отрицательная полуволна напряжения, то число выпрямленных фаз *(m)* в данном случае равно 6. Для данного преобразователя справедлива эквивалентная схема, представленная на рис. 4.12, но со следующими параметрами:

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi}\sqrt{6}E_{2\phi}\sin\frac{\pi}{m};$$

$$R_э = 2\left(R_T + \frac{m}{2\pi}x_T\right);$$

$$\Delta U_B = 2\Delta U_T,$$

где ΔU_B - падение напряжения в идеальном вентиле;

ΔU_T - падение напряжения в тиристоре.

При углах регулирования $\alpha > \frac{\pi}{2}$ среднее значение выпрямленного напряжения преобразователя становится отрицательным. Направление тока из-за односторонней проводимости тиристоров остается постоянным. Поскольку ток двигателя протекает навстречу напряжению источника, то двигатель работает в генераторном режиме. Генерируемая электрической машиной энергия постоянного тока преобразуется вентильным преобразователем в энергию переменного тока и отдается в электрическую сеть. Вентильный преобразователь в этом случае работает в режиме инвертирования, характерной чертой которого является то, что ток в обмотках трансформатора в течение большей части периода проводимости вентилей направлен навстречу ЭДС этих обмоток и протекает под действием ЭДС электрической машины, как показано на рис. 4.15. При этом ЭДС машины постоянного тока должна превышать среднее значение выпрямленного напряжения преобразователя. Механические характеристики привода в этом случае в режиме непрерывного тока представляют собой семейство параллельных прямых. Однако работа тиристорного преобразователя в инверторном режиме ограничена, поскольку осуществить работу преобразователя с углом регулирования $\alpha = \pi$ невозможно. При $\alpha = \pi - (\gamma + \delta)$ (γ - угол, соответствующий времени, необходимому для восстановления запирающих свойств тиристора) в момент подачи отпирающего импульса на последующий тиристор ток работающего тиристора должен уменьшаться, а ток открываемого тиристора - увеличиваться. В пределах угла коммутации y оба тиристора проводят ток в одном направлении. Если процесс коммутации не успеет закончиться до времени $\omega t = \pi$, то при переходе ЭДС через нуль к закрываемому тиристору будет приложено напряжение в проводящем направлении, и он не закроется.

В этом случае к тиристору приложено напряжение, равное сумме ЭДС трансформатора и двигателя. Величина тока, протекающего через тиристор, намного превышает нормальный ток, на который рассчитан тиристор, что приводит к необратимому пробою вентиля и выходу его из строя. Этот режим работы называется опрокидыванием инвертора.

Следует также заметить, что в инверторном режиме (как и в выпрямительном, когда электрическая машина работает в качестве двигателя) ЭДС двигателя и среднее выпрямленное напряжение преобразователя должны быть направлены встречно; при переходе в инверторный режим (α>90°) среднее выпрямленное напряжение преобразователя изменяет знак, следовательно, необходимо изменить и направление ЭДС двигателя, что может быть произведено изменением направления потока возбуждения или переключением обмотки якоря.

Односторонняя проводимость тиристорного преобразователя затрудняет осуществление реверса в таких системах. На практике применяются следующие основные способы изменения направления момента двигателя: изменением направления тока возбуждения двигателя, изменением полярности напряжения на зажимах якоря с помощью переключателя, изменением полярности напряжения на зажимах якоря с помощью двух групп вентильных преобразователей. Наиболее дешевый первый способ, его существенным недостатком является большое время реверса, что обусловлено большой индуктивностью обмотки возбуждения двигателя. Схема с переключением в цепи якоря двигателя позволяет быстрее осуществить процесс реверса, однако и в этом случае время переходного процесса составляет не менее 0,1 с.

Для приводов, в которых требуется максимальное быстродействие, а также необходимы двигательный и тормозные режимы при том же направлении вращения, применяются схемы с двумя комплектами вентилей, каждый из которых проводит ток в одном направлении, благодаря чему создается

эффект двусторонней проводимости преобразователя в целом. Существующие схемы реверсивных вентильных преобразователей можно разделить на два типа: перекрестные и встречно-параллельные (рис. 4.16, 4.17). При работе преобразователя один из комплектов, например *B1* работает в режиме выпрямления, а другой - закрыт или подготовлен к работе в режиме инвертирования. При работе на другое направление движения в режиме выпрямления работает уже комплект *B2,* а *B1* закрыт или подготовлен к режиму инвертирования.

При работе привода в режиме рекуперативного торможения один из комплектов вентилей работает в режиме инвертирования, а второй либо закрыт, либо подготовлен к работе в режиме выпрямления. Режим работы реверсивного преобразователя определяется способом управления обоими комплектами вентилей. Различают совместное и раздельное управление группами вентилей реверсивного тиристорного преобразователя. При совместном управлении управляющие сигналы подаются на оба комплекта вентилей таким образом, чтобы ЭДС выпрямителя не превышала ЭДС инвертора. В этом случае возникает задача ограничения уравнительных токов, протекающих между двумя комплектами вентилей из-за того, что их проводящие направления совпадают, а мгновенные значения их ЭДС различны. С целью уменьшения уравнительных токов в цепи преобразователей включены уравнительные реакторы *L1÷L4* (см. рис. 4.16 и 4.17). При раздельном управлении комплектами вентилей управляющие сигналы подаются только на тот комплект, который должен работать, на другой комплект управляющие импульсы не подаются, и он закрыт. В этом случае цепь уравнительного тока разомкнута и надобность в уравнительных реакторах отпадает. Вид механических характеристик реверсивных тиристорных приводов зависит от способа согласования углов управления обоими комплектами вентилей. Для линейного согласования характерно равенство нулю среднего значения уравнительного напряжения. В этом

случае между углами регулирования первого и второго комплектов выполняется соотношение:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi .$$

(4.29)

Недостатком схемы с линейным согласованием является наличие уравнительных токов, дополнительно загружающих вентили и трансформаторы, но не выполняющих полезной работы, что снижает быстродействие системы и приводит к неполному использованию мощности привода.

С целью уменьшения уравнительных токов в ряде случаев используют нелинейное согласование, когда

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi + \varepsilon . \qquad (4.30)$$

На практике используют системы, в которых значение угла е изменяется автоматически в функции какого-либо параметра. Механические характеристики при данном способе согласования теряют линейность при переходе из двигательного режима работы в генераторный и становятся мягкими. На рис. 4.18 представлены скоростные характеристики реверсивного привода с вентильными преобразователями при совместном управлении и линейном согласовании (*а*); при совместном управлении и нелинейном согласовании (*б*); при раздельном управлении и линейном согласовании (*в*).

Совместное управление и линейное согласование позволяют получить наилучшие динамические показатели и однозначные статические характеристики. Данный способ управления позволяет обеспечить простой переход из одного режима работы в другой; он имеет существенные преимущества перед другими способами управления и находит широкое применение на практике.

Модуль жесткости механических характеристик электропривода с вентильными преобразователями сравнительно мал. С целью расширения диапазона регулирования угловой скорости в системах вентильного привода постоянного тока могут использоваться те же обратные связи, что и в системе Г - Д. С целью ограничения тока вентильного преобразователя может использоваться задержанная отрицательная обратная связь по току (токовая отсечка). В этом случае привод имеет экскаваторную характеристику. Следует отметить, что вентильный преобразователь имеет большой коэффициент усиления, в связи с чем обратные связи могут быть реализованы в ряде случаев без промежуточных усилителей.

Привод по системе тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока обладает высокими технико-экономическими показателями. Диапазон регулирования угловой скорости достигает нескольких тысяч; плавность регулирования весьма высокая. По экономичности тиристорный привод является вполне конкурентоспособным с системой Г - Д. Недостатком в этом отношении является высокая сложность системы управления и связанная с этим невысокая надежность. Коэффициент полезного действия тиристорного преобразователя определяется КПД трансформатора и вентилей. Трансформаторы большой мощности имеют КПД примерно 0,95—0,98. Коэффициент полезного действия тиристоров определяется прямым падением напряжения в нем, которое составляет около 1 В. Поэтому общий КПД преобразователя при номинальной нагрузке велик и составляет при мощности привода 50-7-100 кВт около 0,90—0,92. С увеличением мощности он еще увеличивается. Однако с уменьшением угловой скорости КПД уменьшается значительно даже при постоянном моменте нагрузки. Коэффициент мощности тиристорного преобразователя определяется по формуле:

$$\cos\varphi = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right),$$

(4.31)

откуда видно, что с увеличением угла регулирования тиристоров коэффициент мощности падает, что является существенным недостатком тиристорного преобразователя.

Кроме этого, тиристорный преобразователь имеет следующие недостатки. Пульсация выходного напряжения вызывает пульсацию тока якоря двигателя. Нежелание увеличивать габариты, вес и стоимость привода, а также ухудшать его динамические свойства приводит к отказу от установки сглаживающих дросселей, что увеличивает пульсацию тока. С увеличением амплитуды пульсации увеличиваются тепловые потери, ухудшаются условия коммутации; увеличивается шум, особенно при низких скоростях, а также износ щеток и подшипников. Дополнительный износ подшипников вызывается подшипниковыми токами, наведенными пульсирующим напряжением через емкость между обмоткой якоря и валом. Низкочастотные пульсации тока, возникающие при асимметричной работе фазового управления, могут вызвать пульсации скорости.

При питании двигателя от тиристорного преобразователя целесообразно снижать допустимый ток до 70%, а в некоторых случаях и более. Потери в стали также зависят от пульсации тока; для однофазных схем выпрямления увеличение потерь в меди составляет 70%, а в стали - 50% по сравнению с идеальным напряжением постоянного тока, а для трехфазных схем это увеличение составляет 20 и 10 % соответственно.

Высокое быстродействие тиристорного преобразователя может быть реализовано по условиям коммутации лишь в случае применения двигателей с шихтованными дополнительными полюсами. Такие двигатели для тиристорных преобразователей существенно дороже машин нормального исполнения, но позволяют избежать применения сглаживающих дросселей. В

настоящее время разработаны специальные двигатели постоянного тока, имеющие улучшенную вентиляцию, меньший маховый момент, встроенный тормоз и тахогенератор. Двигатели этой серии специально изготовлены для тиристорного управления. Конструкция двигателя предназначена для питания пульсирующим током, что позволяет отказаться от завышения их мощности и применения сглаживающих устройств.

Тиристорный преобразователь оказывает отрицательное влияние на питающую сеть. Это влияние выявляется прежде всего в понижении коэффициента мощности и наведении в сети высших гармоник, искажающих синусоидальную форму напряжения сети. С целью повышения коэффициента мощности осуществляются следующие мероприятия:

1. Применение линейного шунтирующего конденсатора. Этот способ применим при небольших глубинах регулирования скорости; кроме того, образуются контуры между емкостями и индуктивностями преобразователей.

2. Применение шунтирующего диода. В этом случае часть реактивного тока циркулирует в цепи постоянного тока, минуя трансформатор.

3. Последовательное соединение преобразователей - два преобразователя, соединенные последовательно, управляются таким образом, что один из них всегда работает с большим отставанием по фазе, а другой с минимальным (угол регулирования равен нулю). На предприятиях часто добиваются высокого коэффициента мощности за счет совместной работы преобразователей и синхронных машин. Обычно на каждую секцию шин высокого напряжения подключаются два синхронных двигателя и два тиристорных преобразователя.

Для электроприводов постоянного тока наша промышленность выпускает тиристорные агрегаты серии КТЭ, АТ (АТР), ТПП1 и ТВ (ТВР); они имеют реверсивное и нереверсивное исполнение, обозначаемое соответственно АТ (АТР) и ТВ (ТВР). Тиристорные преобразователи серии КТЭ предназначены для питания электрических машин постоянного тока напряжением 230 или

460 В и с номинальными токами 25; 50; 100; 200; 320; 500; 800; 1000; 1600 А. Тиристорные преобразователи серии ТПП1 и АТ (АТР) имеют то же назначение и те же номинальные напряжения, но выпускаются на номинальные токи 800; 1000; 1600; 2000; 4000; 5000 и 6300 А. Тиристорные преобразователи используются также для питания обмоток возбуждения генераторов в системах Г - Д большой мощности и обмоток возбуждения синхронных генераторов на электрических станциях.

4.5. Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения шунтированием обмотки якоря

Реостатное регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения позволяет получить линейные механические характеристики очень малой жесткости, при этом стабильная работа привода на заданной скорости невозможна. С целью обеспечения достаточно жестких механических характеристик привода при значительном снижении угловой скорости иногда применяют шунтирование обмотки якоря двигателя при обязательном включении последовательного сопротивления (рис. 4.19, *а*).

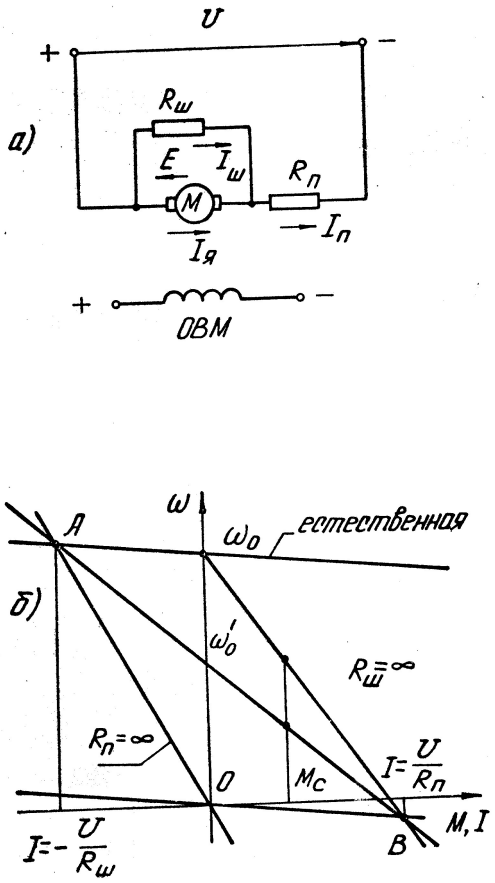


Рис 4.19. Регулирование угловой скорости шунтированием обмотки якоря двигателя независимого возбуждения:

а – электрическая схема; б – скоростные характеристики

На основании этого рисунка могут быть записаны уравнения, выражающие первый и второй законы Кирхгофа:

$$\left.\begin{aligned} U &= E + I_я R_я + I_п R_п; \\ U &= I_ш R_ш + I_п R_п; \\ I_п &= I_я + I_ш. \end{aligned}\right\} \qquad (4.31')$$

Из системы (4.31') можно получить три независимые неизвестные *E,* $I_п, I_ш$ ($I_я$ параметр). Решая систему (4.31), получим:

$$E = U\frac{R_ш}{R_ш + R_п} - I_я\left(R_я + \frac{R_ш \cdot R_п}{R_ш + R_п}\right); \qquad (4.32)$$

$$I_п = \frac{U + I_я R_ш}{R_п + R_ш};\qquad (4.33)$$

$$I_ш = \frac{U - I_я R_п}{R_п + R_ш},\qquad (4.34)$$

где шунтирующее и последовательное сопротивления соответственно;

где $R_ш, R_п$ - шунтирующее и последовательное сопротивления соответственно;

$I_п, I_ш$ - ток в последовательном и шунтирующих сопротивлениях.

Из выражения (4.32) получаем уравнение механической характеристики двигателя при шунтировании обмотки якоря:

$$\omega = \omega_0' - \frac{M}{C^2}\left(R_я + \frac{R_ш \cdot R_п}{R_ш + R_п}\right),\qquad (4.35)$$

где $\omega_0' = \omega_0 \frac{R_ш}{R_ш + R_п}$ - скорость идеального холостого хода.

Из выражения (4.35) видно, что механическая характеристика двигателя линейна; скорость идеального холостого хода здесь будет ниже, чем при реостатном регулировании угловой скорости; двигатель в режиме идеального холостого хода включен на делитель напряжения, образованный резисторами $R_ш$ и $R_п$ (параллельно $R_ш$). Из выражения скорости идеального холостого хода ясна роль последовательно включенного резистора $K_п$: без него скорость идеального холостого хода осталась бы неизменной. Жесткость полученной механической характеристики *AB* (см. рис. 4.19, *б*) меньше, чем жесткость естественной механической характеристики, и больше, чем жесткость реостатной характеристики с последовательно включенным резистором $\omega_0 B$. Этот вывод следует из очевидного соотношения:

$$R_я < R_я + \frac{R_ш \cdot R_п}{R_ш + R_п} < R_я + R_п.\qquad (4.36)$$

На рис. 4.19 представлены электрическая схема (*а*) и механическая характеристика (*б*), полученная для двигателя независимого возбуждения шунтированием обмотки якоря. Построить такую характеристику при заданных значениях резисторов $R_ш$ и $R_п$ можно следующим образом. На естественную характеристику наносится точка *A* с абсциссой $I = -\frac{U}{R_ш}$ и на характеристику динамического торможения при $R_п = 0$ наносится точка *B* с абсциссой $I = \frac{U}{R_п}$. Соединяя точки *A* и *B,* получим искомую характеристику. При отсутствии шунтирующего сопротивления ($R_ш = \infty$) получается характеристика $\omega_0 B$, соответствующая реостатной с сопротивлением $R_п$. При отсутствии последовательного резистора ($R_п = \infty$) получается разрыв в цепи якоря, которая замкнута на резистор $R_ш$, в этом случае имеет место режим электродинамического торможения, характеристика *AO.*

Режим генераторного торможения возможен, когда ток в последовательном сопротивлении становится отрицательным; из выражения (4.33) имеем $I_я < -\frac{U}{R_ш}$, т.е. генераторное торможение с отдачей энергии в сеть имеет место левее точки *A*. На участке характеристики $\omega_0' A$ машина работает в качестве генератора на шунтирующее сопротивление (режим электродинамического торможения).

Рассмотренный способ регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения имеет те же показатели регулирования, что и реостатное. Однако полученные механические характеристики обладают большей жесткостью, чем реостатные; это несколько улучшает показатели регулирования скорости: выше стабильность работы на заданной скорости, повышается и диапазон регулирования до 3:1,

а при малых колебаниях нагрузки - и до 5:1. Все же этот способ неэкономичен из-за больших потерь энергии в сопротивлениях. Поэтому схема с шунтированием якоря используется в приводах сравнительно небольшой мощности. Обычно она применяется для предварительного снижения угловой скорости с целью точной остановки привода в заданном положении. Длительная работа при шунтировании якоря неэкономична вследствие больших потерь энергии в резисторах.

4.6. Регулирование угловой скорости вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Выражение скоростной характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$$

показывает, что для принудительного изменения угловой скорости (при постоянном токе нагрузки) возможны три способа: регулирование сопротивлением в цепи якоря, регулирование величиной подводимого напряжения и регулирование изменением потока возбуждения.

При регулировании угловой скорости двигателя последовательного возбуждения введением дополнительного сопротивления в цепь якоря получают те же значения основных показателей регулирования, что и для двигателей с независимым возбуждением. Диапазон регулирования угловой скорости не превышает 2:1 и зависит от нагрузки. Плавность регулирования зависит от числа ступеней регулировочного реостата. Этот способ регулирования угловой скорости неэкономичен из-за больших потерь энергии в регулировочных сопротивлениях. По мере увеличения сопротив-

ления регулировочного реостата жесткость механических характеристик уменьшается, они становятся очень мягкими; стабильность работы на заданной скорости нарушается. По условиям полного использования двигателя на всех скоростях введение дополнительного сопротивления в цепь якоря должно производиться при постоянном нагрузочном моменте, что соответствует работе двигателя при неизменном токе якоря, равном номинальному. Направление регулирования угловой скорости - вниз от основной.

Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при регулировании угловой скорости введением дополнительного сопротивления в цепь якоря показаны на рис. 4.20. Несмотря на неэкономичность, этот способ находит применение в крановых и тяговых установках ввиду его простоты.

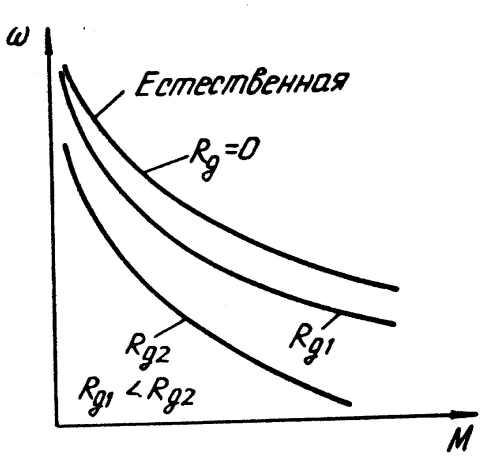


Рис 4.20. механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря

Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением подводимого напряжения может быть осуществлено с помощью тиристорного преобразователя или

генератора постоянного тока независимого или последовательного возбуждения. При питании двигателя от тиристорного или электромашинного преобразователя получают те же показатели регулирования угловой скорости, что и для двигателя независимого возбуждения. Особый интерес представляет способ регулирования напряжения на якоре путем переключения с последовательного на параллельное соединение нескольких двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Данный способ регулирования угловой скорости встречается в случаях» когда производственный механизм приводится двумя или несколькими двигателями. Применение нескольких двигателей вместо одного осуществляется по следующим причинам: из-за необходимости сократить время пуска и торможения путем уменьшения суммарного момента инерции; по условиям удобства размещения двигателей меньших габаритов вместо одного большого; из-за отсутствия подходящего двигателя большой мощности, а также для повышения надежности привода. Такой привод находит применение в электровозном транспорте, в доменных подъемниках, трамваях, механизмах поворота мощных экскаваторов и т.д. В этом случае несколько двигателей одинаковой мощности работают на один общий вал рабочей машины.

Применение последовательно-параллельного включения дает экономические выгоды. При последовательном включении однотипных двигателей на каждый из них приходится одинаковая часть напряжения сети. Когда все двигатели включены в сеть параллельно, к якорю каждого двигателя подводится полное напряжение сети. Таким образом может быть получено несколько ступеней регулирования без затрат бесполезной энергии. Для получения промежуточных ступеней регулирования в цепь якоря может быть введено дополнительное сопротивление. На рис. 4.21 приведены принципиальные схемы переключения (*а*), с помощью которых получаются две ступени регулирования угловой скорости (*б*). В целях полного

использования двигателя регулирование производится при постоянном нагрузочном моменте (без учета ухудшения условий вентиляции). В подобных системах регулирования угловой скорости возникает проблема равномерного распределения нагрузок между отдельными двигателями в статическом и динамическом режимах работы.

Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением магнитного потока затруднено вследствие

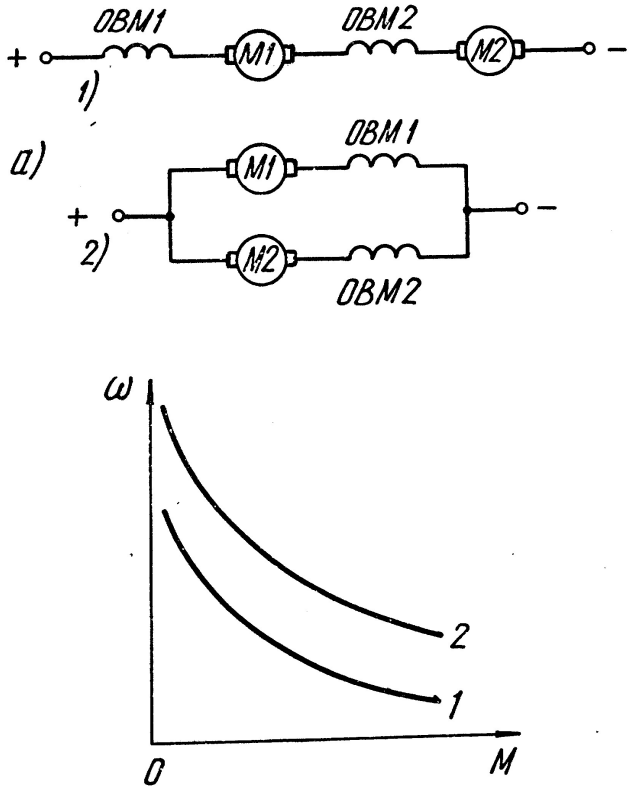


Рис. 4.21. Регулирование угловой скорости двигателя последовательного возбуждения при последовательно-параллельном включении двигателей:
а – электрическая схема; б – механические характеристики

того, что в этом двигателе ток нагрузки является и током возбуждения. В этом

случае изменение потока возбуждения (при постоянном токе якоря) возможно осуществлять шунтированием обмотки якоря или обмотки

возбуждения. При шунтировании обмотки возбуждения имеется возможность регулировать угловую скорость вращения двигателя ослаблением потока возбуждения. На рис. 4.22 представлена схема регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения (*а*) и механические характеристики, полученные при данном способе регулирования угловой скорости (*б*). В данном случае при неизменном токе якоря можно с помощью резистора $R_ш$ изменять ток возбуждения:

$$I_в = I_я - I_ш. \qquad (4.37)$$

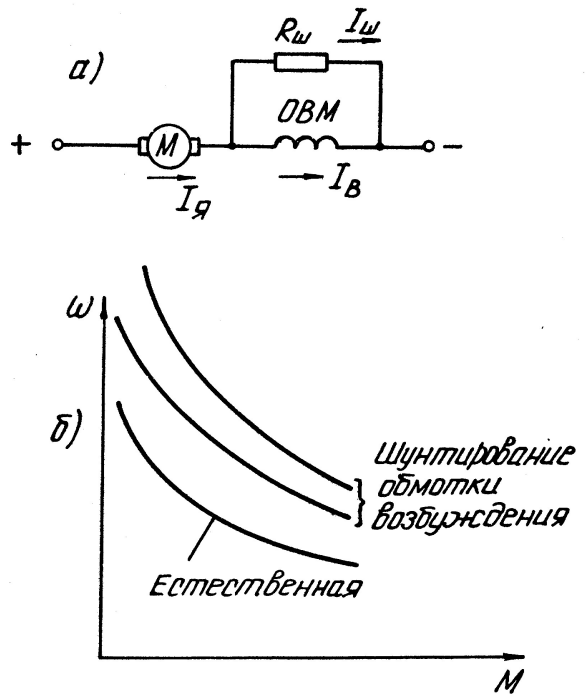


Рис. 4.22. Регулирование угловой скорости двигателя последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения:
а – электрическая схема; б – механические характеристики

Регулирование осуществляется вверх от основной скорости вследствие уменьшения магнитного потока. Оно является экономичным, т.к.

сопротивление $R_ш$ соизмеримо с сопротивлением обмотки возбуждения, и потери энергии в нем невелики.

Диапазон регулирования здесь невелик и составляет 2:1 при условии постоянства мощности нагрузки. Плавности регулирования здесь добиться трудно из-за значительных токов нагрузки, поэтому обычно используется ступенчатое регулирование. Этот способ регулирования получил применение в приводах механизмов, требующих увеличения скорости при малых нагрузках.

4.7. Реостатное и импульсное параметрическое регулирование угловой скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя

Современный автоматизированный электропривод требует регулирования угловой скорости в широких пределах. С точки зрения регулирования угловой скорости наиболее полно требованиям производственных механизмов отвечают двигатели постоянного тока, получающие питание от различного рода преобразователей (система генератор - двигатель, тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока и т.д.). Используя в этих системах различного рода регуляторы и усилители с большим коэффициентом усиления, можно получить практически любую механическую характеристику (от абсолютно жесткой до абсолютно мягкой).

Однако с развитием полупроводниковой преобразовательной техники все больше внимания уделяется внедрению в промышленность регулируемого

электропривода переменного тока. Это вызвано рядом причин, основными из которых можно считать следующие: асинхронные машины надежнее, проще и дешевле двигателей постоянного тока, они имеют большую удельную (на единицу веса) мощность и требуют меньшего расхода цветного металла. По динамическим свойствам двигатель постоянного тока также намного проигрывает асинхронному; так, например, отношение момента инерции к номинальному моменту двигателей постоянного тока в 2÷2,5 раза больше, чем у асинхронного (для двигателей с одинаковыми номинальными скоростями вращения). Двигатель постоянного тока конструктивно намного сложнее асинхронного и более трудоемок в изготовлении. Следует отметить наиболее уязвимое место двигателя постоянного тока - коллектор, который требует значительного ухода, усложняет эксплуатацию и снижает надежность работы электрической машины. Правда, асинхронная машина также имеет конструктивный недостаток - воздушный зазор между статором и ротором, но этот недостаток проявляется лишь для машин очень большой мощности.

В системах генератор - двигатель коэффициент полезного действия не превышает 0,7÷0,8, а в отдельных случаях опускается до 0,6 и ниже. Распределение электрической энергии на предприятиях в основном осуществляется на переменном токе, поэтому при использовании двигателей постоянного тока обязательно требуется преобразователь энергии, что влечет увеличение габаритов установки и снижение КПД. Поэтому стремятся там, где это возможно, использовать для регулирования угловой скорости двигатель переменного тока (трехфазные асинхронные с короткозамкнутым ротором или с контактными кольцами, а также коллекторные двигатели переменного тока). Угловую скорость синхронного двигателя принципиально можно регулировать с помощью преобразователя частоты. Однако поскольку синхронная машина экономичнее асинхронной только для большой мощности, для которой в настоящее время надежные и дешевые

преобразователи частоты промышленностью не изготовляются, синхронные машины пока отнесены к нерегулируемым.

В практике электропривода наибольшее распространение получили следующие способы регулирования угловой скорости вращения асинхронного двигателя: введением активного и индуктивного сопротивления в цепь статора и ротора, изменением числа пар полюсов машины, изменением частоты питающего напряжения, изменением величины питающего напряжения, при помощи каскадных схем включения асинхронного двигателя с другими машинами и преобразователями. Кроме перечисленных, иногда используются специальные методы регулирования: импульсное регулирование и регулирование с помощью электромагнитных муфт.

Рассмотрим показатели регулирования угловой скорости трехфазного асинхронного двигателя введением дополнительного активного сопротивления в цепь ротора. В этом случае пропорционально введенному сопротивлению увеличится критическое скольжение, а критический момент не изменится. Схема включения сопротивлений в цепь ротора и механические характеристики асинхронного двигателя представлены на рис. 4.23, *а* и *б*.

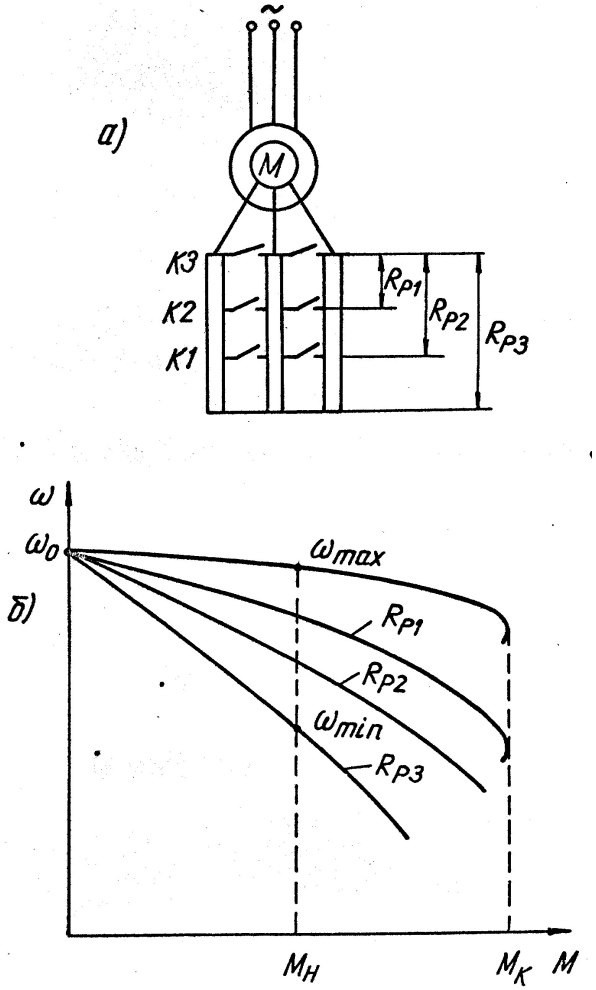


Рис. 4.23. Регулирование угловой скорости трехфазного асинхронного двигателя

введением сопротивления в цепь ротора:

а – схема включения сопротивлений; б – механические характеристики

Как видно из графиков этого рисунка, при увеличении сопротивления ротора жесткость механической характеристики асинхронного двигателя уменьшается. Из выражения (3.36) можно получить зависимости модуля жесткости при номинальной нагрузке для естественной механической характеристики:

$$|\beta_{не}| = \frac{2M_к}{\omega_0 \cdot s_{ке}} \left[1 - \left(\frac{s_{не}}{s_{ке}} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{s_{не}}{s_{ке}} \right)^2 \right]^{-2}$$

и для искусственной механической характеристики:

$$|\beta_{ни}| = \frac{2M_к}{\omega_0 \cdot s_{ки}}\left[1-\left(\frac{s_{ни}}{s_{ки}}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{s_{ни}}{s_{ки}}\right)^2\right]^{-2}.$$

Поделив одно выражение на другое и учитывая, что

$$\frac{s_{не}}{s_{ке}} = \frac{s_{ни}}{s_{ки}},$$

получим:

$$|\beta_{ни}| = |\beta_{не}|\frac{s_{ке}}{s_{ки}}. \qquad (4.38)$$

Критические скольжения относятся как сопротивления ротора:

$$\frac{s_{ке}}{s_{ки}} = \frac{R_2}{R_2 + R_p}. \qquad (4.39)$$

С учетом (4.39) выражение (4.38) принимает вид:

$$|\beta_{ни}| = |\beta_{не}|\left(\frac{R_2}{R_2 + R_p}\right), \qquad (4.40)$$

где $|\beta_{не}|$ и $|\beta_{ни}|$ - модули жесткости естественной и искусственной механических характеристик;

R_2 - собственное сопротивление ротора;

R_p - сопротивление реостата, включенного в цепь ротора.

Выражение (4.40) подтверждает сказанное: чем больше дополнительное сопротивление, введенное в цепь ротора, тем меньше модуль жесткости механической характеристики.

При постоянном моменте статического сопротивления диапазон регулирования скорости невелик и составляет 2:1. Для вентиляторной нагрузки, когда момент сопротивления пропорционален квадрату угловой

скорости, диапазон регулирования угловой скорости может быть увеличен до (3÷5):1.

Плавность регулирования (при заданном диапазоне) зависит от числа ступеней регулировочного реостата. На практике чаще всего используются металлические резисторы, ступени которых регулируются дискретно при помощи контакторов, поэтому регулирование скорости получается ступенчатое. Чем больше число ступеней, тем выше плавность регулирования угловой скорости. Плавное регулирование угловой скорости может быть осуществлено с помощью жидкостного реостата. Однако этот способ не получил широкого распространения в практике из-за нестабильности сопротивления электролита, громоздкости реостата и повышенной инерционности регулирования.

Экономичность оценивается первоначальными и эксплуатационными затратами. Первоначальные затраты на резисторы и контакторную систему управления невелики. Эксплуатационные затраты в данном случае определяются потерями энергии на регулирование скорости (затраты на обслуживание невелики).

Потери мощности при реостатном регулировании угловой скорости подразделяются на переменные, зависящие от нагрузки, и постоянные, не зависящие от нагрузки. Переменные потери - это потери мощности в меди статора, ротора и в сопротивлениях регулировочного реостата. Постоянные потери - это потери в стали статора и ротора, а также механические потери и добавочные, вызванные высшими гармониками магнитодвижущей силы статора и ротора.

При постоянном моменте статического сопротивления сумма переменных потерь в статоре и роторе может быть вычислена по выражению:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = M\Delta\omega\left[1 + R_1\left(R_2' + R_p'\right)^{-1}\right],$$

(4.41)

где ΔP_1 - переменные потери в статоре;

ΔP_2 - переменные потери в роторе;

$\Delta\omega = (\omega_0 - \omega)$ - перепад скоростей;

R_1 - активное сопротивление статора;

R'_2 - активное сопротивление ротора, приведенное к статору;

R'_p - сопротивление регулировочного реостата, включенного в цепь

ротора и приведенное к статору.

Выражение (4.41) может быть переписано следующим образом:

$$\Delta P = P_э s\left[1 + R_1\left(R'_2 + R'_p\right)^{-1}\right], \qquad (4.42)$$

где $\Delta P_э$ - электромагнитная мощность, потребляемая обмоткой статора из сети;

s - скольжение.

Из выражений (4.41) и (4.42) видно, что чем больше перепад скорости (глубже регулирование скорости), тем больше переменные потери в двигателе; с увеличением мощности привода переменные потери также возрастают.

Поскольку с введением дополнительного сопротивления в цепь ротора модуль жесткости механической характеристики асинхронного двигателя уменьшается, стабильность работы на заданной скорости ухудшается. Регулирование скорости производится вниз от основной.

Для двигателей с самовентиляцией при уменьшении угловой скорости вращения вала ухудшаются условия теплоотдачи, т. е. допустимая (по условиям нагрева) нагрузка должна уменьшаться. В этом отношении наиболее благоприятной для данного способа регулирования скорости является вентиляторная характеристика производственной машины, для

которой по мере уменьшения угловой скорости уменьшается и момент сопротивления.

Недостатками реостатного регулирования, угловой скорости являются: сравнительно небольшой диапазон регулирования, недостаточная плавность и низкая стабильность работы на малых скоростях, невысокое быстродействие и большие потери энергии в регулировочных реостатах. Однако, благодаря своей простоте, этот способ находит применение в приводах малой и средней мощности.

Основной недостаток реостатного регулирования - ступенчатое регулирование скорости - может быть устранен, если использовать импульсное параметрическое регулирование, которое часто применяется для стабилизации заданной угловой скорости или для предварительного снижения скорости перед остановкой механизма в заданном положении. При импульсном регулировании добавочное сопротивление включается как в цепь статора, так и в цепь ротора, поэтому данный способ применим и для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

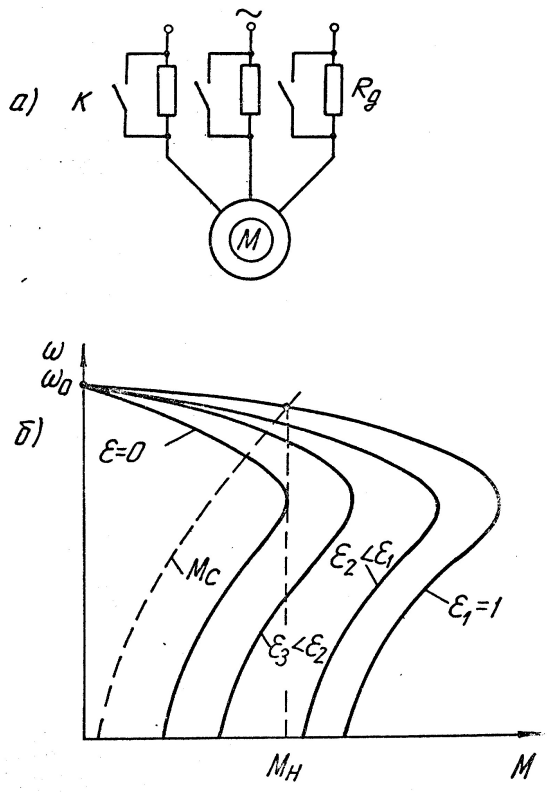


Рис. 4.24. Импульсное параметрическое регулирование скорости трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя:
а – схема включения; б – механические характеристики

На рис. 4.24, *а* приведена схема включения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при импульсном параметрическом регулировании скорости. Добавочные сопротивления $R_д$, включенные во все три фазы статора, шунтируются ключами двусторонней проводимости *К* - полупроводниковыми или контактными. Регулирование скорости осуществляется изменением скважности управляющих импульсов ε, под которой понимают отношение времени, когда ключи *К.* замкнуты, к полному времени цикла. При $\varepsilon = 1$ (ключи *К* постоянно замкнуты) асинхронный двигатель работает на естественной характеристике (рис. 4.24, *б*). Как видно из выражений (3.29) и (3.30), при увеличении активного сопротивления в цепи статора критическое скольжение и критический момент машины уменьшаются, снижается также модуль жесткости механической

характеристики, что влечет понижение стабильности работы на заданной скорости. Потери в роторе пропорциональны скольжению $\Delta P_2 = M\omega_0 s,$ поэтому данный способ применяется в приводах небольшой мощности. Диапазон регулирования угловой скорости, как видно из рис. 4.24, *б*, весьма мал и составляет (1,15÷1,20):1. Для обеспечения стабильной работы на заданной скорости необходимо применять замкнутые системы автоматического регулирования угловой скорости.

Более полное использование двигателя при импульсном параметрическом регулировании угловой скорости достигается, когда дополнительное сопротивление включается в цепь ротора. В этом случае необходимо использовать двигатель с фазным ротором. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя при импульсном параметрическом регулировании сопротивлением в цепи ротора приведена на рис. 4.25, *а.* В этом случае дополнительное сопротивление $R_д$ включено в цепь ротора через выпрямительный мост *В* последовательно со сглаживающим дросселем *L.* Дополнительные потери, связанные с регулированием скорости, выделяются в резисторе $R_д$, а не в двигателе, поэтому допустимый момент двигателя примерно равен номинальному. Резистор $R_д$ периодически шунтируется с помощью ключа *К.* В случае, когда ключ *К.* постоянно замкнут, двигатель работает на характеристике, для которой $\varepsilon = 1$. Если ключ *К* постоянно разомкнут, то двигатель работает на реостатной характеристике с эквивалентным сопротивлением, равным $R_д,$ при этом скважность управляющих импульсов $\varepsilon = 1$. Механические характеристики при импульсном параметрическом управлении представлены на рис. 4.25, *б*. Как видно из графиков этого рисунка, механические характеристики при импульсном параметрическом регулировании скорости аналогичны

характеристикам, полученным при реостатном регулировании. Однако характеристика со скважностью управляющих

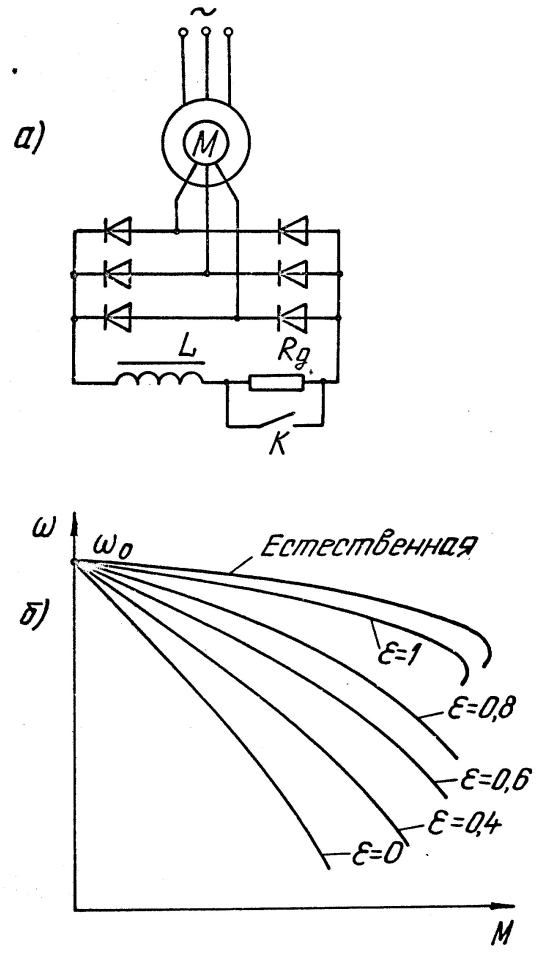


Рис. 4.25. Импульсное параметрическое регулирование угловой скорости трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором:
а – схема включения; б – механические характеристики

импульсов $\varepsilon = 1$ не совпадает с естественной из-за падения напряжения в вентилях, сглаживающем дросселе и ключе *К,*. Энергетические показатели при импульсном параметрическом регулировании угловой скорости также несколько хуже, чем при реостатном, что объясняется искажением формы тока, обусловленным наличием выпрямителя, и вызванным этим искажением появлением моментов высших гармоник, тормозящих ротор.

Системы привода с импульсным параметрическим управлением асинхронным двигателем с фазным ротором являются сравнительно простыми, обладают большим диапазоном и высокой плавностью регулирования угловой скорости при высоком быстродействии.

4.8. Регулирование угловой скорости вращения
трехфазного асинхронного двигателя
переключением числа полюсов

Данный способ регулирования угловой скорости применяется для трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, он основан на том, что синхронная скорость $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ зависит от числа пар полюсов p электрической машины. Изменяя число пар полюсов, можно регулировать угловую скорость. Электрическая машина изготовляется на определенное число полюсов. Поэтому с целью регулирования угловой скорости изготовляют специальные многоскоростные двигатели, обмотки статора которых имеют две или несколько частей. Переключая обмотки с последовательного на параллельное соединение, изменяют число пар полюсов и синхронную скорость асинхронного двигателя. Для простоты на рис. 4.26, *а* показана простая однослойная обмотка с числом пар полюсов $p = 2$. Две секции обмотки соединены последовательно и согласно, каждой секции соответствует одна пара полюсов. Если же эти секции соединить параллельно (рис. 4.26, *б*), то число пар полюсов уменьшается в два раза, а синхронная скорость двигателя увеличивается в два раза,

На практике для двухскоростных двигателей переключение обмоток статора может производиться по схемам, представленным на рис. 4.27, *а* и *б.* На рис. 4.27, *а* представлен переход от одиночной звезды к двойной, а на рис. 4.27, *б* - переключение обмоток статора с треугольника на двойную звезду. Переключение обмоток статора с одиночной звезды на двойную

целесообразно осуществлять при постоянном моменте статического сопротивления. Рассмотрим механические характеристики для данной схемы переключения обмоток двухскоростного асинхронного двигателя.

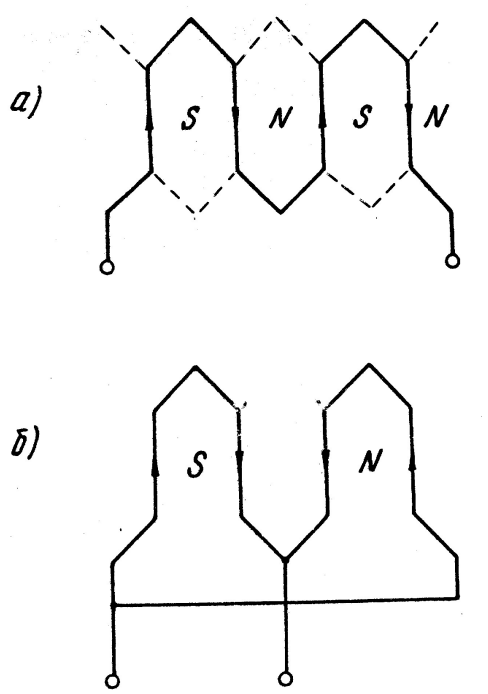


Рис. 4.26. Схема переключения обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя

При соединении обмоток статора в звезду номинальная мощность двигателя равна:

$$P_1 = \sqrt{3} U_н I_н \cos\varphi_1,$$

(4.43)

где $U_н$ - номинальное линейное напряжение сети, В;

$I_{н1}$ - номинальный ток фазы статора, А;

$\cos\varphi_1$ - номинальный коэффициент мощности двигателя при соединении обмо-

ток статора в одиночную звезду.

При соединении обмоток статора в двойную звезду номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети, равна:

$$P_1 = \sqrt{3}U_н \cdot 2 \cdot I_н \cos\varphi_1 = 3{,}46 U_н I_н \cos\varphi_1,$$

(4.44)

где $\cos\varphi_1$ - номинальный коэффициент мощности двигателя при соединении об-

моток статора в двойную звезду.

Из выражений (4.43) и (4.44) видно, что если принять $\cos\varphi_1 \approx \cos\varphi_1$, то

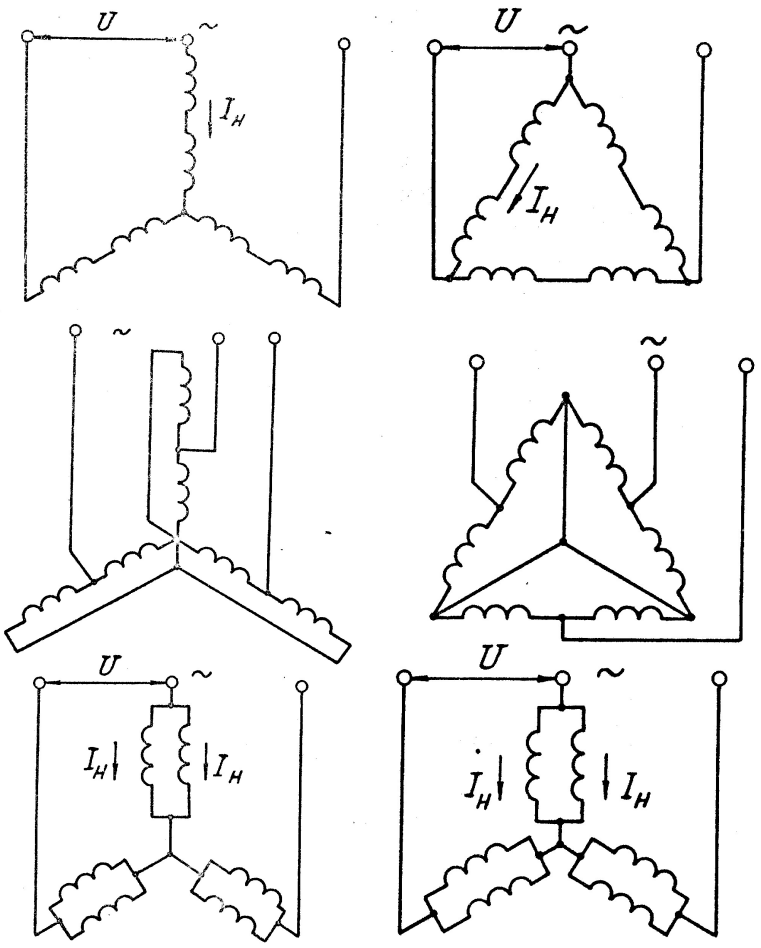
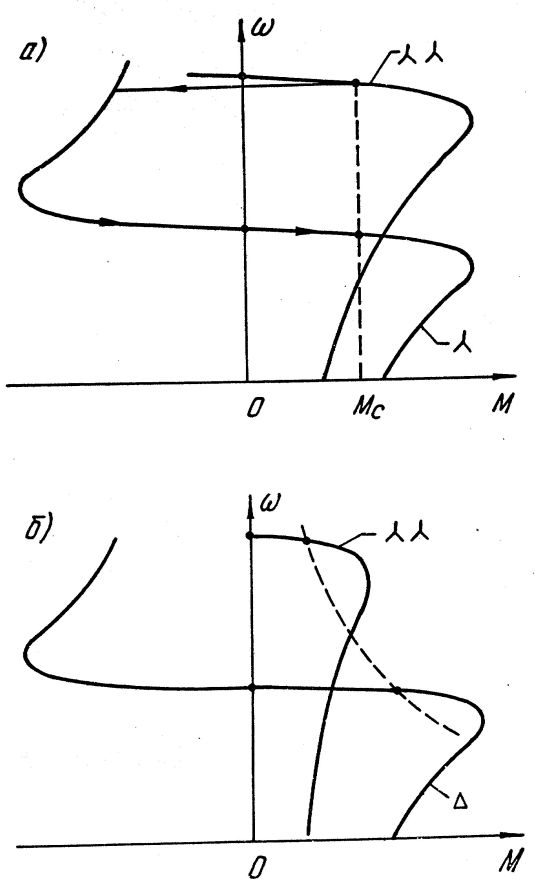


Рис. 4.27. Схема переключений обмоток статора:

а – схема звезда - двойная звезда; б – схема треугольник – двойная звезда

номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети при соединении обмоток статора в двойную звезду, в два раза больше, чем при соединении обмотки статора в одиночную звезду. Поскольку при этом угловая скорость вращения вала двигателя также увеличилась в два раза, то момент, развиваемый двигателем, остался примерно тот же. Механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя для данной схемы переключения обмоток статора приведены на рис. 4.28, *а.*

Переключение обмоток статора с треугольника на двойную звезду целесообразно производить для приводов механизмов с нелинейно-ниспадающей механической характеристикой производственной машины, представленной на рис. 2.1 кривой *4.*



При соединении обмоток статора в треугольник номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети, равна:

$$P_{1\Delta} = 3U_н I_н \cos\varphi_{1\Delta}, \qquad (4.45)$$

где $cos\varphi_{1\Delta}$ - номинальный коэффициент мощности двигателя при соединении

обмоток статора в треугольник.

Сравнение выражений (4.44) и (4.45) показывает, что при $cos\varphi \approx \cos$ мощности .Pi ^^ и *Pi*\ отличаются незначительно (примерно на 15%). Таким образом, регулирование скорости переключением обмоток статора с треугольника на двойную звезду осуществляется при постоянной мощности, развиваемой двигателем. Механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя для данной схемы переключения обмоток статора приведены на рис. 4,28, *б.*

Промышленность выпускает двух-, трех- и четырехскоростные асинхронные короткозамкнутые двигатели, в статоре которых закладывается несколько независимых обмоток на разное число пар полюсов. Существует определенный ряд скоростей, обусловленный числом пар полюсов двигателей. Например, двухскоростные двигатели выпускают на следующие значения синхронной скорости вращения: 3000/1500; 1500/750; 1000/500; для четырехскоростных двигателей можно получить следующий ряд синхроннных скоростей:

3000/1500/1000/500; 3000/1500/750/375; 1500/1000/750/500; 1000/750/500/375.

Как видно из приведенных значений синхронной скорости вращения, диапазон регулирования скорости может достигать 8: 1, почти как у системы генератор—двигатель. Однако в данном случае регулирование скорости производится ступенчато, плавность регулирования низкая. Стабильность работы на заданной скорости зависит от жесткостно-механической характеристики, которая может быть оценена по величине номинального скольжения: fl== =*MufwoSii.* Для многоскоростных асинхронных двигателей малой мощности номинальное скольжение составляет 0,05, а для средней мощности—0,03, т. е. характеристики обладают довольно высокой жесткостью, при этом перегрузочная способность составляет ^м== =1,7-2,6.

Многоскоростные двигатели имеют несколько худшие энергетические показатели по сравнению с обычными короткозамкнутыми
двигателями: ниже КПД, коэффициент мощности и удельная мощность (мощность на единицу веса), особенно при работе на малых угловых скоростях вращения. Однако, несмотря на это, данный способ регулирования угловой скорости является весьма экономичным по причине отсутствия потерь мощности на регулирование скорости.

4.9. Регулирование угловой скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя величиной подводимого напряжения

Угловую скорость вращения трехфазного асинхронного двигателя можно регулировать величиной напряжения, подводимого к обмотке статора. Во избежание насыщения магнитопровода и связанного с ним повышенного нагрева машины, а также для предупреждения пробоя изоляции обмоток напряжение питания трех фаз статора изменяют в сторону его уменьшения. Из выражения (3.30) видно, что критический момент трехфазного асинхронного двигателя зависит в квадрате от величины напряжения питания. Критическое скольжение (3.29) не зависит от напряжения питания. Следовательно можно записать:

$$M_{кп} = M_{к}\left(\frac{U_{п}}{U_{н}}\right)^{2}, \qquad (4.46)$$

где $M_{кп}$ - критический момент, развиваемый двигателем при пониженном напряжении;

$M_к$ - критический момент, развиваемый двигателем при номинальном напряжении;

$U_п$, $U_н$ - пониженное и номинальное напряжение питания асинхронного двигателя.

Синхронная скорость асинхронной машины не зависит от напряжения питания и остается постоянной. Как видно из выражения (3.36), с уменьшением критического момента уменьшается модуль жесткости механических характеристик асинхронного двигателя. Регулирование угловой скорости осуществляется за счет уменьшения модуля жесткости механической характеристики вниз от основной. Плавность регулирования угловой скорости зависит от плавности регулирования подводимого напряжения. Стабильность работы на заданной скорости с уменьшением жесткости механической характеристики ухудшается. Для поддержания заданной скорости в системах с тиристорными преобразователями напряжения следует использовать обратные связи.

Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при регулировании его угловой скорости величиной напряжения, питающего обмотки статора, приведены на рис. 4.29, *а.* Как видно из графиков этого рисунка, пределы регулирования угловой скорости вращения весьма ограничены даже при вентиляторном моменте статического сопротивления. Потери мощности в роторной цепи пропорциональны скольжению, поэтому с увеличением скольжения допустимый момент резко уменьшается. Такой способ регулирования угловой скорости неэкономичен и применяется для приводов малой мощности, работающих в кратковременном режиме.

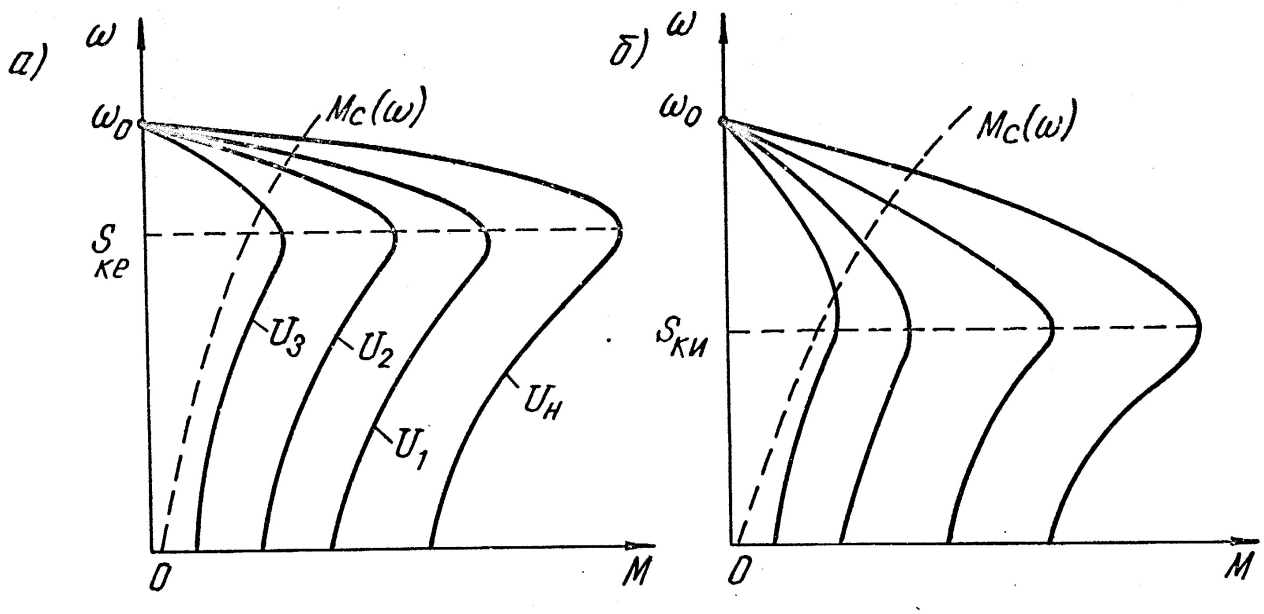


Рис. 4.29. Механические характеристики трехфазных асинхронных двигателей
при регулировании угловой скорости величиной подводимого напряжения:
а – без дополнительного сопротивления в цепи ротора; б – с постоянным добавочным
сопротивлением в цепи ротора

Больший диапазон регулирования угловой скорости и лучшее использование мощности двигателя можно получить для двигателя с фазным ротором, если в цепь ротора ввести добавочное неизменное сопротивление и регулировать угловую скорость величиной напряжения на статоре. Полученные этим способом механические характеристики представлены на рис. 4.29, *б.* При регулировании угловой скорости данным способом часть потерь скольжения выделяется не в самом роторе, а в добавочном сопротивлении, что улучшает тепловой режим двигателя; кроме того, отсутствует контактная аппаратура в силовой цепи ротора. Полученные характеристики мягче, чем для предыдущего способа (см. рис. 4.29, *а),* и диапазон регулирования угловой скорости значительно увеличивается, так что данный способ может

применяться при вентиляторной нагрузке для продолжительного режима работы, а при постоянной нагрузке - для кратковременного режима.

Для регулирования напряжения, питающего обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя, могут использоваться различные преобразователи: автотрансформаторы, дроссели насыщения и тиристорные регуляторы напряжения.

4.10. Регулирование трехфазного асинхронного двигателя частотой подводимого напряжения

Частотное регулирование угловой скорости является наиболее экономичным для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, однако в этом случае требуется преобразователь частоты. Известны следующие преобразователи частоты: механические, электромашинные, электронно-ионные (ртутные) и полупроводниковые (тиристорные и транзисторные). Механические преобразователи частоты (на основе механического прерывателя) не получили применения в приводе из-за низкого КПД и малой надежности. Из электромашинных преобразователей частоты в настоящее время используются синхронные и асинхронные преобразователи, приводимые по системе генератор—двигатель. Наибольшее распространение в настоящее время имеют полупроводниковые преобразователи частоты.

Возможность частотного регулирования угловой скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя вытекает из выражения: $\omega = \frac{2\pi f_{1\phi}}{p}$.

Изменение частоты питающего напряжения f_1 приводит при постоянном моменте статического сопротивления к изменению угловой скорости вращения вала двигателя ω; одновременно изменяется и механическая

характеристика асинхронного двигателя. Если в выражении (3.30) пренебречь активным сопротивлением статора $R_1 = 0$, то выражение для критического момента примет вид:

$$M_к = \frac{mU_{1ф}^2}{2\omega_0 \cdot x_к}. \qquad (4.47)$$

Поскольку синхронная скорость и индуктивное сопротивление машины при коротком замыкании пропорциональны частоте: $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$, $x_к = 2\pi f_1 L_к$, то выражение (4.47) можно представить следующим образом:

$$M_к = \frac{mp}{8\pi^2 L_к} \cdot \frac{U_{1ф}^2}{f_1^2} = A\left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2, \qquad (4.48)$$

где f_1, U_1 - значения частоты и напряжения питания машины.

Таким образом, уменьшение частоты питающего напряжения обусловливает увеличение критического момента, а увеличение частоты—его снижение. Кроме того, изменение частоты питающего напряжения влечет изменение индуктивного сопротивления контура намагничивания и (при неизменном напряжении питания) изменение тока и потока намагничивания. С уменьшением частоты увеличивается ток намагничивания и поток возбуждения машины, что может привести к увеличению потерь в магнитопроводе и значительному нагреву стали двигателя. При увеличении частоты величина потока двигателя уменьшается, что при неизменном моменте на валу вызовет увеличение тока нагрузки и повышенный нагрев обмоток ротора. В современных преобразователях частоты регулируется не только частота, но и величина напряжения, подводимого к обмотке статора асинхронной машины, при этом стремятся получить жесткие механические характеристики и неизменную перегрузочную способность (кратность максимального момента: $\lambda = \frac{M_к}{M_н} = const$).

Для естественной характеристики это условие выглядит следующим образом:

$$M_н\lambda = M_{ке} = A\left(\frac{U_{1н}}{f_н}\right)^2; \qquad (4.49)$$

для искусственной характеристики:

$$M_c\lambda = M_{ки} = A\left(\frac{U_1}{f}\right)^2, \qquad (4.50)$$

где M_c - момент сопротивления.

Поделив (4.50) на (4.49), получим зависимость момента нагрузки при таком изменении частоты и напряжения питания асинхронного двигателя, при котором перегрузочная способность остается постоянной на любой механической характеристике:

$$M_c = M_н\left(\frac{U_1}{U_{1н}}\right)^2\left(\frac{f_н}{f}\right). \qquad (4.51)$$

Как уже отмечалось, регулирование частоты и напряжения питания вызывает изменение потока возбуждения асинхронной машины. Для асинхронной машины можно приближенно считать, что ЭДС обмотки статора равна напряжению питания: $U \approx E$. Электродвижущая сила обмотки статора равна: $E = 4{,}44\Phi f k_1 w_1$, где Φ - магнитный поток, k_1 - обмоточный коэффициент, а w_1 - число витков фазы статора. Таким образом, можно записать:

$$U_1 = B\Phi f. \qquad (4.52)$$

Для номинальных значений напряжения питания и частоты поток равен номинальному, т. е.

$$U_{1н} = B\Phi_н f_н. \qquad (4.53)$$

Из (4.52) и (4.53) следует:

$$\Phi = \Phi_н\left(\frac{U_1}{U_{1н}}\right)\left(\frac{f_н}{f}\right). \qquad (4.54)$$

Выражение (4.54) показывает, как изменяется магнитный поток асинхронной машины при регулировании частоты и напряжения питания обмоток статора.

В зависимости от соотношения частоты и питающего напряжения $\frac{U_1}{f}$ преобразователя частоты могут быть получены разные законы регулирования угловой скорости в системе привода управляемый преобразователь частоты - асинхронный двигатель (УПЧ—Д).

При регулировании угловой скорости по закону постоянства момента $M_c = M_н = const$ из выражения (4.51) получим:

$$\frac{U_1}{f} = const. \qquad (4.55)$$

В этом случае, как следует из выражения (4.54) и (4.55), магнитный поток асинхронного двигателя остается постоянным: $\Phi = \Phi_н = const$. Таким образом, при регулировании угловой скорости на постоянство момента необходимо напряжение преобразователя изменять прямо пропорционально частоте при постоянном потоке возбуждения.

При регулировании угловой скорости по закону постоянства мощности должно выполняться соотношение:

$$P = M_c\omega = M_н\omega_н = const$$

или

$$M_c f = M_н f_н = const. \qquad (4.56)$$

Из выражения (4.56) получаем выражение момента:

$$M_c = M_н \frac{f_н}{f}. \qquad (4.57)$$

Из выражении (4.61) и (4.57) можно получить закон изменения напряжения от частоты при регулировании угловой скорости по закону постоянства мощности:

$$U_1 = U_{1н}\sqrt{\frac{f}{f_н}}. \qquad (4.58)$$

Подставив (4.58) в (4.54), получим закон изменения магнитного потока при регулировании при постоянной мощности:

$$\Phi = \Phi_н\sqrt{\frac{f_н}{f}}. \qquad (4.59)$$

Для производственных механизмов с вентиляторной (параболической) механической характеристикой имеют место соотношения:

$M_c = k\omega^2$, $M_н = k\omega_н^2$.

Из этих соотношений следует:

$$M_c = M_н\left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^2 \quad \text{или} \quad M_c = M_н\left(\frac{f}{f_н}\right)^2.$$

Из выражений (4.51) и (4.60) можно получить закон изменения напряжения от частоты при регулировании угловой скорости механизмов с вентиляторной механической характеристикой:

$$U_1 = U_{1н}\left(\frac{f}{f_н}\right)^2 \qquad (4.61)$$

и закон изменения магнитного потока асинхронного двигателя:

$$\Phi = \Phi_н\left(\frac{f}{f_н}\right). \qquad (4.62)$$

Таким образом, при частотном регулировании угловой скорости механизмов с вентиляторной механической характеристикой напряжение питания необходимо изменять пропорционально квадрату частоты, поток возбуждения при этом изменяется пропорционально частоте напряжения питания обмоток статора асинхронной машины. На рис. 4.30 представлены механические харак

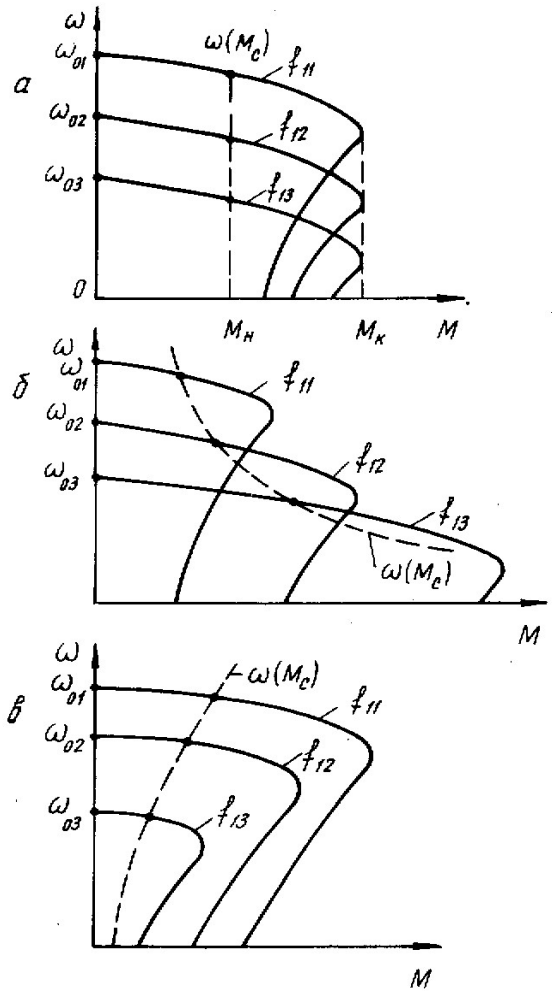


Рис.4.30. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании угловой скорости

теристики асинхронного двигателя при частотном регулировании угловой скорости по закону постоянства момента $M_c = const$ *(а),* постоянства мощности $P = const$ *(б)* и для вентиляторного момента сопротивления механизма *(в).*

Принципиальная схема электромашинного преобразователя на основе синхронного генератора, приводимого по системе генератор - двигатель, показана на рис. 4.31. Преобразователь состоит из сетевого двигателя (синхронного или асинхронного) *M1,* который вращает генератор *G1* с постоянной скоростью; напряжение на зажимах генератора *G1* регулируется

с помощью тока в обмотке возбуждения *OBG1,* который изменяется по величине (и по направлению) с по-

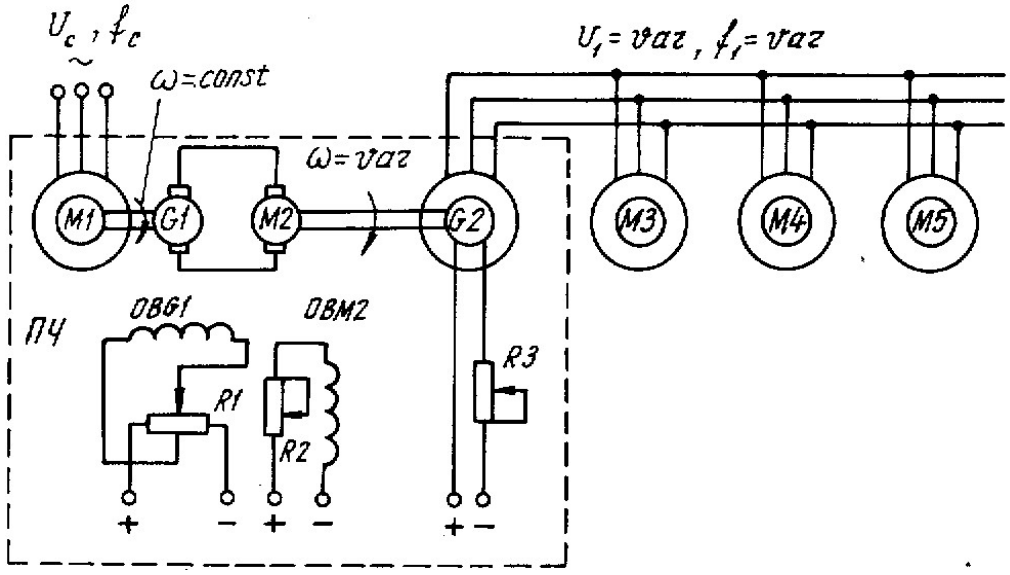


Рис.4.31. Принципиальная схема электромашинного преобразователя частоты

мощью резистора *R1.* От генератора *G1* напряжение постоянного тока регулируемой величины поступает на якорь двигателя постоянного тока *M2,* который приводит генератор *G2* с плавнорегулируемой угловой скоростью.

При изменении угловой скорости вращения вала генератора *G2* изменяются частота и амплитуда напряжения питания двигателей *M3, M4* и т. д. Изменяя направление тока в обмотке генератора *OBG1,* можно изменять направление вращения двигателей *M3, M4.* При неизменном возбуждении генератора *G2* и двигателя *M2* угловая скорость двигателей *M3* и *M4* регулируется по закону $\frac{U}{f} = const$, *т.* е. регулирование в этом случае осуществляется автоматически по закону постоянного момента. Увеличение угловой скорости вращения двигателя *M2* может быть получено за счет уменьшения тока возбуждения в обмотке *OBM2.* В этом случае частота и напряжение генератора *G2* увеличиваются, но перегрузочная способность двигателя *M2* уменьшается.

Достоинства данного преобразователя частоты следующие: простота управления, регулирование угловой скорости производится током в обмотке возбуждения генератора *OBG1;* высокая плавность регулирования угловой скорости; диапазон регулирования скорости при постоянном моменте статического сопротивления составляет 5:1, при двухзонном регулировании скорости (вверх от основной) диапазон несколько увеличивается; механические характеристики двигателей *M3* и *M4* обладают достаточной жесткостью (но мягче естественных) ; отсутствуют потери мощности на регулирование скорости. Данный тип преобразователя частоты имеет недостатки: большие габариты, вес и стоимость установки; преобразователь состоит из четырех машин примерно одинаковой мощности, поэтому КПД преобразователя очень мал даже при номинальных скоростях вращения машин *M3, M4;* с уменьшением угловой скорости вращения КПД еще меньше; привод имеет низкое быстродействие и производит большой шум при работе. Несмотря на указанные недостатки, данный привод применяется в металлургической промышленности, там, где требуется получить одинаковую угловую скорость большого числа согласованно работающих синхронных или асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

В качестве генератора переменной частоты в схемах с электромашинным преобразователем частоты могут быть использованы обычные асинхронные двигатели с фазным ротором, работающие в режиме асинхронного преобразователя частоты. Электромашинные преобразователи частоты не получили широкого применения в промышленности ввиду их низких технико-экономических показателей. Наиболее перспективными в настоящее время являются статические преобразователи частоты на основе тиристора.

Существующие тиристорные преобразователи частоты можно разделить на следующие основные группы: преобразователи с непосредственной связью (с неявновыраженным звеном постоянного тока); преобразователи с

промежуточным звеном постоянного тока повышенной частоты; преобразователи с явновыраженным звеном постоянного тока.

Схема тиристорного преобразователя частоты с непосредственной связью представлена на рис. 4.32. Преобразователь с непосредственной связью служит для понижения частоты питающего напряжения и состоит из 18 тиристоров,

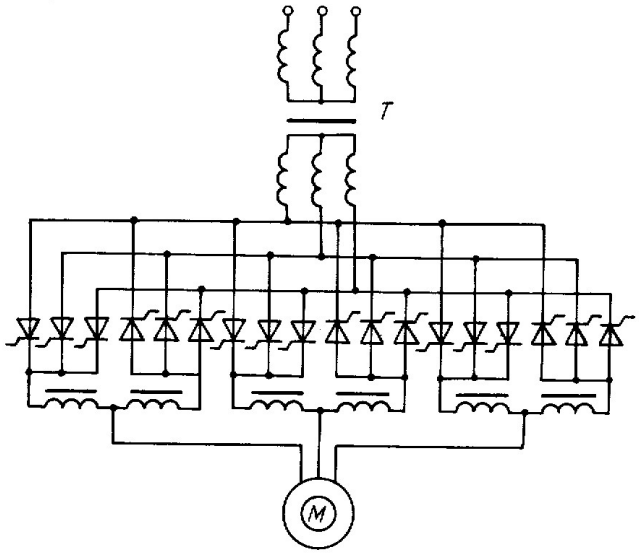


Рис 4.32. Принципиальная схема тиристорного преобразователя частоты с непосредственной связью

включенных по три во встречно-параллельные группы. В основе преобразователя лежит трехфазная нулевая схема выпрямления. Группу вентилей, имеющих общий катод, называют выпрямительной, а группу с общим анодом - ин-верторной. Реакторы, включенные между группами вентилей одной фазы, ограничивают уравнительные токи при совместном управлении вентильными группами.

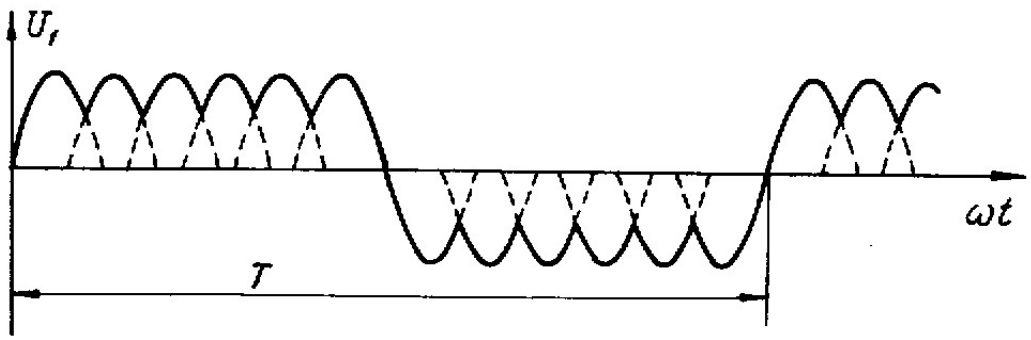


Рис. 4.33. Выходное напряжение тиристорного преобразователя частоты с непосредственной связью

В течение одного полупериода выходного напряжения преобразователя пропускает ток выпрямительная группа фазы преобразователя, а в течение другого полупериода - инверторная группа фазы преобразователя. Кривая выходного напряжения составляется из полуволн напряжения питающей сети (рис. 4.33). Включение одного вентиля в группе и выключение другого происходит подобно переключению в трехфазной нулевой схеме без коммутирующих конденсаторов. Регулирование выходного напряжения преобразователя достигается изменением угла включения вентилей.

Преобразователь частоты с непосредственной связью имеет следующие достоинства: высокий КПД, обусловленный однократным преобразователем энергии, независимость регулирования частоты и напряжения, свободный обмен активной и реактивной энергией между сетью и двигателем, отсутствие коммутирующих конденсаторов. К недостаткам преобразователя относятся: ограниченное регулирование выходной частоты (от 0 до 33 % частоты сети), большое число силовых вентилей, малый коэффициент мощности.

В тиристорных преобразователях частоты с промежуточным звеном переменного тока трехфазное напряжение частоты сети вначале преобразуется в однофазное переменное напряжение повышенной частоты,

которое затем преобразуется в трехфазное напряжение регулируемой частоты. Большое количество тиристоров, необходимость получения повышенной частоты, значительно превосходящей наибольшую выходную, ограничивает применение данного типа преобразователей частоты в промышленных установках.

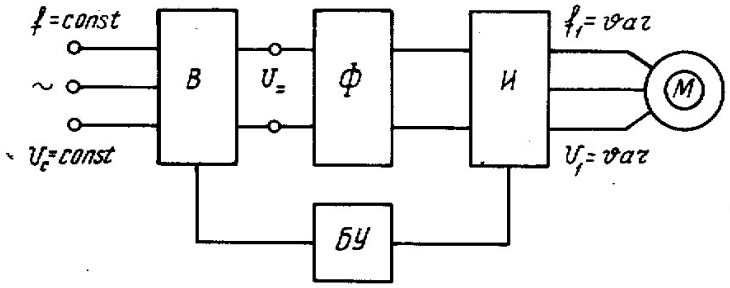


Рис. 4.34. Структурная схема тиристорного преобразователя
с промежуточным звеном постоянного тока

В тиристорных преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока производится двукратное преобразование напряжения (энергии) питающей сети: сначала оно выпрямляется выпрямителем *В,* а затем выпрямленное напряжение с помощью инвертора *И* преобразуется в переменное напряжение регулируемой частоты и амплитуды. Структурная схема тиристорного преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока представлена на рис. 4.34. Между выпрямителем *В* и инвертором *И* обычно включается фильтр Ф, сглаживающий пульсации либо выпрямленного напряжения, либо выпрямленного тока. Выпрямитель и инвертор могут работать независимо друг от друга либо с естественной, либо с принудительной коммутацией.

Инвертор является важнейшей составной частью тиристорного преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Инвертирование—это процесс преобразования постоянного тока в переменный или процесс передачи электрической энергии из цепи

постоянного тока в цепь переменного тока с помощью управляемых ключевых элементов (тиристоров или транзисторов). Инверторы подразделяются на автономные (независимые) и ведомые сетью (зависимые). Автономный инвертор—это преобразователь, работающий на автономную нагрузку, не содержащую источников активной энергии той же частоты, что и выходная частота инвертора. Инвертор, ведомый сетью (зависимый), - это инвертор, отдающий энергию в сеть переменного напряжения, в которой имеются источники активной энергии той же частоты, что и выходная частота инвертора, но со значительно большей мощностью по сравнению с отдаваемой инвертором.

Для автономного инвертора характерна принудительная коммутация тиристоров. Для инвертора, ведомого сетью, характерна естественная коммутация тиристоров; система управления тиристорами такого инвертора обычно является синхронизированной с сетью.

Основным типом инвертора, используемого в тиристорных преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока, является автономный инвертор. В зависимости от режима работы источника постоянного тока и особенностей протекания электромагнитных процессов автономные инверторы могут подразделяться на инверторы напряжения и инверторы тока. Автономный инвертор напряжения - это инвертор, форма напряжения на выходе которого определяется только порядком переключения тиристоров, а форма тока зависит от характера нагрузки. Автономный инвертор напряжения получает питание от источника напряжения. При его работе на индуктивную нагрузку должна быть обеспечена возможность обмена реактивной энергией между нагрузкой и источником постоянного напряжения, для чего на его входе устанавливается конденсатор достаточно большой емкости, а к встречно-параллельной переключающей схеме подключается обратный выпрямительный мост. Это позволяет току нагрузки протекать со сдвигом по фазе относительно напряжения.

Автономный инвертор тока - это инвертор, форма тока на выходе которого определяется только порядком переключения тиристоров инвертора, а форма напряжения зависит от характера нагрузки. Питание автономного инвертора тока должно производиться от источника тока. Перевод выпрямителя в режим регулируемого источника тока достигается обычно путем включения сглаживающего реактора очень большой индуктивности либо путем охвата выпрямителя сильной отрицательной обратной связью по току. Первый способ непригоден в регулируемом электроприводе из-за увеличения массы и габаритов преобразователя, его большой инерционности. В регулируемом электроприводе наиболее целесообразен второй способ.

Для автономного инвертора напряжения характерны однозначная зависимость выходного напряжения от входного и практическая независимость выходного напряжения от изменения нагрузки и коэффициента мощности. Эти его достоинства при работе на двигатель переменного тока и обусловливают предпочтительное применение преобразователей частоты с автономными инверторами тока в разомкнутых системах регулирования угловой скорости трехфазного асинхронного двигателя. Недостатками тиристорных преобразователей частоты с автономными инверторами напряжения являются: большая установленная мощность и соответственно большая масса и габариты конденсаторов и фильтра на входе автономного инвертора напряжения; большое количество силовых диодов и тиристоров; большая инерционность канала регулирования напряжения при установке LC - фильтра в звене постоянного тока.

На рис. 4.35 приведена принципиальная силовая схема статического преобразователя частоты с промежуточным. звеном постоянного тока, содержащего трехфазный мостовой полностью управляемый выпрямитель *B1,* дроссель фильтра L_{ϕ}, конденсатор реактивной энергии C_0 и автономный трехфазный мостовой инвертор с ограниченными коммутирующими

емкостями *С.* В качестве управляемого выпрямителя используются тиристоры VS1÷VS6,

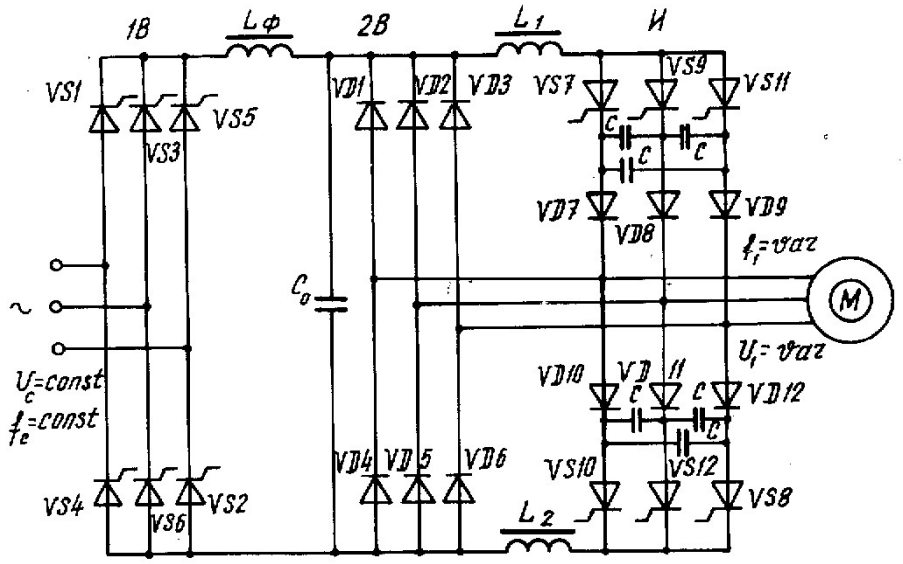


Рис. 4.35. Принципиальная силовая схема тиристорного преобразователя частоты со звеном постоянного тока

включенные по трехфазной мостовой схеме. Автономный инвертор напряжения *И* состоит из шести тиристоров VS7÷VS12, шести последовательно включенных с ними диодов VD7÷VD12 и шести диодов VD1÷VD6, включенных по трехфазной мостовой схеме и образующих мост реактивного тока, назначение которого состоит в пропускании отстающего тока нагрузки, когда знаки тока и напряжения не совпадают.

Дроссели L_1 и L_2 служат для ограничения тока разряда конденсаторов С по цепи через обратный мост, минуя закрываемый тиристор. Диоды VD7÷VD12 служат для отделения коммутирующих конденсаторов С от нагрузки, что дает возможность значительно снизить их емкость в сравнении с обычным параллельным инвертором.

Схема работает следующим образом. Выпрямитель *В1* преобразует переменное напряжение сети в постоянное регулируемое по величине напряжение, которое подается на вход инвертора *И.* Инвертор преобразует

постоянное напряжение в трехфазное переменное с регулируемой частотой. Регулирование частоты производится с помощью тиристоров VS7÷VS12, выполняющих роль ключей. Тиристоры включаются схемой управления попарно (VS7÷VS8, VS9÷VS10 и т. д.) с требуемой частотой.

При питании двигателя от тиристорного преобразователя частоты целесообразно обмотку статора включать на треугольник, что позволяет повысить надежность инвертора за счет снижения требуемого напряжения питания.

Преобразователь с автономным инвертором позволяет осуществлять двухзонное регулирование угловой скорости (как вниз, так и вверх от основной скорости), обладает высоким КПД, значительным быстродействием, малыми габаритами, имеет сравнительно высокую надежность и не производит шума. Однако он имеет и недостатки, к основным из которых следует отнести относительную сложность и высокую стоимость. В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию приемлемых по сложности и стоимости преобразователей частоты для регулирования скорости трехфазного корот-козамкнутого асинхронного двигателя.

4.11. Каскадные схемы регулирования угловой скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя

В установках средней и большой мощности, работающих в длительном режиме и требующих небольшого диапазона регулирования угловой скорости (вентиляторы, дымососы, воздуходувки), параметрические и импульсные методы становятся неприемлемыми ввиду их неэкономичности,

поскольку энергия скольжения рассеивается в дополнительных резисторах, введенных в цепь статора или ротора асинхронного двигателя. В установках подобного типа применяют каскадные схемы соединения асинхронного двигателя с другими машинами или преобразователями. Идея каскадного регулирования угловой скорости заключается в том, чтобы полезно использовать энергию скольжения, повышая тем самым экономичность электропривода.

Каскадные приводы классифицируются по способу использования энергии скольжения (электрические и электромеханические каскады) и по типу преобразователя энергии скольжения (электромашинные, вентильно-машинные и вентильные каскады). В электрических каскадах энергия скольжения за вычетом потерь на преобразование отдается в сеть. В электромеханических каскадах энергия скольжения возвращается на вал основного асинхронного двигателя.

Принцип каскадного регулирования угловой скорости заключается в следующем. Как известно, ток ротора протекает под воздействием его ЭДС; для того, чтобы ток производил полезную работу, необходимо, чтобы он был направлен навстречу ЭДС. С этой целью, в цепь ротора вводят добавочную ЭДС, которая сдвинута по отношению ЭДС ротора на угол (180° - ψ) и имеет частоту тока ротора. Введение добавочной ЭДС в цепь ротора позволяет регулировать угловую скорость, величину динамического момента и коэффициент мощности асинхронной машины.

Электромашинные каскады в настоящее время не применяются, поскольку они содержат одноякорный преобразователь, который характеризуется инерционностью, сложностью изготовления и неудовлетворительной коммутацией (в настоящее время одноякорные преобразователи не выпускаются промышленностью). Наиболее простыми и надежными (по сравнению с электромашинными каскадами) являются схемы, в которых

одноякорные преобразователи заменяются полупроводниковыми вентилями, что повышает их надежность и КПД.

Принцип регулирования угловой скорости в каскадных схемах может быть пояснен следующим образом. Если в цепь ротора введена добавочная ЭДС, которая находится в противофазе с ЭДС ротора ($\psi = 0$) и равна ей по величине:

$$E_{доб} = E_2 = E_{2н}S = E_{2н}\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right), \qquad (4.63)$$

где $E_{доб}$ - добавочная ЭДС ротора;

$E_{2н}$ - номинальная ЭДС ротора (при заторможенном двигателе);

ω - угловая скорость ротора;

ω_0 - скорость идеального холостого хода,

то ток ротора и момент машины равны нулю, т. е. она работает в режиме холостого хода ($\omega = \omega_{xx}$). Из выражения (4.63) можно получить значение скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{xx} = \omega_0\left(1 - \frac{E_{доб}}{E_{2н}}\right), \qquad (4.64)$$

где ω_{xx} - скорость холостого хода асинхронной машины.

Как видно из выражения (4.64), регулируя величину $E_{доб}$, можно изменять скорость идеального холостого хода, которая уже не равна синхронной скорости асинхронной машины.

Наибольшее распространение в настоящее время получили вентильно-машинные (электрические и электромеханические) и вентильные каскады.

Введение добавочной ЭДС вызывает трудности, поскольку она должна иметь частоту тока ротора, которая зависит от угловой скорости (скольжения) двигателя:

$$f_2 = f_1 s = f_1\left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}\right), \qquad (4.65)$$

где f_2 - частота тока ротора;

f_1 - частота сети.

Следовательно, добавочная ЭДС должна иметь регулировочную частоту, равную частоте тока ротора, что весьма трудно технически выполнить. Поэтому добавочную ЭДС вводят в ротор асинхронной машины либо посредством преобразователя частоты, либо включением постоянной по знаку ЭДС в цепь выпрямленного тока ротора. Очевидно, что использование каскадных схем возможно лишь для асинхронных машин с фазным ротором.

На рис. 4.36 представлена принципиальная схема вентильно-машинного электрического каскада с промежуточным звеном постоянного тока. Асинхронная машина *M1 с* фазным ротором получает питание от сети переменного тока промышленной частоты. В цепь ротора включен выпрямитель *B,* собранный по трехфазной мостовой выпрямительной схеме. Выпрямитель *B* питает обмотку якоря двигателя постоянного тока *M2,* с помощью которого вращается вал генератора *G*, обмотка статора которого включена в сеть переменного тока. Вал генератора *G* вращается с постоянной синхронной скоростью, определяемой частотой сети и числом пар полюсов генератора.

Регулирование угловой скорости асинхронной машины *M1* осуществляется следующим образом. С помощью резистора *R1,* включенного в цепь питания обмотки возбуждения *OBM2* двигателя постоянного тока, уменьшается поток возбуждения машины *M2.* Поскольку машина *M2* вращается с постоянной угловой скоростью, то изменение потока влечет изменение ЭДС об-

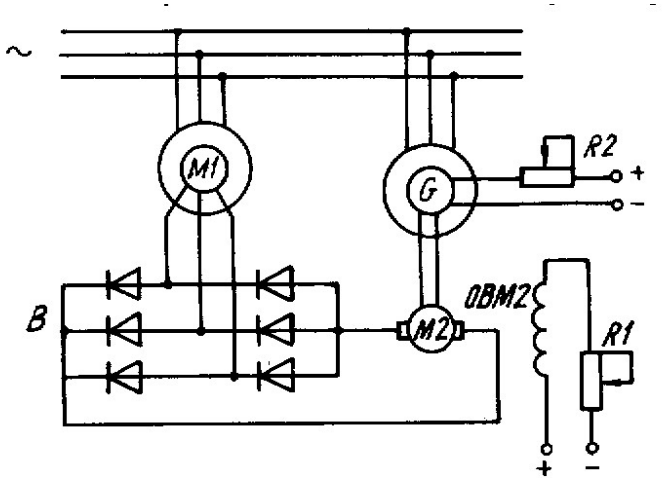


Рис 4.36. Принципиальная схема вентильно-машинного электрического каскада

мотки якоря $E = k\Phi\omega$, которая направлена встречно выпрямленному напряжению выпрямителя *B*. При этом изменяется ток ротора и момент на валу асинхронной машины. Если момент статического сопротивления остается постоянным, то изменение момента асинхронной машины вызовет ее ускорение (или замедление) до тех пор, пока момент машины не достигнет прежнего значения, но уже при другом значении угловой скорости вращения асинхронной машины. При токе возбуждения *OBM2,* равном нулю, характеристика *M1* незначительно отличается от естественной (из-за падения напряжения в вентилях выпрямителя *B* и якоря двигателя *M2).*

При подаче тока в обмотку возбуждения *OBM2* на якоре *M2* появится ЭДС, направленная навстречу выпрямленной ЭДС ротора, ток ротора уменьшится, уменьшится и момент асинхронной машины, угловая скорость *M1* уменьшится, что вызовет увеличение скольжения и ЭДС ротора; так будет длиться до тех пор, пока момент асинхронной машины не возрастет до прежнего значения, при этом машина будет работать в новом установившемся режиме на пониженной угловой скорости. Энергия скольжения через выпрямитель *B* передается машине постоянного тока *M2* и через ее вал - генератору *G,* который возвращает ее в сеть переменного тока.

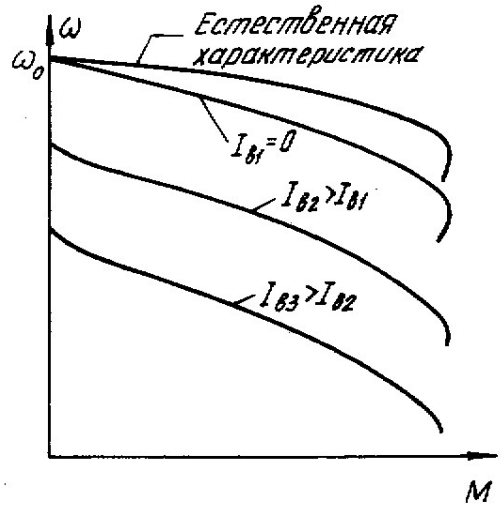


Рис. 4.37. Механические характеристики вентильно-машиннго каскада

Полное использование асинхронного двигателя в электрическом каскаде достигается при постоянном моменте на его валу, поэтому электрический каскад называют каскадом постоянного момента. Диапазон регулирования угловой скорости вентильно-машинного электрического каскада не превышает 2:1. Направление регулирования угловой скорости - вниз от основной, т. е. он обеспечивает однозонное регулирование угловой скорости. Суммарная установленная мощность вентильно-машинного электрического каскада (при диапазоне регулирования угловой скорости 2:1) составляет 250 % от мощности основного двигателя. Плавность регулирования очень высокая и зависит от плавности регулирования тока в обмотке *ОВМ2.* Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке составляет $82 \div 85$ %. Коэффициент мощности равен $0{,}7 \div 0{,}75$, но может быть увеличен за счет перевозбуждения синхронного генератора *G.* Механические характеристики вентильно-машинного электрического каскада показаны на рис. 4.37.

На рис. 4.38 представлена принципиальная схема вентильно-машинного электромеханического каскада. Как для всякого вентильно-машинного

каскада, ротор двигателя *Ml* подключен к выпрямителю *B,* от которого получает питание обмотка якоря двигателя постоянного тока *M2.* В отличие от предыдущей схемы, вал двигателя *M2* механически связан с валом основного двигателя *M1.* Та-

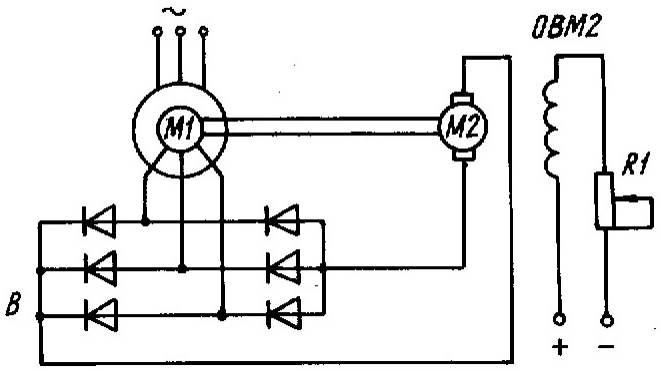


Рис.4.38. Принципиальная схема вентильно-машинного электрического каскада

ким образом, энергия скольжения за вычетом потерь в выпрямителе *B* и двигателе постоянного тока *M2* возвращается на вал регулируемого двигателя *M1.* Следовательно, мощность, развиваемая каскадом независимо от угловой скорости, будет постоянной, и вентильно-машинный электромеханический каскад называют каскадом постоянной мощности.

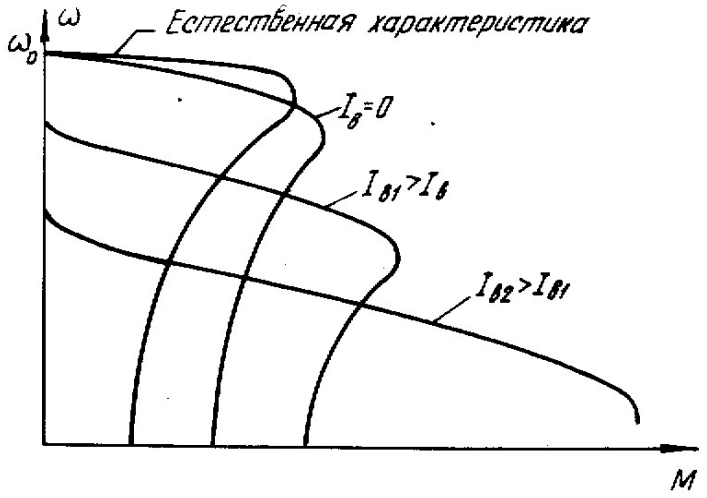


Рис. 4.39. Механические характеристики вентильно-машинного

электрического каскада

Регулирование угловой скорости, как и в предыдущем каскаде, осуществляется изменением добавочной ЭДС, создаваемой якорем машины *М2,* что производится с помощью резистора *R1,* включенного в цепь обмотки возбуждения *ОВМ2* двигателя постоянного тока.

Механические характеристики вентильно-машинного электромеханического каскада приведены на рис. 4.39. Данный каскад позволяет получить плавное, однозонное регулирование скорости с диапазоном регулирования 2:1, он имеет почти такие же технико-экономические показатели, что и электрический каскад, однако преобразователь не содержит генератора переменного тока, что упрощает и удешевляет установку в целом.

Основным недостатком вентильно-машинных каскадов является то, что добавочная ЭДС в цепь ротора вводится с помощью машины постоянного тока. Наличие машинного преобразователя увеличивает габариты и стоимость установки, создает шум при работе. В настоящее время машинный агрегат, с помощью которого создается добавочная ЭДС, заменяется инвертором.

Принципиальная схема асинхронно-вентильного каскада приведена на рис. 4.40. Схема состоит из следующих основных элементов: регулируемого асинхронного двигателя *М* с фазным ротором; неуправляемого вентильного выпрямителя, включенного в цепь ротора; управляемого вентильного преобразователя - инвертора *И,* трансформатора *Т,* служащего для согласования напря-

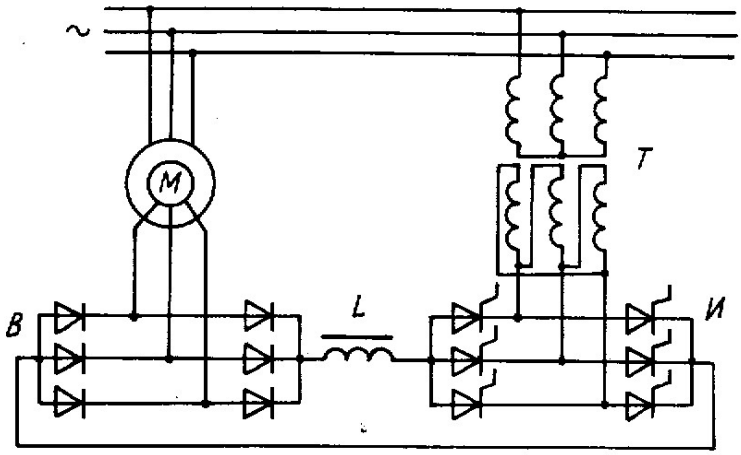


Рис. 4.40 Принципиальная схема асинхронно-вентильного каскада

жения ротора двигателя с напряжением сети, а также сглаживающего дросселя L - для сглаживания пульсации тока и напряжения в промежуточной цепи постоянного тока.

Регулирование угловой скорости асинхронного двигателя с фазным ротором по схеме асинхронно-вентильного каскада производится следующим образом. При работе асинхронной машины на пониженных скоростях ЭДС ротора $E_2 = E_{2н}s$ выпрямляется с помощью выпрямителя *В*. В цепь выпрямленного напряжения ротора вводится добавочная ЭДС, представляющая среднее выпрямленное напряжение инвертора. Величина ЭДС инвертора регулируется посредством изменения угла открывания тиристоров инвертора. При увеличении ЭДС инвертора ток ротора и момент двигателя уменьшаются и двигатель тормозится (угловая скорость его уменьшается). По мере снижения угловой скорости (увеличения скольжения) повышается выпрямленное напряжение ротора. Ток ротора и момент асинхронной машины увеличиваются до тех пор, пока момент, развиваемый двигателем, не станет равным моменту статического сопротивления. Двигатель снова работает в установившемся режиме с пониженной угловой скоростью вращения.

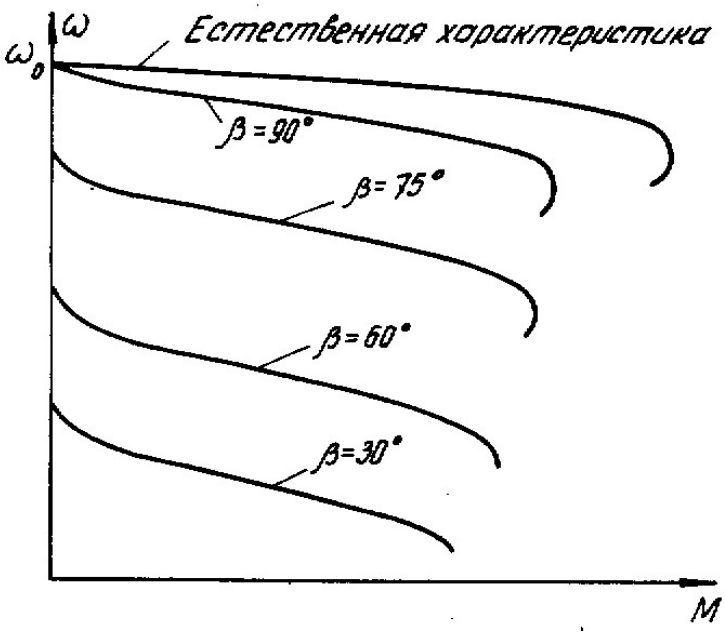


Рис. 4.41. Механические характеристики асинхронно-вентильного каскада

Если уменьшить ЭДС инвертора до нуля, угловая скорость двигателя возрастает лишь до 90 ÷ 95 % синхронной (из-за дополнительного падения напряжения в цепи ротора). Энергия скольжения через выпрямитель, инвертор и трансформатор отдается в сеть переменного тока, поэтому асинхронно-вентильный каскад относится к электрическому каскаду или каскаду постоянного момента. Механические характеристики асинхронно-вентильного каскада представлены на рис. 4.41. Привод обладает высокой плавностью регулирования угловой скорости, КПД асинхронно-вентильного каскада достигает 0,82 ÷ 0,90 при максимальной угловой скорости и зависит от мощности регулируемого двигателя. Привод по системе асинхронно-вентильный каскад обладает низким коэффициентом мощности, что связано со значительным потреблением реактивной мощности асинхронным двигателем, трансформатором и инвертором. Коэффициент мощности зависит не только от нагрузки, но и от глубины регулирования угловой скорости.

Система асинхронно-вентильный каскад обладает рядом достоинств. В качестве приводного используется трехфазный асинхронный двигатель, включаемый непосредственно в промышленную сеть. Асинхронный двигатель проще, дешевле и надежнее двигателя постоянного тока. Преобразованию подвергается только часть энергии, потребляемой двигателем из сети, а именно: энергия скольжения, что обусловливает высокий КПД системы. Привод имеет малую мощность управления, обладает высокой плавностью регулирования угловой скорости. К недостаткам системы асинхронно-вентильный каскад относятся следующие: низкий коэффициент мощности, уменьшение перегрузочной способности и жесткости по сравнению с естественной механической характеристикой асинхронного двигателя.

Контрольные вопросы

1. Дать определение регулирования угловой скорости вращения электропривода.
2. Перечислить показатели регулирования угловой скорости.
3. Сравнить показатели систем Г—Д с показателями при регулировании угловой скорости вращения двигателей постоянного тока другими способами.
4. Перечислить способы регулирования угловой скорости вращения двигателей постоянного тока, трехфазного асинхронного двигателя.
5. Объяснить способ регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока с помощью тиристорного преобразователя.
6. Перечислить законы регулирования асинхронного двигателя с помощью преобразователя частоты.
7. Пояснить принцип регулирования угловой скорости асинхронного двигателя в каскадных схемах.

5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

5.1. Общие сведения о переходных процессах

Переходными процессами называют все явления, связанные с изменением энергетического состояния привода (ускорение, замедление, изменение тока, момента, потока). Переходные процессы присущи любому приводу, они возникают при пуске, торможении, регулировании скорости и изменении нагрузки на валу рабочей машины. Характер и длительность протекания переходных процессов оказывают существенное влияние на выбор мощности электрического двигателя и аппаратуры управления и защиты. Только для очень ограниченного класса рабочих машин выбор мощности приводного двигателя можно производить без учета переходных процессов. К ним относятся редко пускаемые нерегулируемые установки, работающие с постоянным моментом (конвейеры, центробежные вентиляторы, насосы и т.д.). Некоторые рабочие машины, наоборот, не имеют установившихся режимов и работают при циклически изменяющемся моменте статического сопротивления, это щековые дробилки, поршневые компрессоры и т.д.

Переходные процессы, связанные с пуском, торможением и реверсированием привода, не являются рабочими, но их длительность существенно влияет на производительность рабочей машины. Ввиду этого необходимо сокращать длительность протекания переходных процессов, однако, большие ускорения (замедления) привода приводят к значительным динамическим моментам в элементах редуктора и исполнительного органа рабочей машины, кроме того, особенности технологического процесса часто накладывают ограничения на величину ускорения (замедления) привода. Ограничение пусковых и тормозных моментов существенно и для защиты двигателя от электрических перегрузок. Для двигателя постоянного тока превышение допустимой нагрузки влечет появление кругового огня на коллекторе и выход из строя

щеточного аппарата, превышение критического момента асинхронного двигателя вызывает "опрокидывание" и остановку двигателя.

Причины, вызывающие переходные процессы в приводе, подразделяют на внешние и внутренние. К внешним причинам относятся воздействия, связанные с управлением привода (пуск, торможение, регулирование скорости), а также с изменением нагрузки на валу двигателя. Внутренними причинами являются инерционности привода:

1) механическая инерция вращающихся и поступательно движущихся масс;

2) электромагнитная инерция, обусловленная индуктивностями обмоток двигателя;

3) тепловая инерция, зависящая от теплоемкости обмоток и магнитопровода двигателя.

Изменение энергетического состояния обычно связано с передачей или преобразованием энергии. Мгновенное изменение энергетического состояния привода невозможно, т.к. это потребовало бы бесконечно большую мощность электрического двигателя. Например, при пуске двигатель потребляет электрическую энергию из сети и преобразует ее в механическую энергию на валу. При этом маховые массы привода запасают определенное количество кинетической энергии. Поскольку мощность электрического двигателя ограничена, то накопление необходимого количества кинетической энергии элементами привода происходит по истечении некоторого времени. Таким образом, даже при ступенчатой подаче напряжения к обмоткам двигателя, скорость последнего изменяется не мгновенно, а постепенно с течением времени.

Преобразование электрической энергии в механическую энергию происходит посредством электромагнитного поля, обладающего запасом энергии. Поскольку изменение тока вызывает изменение запаса энергии электромагнитного поля, то оно так же не может произойти мгновенно. По

этой причине ток (момент) двигателя в переходных режимах не может измениться мгновенно.

Интенсивность изменения того или иного параметра привода определяется величиной, называемой постоянной времени. Каждому виду инерции соответствует своя постоянная времени, которая является мерой инерционности.

Механическая инерция характеризуется механической постоянной времени, которая зависит от момента инерции привода и жесткости механических характеристик двигателя и рабочей машины. В электрическом приводе основное влияние на характер и продолжительность переходного процесса оказывает механическая инерция.

Электромагнитная инерция характеризуется электромагнитной постоянной времени, определяемой отношением индуктивности обмотки к ее активному сопротивлению. Электромагнитная инерция оказывает значительно меньшее влияние на время протекания переходного процесса, нежели механическая инерция, поэтому ею часто пренебрегают. Однако при некоторых соотношениях между механической и электромагнитной постоянной времени в приводе возникают колебательные процессы, которые существенно изменяют сам характер переходного процесса. В этом случае пренебрежение учетом электромагнитной инерции приводит к грубым ошибкам в расчетах.

Тепловая инерция характеризуется постоянной времени нагрева, которая определяется отношением между теплоемкостью и коэффициентом теплоотдачи двигателя. Скорость изменения теплового состояния двигателя зависит от многих факторов (габаритов двигателя, исполнения, способов охлаждения) и очень мала по отношению с интенсивностью изменения угловой скорости вращения привода и тока (момента) двигателя. По этой причине при изучении механических и электромагнитных переходных процессов изменением теплового состояния двигателя пренебрегают, и тепловые переходные процессы рассматривают независимо от других.

Каждый вид инерции тесно связан с определенным переходным процессом в приводе. Механическая инерция обуславливает механический переходный процесс, который характеризуется плавным изменением скорости привода и мгновенным изменением тока и момента двигателя, последнее обстоятельство приводит к тому, что динамические и статические механические характеристики привода при механических переходных процессах совпадают. Электромеханические переходные процессы учитывают как механическую, так и электромагнитную инерцию привода, в этом случае скорость, ток и момент привода изменяются постепенно с течением времени, а статические и динамические механические характеристики двигателя различны. Тепловая инерция определяет протекание тепловых переходных процессов в приводе и оказывает существенное влияние на методику расчета мощности приводного двигателя.

Следует отметить, что все виды переходных процессов протекают одновременно и оказывают взаимное влияние. Например, с изменением момента статического сопротивления изменяется скорость вращения, ток и момент двигателя, что влечет изменение потерь и теплового состояния двигателя. Активное сопротивление обмоток зависит от температуры нагрева и влияет на величину механической и электромагнитной постоянной времени.

Целью изучения переходных процессов является определение зависимостей: $I = I(t);\ V = V(t);\ \omega = \omega(t),$ а также скольжения $S = S(t)$ или пути от времени $\varphi = \varphi(t).$

5.2. Механические переходные процессы с линейными механическими характеристиками двигателя и производственной машины

Механические переходные процессы, как уже упоминалось, учитывают одну (механическую) постоянную времени и описывается одним дифференциальным уравнением первого порядка (основное уравнение движения привода). На рис. 5.1, а представлены графики с линейными механическими характеристиками электрического двигателя и производственного механизма.

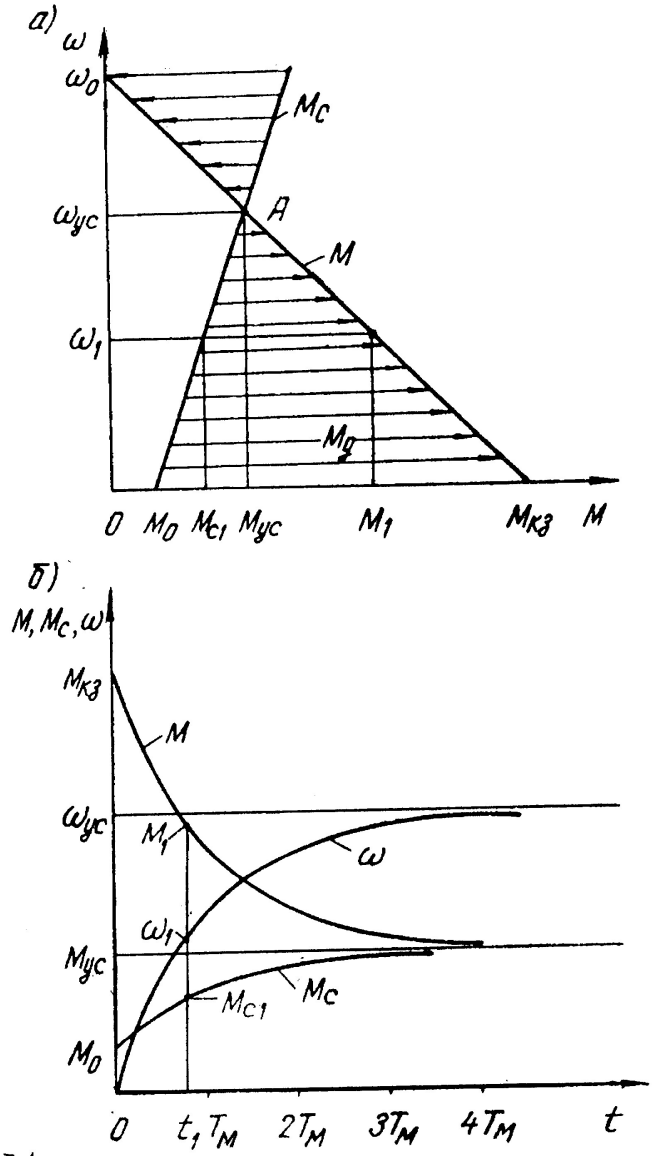


Рис. 5.1. Механические переходные процессы в приводе с линейными механическими характеристиками:

а – механические характеристики; *б* – графики переходных процессов

Рассмотрим переходные процессы для случая линейных механических характеристик электродвигателя и производственного механизма. Момент инерции системы считаем постоянным. В этом случае система описывается следующими уравнениями

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{с}} &= J\frac{d\omega}{dt};\\ \omega &= \omega_0 - \frac{1}{\beta}M;\\ M_{\text{с}} &= M_0 + \beta_{\text{с}}\omega. \end{aligned}\right\} \qquad (5.1)$$

Здесь $\beta, \beta_{\text{с}}$ – модули жесткости механических характеристик двигателя и механизма;

ω_0 – скорость вращения при идеальном холостом ходе;

M_0 – момент статического сопротивления при неподвижном вале рабочей машины.

Первое уравнение системы (5.1) является, как известно, основным уравнением движения привода.

Второе уравнение системы (5.l) является уравнением механической характеристики двигателя, третье уравнение - механическая характеристика производственного механизма. Систему (5.1) можно решить относительно момента двигателя M, момента статического сопротивления $M_{\text{с}}$, и угловой скорости вращения ω. Прежде чем решать систему уравнений, определим установившийся режим работы. В этом случае производная от скорости по времени равна нулю, т.е. установившийся момент двигателя равен установившемуся моменту статического сопротивления, а угловая скорость вращения равна ее установившемуся значению. Система (5.1) принимает вид:

$$\left.\begin{aligned} &M_{\text{óñ}} - I_{\text{ñóñ}} = 0; \\ &\omega_{\text{óñ}} = \omega_0 - \frac{1}{\beta} I_{\text{óñ}}; \\ &I_{\text{ñóñ}} = I_0 + \beta_{\text{ñ}} \omega_{\text{óñ}}; \end{aligned}\right\} \qquad (5.2)$$

где $\omega_{\text{óñ}}$ – установившаяся скорость вращения вала двигателя;

$M_{\text{óñ}}, M_{\text{ñóñ}}$ – установившиеся значения момента двигателя и момента статического сопротивления, приведенного к валу двигателя, соответственно.

На рис. 5.1, а величинам $M_{\text{óñ}}$ и $\omega_{\text{óñ}}$ соответствуют координаты точки A.

Решая совместно (5.2), получим параметры системы в установившемся режиме работы

$$\omega_{\text{óñ}} = \omega_0 \frac{\beta}{\beta + \beta_{\text{ñ}}} - I_0 \frac{1}{\beta + \beta_{\text{ñ}}}; \qquad (5.3)$$

$$I_{\text{óñ}} = I_{\text{ñóñ}} = I_0 \frac{\beta}{\beta + \beta_{\text{ñ}}} + \omega_0 \frac{\beta\beta_{\text{ñ}}}{\beta + \beta_{\text{ñ}}}; \qquad (5.4)$$

Систему (5.1) решаем методом исключения переменных, для этого из второго уравнения системы определяем момент двигателя и подставляем его и момент статического сопротивления в основное уравнение движения привода:

$$M = (\omega_0 - \omega)\beta;$$

$$(\omega_0 - \omega)\beta - M_0 - \beta_c \omega = J \frac{d\omega}{dt}.$$

После преобразований последнее уравнение примет вид:

$$J \frac{1}{\beta + \beta_c} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 \frac{\beta}{\beta + \beta_{\text{ñ}}} - I_0 \frac{1}{\beta + \beta_{\text{ñ}}}; \qquad (5.5)$$

Принимая во внимание (5.3), получим окончательно

$$T_{\text{ì}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{óñ}}, \qquad (5.6)$$

где $T_м = J\frac{1}{\beta+\beta_с}$ - механическая постоянная времени привода, с.

Механическая постоянная времени является важным параметром электропривода, она характеризует инерционность системы и скорость изменения момента или угловой скорости в переходных режимах.

Из второго уравнения системы (5.1) определяем производную от скорости вращения вала двигателя по времени

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\beta}\frac{dM}{dt}.$$

Если полученное выражение подставить в первое уравнение системы (5.1), то получим дифференциальное уравнение для момента электродвигателя

$$T_м \frac{dM}{dt} + M = M_{уст}, \qquad (5.7)$$

Аналогично находится дифференциальное уравнение для момента статического сопротивления:

$$T_м \frac{dM_с}{dt} + M_с = M_{уст}. \qquad (5.8)$$

Таким образом, решением системы (5.1) являются выражения (5.6), (5.7) и (5.8). Это обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами. Методику получения уравнения переходного процесса рассмотрим на примере решения дифференциального уравнения (5.6).

В уравнении (5.6) разделяем переменные, для чего переписываем его в виде:

$$-\frac{dt}{T_м} = \frac{d\omega}{(\omega - \omega_{уст})}. \qquad (5.9)$$

Интегрируя обе части выражения (5.9), получим

$$-\frac{t}{T_м} = \ln(\omega - \omega_{уст}) - \ln C$$

или

$$Ce^{-\frac{t}{T_i}} = \omega(t) - \omega_{óñ}, \qquad (5.10)$$

где t – текущее значение времени;

C – постоянная интегрирования.

Постоянная интегрирования определяется из начальных условий: t=0; $\omega = \omega_{i2}$.

Подставляя начальные условия в выражение (5.10), получим значение постоянной интегрирования:

$$C = \omega_{í\div} - \omega_{óñ}.$$

Уравнение переходного процесса для скорости вращения вала электродвигателя принимает вид:

$$\omega(t) = \omega_{í\div} e^{-\frac{t}{T_i}} + \omega_{óñ}(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}). \qquad (5.11)$$

Совершенно аналогично решаются дифференциальные уравнения (5.7) и (5.8), их решения имеет следующий вид

$$M(t) = M_{í\div} e^{-\frac{t}{T_i}} + M_{óñ}(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}). \qquad (5.12)$$

$$M_c(t) = M_{ñí\div} e^{-\frac{t}{T_i}} + M_{ñóñ}(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}). \qquad (5.13)$$

Для того чтобы получить уравнения переходных процессов при пуске, необходимо в выражения (5.11), (5.12) и (5.13) подставить начальные значения моментов двигателя и скорости его вращения из графиков рис. 5.1, *а*:

$\omega_{í\div} = 0; M_{í\div} = M_{êç}; M_{ñí\div} = M_0;$

$$\omega(t) = \omega_{óñ}(1 - e^{-\frac{t}{T_i}});$$

$$M(t) = M_{êç} e^{-\frac{t}{T_i}} + M_{óñ}(1 - e^{-\frac{t}{T_i}});$$

$$M_{\text{ñ}}(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_{\text{i}}}} + M_{\text{óñ}}(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{i}}}}),$$

где $M_{\text{êç}}$ – начальный пусковой момент электродвигателя.

Графики переходных процессов при пуске системы показаны на рис. 5.1, *б*.

Если на рис. 5.1, *б* для каждого значения времени определить соответствующие значения ω и M, то можно получить динамическую механическую характеристику $\omega(M)$, которая совпадает со статической механической характеристикой. Например, времени t_1 на рис. 5.1, *б* соответствуют значения M_1, ω_1 и $M_{\text{ñ}1}$; то же самое, на рис. 5.1, *а* угловой скорости ω_1 соответствуют моменты M_1 и $M_{\text{ñ}1}$.

5.3. Переходные процессы с нелинейными механическими характеристиками производственных машин

Рассмотрим механические переходные процессы для привода с линейной характеристикой двигателя и квадратичной зависимостью момента статического сопротивления от угловой скорости вращения; статические характеристики для этого случая представлены на рис. 5.2, *а*.

Поведение привода в переходных режимах описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{c}} &= J\frac{d\omega}{dt}; \\ M &= (\omega_0 - \omega)\beta; \\ M_{\text{c}} &= M_{\text{co}} + \beta_{\text{c}}\omega + \alpha\omega^2 \end{aligned}\right\} \qquad (5.14)$$

Приравнивая правые части второго и третьего уравнения системы (5.14), получим уравнение для определения установившейся угловой скорости вращения:

$$\alpha\omega_{\text{óñ}}^2 + (\beta + \beta_{\text{ñ}})\omega_{\text{óñ}} - (\omega_0\beta - \grave{I}_{\text{ñî}}) = 0.$$

Решая квадратное уравнение, получим установившуюся угловую скорость вращения:

$$\omega_{\text{óñ}1,2} = -\frac{\beta + \beta_{\text{ñ}}}{2\alpha} \pm \sqrt{\left(\frac{\beta + \beta_{\text{ñ}}}{2\alpha}\right)^2 + \frac{\grave{I}_{\text{êç}} - \grave{I}_{\text{ñî}}}{\alpha}}, \qquad (5.15)$$

где $M_{\text{êç}}$- начальный пусковой момент двигателя.

Физическое содержание имеет только положительный корень, показанный на рис. 5.2, а.

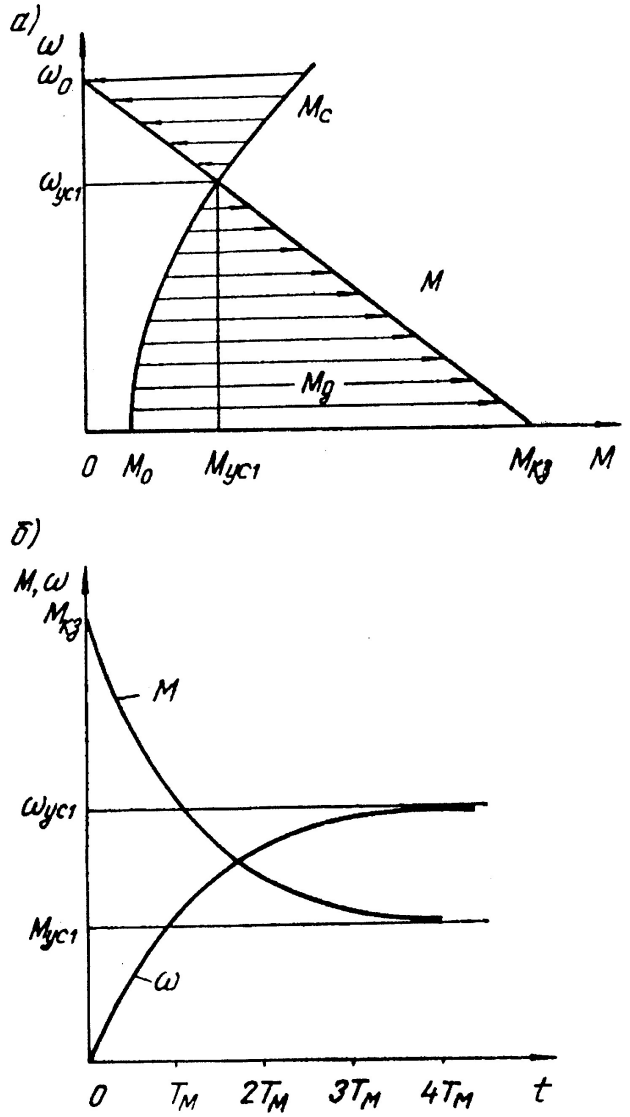


Рис.5.2. Механические переходные процессы в приводе с нелинейными механическими характеристиками:
а – механические характеристики; *б* – графики переходных процессов

Для решения системы (5.14) относительно угловой скорости вращения необходимо в основное уравнение движения привода подставить выражение для момента двигателя и момента статического сопротивления:

$$\omega_0\beta - \omega\beta - M_0 - \alpha\omega^2 = J\frac{d\omega}{dt}.$$

Полученное дифференциальное уравнение может быть решено путем разделения переменных:

$$-\frac{\alpha}{J}dt = \frac{d\omega}{\omega^2 + \frac{\beta+\beta_c}{\alpha}\omega - \frac{\grave{I}_{\hat{e}ç} - \grave{I}_0}{\alpha}}. \qquad (5.16)$$

Для того, чтобы проинтегрировать уравнение (5.16), необходимо его правую часть разложить на простейшие дроби:

$$-\frac{\alpha}{J}dt = \left[\frac{d_1}{\omega - \omega_{óñ1}} + \frac{d_2}{\omega - \omega_{óñ2}}\right]d\omega, \qquad (5.17)$$

где $\omega_{óñ1}$, $\omega_{óñ2}$ – корни полинома знаменателя, определяемые выражением (5.15);

d_1, d_2 – константы, которые могут быть определены методом неопределенных коэффициентов.

Метод неопределенных коэффициентов заключается в том, что разлагаемая дробь представляется двумя способами:

$$\frac{1}{(\omega - \omega_{óñ1})(\omega - \omega_{óñ2})} = \frac{d_1}{\omega - \omega_{óñ1}} + \frac{d_2}{\omega - \omega_{óñ2}}. \qquad (5.18)$$

Приведя правую часть выражения (5.18) к общему знаменателю, получим тождество:

$$(d_1 + d_2)\omega - (d_1\omega_{óñ2} + d_2\omega_{óñ1}) = 1.$$

Поскольку тождество справедливо при любом значении переменной, то, задавшись двумя любыми значениями ω, получим два уравнения с двумя неизвестными, например, зададимся $\omega = 0$ и $\omega = 1$:

$$d_1\omega_{óñ2} + d_2\omega_{óñ1} = -1;$$

$$d_1 + d_2 - \left(d_1\omega_{óñ2} + d_2\omega_{óñ1}\right) = 1.$$

Решая систему относительно d_1 и d_2 получим:

$$d_1 = \frac{1}{\omega_{óñ1} - \omega_{óñ2}}; \quad d_2 = -\frac{1}{\omega_{óñ1} - \omega_{óñ2}}.$$

Дифференциальное уравнение (5.17) приобретает следующий вид:

$$-\left(\omega_{\text{óñ1}}-\omega_{\text{óñ2}}\right)\frac{\alpha}{J}dt=\frac{d\omega}{\omega-\omega_{\text{óñ1}}}-\frac{d\omega}{\omega-\omega_{\text{óñ2}}}.$$

Полученное уравнение легко интегрируется:

$$-(\omega_{\text{óñ1}}-\omega_{\text{óñ2}})\frac{\alpha}{J}t=\ln\frac{\omega-\omega_{\text{óñ1}}}{\omega-\omega_{\text{óñ2}}}+\ln C_1; \qquad (5.19)$$

где C_1 – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий ($t=0$, $\omega=\omega_{\text{íà÷}}$):

$$C_1=\frac{\omega_{\text{íà÷}}-\omega_{\text{óñ2}}}{\omega_{\text{íà÷}}-\omega_{\text{óñ1}}}.$$

Угловая скорость как функция времени может быть определена потенцированием уравнения (5.19):

$$\omega(t)=\frac{\omega_{\text{óñ1}}-\tilde{N}\omega_{\text{óñ2}}\mathring{a}^{-\frac{t}{T_{\text{ì}}}}}{\left(1-Ce^{-\frac{t}{T_{\text{ì}}}}\right)}, \qquad (5.20)$$

где $\tilde{N}=\frac{I}{C_1}$ – постоянный коэффициент;

$T_{\text{ì}}=\frac{J}{\alpha(\omega_{\text{óñ1}}-\omega_{\text{óñ2}})}$ – постоянная времени.

Чтобы получить уравнение переходных процессов для момента двигателя и момента статического сопротивления, необходимо во второе и третье уравнения системы (5.14) подставить выражение (5.20). Графики переходных процессов для угловой скорости и момента двигателя при пуске привода представлены на рис. 5.2, *б*.

Как видно из этих графиков, переходный процесс в приводе заканчивается за время, равное примерно трем – четырем механическим постоянным времени.

5.4. Переходные процессы при пуске и торможении

двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Рассмотрим переходные процессы при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Пуск двигателя производится подключением обмотки якоря к сети постоянного тока. Поскольку сопротивление обмотки якоря мало, прямой пуск двигателя недопустим, т.к. при отсутствии электродвижущей силы начальный пусковой ток и начальный пусковой момент двигателя превышают допустимые значения, для их ограничения в цепь якоря вводятся дополнительные сопротивления; пуск двигателя производится поэтапно в несколько ступеней. Число пусковых ступеней определяется необходимой плавностью, которую следуем обеспечить при запуске привода. Чем больше пусковых сопротивлений, тем выше плавность, однако, большое число ступеней усложняет схему и снижает ее надежность.

Принципиальная схема пуска двигателя независимого возбуждения представлена на рис. 5.3, *а*. Как видно из приведенной схемы, пуск двигателя производится в три ступени. Для упрощения расчетов примем следующие допущения: поток возбуждения двигателя, напряжение сети и момент инерции привода являются постоянными величинами; индуктивностью обмотки якоря пренебрегаем,

$L_{\ddot{y}} = 0$.

Переходные процессы при пуске двигателя описываются двумя уравнениями, одно из которых является основным уравнением движения привода, а другое - второй закон Кирхгофа для якорной цепи:

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{c}} &= J\frac{d\omega}{dt}; \\ U &= E + IR, \end{aligned}\right\} \qquad (5.21)$$

где I – ток якоря, А;

E – электродвижущая сила обмотки якоря, В;

R – сопротивление якорной цепи, Ом.

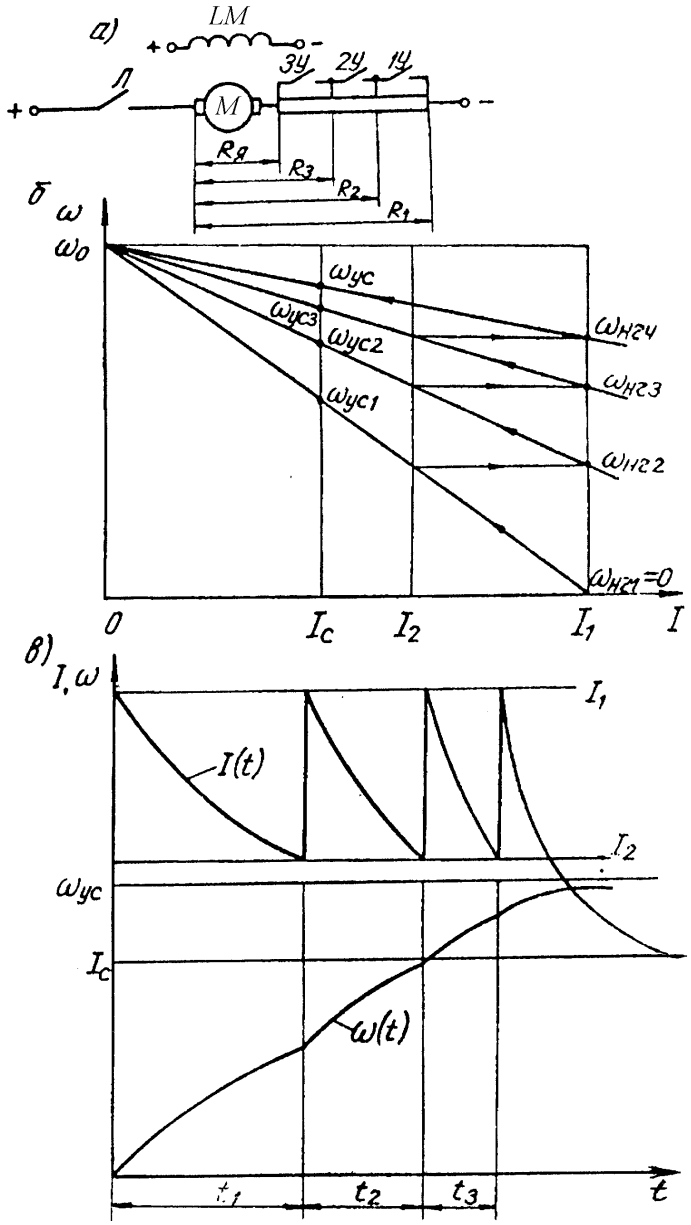


Рис. 5.3. Механические переходные процессы при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

а – схема пуска двигателя; *б* и *в* – графики переходных процессов

При постоянном потоке двигателя его момент и электродвижущая сила определяются следующим образом:

$$M = CI; \quad E = C\omega, \tag{5.22}$$

где $C = k\Phi$ – константа;

Φ – поток возбуждения двигателя, Вб;

$k = \dfrac{pN}{2\pi a}$ – конструктивная постоянная двигателя.

$$M = CI\,; \quad E = C\omega,$$

Система (5.21) с учетом выражений (5.22) принимает вид:

$$\left.\begin{aligned} I &= J\frac{1}{C}\frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{C}M_{\text{c}}; \\ \omega &= \frac{U}{C} - \frac{R}{C}I. \end{aligned}\right\} \qquad (5.23)$$

В установившемся режиме работы производная $\dfrac{d\omega}{dt} = 0$, при постоянном моменте статического сопротивления установившиеся значения тока и частоты вращения равны соответственно:

$$\left.\begin{aligned} I_{óñ} &= \frac{\grave{I}_{\text{ñ}}}{C}; \\ \omega_{óñ} &= \frac{U}{C} - \frac{R}{C^2}\grave{I}_{\text{ñ}}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.24)$$

Подставив первое уравнение системы (5.23) во второе, после разделения переменных получим:

$$-\frac{dt}{J\dfrac{R}{C^2}} = \frac{d\omega}{\omega - \left(\dfrac{U}{C} - \dfrac{R}{C^2}M_c\right)}.$$

С учетом (5.24) последнее выражение приобретает вид:

$$-\frac{dt}{T_{\text{ì}}} = \frac{d\omega}{\omega - \omega_{óñ}}, \qquad (5.25)$$

где $T_{\text{ì}} = \dfrac{JR}{c^2}$ – постоянная времени привода.

Интегрируем обе части уравнения (5.25):

$$-\frac{t}{T_{\text{ì}}} = \ln(\omega - \omega_{óñ}) + \ln C, \qquad (5.26)$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий:

$$t = 0;\ \omega = \omega_{нач};\ C = -(\omega_{нач} - \omega_{уст}).$$

После потенцирования уравнения (5.26) получим выражение переходного процесса для угловой скорости:

$$\omega(t) = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст})e^{-\frac{t}{T_M}}. \qquad (5.27)$$

Если второе уравнение системы (5.23) подставить в первое, то после простых преобразований получим дифференциальное уравнение для тока якоря:

$$-\frac{dt}{J\frac{R}{C^2}} = \frac{dI}{I - \frac{M_c}{C}};$$

или

$$-\int_0^t \frac{dt}{T_м} = \int_{I_н}^{I} \frac{dI}{(I - I_c)},$$

где $I_c = \frac{M_c}{C}$ – ток статического сопротивления.

Уравнение переходного процесса для тока якоря имеет вид:

$$I(t) = I_{нач}e^{-\frac{t}{T_M}} + I_c\left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right). \qquad (5.28)$$

Графики $\omega(t)$ и $I(t)$ могут быть построены по выражениям (5.27) и (5.28) в которых значения постоянных величин $\omega_{уст}$, $\omega_{нач}$, $T_м$ зависят от того, для какой ступени разгона рассматривается переходный процесс.

Проще всего значения этих величин могут быть получены с помощью пусковой диаграммы привода, представленной на рис. 5.3, б. Для первой ступени разгона имеем следующие значения параметров:

$$\omega_{нач} = 0,\ \omega_{уст} = \omega_{уст1},\ I_{н2} = I_1,\ T_м = T_{м1} = \frac{JR_1}{C^2},$$

$R_1 = \dfrac{U}{I_1}$

где – сопротивление якорной цепи при пуске двигателя.

Уравнения переходных процессов (5.27) и (5.28) для первой ступени разгона:

$$\omega_I(t) = \omega_{\text{óñ}1}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{M}1}}}\right); \tag{5.29}$$

$$I_I(t) = I_I \text{å}^{-\frac{t}{T_{\text{M}1}}} + I_{\text{c}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{M}1}}}\right). \tag{5.30}$$

Аналогично получаются уравнения переходного процесса для любой ступени разгона привода.

Время разгона привода на первой пусковой характеристике определяется из выражения (5.30), если текущее значение тока приравнять току переключения, $I_1(t_1) = I_2$:

$$t_1 = T_{\text{i}1}\ \ln\left(\frac{I_1 - I_{\text{c}}}{I_2 - I_{\text{c}}}\right),$$

где t_1 – время разгона привода на первой пусковой характеристике.

Аналогично определяется время разгона для других ступеней. Суммарное время разгона на искусственных характеристиках равно

$$t_{\text{p}} = \sum_{1}^{n} T_{\text{iñ}}\ \ln\left(\frac{I_1 - I_{\text{c}}}{I_2 - I_{\text{c}}}\right).$$

Время разгона привода на естественной характеристике теоретически равно бесконечности. Практически переходный процесс можно считать законченным по истечении времени, равном трем – четырем постоянным времени привода. Полное время разгона:

$$T_{\text{ð}} = t_{\text{ð}} + 4T_{\text{i}},$$

где $T_{\text{i}} = \dfrac{JR_{\text{ÿ}}}{\tilde{N}^2}$ – механическая постоянная времени привода, соответствующая естественной характеристике двигателя.

Графики переходных процессов для угловой скорости и тока якоря двигателя представлены на рис. 5.3, *в*. Как видно из этих графиков, ток якоря в процессе разгона изменяется от I_1 (пусковой ток) до I_2 (ток переключения); при шунтировании части сопротивления якорной цепи, время работы привода на каждой последующей ступени разгона уменьшается по сравнению с предыдущим:

$$t_1 > t_2 > t_3.$$

Для остановки и реверса двигателя постоянного тока независимого возбуждения, получающего питание от сети, могут быть использованы два тормозных режима: торможение противовключением и электродинамическое торможение. Для переходных процессов при торможении привода существенное значение имеет характер момента статического сопротивления. При активном моменте статического сопротивления его знак не меняется с изменением направления угловой скорости, и основное уравнение движения привода можно интегрировать от начального до установившегося режима работы. В случае реактивного момента статического сопротивления основное уравнение движения необходимо интегрировать по частям от начального значения угловой скорости до нуля и от нуля до установившегося режима работы. Это происходит потому, что реактивный момент статического сопротивления при изменении знака угловой скорости также меняет знак, следовательно, в основном уравнение движения привода необходимо изменить знак перед моментом статического сопротивления. Говорят, что в этом случае система имеет переменную структуру. Для таких систем переходные процессы рассчитываются по участкам, на которых их структура неизменна.

Торможение противовключением может быть получено изменением полярности напряжения, подводимого к работающему двигателю. Для ограничения тормозного тока в цепь якоря вводят дополнительное

сопротивление, как показано на рис. 5.4, а. Статические характеристики привода для торможения противовключением при реактивном моменте статического сопротивления показаны на рис. 5.4, б. При пуске привода замыкаются контакты вперед *“В”*. Чтобы произвести торможение противовключением, необходимо разомкнуть контакты *“В”* и замкнуть контакты назад *“Н”*. При этом привод мгновенно переходит из точки *Е* на естественной характеристике в точку *А* на характеристике *АВ* торможения противовключением. В точке *А* на привод действует отрицательный момент двигателя и отрицательный момент статического сопротивления. Под действием суммарного отрицательного момента привод тормозится, направление движения привода из точки *А* в точку *Б* показано стрелкой. На участке *АВ* переходный процесс в приводе описывается системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{с}} &= J\frac{d\omega}{dt};\\ -U &= E + IR. \end{aligned}\right\} \qquad (5.31)$$

Первое уравнение системы (5.31) – основное уравнение движения привода, а второе – закон Кирхгофа для якорной цепи при торможении противовключением (индуктивностью якорной обмотки мы пренебрегли). Считаем приведенный момент инерции системы постоянным, момент статического сопротивления реактивным и неизменным, как показано на графике рис. 5.4, *б*.

Электромагнитный момент и электродвижущая сила обмотки якоря для двигателя с независимым возбуждением

$$M = CI;\ E = C\omega.$$

Второе уравнение системы с учетом последних выражений примет вид:

$$\omega = -\frac{U}{C} - \frac{R}{C^2}M. \qquad (5.32)$$

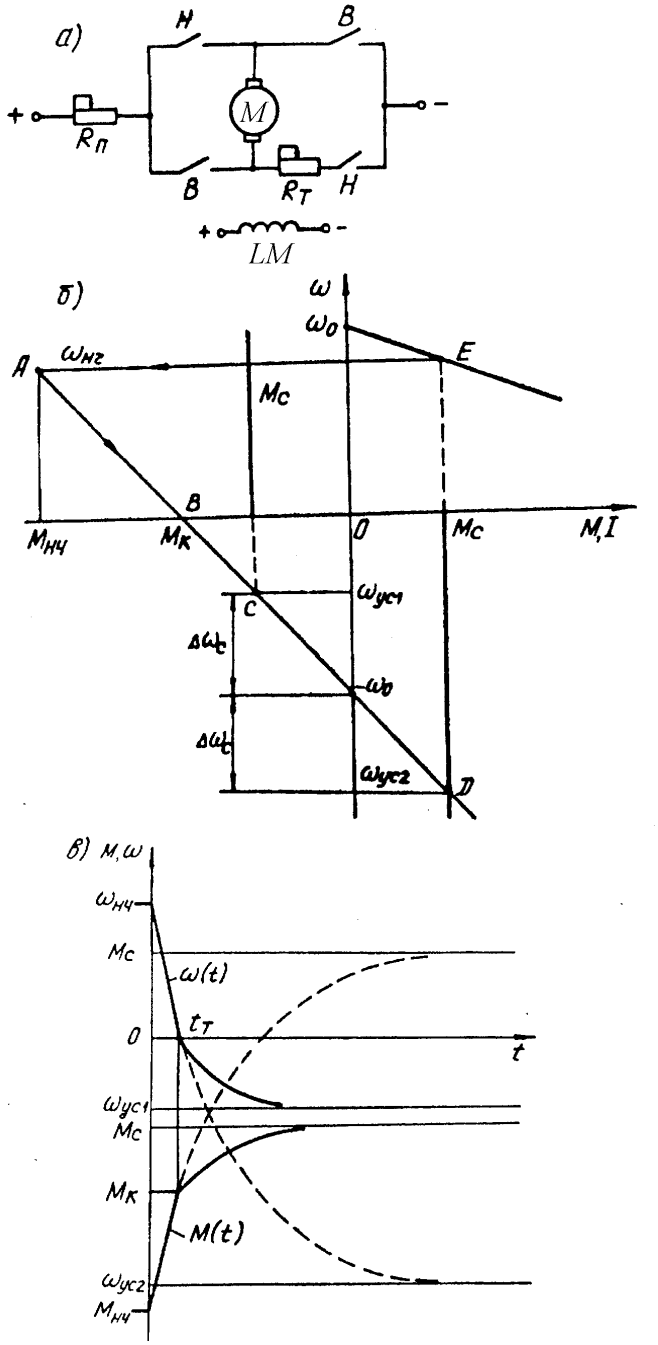


Рис. 5.4. Механические переходные процессы при торможении противовключением

двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

а – схема торможения; *б* – механические характеристики; *в* – графики переходного процесса

Если выражение (5.32) продифференцировать по времени и полученную производную от скорости вращения подставить в первое уравнение для момента двигателя

$$J\frac{R}{C^2}\frac{dM}{dt}+M=M_{\text{c}}. \qquad (5.33)$$

Если из уравнения (5.32) определить момент и подставить в первое уравнение системы (5.31), то получим дифференциальное уравнение для угловой скорости вращения вала двигателя

$$T_{\text{ì}}\ \frac{d\omega}{dt}+\omega=\omega_{\text{óñ}}, \qquad (5.34)$$

где $\omega_{\text{óñ}}=-\frac{U}{C}-\frac{R}{C^2}M_{\text{c}}$ – установившаяся угловая скорость вращения вала двигателя;

$T_{\text{ì}}=\frac{JR}{C^2}$ – механическая постоянная времени привода;

$R=R_{\text{ÿ}}+R_{\text{ï}}+R_{\text{ò}}$ – полное сопротивление якорной цепи.

Следует помнить, что система (5.31) и дифференциальные уравнения (5.33) и (5.34) справедливы при изменении момента двигателя от $M_{\text{íà}}$ до $M_{\text{ê}}$ и изменении угловой скорости вращения вала двигателя от $\omega_{\text{íà}}$ до $\omega=0$.

Решение дифференциального уравнения (5.33) имеет вид:

$$M(t)=M_{\text{íà}}e^{-\frac{t}{T_{\text{M}}}}+M_{\text{c}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{\text{M}}}}\right), \qquad (5.35)$$

где $M_{\text{íà}}$ – начальное значение тормозного момента двигателя.

Начальный тормозной момент может быть определен из второго уравнения системы (5.31):

$$M_{\text{íà}}=CI_{\text{íà}}=-\frac{(U+E)C}{R},$$

$$M_{íà÷} = -\frac{\tilde{N}^2}{R}(\omega_0 + \omega_{íà÷}).$$

или

Начальным тормозным моментом обычно задаются, исходя из перегрузочной способности двигателя, $M_{íà÷} = -2M_í$. При этом можно определить необходимое значение полного сопротивления якорной цепи и механическую постоянную времени привода:

$$R = \frac{C^2(\omega_0 + \omega_{íà÷})}{2I_{\text{í}}}; \quad T_{\text{ì}} = \frac{JR}{C^2}.$$

Дифференциальное уравнение (5.34) имеет следующее решение:

$$\omega(t) = \omega_{íà÷} e^{-\frac{t}{T_{\text{M}}}} + \omega_{óñ}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{M}}}}\right), \tag{5.36}$$

Для определения времени торможения привода необходимо в выражение (5.36) подставить значения $t = t_{ò}$ и $\omega(t_{ò}) = 0$. Время торможения равно:

$$t_{ò} = T_{\text{ì}} \ln\left(\frac{\omega_0 + \omega_{íà÷} + \Delta\omega_{ñ}}{\omega_0 + \Delta\omega_{ñ}}\right). \tag{5.37}$$

где $\Delta\omega_{\text{c}} = \frac{R}{C^2} M_{\text{c}}$ – перепад угловой скорости, вызванный нагрузкой.

Таким образом, уравнения переходных процессов (5.35) и (5.36) справедливы на интервале времени $0 \le t \le t_{ò}$.

При изменении направления угловой скорости реактивный момент статического сопротивления изменяет знак. В этом случае привод описывается следующей системой уравнений:

$$M + M_{ñ} = J\frac{d\omega}{dt}, \tag{5.38}$$

$$-U = E + IR. \tag{5.39}$$

Из (5.38) и (5.39) может быть получено дифференциальное уравнение для скорости вращения вала двигателя:

$$T_{\text{м}}\frac{d\omega}{dt}+\omega=\omega_{\text{уст1}}, \qquad (5.40)$$

где $\omega_{\text{уст1}}=-\omega_0+\frac{R}{C^2}M_{\text{с}}$ – установившаяся частота вращения вала двигателя.

Решения уравнений (5.39) и (5.40) имеют вид:

$$M(t)=M_{\text{нач}}e^{-\frac{t}{T_{\text{М}}}}-M_{\text{с}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{\text{М}}}}\right), \qquad (5.41)$$

$$\omega(t)=\omega_{уст1}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{М}}}\right), \qquad (5.42)$$

где $M_{\text{нач}}=M_{\text{кз}}$ – начальный момент двигателя;

$\omega_{\text{уст1}}=-\omega_0+\Delta\omega$ – установившаяся угловая скорость вращения вала двигателя.

Графики переходных процессов при торможении противовключением в приводе с реактивным моментом статического сопротивления показаны на рис. 5.4, *в* сплошной линией.

При активном моменте статического сопротивления система (5.31), дифференциальные уравнения (5.33), (5.34) и уравнения переходных процессов (5.35) и (5.36) справедливы на всем диапазоне изменения момента и угловой скорости вращения вала двигателя. Графики переходных процессов для этого случая представлены на рис. 5.4, в пунктирной линией.

Если якорь работающего двигателя отключить от сети и замкнуть на сопротивление, а обмотку возбуждения оставить подключенной к сети, то электрическая машина перейдет в режим электродинамического торможения. При реактивном моменте статического сопротивления переходный процесс закончится остановкой привода, поскольку реактивный момент препятствует движению и не может быть причиной движения. При активном моменте статического сопротивления после окончания переходного процесса рабочая машина вращает электрический двигатель, который работает в качестве

генератора, полученная электрическая энергия преобразуется в тепло и рассеивается в якорной цепи двигателя. Электрическая схема для получения режима электродинамического торможения и механические характеристики двигателя показаны на рис.5.5, *а* и *б*.

Переходные процессы в приводе описываются следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{с}} &= J\frac{d\omega}{dt}; \\ 0 &= E + IR. \end{aligned}\right\} \qquad (5.43)$$

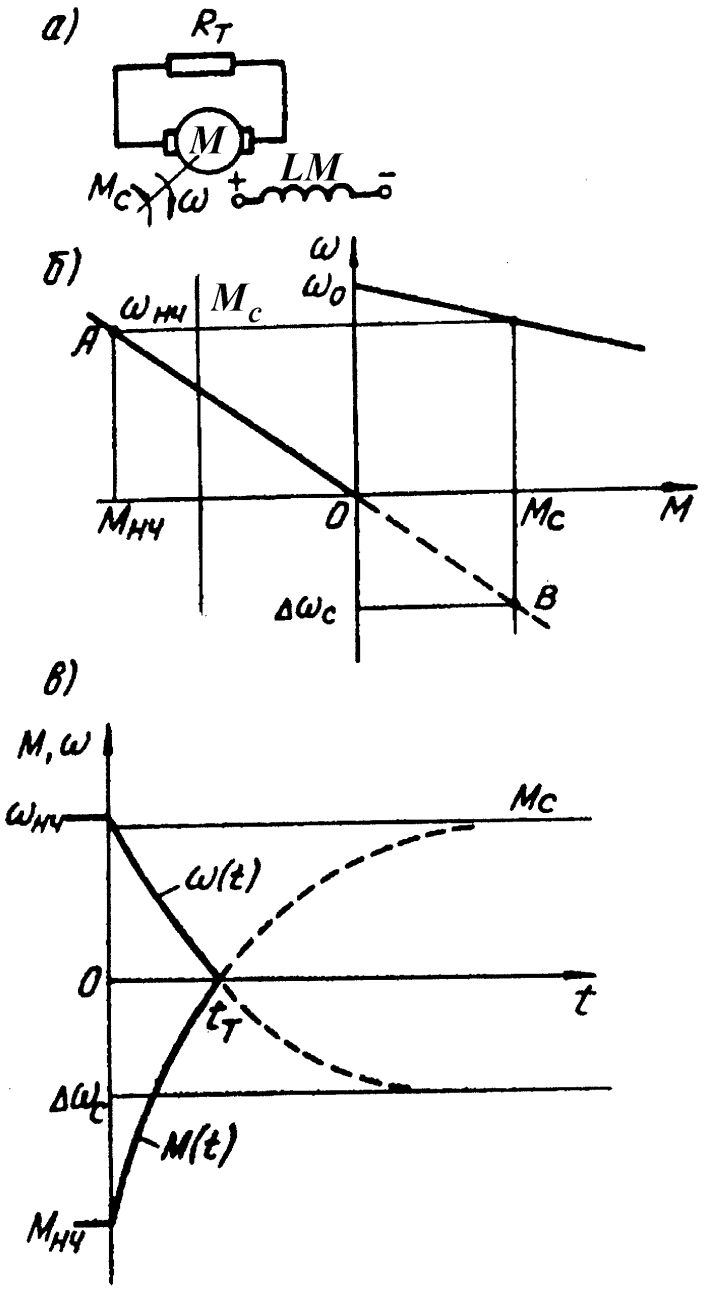


Рис. 5.5. Механические переходные процессы при электродинамическом торможении двигателя постоянного тока независимого возбуждения:
а – схема торможения; *б* – механические характеристики; *в* – графики переходных процессов

Последнее уравнение системы (5.43) выражает второй закон Кирхгофа для якорной цепи.

Решая систему (5.43) относительно скорости вращения вала двигателя, получим:

$$T_м \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{ус}, \qquad (5.44)$$

где $\omega_{ус} = -\Delta\omega_с = -\frac{R}{C^2} M_с$ – установившаяся скорость вращения вала двигателя (при активном моменте статического сопротивления).

Дифференциальное уравнение для момента, развиваемого двигателем, имеет вид:

$$T_м \frac{dM}{dt} + M = M_с. \qquad (5.45)$$

Уравнение переходного процесса для момента двигателя

$$M(t) = M_{нач} e^{-\frac{t}{T_М}} + M_с \left(1 - e^{-\frac{t}{T_М}}\right), \qquad (5.46)$$

где $M_{нач}$ – начальный тормозной момент двигателя.

Задаваясь величиной начального тормозного момента двигателя по условиям допустимой механической перегрузки, можно определить полное сопротивление якорной цепи двигателя и механическую постоянную времени привода.

$$R = R_я + R_д = \frac{c^2 \omega_{нач}}{2 I_{нач}}; \quad T_м = J \frac{R}{C^2}.$$

Уравнение переходного процесса для частоты вращения вала двигателя определяется решением дифференциального уравнения (5.44):

$$\omega(t) = \omega_{нач} e^{-\frac{t}{T_М}} + \omega_с \left(1 - e^{-\frac{t}{T_М}}\right), \qquad (5.47)$$

Если в выражение (5.47) подставить время торможения $t = t_T$. Из полученного уравнения определяем время до полной остановки привода

$$t_{\text{ò}} = T_{\text{ì}}\ \ln\left(\frac{\omega_{\text{íà}} + \Delta\omega_{\text{ñ}}}{\Delta\omega_{\text{ñ}}}\right).$$

Графики переходных процессов при электродинамическом торможении показаны на рис.5.5, *в* сплошной линией для реактивного момента и пунктирной линией – для активного момента статического сопротивления.

5.5. Механические переходные процессы в приводе с моментом статического сопротивления, изменяющимся по гармоническому закону, и линейной механической характеристикой двигателя

Некоторые механизмы (поршневые компрессоры и насосы) имеют периодический момент статического сопротивления, который (в простейших случаях) можно разложить на две составляющие: постоянную $M_{\text{ñ}}$ и гармоническую с амплитудой M_m и угловой частотой k:

$$M_{\text{ñ}}(t) = M_{\text{ñð}} + M_m \sin kt. \qquad (5.48)$$

Основное уравнение движения привода и механическую характеристику двигателя примем как в системе (5.1):

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{c}} &= J\frac{d\omega}{dt};\\ \omega &= \omega_0 - \frac{1}{\beta}M. \end{aligned}\right\} \qquad (5.49)$$

Графики механической характеристики двигателя и рабочей машины представлены на рис. 5.6, *а*.

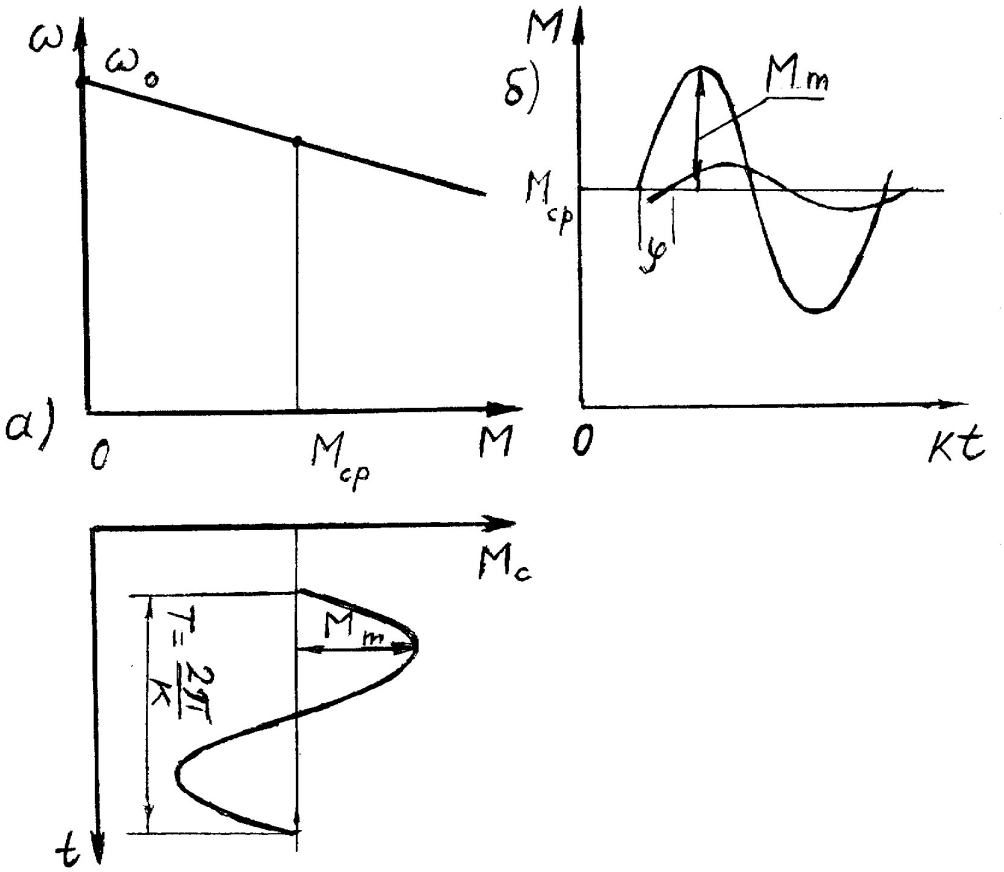


Рис 5.6. Механические переходные процессы в приводе с моментом статического

сопротивления, изменяющимся по гармоническому закону:

а – механические характеристики; *б* – графики установившихся колебаний момента

двигателя и момента сопротивления

Решив совместно уравнения (5.48) и (5.49) относительно момента двигателя, получим:

$$T_{\text{i}} \frac{dM}{dt} + M = M_{\text{ñò}} + M_m \sin kt. \qquad (5.50)$$

Решение уравнения (5.50) содержит свободную и вынужденную составляющие; свободная составляющая описывает поведение системы,

когда на нее не действуют ни задание, ни возмущение; она описывается уравнением:

$$\frac{dM_{\text{ñâ}}}{dt} + M_{\text{ñâ}} = 0. \qquad (5.51)$$

Вынужденная составляющая описывает поведение системы после окончания переходного процесса; эту составляющую определяют подбором коэффициентов уравнения:

$$M_{\text{â}} = A + B\sin kt + C\cos kt. \qquad (5.52)$$

Решением уравнения (5.51) будет:

$$M_{\text{ñâ}} = De^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}},$$

где D – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.

Очевидно, что с течением времени свободная составляющая переходного процесса стремится к нулю, а момент двигателя будет совершать установившиеся гармонические колебания под действием момента статического сопротивления. Уравнение (5.52) является частным решением дифференциального уравнения (5.50), следовательно, при его подстановке в (5.50) будет получено тождество, т.е. выражение, справедливое для любого значения времени. Это позволяет определить коэффициенты *A, B, C*. Произведя названную операцию, получим:

$$BkT_{\text{ì}}\cos kt - CkT_{\text{ì}}\sin kt + A + B\sin kt + C\cos kt = M_{\text{ñð}} + M_m \sin kt.$$

Приравнивая коэффициенты тождества при одинаковых функциях справа и слева, получим:

$$\left.\begin{aligned} &A = M_{\text{ñð}}; \\ &BkT_{\text{ì}} + C = 0; \\ &B - CkT_{\text{ì}} = M_m. \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{aligned} B &= \frac{M_m}{1 + k^2 T_{\text{ì}}^2} \\ C &= -M_m \frac{kT_{\text{ì}}}{1 + k^2 T_{\text{ì}}^2} \end{aligned}\right\} \qquad (5.53)$$

Теперь решение уравнения (5.50) будет выглядеть следующим образом:

$$M(t) = De^{-\frac{t}{T_м}} + M_{ñð} + \frac{M_m}{1+k^2T_ì^2}\sin kt - \frac{kT_ì M_m}{1+k^2T_ì^2}\cos kt.$$

Экспоненциальная составляющая быстро затухает и в установившемся режиме работы двигателя его момент будет изменяться по закону:

$$M(t) = M_{ñð} + \frac{M_m}{1+k^2T_ì^2}\sin kt - \frac{kT_ì M_m}{1+k^2T_ì^2}\cos kt.$$

Последнее уравнение преобразуем следующим образом:

$$M(t) = M_{ñð} + \frac{M_m}{\sqrt{1+k^2T_ì^2}}\left[\frac{\sin kt}{\sqrt{1+k^2T_ì^2}} - \frac{kT_ì\ \cos kt}{\sqrt{1+k^2T_ì^2}}\right].$$

Выражение в квадратных скобках можно заменить одной гармоникой с частотой k:

$$M(t) = M_{ñð} + M_{mg}\sin(kt-\varphi), \qquad (5.54)$$

где $M_{mg} = \frac{M_m}{\sqrt{1+k^2T_ì^2}}$ – амплитуда колебания момента двигателя,

$\varphi = \mathrm{arctg}kT_ì$ – сдвиг по фазе колебаний момента двигателя и момента сопротивления.

Таким образом, при механических переходных процессах в приводе с линейными характеристиками электродвигателя гармонические колебания момента сопротивления приводят к гармоническим колебаниям момента двигателя той же частоты, но меньшей амплитуды:

$$M_{mg} = \frac{M_m}{\sqrt{1+k^2T_ì^2}} < M_m$$

и со сдвигом по фазе φ. Сдвиг по фазе зависит от частоты вынужденных колебаний нагрузки k и механической постоянной времени привода $T_ì$. С увеличением частоты и момента инерции сдвиг по фазе (отставание вектора момента двигателя от вектора момента сопротивления) увеличивается.

С увеличением частоты вынужденных колебаний k и постоянной времени T_{i} амплитуда вынужденных колебаний двигателя уменьшается. Частота вынужденных колебаний чаще всего бывает постоянной (зависит от конструкции кривошипно-шатунного механизма) или случайной величиной. Другой параметр (постоянная времени T_{i}) зависит от приведенного момента инерции привода J и жесткости механической характеристики двигателя. При абсолютно жесткой характеристики привода $(\beta = \infty)$ постоянная времени $T_{\text{i}} = 0$ и амплитуды гармоник моментов двигателя и механизма равны (привод воспроизводит все колебания нагрузки без отставания по фазе, $\varphi = 0$). При абсолютно мягкой характеристике двигателя ($\beta = 0$) постоянная времени $T_{\text{i}} = \infty$ амплитуда момента двигателя равна нулю (двигатель гасит колебания нагрузки и поддерживает постоянное значение момента $M = M_{\text{ñð}}$). С увеличением приведенного момента инерции привода амплитуда гармонической составляющей момента двигателя уменьшается. Поэтому на механизмы, совершающие возвратно-поступательное движение исполнительного органа (щековые дробилки), с целью снижения динамических нагрузок устанавливают маховики. График зависимости момента двигателя в установившемся режиме работы при гармоническом законе изменения момента сопротивления представлен на рис. 5.6, *б*. В случаях, когда момент статического сопротивления носит более сложный характер, график зависимости $M_{\text{ñ}}(t)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$M_{\text{ñ}}(t) = M_{\text{ñð}} + \sum M_i \sin(kit + \varphi_i),$$

где $M_{\text{ñð}}$ – среднее значение статического момента;

M_i – амплитуда *i*-той гармоники;

φ_i – начальная фаза *i*-той гармоники;

k – угловая частота основной (первой) гармоники.

Дифференциальное уравнение движения привода в этом случае примет вид:

$$T_{\text{ì}}\ \frac{dM}{dt} + M = M_{\text{ñð}} + \sum M_i \sin(kit + \varphi_i).$$

Это уравнение линейное и при его решении может быть применен принцип суперпозиции (наложения).

5.6. Переходные процессы в приводах с трехфазными асинхронными двигателями

Рассмотрим механические переходные процессы в приводе с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при постоянном моменте статического сопротивления. Пуск таких двигателей небольшой и средней мощности осуществляется обычно при полном напряжении, приложенном к обмотке статора. Механическая характеристика привода приведена на рис. 5.7, *а*. Переходные процессы в приводе описываются следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} M - M_{\text{c}} &= J\frac{d\omega}{dt};\\ M &= \frac{2M_{\hat{\text{e}}}}{\left(\frac{S}{S_{\hat{\text{e}}}} + \frac{S_{\hat{\text{e}}}}{S}\right)};\\ M_{\text{c}} &= \text{const}, \end{aligned}\right\} \qquad (5.55)$$

$S = \dfrac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0}$ где – скольжение двигателя;

$S_{\hat{\text{e}}}$ – критическое скольжение;

$M_{\hat{\text{e}}}$ – критический момент.

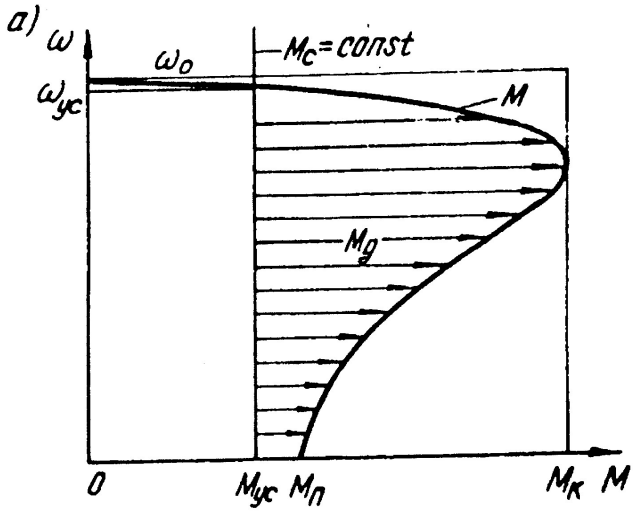
Установившееся значение скольжения находится совместным решением второго и третьего уравнения системы (5.55):

$$S_{\text{óñ1}} = S_{\text{ê}}\left[\left(\frac{M_{\text{ê}}}{M_{\text{c}}}\right) - \sqrt{\left(\left(\frac{M_{\text{ê}}}{M_{\text{c}}}\right)^2 - 1\right)}\right]; \quad (5.56)$$

$$S_{\text{óñ2}} = S_{\text{ê}}\left[\left(\frac{M_{\text{ê}}}{M_{\text{c}}}\right) + \sqrt{\left(\left(\frac{M_{\text{ê}}}{M_{\text{c}}}\right)^2 - 1\right)}\right]. \quad (5.57)$$

Реальный физический смысл имеет только $S_{\text{óñ1}}$. В основное уравнение движения привода подставляем выражение момента асинхронного двигателя:

$$\frac{2M_{\text{ê}}}{\left(\frac{S}{S_{\text{ê}}} + \frac{S_{\text{ê}}}{S}\right)} - M_{\text{c}} = J\frac{d\omega}{dt}. \quad (5.58)$$



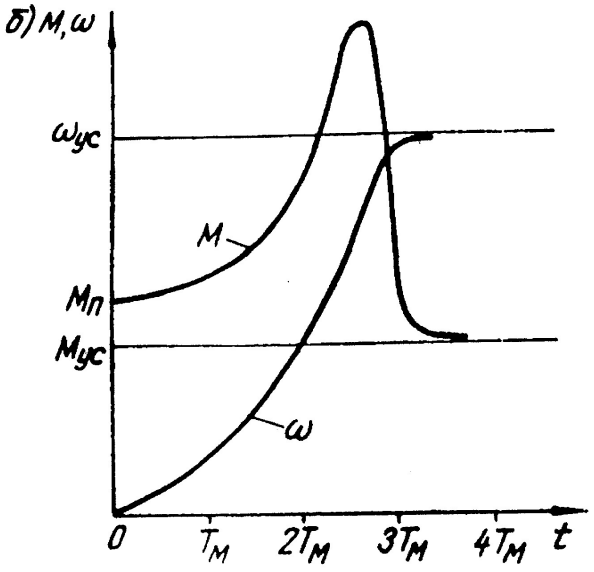


Рис. 5.7. Механические переходные процессы при пуске асинхронного двигателя:

а – механические характеристики; *б* – графики переходных процессов

Известно, что $\omega = \omega_0(1-S)$, тогда $\dfrac{d\omega}{dt} = -\dfrac{\omega_0 dS}{dt}$.

После простых преобразований выражение (5.58) принимает вид:

$$dt = J\frac{\omega_0}{M_c}\frac{\left(S^2 + S_{\text{к}}^2\right)dS}{\left(S^2 - \left(M_{\text{к}}/M_c\right)S_{\text{к}}S + S_{\text{к}}^2\right)}. \qquad (5.59)$$

Выражение (5.59) преобразуем следующим образом:

$$dt = T_м \left(\frac{M_к}{M_с} \right) \left[1 + \frac{2\left(\frac{M_к}{M_с} \right) S_к S}{(S - S_{ук1})(S - S_{ук2})} \right] dS;$$

$$dt = T_м \left(\frac{M_к}{M_с} \right) \left\{ 1 - \frac{2\left(\frac{M_к}{M_с} \right) S_к}{(S_{ук2} - S_{ук2}) \left[\frac{S_{ук1}}{S - S_{ук1}} - \frac{S_{ук2}}{S - S_{ук2}} \right]} \right\} dS;$$

Интегрируя последнее уравнение, получим:

$$\frac{t}{T_м} = \frac{I_к}{I_н} (S - S_н) + \frac{2\left(\frac{I_к}{I_н} \right)^2 S_к}{S_{ук2} - S_{ук1}} \times$$

$$\times \left[S_{ук2} \ln \frac{S - S_{ук2}}{S_н - S_{ук2}} - S_{ук1} \ln \frac{S - S_{ук1}}{S_н - S_{ук1}} \right], \qquad (5.60)$$

где $T_м = J \frac{\omega_0}{M_к}$ – постоянная времени;

$S_{ук1}$ и $S_{ук2}$ – установившиеся значения скольжения, определяются по выражениям (5.56) и (5.57);

$S_н$ – начальное значение скольжения.

Задаваясь текущими значениями скольжения, по выражению (5.60) и второму уравнению системы (5.55) можно определить зависимости момента и скольжения (или угловой скорости) от времени; эти зависимости для случая пуска привода представлены на графиках рис. 5.7, *б*. Как видно из этих графиков, ускорение привода достигает наибольшего значения при максимальном значении момента; переходный процесс заканчивается за время, равное примерно трехкратному значению механической постоянной времени.

5.7. Электромагнитные переходные процессы

Электромагнитные переходные процессы протекают в цепях, содержащих катушки индуктивности, и связаны с изменением электромагнитного поля. Электромагнитные переходные процессы возникают в приводе при регулировании тока в обмотках возбуждения электрических машин и изменении тока якорной цепи. С целью аналитического исследования электромагнитных переходных процессов необходимо принять некоторые упрощения. Например, влиянием вихревых токов и гистерезисом кривой намагничивания обычно пренебрегают. Магнитный поток двигателя независимого возбуждения считают постоянным, в противном случае поведение привода в переходных режимах описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений, т.к. электромагнитный момент двигателя определяется произведением тока якоря на поток возбуждения. В системе генератор-двигатель насыщением стали генератора обычно пренебрегают, и характеристику холостого хода генератора считают линейной, чему соответствует неизменное значение индуктивности обмотки возбуждения генератора. При этом переходные процессы в обмотке возбуждения генератора можно рассматривать независимо от остальных переходных процессов, протекающих в приводе.

Скорость протекания электромагнитного переходного процесса зависит от индуктивности обмоток. Большой индуктивностью обладают обмотки возбуждения электрических машин постоянного тока, обмотка якоря машины постоянного тока имеет гораздо меньшее значение индуктивности и поэтому ею иногда пренебрегают.

Рассмотрим электромагнитный переходный процесс в обмотке возбуждения генератора постоянного тока. На рис.5.8, *а* представлена схема подключения обмотки к источнику постоянного тока. При замыкании контакта В

начинается переходный процесс, который описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$U_{\text{â}} = i_{\text{â}} R_{\text{â}} + L_{\text{â}} \frac{di_{\text{â}}}{dt},$$

где $U_{\text{â}}$ – напряжение, приложенное к обмотке возбуждения, В;

$i_{\text{â}}$ – ток, протекающий по обмотке возбуждения, А;

$R_{\text{â}}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$L = \frac{d\psi}{di}$ – индуктивность обмотки возбуждения, Гн;

ψ – потокосцепление, Вб.

При ненасыщенной магнитной системе индуктивность катушки возбуждения является неизменной. Поделив обе части выражения на активное сопротивление обмотки, получим:

$$T_{\text{â}} \frac{di_{\hat{a}}}{dt} + i_{\text{â}} = i_{\text{âó}}, \qquad (5.61)$$

где $T_{\text{â}} = \frac{L_{\text{â}}}{R_{\text{â}}}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения;

$i_{\text{âó}} = \frac{U_{\text{â}}}{R_{\text{â}}}$ – установившееся значение тока в обмотке возбуждения.

Выражение (5.61) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, его решение имеет вид:

$$i_{\text{â}}(t) = i_{\text{âíã}}\, \mathring{a}^{-t/T_{\text{À}}} + i_{\text{âó}}\left(1 - \mathring{a}^{-t/T_{\text{À}}}\right), \qquad (5.62)$$

где $i_{\text{âí2}}$ – начальное значение тока возбуждения.

До замыкания контакта В (рис. 5.8, *а*) ток возбуждения был равен нулю, выражение (5.62) при этом несколько упрощается.

$$i_{\text{â}}(t) = i_{\text{âó}}\left(1 - \mathring{a}^{-t/T_{\text{À}}}\right). \qquad (5.63)$$

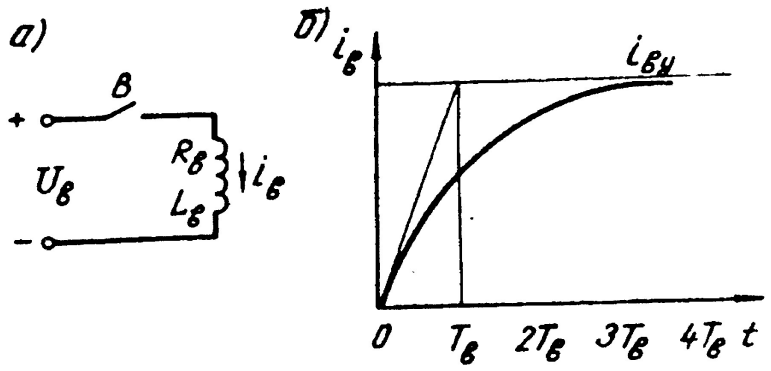


Рис 5.8. Переходный процесс возбуждения генератора постоянного тока: *а* – электрическая схема питания обмотки возбуждения генератора постоянного тока; *б* – график переходного процесса

Выражению (5.63) Соответствует график переходного процесса, представленный на рис. 5.8, *б*. Как видно из этого графика, переходный процесс при возбуждении генератора заканчивается за время, приблизительно равное четырехкратному значению электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения. Мощные генераторы имеют постоянную времени обмотки возбуждения порядка 2 с. Если не принять дополнительных мер, то время переходных процессов при возбуждении генератора будет очень велико, что повлечет снижение производительности производственной машины.

С целью сокращения длительности переходного процесса применяют форсировку возбуждения, для форсировки переходного процесса к обмотке возбуждения прикладывается напряжение, в несколько раз превышающее номинальное значение:

$$U_{â}^{/} = \alpha U_{âí} \qquad (5.64)$$

где $U_{â}^{/}$ – приложенное напряжение;

$U_{âí}$ – номинальное напряжение обмотки возбуждения;

α – коэффициент форсировки.

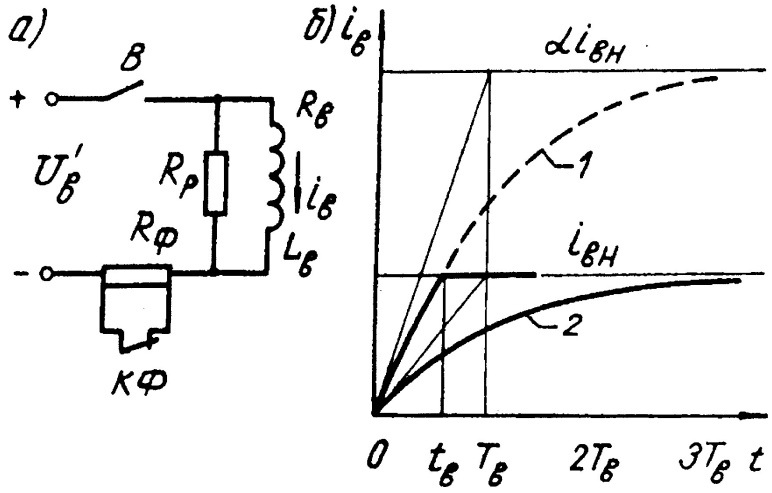


Рис. 5.9. Форсировка процесса возбуждения:

а – схема форсировки; *б* – графики переходных процессов

Коэффициент форсировки обычно принимают равным $2 \div 4$. Дальнейшее увеличение коэффициента форсировки мало влияет на сокращение длительности переходного процесса. На рис. 5.9 показана схема и график для тока возбуждения генератора при форсировании переходного процесса. Для ограничения установившегося значения тока возбуждения генератора применяется форсировочное сопротивление (резистор $R_{\text{ф}}$), которое на время переходного процесса замкнуто контактом *КФ*. При достижении тока возбуждения номинального значения контакт *КФ* размыкается, переходный процесс при этом заканчивается. Резистор $R_{\text{ф}}$ служит для рассеивания электромагнитной энергии при отключении обмотки возбуждения от источника питания.

Рассмотрим переходный процесс при возбуждении генератора с форсировкой. Уравнение равновесия напряжения для цепи возбуждения при форсировке (рис. 5.9, а) запишется в следующем виде:

$$U'_{\text{в}} = i_{\text{в}} R_{\text{в}} + L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt},$$

или с учетом (5.64):

$$T_{\text{â}} \frac{di_{\hat{a}}}{dt} + i_{\text{â}} = \alpha \frac{U_{\text{âí}}}{R_{\hat{a}}}. \qquad (5.65)$$

Решение дифференциального уравнения (5.65)

$$i_{\text{â}}(t) = \alpha i_{\text{âó}} \left(1 - \mathring{a}^{\frac{-t}{T_{\text{Â}}}} \right). \qquad (5.66)$$

Уравнение (5.65) и (5.66) справедливы только на интервале времени $0 \le t \le t_{\text{â}}$, где $t_{\text{â}}$ – время возбуждения, за это время ток возрастает до номинального значения $i_{\text{âí}}$.

Подставляя в (5.66) значение $i_{\text{â}} = i_{\text{âí}}$ и $t = t_{\text{â}}$, получим выражение для определения времени возбуждения:

$$t_{\text{â}} = T_{\text{â}} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}.$$

На рис. 5.9, *б* приведены графики переходных процессов с форсировкой (кривая I) и без форсировки (кривая 2). При $\alpha = 2$ время возбуждения равно $0{,}693T$. Если время переходного процесса без форсировки составляет $3T$, то при форсировке оно уменьшится более чем в четыре раза.

Рассмотрим переходные процессы в приводе с двигателем постоянного тока независимого возбуждения с учетом индуктивности обмотки якоря, приведенный момент инерции системы и момент статического сопротивления считаем постоянными, а поток возбуждения двигателя – равным номинальному. Наличие индуктивности в якорной цепи приводит к тому, что при включении якоря в сеть ток в обмотке изменяется не мгновенно, а плавно нарастает от нуля до установившегося значения. Момент двигателя изменяется пропорционально току якоря, следовательно, в какой-то промежуток времени, называемый временем запаздывания, момент двигателя меньше момента статического сопротивления. При реактивном ха-

рактере момента статического сопротивления привод останется в неподвижном состоянии до тех пор пока момент двигателя не превысит момент статического сопротивления механизма. Таким образом переходный процесс следует рассматривать по участкам. На первом участке двигатель включен в сеть и неподвижен, ток двигателя плавно нарастает от нуля до тока, определяемого моментом статического сопротивления. Это участок запаздывания. На втором участке переходного процесса момент двигателя превышает момент статического сопротивления механизма, происходит разгон привода

Переходный процесс для участка запаздывания описывается одним дифференциальным уравнением. Это второй закон Кирхгофа для якорной цепи при неподвижном двигателе:

$$U = IR + L_{\ddot{y}}\frac{dI}{dt}, \qquad (5.67)$$

где $R_{\ddot{y}}$ – сопротивление якорной цепи;

$L_{\ddot{y}}$ – индуктивность обмотки якоря,

Разделив обе части уравнения (5.67) на сопротивление якорной цепи, получим дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$T_{\ddot{y}}\frac{dI}{dt} + I = I_{\hat{e}}, \qquad (5.68)$$

где $T_{\ddot{y}} = \frac{L_{\ddot{y}}}{R_{\ddot{y}}}$ – электромагнитная постоянная времени якорной обмотки;

$I_{\hat{e}} = \frac{U}{R_{\ddot{y}}}$ – установившееся значение тока короткого замыкания.

Решение дифференциального уравнения (5.68) имеет вид:

$$I(t) = I_{\hat{e}}\left(1 - \mathring{a}^{-\frac{t}{T_{\text{в}}}}\right). \qquad (5.69)$$

Пользуясь выражением (5.69), можно определить время запаздывания из условия: $t = t_з$; $I = I_с$,

где $I_с = \frac{M_с}{k\Phi}$ – ток статического сопротивления.

$$t_з = T_я \ln \frac{I_к}{(I_к - I_с)}. \qquad (5.70)$$

Из (5.70) следует, что запаздывание обусловлено индуктивностью якорной обмотки и моментом статического сопротивления. По выражению (5.69) можно построить график переходного процесса на отрезке времени $0 \le t \le t_з$, при этом угловая скорость вращения двигателя равна нулю.

Для второго участка переходного процесса справедлива система уравнений:

$$\left.\begin{aligned} & M - M_с = J \frac{d\omega}{dt}; \\ & U = E_g + IR + L_я \frac{dI}{dt}; \\ & M = k\Phi I \\ & E_g = k\Phi\omega. \end{aligned}\right\} \qquad 5.71)$$

Первое уравнение системы является основным уравнений движения привода, а второе – второй закон Кирхгофа для якорной цепи с учетом ее индуктивности. Систему (5.71) можно решить методом исключения переменных. Подставляя третье уравнение системы в первое, можно получить выражение для тока и производной от тока по времени:

$$I = J \frac{1}{k\Phi} \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_с}{k\Phi}; \qquad (5.72)$$

$$\frac{dI}{dt} = J \frac{1}{k\Phi} \frac{d^2\omega}{dt^2}. \qquad (5.73)$$

Решая совместно второе уравнение системы (5.71) с (5.72) и (5.73) получим дифференциальное уравнение для угловой скорости:

$$U = J\frac{R}{k\Phi}\frac{d\omega}{dt} + M_{\text{с}}\frac{R}{k\Phi} + k\Phi\omega + L_{\text{ў}}J\frac{1}{k\Phi}\frac{d^2\omega}{dt^2}$$

или после упрощения

$$T_{\text{ì}}\,T_{\text{ў}}\frac{d^2\omega}{dt^2} + T_{\text{ì}}\,\frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{с}}, \qquad (5.74)$$

где $\omega_{\text{с}} = \dfrac{U}{k\Phi} - M_{\text{с}}\dfrac{R}{k^2\Phi^2}$ – установившаяся угловая скорость вращения двигателя;

$T_{\text{ì}} = \dfrac{JR}{k^2\Phi^2}$ – механическая постоянная времени привода.

Общее решение дифференциального уравнения (5.74) имеет вид

$$\omega(t) = \omega_{\text{с}} + C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}, \qquad (5.75)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий;

p_1, p_2 – корни характеристического многочлена дифференциального уравнения:

$$T_{\text{ì}}\,T_{\text{ў}}p^2 + T_{\text{ì}}\,p + 1 = 0. \qquad (5.76)$$

Для второго участка переходного процесса отсчет времени также начинается с нуля. Поэтому начальными условиями для уравнения (5.75) будут следующие:

1) $t = 0;\ \omega = 0$.

2) $t = 0,\ \dfrac{d\omega}{dt} = 0$.

Второе условие следует из первого уравнения системы (5.71); при моменте двигателя, равном моменту статического сопротивления, ускорение привода равно нулю. Подставляя начальные условия в уравнение (5.75), получим систему уравнений для определения постоянных интегрирования C_1 и C_2:

$$\left.\begin{aligned} C_1 + C_2 &= -\omega_c; \\ C_1 p_1 + C_2 p_2 &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (5.77)$$

Решение системы (5.77):

$$C_1 = -\omega_c \frac{p_2}{p_2 - p_1};\ C_2 = \omega_c \frac{p_1}{p_2 - p_1}.$$

Уравнение переходного процесса для угловой скорости с учетом начальных условий

$$\omega(t) = \omega_c \left(1 - \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} + \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t} \right). \qquad (5.78)$$

Уравнение переходного процесса для тока якоря получается из совместного решения уравнений (5.71) и (5.78):

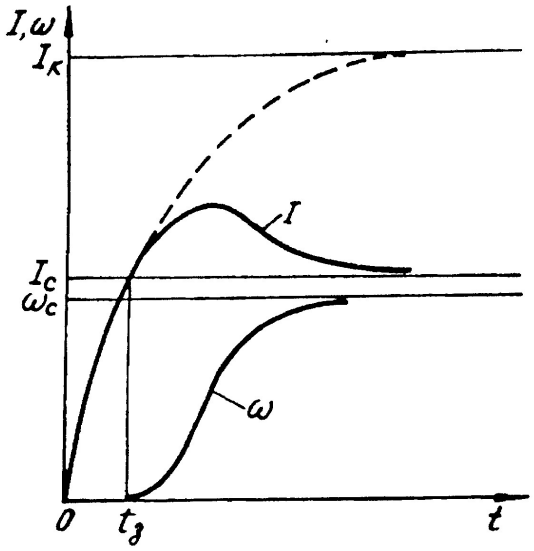


Рис 5.10. Графики электромагнитных переходных процессов для тока и скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

$$I(t) = I_c + \frac{(I_{\hat{e}} - I_c)}{T_{\ddot{y}}(p_2 - p_1)} \left(e^{p_2 t} - e^{p_1 t} \right). \qquad (5.79)$$

Примерные графики переходных процессов в двигателе постоянного тока независимого возбуждения с учетом электромагнитной инерции якоря показаны на рис. 5.10.

5.8. Колебательные переходные процессы в приводе

Наличие индуктивности в якорной цепи двигателя постоянного тока качественно изменяет переходные процессы при пуске и торможении привода. Наличие индуктивности не позволяет изменять пусковой ток скачком. При работе в установившемся режиме двигатель потребляет из сети электрическую энергию, которую он преобразует в механическую на валу рабочей машины (за вычетом потерь в обмотках, магнитопроводе и на трение в подшипниках и передачах). При пуске двигателя кроме затрат механической энергии на вращение механизма он накапливает электромагнитную энергию в обмотках, обладающих индуктивностью, и кинетическую энергию вращающихся масс (якоря двигателя, валов редуктора и рабочей машины). В процессе торможения накопленная приводом энергия может быть возвращена в сеть (с помощью преобразователя), выделена в виде тепла в тормозных колодках или обмотках якоря и тормозных сопротивлениях.

Таким образом, двигатель в процессе работы накапливает два вида энергии: кинетическую, оцениваемую величиной:

$$W_{\text{к}} = \frac{1}{2} J\omega^2$$

и электромагнитную, равную:

$$W_{\text{э}} = \frac{1}{2} LI^2 .$$

Для мощных электродвигателей, имеющих большие значения моментов инерции, индуктивности и токов, запас накопленной энергии велик; активное сопротивление обмоток этих двигателей весьма мало. Рассмотрим процессы, проходящие в электродвигателе при отключении его от источника питания в случае, когда момент сопротивления $M_{\text{ñ}}$ равен нулю, а активным сопротивлением якоря можно пренебречь. Положим, что начальная скорость вращения равна ω_0, а обмотка якоря при возбужденном двигателе замкнута накоротко.

Поведение привода описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{1}{2}J\omega_0^2 = \frac{1}{2}J\omega^2 + \frac{1}{2}LI^2; \\ &M = J\frac{d\omega}{dt}; \\ &0 = E + L\frac{di}{dt}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.80)$$

Первое уравнение системы (5.80) представляет закон сохранения энергии, второе – основное уравнение движения привода при отсутствии нагрузки, а третье – второй закон Кирхгофа для случая, когда якорь машины замкнут накоротко, а его сопротивление равно нулю. Начальные условия находим из системы (5.80). Значения начальной угловой скорости $\omega_{\text{í÷}} = \omega_0$, начального тока $i_{\text{í÷}}$ и момента двигателя $M_{\text{í÷}}$ равны нулю ($\omega_{\text{í÷}} = 0$, $i_{\text{í÷}} = 0$, $M_{\text{í÷}} = 0$). Начальное ускорение находим из второго уравнения $\frac{d\omega}{dt} = 0$, первая производная от тока по времени: $\frac{di}{dt} = -\frac{E}{L}$.

Знак минус показывает, что возникающий ток будет создавать момент, направленный встречно скорости вращения вала двигателя. В этом случае двигатель начинает тормозиться, а кинетическая энергия системы убывает.

Из первого уравнения системы (5.80) видно, что она превращается в энергию электромагнитного поля.

Когда скорость вращения вала двигателя снизится до нуля, его кинетическая энергия превратится в электромагнитную ($\omega = 0$; а ток $i = I_{\max}$). Подставляя значения тока и скорости в первое уравнение системы (5.80), найдем выражение для максимального тока:

$$I_{\max} - = \pm\omega_0 \sqrt{\frac{J}{L}}. \qquad (5.81)$$

Знак минус указывает на отрицательное ускорение – двигатель начинает разгоняться в противоположном (относительно начальной скорости) направлении. Увеличение скорости вызывает (как видно из первого уравнения системы (5.80)) увеличение кинетической и уменьшение электромагнитной энергии в системе (скорость увеличивается, а ток и момент уменьшаются). Так будет до тех пор, пока скорость не достигнет максимального значения $\omega = \omega_{\max} = \omega_0$, а ток не станет равным нулю. Очевидно, что запас энергии в рассматриваемой идеальной системе не уменьшается, поэтому процесс носит незатухающий характер. Для определения закона изменения скорости вращения и тока двигателя во времени следует решить совместно второе и третье уравнение системы (5.80). Запишем выражение электромагнитного момента и электродвижущей силы якоря:

$$M = k\Phi i;\ E = k\Phi\omega$$

и подставляем их во второе и третье уравнение системы (5.80):

$$\left.\begin{aligned} \hat{e}\Phi i &= J\frac{d\omega}{dt}; \\ \hat{e}\Phi\omega + L\frac{di}{dt} &= 0. \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left.\begin{aligned} i &= \frac{J}{\hat{e}\Phi}\frac{d\omega}{dt}; \\ \hat{e}\Phi\omega + L\frac{di}{dt} &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (5.82)$$

Подставив первое уравнение системы во второе, получим дифференциальное уравнение второго порядка без правой части (отсутствует задание и возмущение):

$$L\frac{J}{\hat{e}^2\Phi^2}\frac{d^2\omega}{dt^2}+\omega=0 .$$

Характеристическое уравнение системы:

$$L\frac{J}{\hat{e}^2\Phi^2}\eth^2+1=0 .$$

Корни характеристического уравнения:

$$p_1=-j\beta;\ p_2=+j\beta,$$

где $\beta=\sqrt{\frac{\hat{e}^2\Phi^2}{LJ}};\ j=\sqrt{-1}$.

Общее решение системы относительно угловой скорости вращения вала имеет вид:

$$\omega(t)=Ae^{p1t}+Be^{p2t}$$

где A и B – коэффициенты, определяемые из начальных условий: $t=0$,

$$\omega=\omega_0 \text{ и } \frac{d\omega}{dt}=0 .$$

Имеем систему относительно коэффициентов A и B:

$$\left.\begin{array}{l}A+B=\omega_0;\\ A\cdot p_1+B\cdot p_1=0.\end{array}\right\}\Rightarrow A=B=\frac{\omega_0}{2} . \qquad (5.83)$$

Подставив $\omega(t)$ в первое уравнение системы (5.82), получим зависимость тока двигателя от времени:

$$i(t)=-\omega_0\sqrt{\frac{J}{L}}\sin\beta t=-I_{\max}\sin\beta t. \qquad (5.84)$$

Максимальные значения тока двигателя, полученные на основе закона сохранения энергии (5.81) и чисто математическим путем (5.84), совпадают.

Величина β в выражении (5.84) представляет угловую частоту колебаний тока якоря и скорости вращения вала и связана с периодом колебаний выражением:

$$T = \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi\sqrt{L\frac{J}{k^2\Phi^2}}.$$

Физический смысл величины $\frac{J}{k^2\Phi^2}$ можно уяснить, обратившись к первому уравнению системы (5.82). Представим его следующим образом:

$$\int_0^{I_{max}} idt = \frac{J}{k^2\Phi^2} k\Phi \int_0^{\omega_0} d\omega.$$

Из последнего выражения следует:

$$q = \frac{J}{k^2\Phi^2} k\Phi\omega_0 = \frac{J}{k^2\Phi^2} U.$$

Тогда искомая величина равна:

$$\frac{J}{k^2\Phi^2} = \frac{q}{U} = C,$$

где q – заряд, Кл;

U – напряжение питания двигателя, В;

C – емкость, Ф.

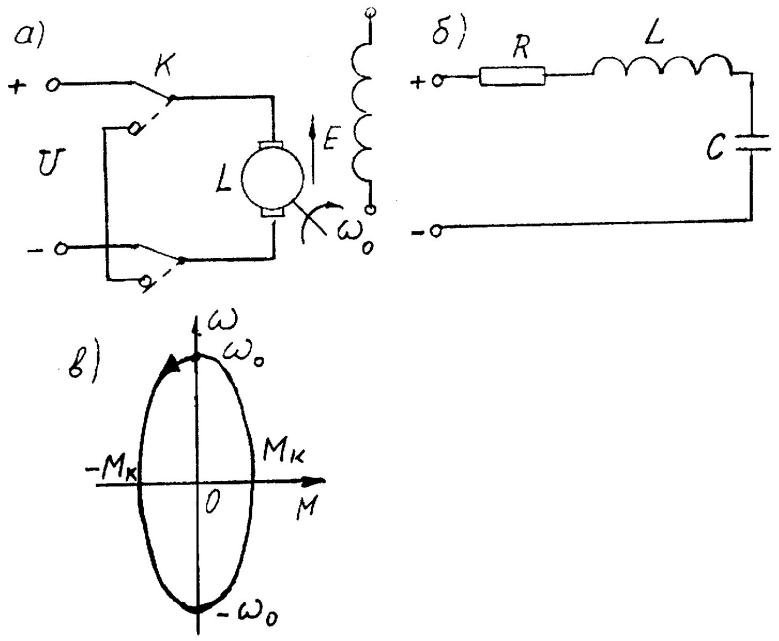


Рис 5.11. Колебательные переходные процессы в двигателе постоянного тока независимого возбуждения:

а – схема переключения двигателя постоянного тока; *б* – схема замещения двигателя

постоянного тока; *в* – фазовый портрет системы

Таким образом, искомый коэффициент выполняет функцию емкости и измеряется в фарадах (Ф).

На рис. 5.11, *а* и *б* представлены электрическая схема переключения двигателя постоянного тока и схема его замещения соответственно.

Если из выражения (5.83) и (5.84) исключить параметр время, то будет получено выражение фазового портрета системы:

$$\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{i^2}{I_{\max}^2} = 1,$$

представляющий собой график уравнения эллипса, рис. 5.11, *в*. Как видно из рисунка, линия фазового портрета не проходит через начало координат.

5.9. Графическое интегрирование основного

уравнения движения электропривода

На практике часто встречаются нелинейные механические характеристики производственных машин (центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры). Изучение переходных процессов в приводе с нелинейными механическими характеристиками затруднено тем, что такие системы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, аналитическое решение нелинейных уравнений связано с большими математическими трудностями, а иногда невозможно. Для облегчения поставленной задачи пользуются графоаналитическими и графическими методами интегрирования. Рассмотрим некоторые простейшие случаи применения этих методов.

При графоаналитическом способе решения уравнения движения привода нелинейные механические характеристики на некоторых участках изменения угловой скорости заменяются линейными. Интегрирование основного уравнения движения привода на этих участках производится по известным выражениям, необходимо только для каждого участка определять начальные значения угловой скорости и момента, а также жесткость механических характеристик.

На рис. 5.12 представлены линейная механическая характеристика электрического двигателя М и нелинейная характеристика производственной машины $M_{\text{ñ}}$. Рассмотрим графоаналитический метод построения переходных процессов при ступенчатом пуске привода. С этой целью строится пусковая диаграмма электродвигателя и производится ступенчатая линеаризация статической характеристики производственной машины, линеаризация заключается в том, что в диапазоне изменения угловой скорости вращения двигателя на данной ступени разгона реальная механическая характеристика производственной машины заменяется линейной. Так, при разгоне привода на первой ступени кривая статического

момента заменяется прямой АВ, для второй ступени – прямой ВС и так далее. Установившийся режим работы для каждой ступени определяется графически как точка пересечения соответствующей характеристики двигателя и линеаризованной характеристики производственной машины (точки I, 2, 3 и 4).

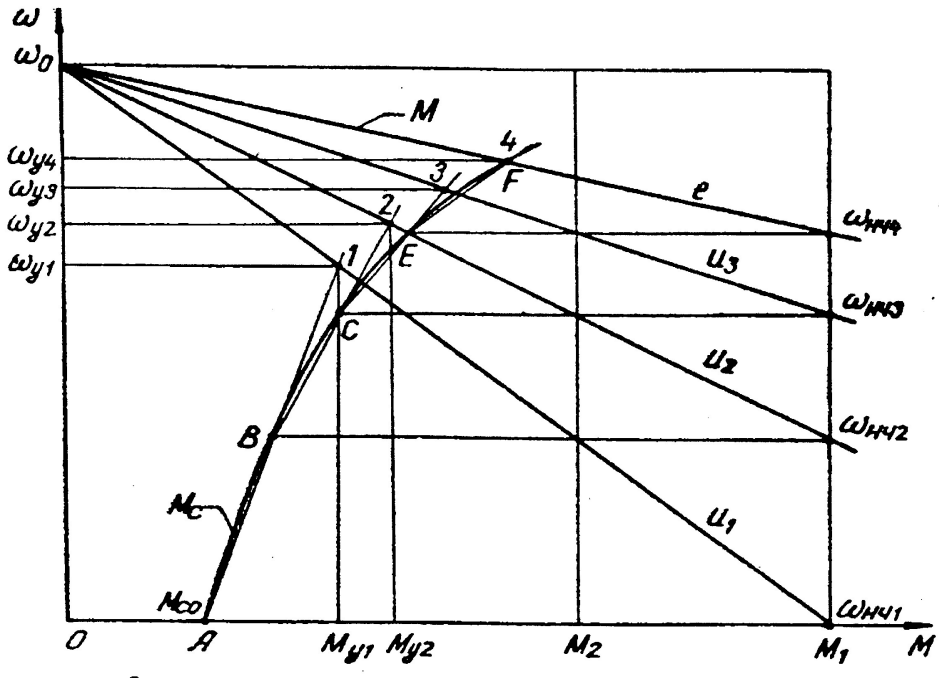


Рис. 5.12. Графоаналитический метод решения основного уравнения движения

привода

Графики переходных процессов строятся по уравнениям:

$$\grave{I}_{i}(t) = M_{\text{í}\div i} e^{-\frac{t}{T_{\text{i}\,i}}} + M_{\text{y}i}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{i}\,i}}}\right),$$

$$\omega_i(t) = \omega_{\text{í}\div i} e^{-\frac{t}{T_{\text{i}\,i}}} + \omega_{\text{y}i}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{i}\,i}}}\right),$$

где $M_{\text{í}\div i}$ и $\omega_{\text{í}\div i}$ – начальные значения момента и угловой скорости на i – той ступени разгона;

$M_{\text{y}i}$, $\omega_{\text{y}i}$ – установившиеся значения момента и угловой скорости на

i -той ступени разгона;

$T_{\text{м}\,i} = \dfrac{j}{\beta_i + \beta_{\text{с}i}}$ – механическая постоянная времени привода на i -той ступени разгона.

$\beta_i = \left|\dfrac{\Delta M_i}{\Delta\omega_i}\right|$ – модуль жесткости механической характеристики двигателя на i - той ступени разгона;

$\beta_{\text{с}i} = \left|\dfrac{\Delta M_{\text{с}i}}{\Delta\omega_i}\right|$ – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики производственной машины на i - той ступени разгона;

t – текущее значение времени работы привода для каждой ступени разгона.

Рассмотрим графическое интегрирование основного уравнения движения привода. При исследовании привода с нелинейной характеристикой момента статического сопротивления и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором проще всего воспользоваться графическим методом интегрирования, для этого механические характеристики двигателя и механизма строятся в левом квадранте, рис. 5.13. Разность моментов двигателя и статического сопротивления даст зависимость динамического момента от скорости вращения. Основное уравнение движения привода запишется следующим образом:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_g(\omega)}{J} \qquad (5.85)$$

где $M_g(\omega)$ – зависимость динамического момента от частоты вращения.

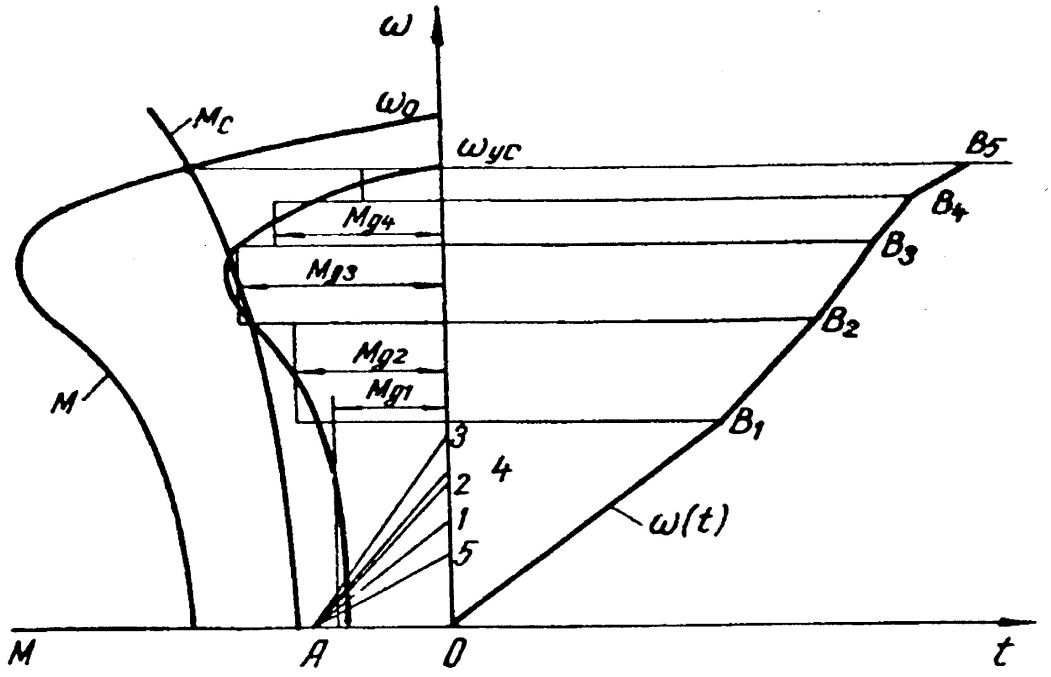


Рис 5.13. Графический метод решения основного уравнения движения привода

График кривой $M_g(\omega)$ разбивают на участки таким образом, чтобы в пределах каждого участка динамический момент изменялся незначительно. Тогда для каждого участка величина ускорения будет постоянна, и для, i-того участка можно записать

$$\int_{\omega_{нi}}^{\omega_{ki}} d\omega = \frac{M_{gi}(\omega)}{J} \int_{0}^{\Delta t_i} dt ,$$

или

$$\omega_{ki} = \omega_{нi} + \alpha_i \Delta t_i ,$$

где $\alpha_i = \dfrac{M_{gi}(\omega)}{J}$ – ускорение на i-том участке;

$\omega_{нi}$, ω_{ki} – начальная и конечная угловая скорость на i-том участке;

Δt_i – время работы привода на i-том участке.

Таким образом, кривую разгона $\omega(t)$ на i - том участке можно заменить прямой, проходящей через $\omega_{í\div i}$ с коэффициентом наклона к оси времени равным α_i. На оси момента откладывается отрезок ОА равный

$$OA = \frac{J}{m_J},$$

где m_J – масштаб момента инерции, определяемый из соотношения:

$$m_J = \frac{m_t m_M}{m_\omega},$$

m_t – масштаб времени;

m_M – масштаб момента;

m_ω – масштаб скорости вращения.

На оси ω откладывают величины динамического момента ($01 = M_{ä1}$, $02 = M_{ä2}$ и т.д.). Полученные точки 1, 2 ... соединяют прямыми линиями с точкой A. Из точки O проводят прямую OB_1, параллельную прямой $A1$, до $\omega = \omega_{í\div 2}$. Полученная прямая характеризует зависимость угловой скорости для участка разгона, определяемого динамическим моментом $M_{äi}$. Построение графика переходного процесса для других ступеней аналогично. Из точки B_1 проводят прямую параллельную прямой A_2 до точки B_2, определяющей $\omega_{í\div 3}$, и так далее до точки B_5, которая характеризует установившийся режим работы привода.

Графоаналитические и графические методы решения дают приближенные результаты, вполне пригодные для практических целей. Для увеличения точности построения переходного процесса следует увеличить число ступеней, т.е. уменьшить величину интервала $\Delta\omega$. Основным недостатком этих методов является невозможность выявить влияние того или иного

параметра на поведение привада в переходном процессе. Поэтому их применяют в простейших случаях, не требующих изменения параметров привода. для сложных систем, когда требуется менять параметры отдельных элементов с целью получения определенных динамических свойств привода, пользуются методами математического моделирования. Для решения инженерных задач методами математического моделирования в настоящее время широко применяют аналоговые вычислительные машины (АВМ).

Контрольные вопросы

1. Дать определение переходному процессу в электроприводе.
2. Перечислить причины, вызывающие переходный процесс.
3. Назвать инерционности, встречающиеся в электроприводе.
4. От каких параметров зависит время переходного процесса?
5. С какой целью применяют графический и графоаналитический методы интегрирования основного уравнения движения привода?
6. Почему при изучении переходных процессов не учитывают изменения температуры двигателя?
7. За счет чего двигатель гасит колебания нагрузки?
8. Как влияет момент инерции на амплитуду вынужденных колебаний?
9. Как влияет жесткость механической характеристики двигателя на амплитуду вынужденных колебаний двигателя
10. Для чего производится форсировка переходных процессов в системе Г-Д?
11. Перечислить способы форсировки переходных процессов.
12. Чем обусловлено время запаздывания в переходных процессах?
13. Как определяются начальные условия при решении задач по переходным процессам.
14. Нарисовать схему замещения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

15.Нарисовать график переходного процесса в режиме электродинамического торможения при активном и реактивном моменте статического сопротивления.

16.Начертить график переходного процесса в режиме торможения противовключением при активном и реактивном моментах статического сопротивления.

17.Определить дополнительное сопротивление реостата при электродинамическом торможении.

18.Рассчитать дополнительное сопротивление реостата при торможении противовключением.

6. ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. Общие сведения о выборе мощности электродвигателей

Основным элементом электропривода является электрический двигатель, который определяет его основные технические и экономические показатели. Поэтому правильный выбор мощности электродвигателя имеет большое значение: он определяет первоначальные и эксплуатационные затраты. Особо следует отметить требование безаварийной работы привода, которое удовлетворяется правильным выбором исполнения двигателя по защите его от воздействия окружающей среды (открытые, защищенные, закрытые, герметичные), по способу охлаждения (с естественной вентиляцией, с самовентиляцией и с независимой или принудительной вентиляцией) и по климатическому исполнению (для холодного, умеренного и тропического климата). Для обеспечения надежной работы привода необходимо учитывать условия его работы. Необоснованный выбор типа двигателя может привести к преждевременному выходу его из строя или увеличению капитальных затрат и габаритов привода. Для регулируемых приводов особенно важен выбор двигателя по способу их охлаждения, поскольку для двигателей с самовентиляцией при уменьшении угловой скорости ухудшаются условия их охлаждения.

Надежная и устойчивая работа электропривода (без “опрокидывания” асинхронного двигателя и выпадения из синхронизма синхронного двигателя) возможна только при правильном выборе мощности электродвигателя. При выборе мощности двигателя необходимо учитывать условия его работы, охлаждения и характер нагрузки. Установка двигателя завышенной мощности является нецелесообразной. В этом случае возрастают габариты и вес машины, а также первоначальные затраты,

снижаются ее технико-экономические показатели: двигатель работает с недогрузкой, чему соответствует пониженный КПД, а в случае асинхронной машины – и с низким коэффициентом мощности, что увеличивает непроизводительную загрузку распределительных сетей, генераторов и трансформаторов. Использование электродвигателей заниженной мощности приводит к нарушению нормальной работы производственного механизма, снижению его производительности, возникновению аварий и повышению температуры ее обмоток сверх допустимого значения, что влечет преждевременный выход машины из строя.

При работе привода могут возникнуть кратковременные увеличения момента статического сопротивления, вызывающие значительное превышение тока нагрузки. Ввиду кратковременного действия перегрузок не происходит значительного повышения температуры обмоток двигателя, однако, если будет превышен определенный предел, то может быть нарушен нормальный режим работы двигателя. Поэтому при выборе мощности двигателя надо исходить как из условий кратковременных перегрузок, так и нагрева его обмоток. Выполнение условия перегрузочной способности двигателя проверяется из выражения:

$$M_{\max} \le M_{\text{í}} \cdot \lambda_{\text{ì}}, \qquad (6.1)$$

где $M_{\max}$ – максимальный момент, который может возникнуть при работе электропривода;

$M_{\text{í}}$ – номинальный момент двигателя (определяется по паспортным или каталожным данным);

$\lambda_{\text{ì}}$ – перегрузочная способность электрической машины по моменту.

Если при выборе мощности двигателя за исходную величину принимают ток нагрузки, то проверка на перегрузочную способность производится исходя из следующей зависимости:

$$I_{\max} \le I_{\text{í}} \cdot \lambda_I \qquad (6.2)$$

где I_{max} – максимальный ток, возникающий при работе электродвигателя;

$I_{í}$ – номинальный ток двигателя;

λ_I – перегрузочная способность двигателя по току.

Перегрузочная способность $\lambda_{ì}$ асинхронных двигателей определяется значением критического момента $M_{ê}$; для двигателей единой серии нормального исполнения она составляет $\lambda_{ì} = 1{,}7 \div 2{,}2$, а для крановометаллургических $\lambda_{ì} = 2{,}3 \div 3{,}0$. Пусковой и критический моменты асинхронного двигателя пропорциональны квадрату напряжения сети; при снижении напряжения до значения $0{,}9U_{í}$ критический момент снижается на 20%, поэтому при расчетах необходимо брать 0,8 перегрузочной способности, приведенной выше.

Перегрузочная способность синхронной машины обычно составляет $2{,}5 \div 3{,}0$. За счет перевозбуждения двигателя его перегрузочная способность может быть увеличена до $3{,}5 \div 4{,}0$.

Перегрузочная способность по току двигателя постоянного тока ограничивается по условиям коммутации; реактивная ЭДС, вызывающая искрение на коллекторе, пропорциональна току нагрузки. Перегрузочная способность по моменту двигателя постоянного тока независимого возбуждения нормального исполнения должна быть не ниже 2,5. Для двигателей смешанного и последовательного возбуждения перегрузочная способность по моменту еще больше из-за увеличения магнитного потока за счет обмотки последовательного возбуждения и составляет $4{,}5 \div 5{,}0$ и более.

При работе электрической машины, как в двигательном режиме, так и в тормозном в ней происходит преобразование одного вида энергии в другой, причем преобразование энергии всегда сопровождается потерями. Потери в двигателе подразделяются на механические, потери в стали магнитопровода и потери в меди. В конечном итоге все они превращаются в тепловую

энергию, нагревают двигатель и рассеиваются в окружающую среду. Потери (мощности) в общем случае могут быть представлены следующим образом:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_1(1-\eta) = P_2\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) = k + \upsilon_í\, x^2 = \upsilon_í\,(a + x^2), \qquad (6.3)$$

где ΔP – потери мощности, Вт;

P_1 – мощность из сети (затраченная мощность), Вт;

P_2 – мощность на валу (полезная мощность), Вт;

η – коэффициент полезного действия (КПД) двигателя;

k – постоянные потери, Вт;

$\upsilon_í$ – переменные потери при номинальной нагрузке, Вт;

$x = \dfrac{P_2}{P_í}$ – коэффициент загрузки двигателя;

$P_í$ – номинальная мощность двигателя;

$a = \dfrac{k}{\upsilon_í}$ – коэффициент постоянных потерь.

Для двигателя постоянного тока эти потери могут быть определены по выражениям:

$$k = \Delta P_â + \Delta P_{ñò} + \Delta P_{ìåõ}; \qquad (6.4)$$

$$\upsilon = I^2 \cdot R, \qquad (6.5)$$

где $\Delta P_â$, $\Delta P_{ñò}$, $\Delta P_{ìåõ}$ – потери на возбуждение, потери в стали и механические потери соответственно;

I – ток нагрузки (ток якоря), А;

R – сопротивление якорной цепи, Ом.

Для асинхронного двигателя потери подсчитываются аналогично:

$$k = \Delta P_{ñò} + \Delta P_{ìåõ}; \qquad (6.6)$$

$$\upsilon = 3\left(I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2\right) = 3\left(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'\right), \qquad (6.7)$$

где I_1, R_1 – ток и активное сопротивление фазы статора;

I_2, R_2 – ток и активное сопротивление фазы ротора;

$I_2^{/}, R_2^{/}$ – ток и активное сопротивление фазы ротора, приведенные к обмотке статора.

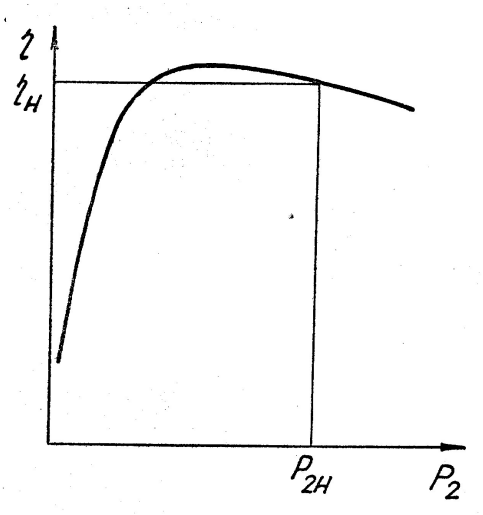


Рис. 6.1. График зависимости КПД от мощности на валу

Потери в двигателе при заданной нагрузке P_2 можно определить по выражению (6.3) $\Delta P = P_2 \dfrac{(1-\eta)}{\eta}$ если известна зависимость КПД двигателя от полезной мощности $\eta(P_2)$ (рис. 6.1). Если этой зависимости нет, то, зная паспортные данные двигателя, можно определить его значение для любого коэффициента загрузки двигателя по выражению:

$$\eta = \frac{1}{1+\left(\dfrac{1}{\eta_{\text{i}}}-1\right)\left(\dfrac{x+\dfrac{a}{x}}{a+1}\right)}, \qquad (6.8)$$

Значение коэффициента постоянных потерь a определяется следующим образом. По номинальным значениям мощности двигателя $P_{2н}$ и КПД $\eta_н$ определяют номинальные потери:

$$\Delta P_н = \frac{P_{2н}(1-\eta_н)}{\eta_н},$$

Определяют номинальные переменные потери в двигателе $\upsilon_н$ (для машины постоянного тока по выражению (6.5), а для асинхронной машины – по выражению (6.7)). Затем определяют постоянные потери: $k = \Delta P_н - \upsilon_н$ и коэффициент постоянных потерь: $a = \frac{k}{\upsilon_н}$.

Для правильного выбора мощности электродвигателя как по условиям его нагрева, так и по перегрузочной способности необходимо иметь нагрузочную диаграмму привода, под которой понимают зависимость мощности, момента или тока двигателя от времени: $P(t)$, $M(t)$, $I(t)$. В отличие от переходного процесса нагрузочная диаграмма определяется для полного времени работы привода, включающего время пуска, торможения и время работы в установившемся режиме. Различают нагрузочную диаграмму привода и нагрузочную диаграмму рабочей машины, которые не совпадают из-за возникновения динамических моментов при пуске и торможении привода. Таким образом, правильно выбранный для заданной нагрузочной диаграммы и условий работы электродвигатель должен быть полностью нагружен, не нагреваться сверх допустимого значения и обеспечивать нормальную работу механизма при возможных кратковременных перегрузках. Обычно выбор мощности электродвигателя производится исходя из условий его нагрева, а затем он проверяется по условиям перегрузки.

Величина допустимого нагрева электродвигателей определяется классом нагревостойкости материалов, используемых для изоляции обмоток

электрической машины. В электромашиностроении применяются следующие классы нагревостойкости изоляционных материалов.

Класс нагревостойкости *A* включает в себя следующие материалы: хлопчатобумажные ткани, бумагу, целлюлозу и шелк, пропитанные или погруженные в жидкий изоляционный материал (трансформаторное масло, масляные и асфальтовые лаки). К данному классу изоляции относятся также лакоткани, ленты, электротехнический картон и другие материалы. Предельно допустимая температура нагрева составляет 105 °С. Изоляция класса *A* широко применяется для электрических машин мощностью до 100 кВт и выше, а также в трансформаторостроении.

Класс нагревостойкости *E* включает синтетические эмали (для изоляции проводов) и синтетические органические пленки, это новые синтетические материалы, получившие большое применение в машинах малой и средней мощности (до 10 кВт и выше). Предельно допустимая температура нагрева 120 °С.

Класс нагревостойкости *B* содержит неорганические диэлектрики (слюда, асбест, стекловолокно) и пропиточные лаки и смолы органического происхождения. Предельно допустимая температура нагрева составляет 130 °С. Материалы этого класса нагревостойкости применяются для изоляции обмоток двигателей единой серии 4А средней и большой мощности. Изоляция класса нагревостойкости *F* включает те же материалы, что и изоляция класса *B,* но с применением органических лаков и смол, модифицированных кремнийорганическими и другими смолами с высокой нагревостойкостью. Изоляция этого класса не должна содержать хлопчатой бумаги, целлюлозы или шелка. Предельно допустимая температура нагрева составляет 155 °С. Такую изоляцию имеют двигатели серий 4А, 2П, МТТ, МТКГ средней мощности.

К классу нагревостойкости *H* относится изоляция на основе слюды, стекловолокна и асбеста в сочетании с кремнийорганическими и другими

нагревостойкими смолами. С применением таких смол изготовляются миканиты, слюдиниты, а также стекломикаленты, стеклослюдиниты и т. д. Предельно допустимая температура нагрева 180 °С. Двигатели с классом изоляции *Н* используются в тяжелых условиях (горная и металлургическая промышленность, транспортные установки и др.) с частыми пусками и реверсами, при высокой температуре окружающей среды. Такую изоляцию имеют двигатели серий МТН, МТКН, Д.

Изоляция класса нагревостойкости С включает стекло, слюду, кварц, керамические материалы, применяемые с неорганическими связующими составами или без связующих составов. Предельно допустимая температура нагрева превышает 180 °С. Нагревостойкость этих материалов не используется полностью в современном машиностроении, поэтому предельно допустимая температура нагрева для данного класса изоляции не установлена.

Под воздействием температуры, влажности окружающей среды, вибрации и других физико-химических воздействий происходит старение изоляции, т. е. потеря механической прочности и изолирующих свойств. При соблюдении условий эксплуатации электрической машины срок службы ее изоляции составляет $15 \div 20$ лет. Превышение допустимой температуры нагрева сверх допустимого значения влечет разрушение изоляции и сокращение срока эксплуатации электрической машины. Для класса нагревостойкости изоляции A превышение температуры нагрева на $8 \div 10$ °С влечет сокращение срока службы двигателя в два раза.

Предельно допустимые температуры обмоток двигателей достигаются при номинальной нагрузке, номинальной температуре окружающей среды 40 °С и при высоте над уровнем моря до 1000 м. При температуре окружающей среды ниже 40 °С двигатель может быть нагружен несколько выше номинального значения (для изоляции класса A превышение номинальной

нагрузки не допускается); если температура окружающей среды выше номинальной, то двигатель следует несколько недогружать.

Процесс нагрева электрической машины чрезвычайно сложен. Детали двигателя (обмотка, изоляция, магнитопровод) имеют разную удельную теплоемкость и теплопроводность. Вес изоляции весьма мал по отношению к весу машины, но ее теплопроводность существенно отличается от теплопроводности стали и меди, что затрудняет теплообмен между обмотками и магнитопроводом машины. Условия нагрева и охлаждения различных частей машины зависят от их положения и режима работы. При малых нагрузках, когда постоянные потери превышают переменные, большему нагреву подвергается магнитопровод машины. С увеличением нагрузки переменные потери превышают постоянные, в этом случае обмотки двигателя нагреваются сильнее магнитопровода, и направление теплового потока изменяется на противоположное. Условия охлаждения элементов машины также различны. Более интенсивно охлаждаются открытые части машины (лобовые части обмоток), хуже охлаждаются закрытые (части обмоток, находящиеся в пазах). Перечисленные условия работы и охлаждения электрической машины весьма осложняют тепловые расчеты и делают их невозможными, если не принять некоторых упрощений. При нагревании тела часть тепла идет на повышение температуры самого тела, другая часть отдается в окружающую среду. Количество тепла, затраченное на повышение температуры тела, пропорционально его теплоемкости. Однако различные части двигателя имеют различную удельную теплоемкость (и вес). *С* целью упрощения расчета считают, что двигатель обладает некоторой средней постоянной для всей массы теплоемкостью *С*. Температура двигателя в пазах (точках наибольшего выделения тепла) и на поверхности, где созданы условия наилучшего охлаждения, значительно отличается, однако ее принимают одинаковой, что эквивалентно бесконечной теплопроводности материала. Теплоотдача осуществляется тремя способами:

за счет теплопроводности, конвекцией и лучеиспусканием. Количество тепла, отдаваемое за счет теплопроводности, пропорционально разности температуры тела и окружающей среды, отдаваемое за счет конвекции, пропорционально этой разности в степени 1,25. И, наконец, тепло, отдаваемое лучеиспусканием, пропорционально четвертой степени этой разности. Предельно допустимые значения температуры двигателя невелики, и количество тепла, отдаваемое лучеиспусканием, мало, и им обычно пренебрегают. Степень разности температур, от которой зависит количество тепла, передаваемое в окружающую среду конвекцией, незначительно отличается от единицы, поэтому считают, что отдаваемое двигателем в окружающую среду тепло пропорционально разности его температуры и температуры окружающей среды. Считают также, что условия работы двигателя постоянны, т. е. температура окружающей среды неизменна.

Уравнение теплового баланса в двигателе при постоянной нагрузке и неизменных условиях его охлаждения имеет следующий вид:

$$Qdt = A\tau dt + Cd\tau, \qquad (6.9)$$

где Q – количество тепла, образующееся в двигателе в единицу времени (мощность потерь в двигателе $Q = \Delta P$), Дж/с;

A – коэффициент теплоотдачи двигателя, т. е. количество тепла, отдаваемое двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температуры двигателя и окружающей среды в один градус, Дж/с °С;

C – теплоемкость двигателя – количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на один градус, Дж/°С;

τ – нагрев двигателя, т. е. превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды, °С.

Нагрев двигателя равен:

$$\tau = \vartheta_д - \vartheta_{îñ} \qquad (6.10)$$

где $\vartheta_д$ и $\vartheta_{îñ}$ – температура двигателя и окружающей среды соответственно,

°C.

Выражение (6.9) легко приводится к виду:

$$\frac{C}{A} = \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{Q}{A}$$

или

$$T_{\text{í}} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{ó}}, \qquad (6.11)$$

где $T_{\text{í}} = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева двигателя, с;

$\tau_{\text{ó}} = \frac{Q}{A}$ – установившийся нагрев двигателя, °С.

Решение обыкновенного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (6.11) будет:

$$\tau(t) = \tau_{\text{í÷}} e^{-\frac{t}{T_{\text{í}}}} + \tau_{\text{ó}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{í}}}} \right), \qquad (6.12)$$

где $\tau_{\text{í÷}}$ – начальное значение нагрева двигателя.

Если начальный нагрев равен нулю (температура двигателя равна температуре окружающей среды), то выражение (6.12) примет вид:

$$\tau(t) = \tau_{\text{ó}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{í}}}} \right). \qquad (6.13)$$

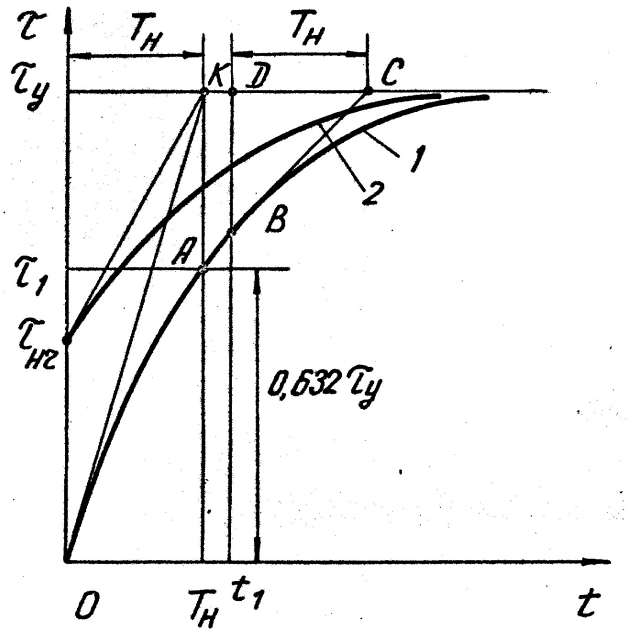


Рис. 6.2. График нагрева электродвигателя

На рис. 6.2 представлены графики нагрева двигателя при нулевом *1* и ненулевом *2* значении начального нагрева двигателя и одном и том же значении постоянной времени нагрева.

При отключении двигателя от сети и окончании тормозного режима количество тепла, выделяемое в двигателе, равно нулю $Q = 0$, поскольку двигатель не преобразует энергию и потери в нем отсутствуют. Происходит охлаждение двигателя. Уравнение теплового баланса при охлаждении двигателя имеет вид:

$$0 = A_0 \tau dt + C d\tau, \qquad (6.14)$$

где A_0 – коэффициент теплоотдачи двигателя при охлаждении.

Коэффициент теплоотдачи двигателя зависит от способа его вентиляции; для двигателей с принудительной вентиляцией при работе и остановках привода условия теплоотдачи не изменяются и коэффициент теплоотдачи постоянен при нагреве и охлаждении двигателя. Для двигателей с самовентиляцией условия охлаждения зависят от угловой скорости вращения вентилятора,

находящегося на валу двигателя. В этом случае коэффициенты теплоотдачи при нагреве и охлаждении двигателя существенно отличаются. Дифференциальное уравнение (6.14) имеет решение:

$$\tau(t) = \tau_{\text{íà÷}} e^{-\frac{t}{T_0}}, \qquad (6.15)$$

где $T_0 = \dfrac{C}{A_0}$ – постоянная времени охлаждения двигателя, с.

На рис. 6.3 показан график изменения нагрева при охлаждении двигателя.

Постоянная времени нагрева (и охлаждения) двигателя зависит от теплоемкости двигателя *C* и коэффициента теплоотдачи *A*, которые в свою очередь определяются габаритами, площадью охлаждающей поверхности, исполнением, способом вентиляции и даже окраской охлаждающей поверхности. Двигатели большой мощности закрытого типа имеют постоянную времени нагрева порядка $3 \div 4$ часа. У двигателей малой и средней мощности

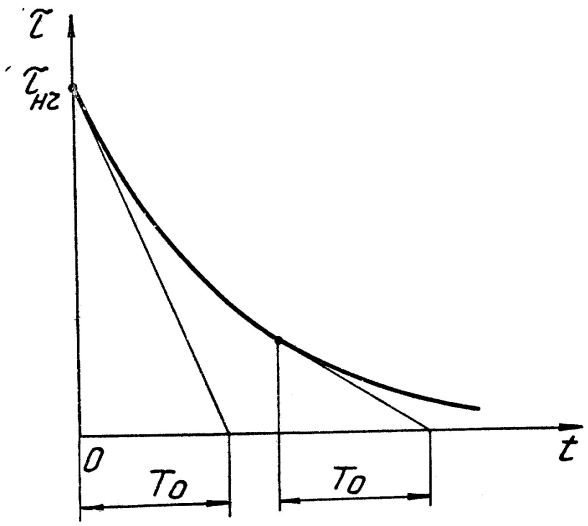


Рис. 6.3. График охлаждения электродвигателя

открытого исполнения постоянная времени нагрева составляет от нескольких десятков минут до часа. Постоянная времени нагрева (охлаждения) двигателя не зависит от величины нагрузки (потерь в двигателе). При различных

нагрузках нагрев двигателя будет протекать по кривым с различными значениями установившегося нагрева, но с одинаковыми постоянными времени нагрева (рис. 6.4).

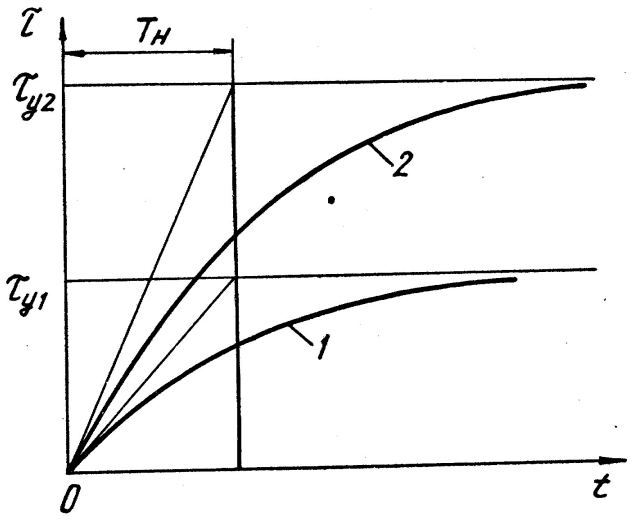


Рис. 6.4. Графики нагрева при различной нагрузке электродвигателя

Значение установившегося нагрева двигателя зависит от нагрузки; при постоянном значении коэффициента теплоотдачи установившийся нагрев пропорционален потерям в двигателе:

$$\tau_{ó} = \frac{Q}{A}. \qquad (6.16)$$

Постоянная времени нагрева не приводится в справочниках, ее можно определить приближенно экспериментальным или расчетным путем. По паспортным данным двигателя определяют поминальные потери:
Коэффициент теплоотдачи определяется из выражения:

$$A = \frac{Q_í}{\tau_ó}$$

где $\tau_ó$ – установившийся нагрев при номинальной нагрузке двигателя, равный допустимой температуре нагрева для данного класса изоляции минус номинальная температура окружающей среды (40 °С).

Постоянная нагрева вычисляется по формуле

$$T_{\text{í}} = \frac{\tilde{N}}{A}, \qquad (6.17)$$

где $C = C^{/}m$ – теплоемкость двигателя, Дж/°С;

$C^{/}$ – удельная теплоемкость стали, Дж/кг °С;

m – масса двигателя, кг.

Экспериментальное определение постоянной времени нагрева связано с изменением температуры двигателя во времени при постоянной нагрузке. По графику зависимости $\tau(t)$ постоянная времени нагрева может быть получена двумя способами.

Первый способ основан на проведении касательной к графику зависимости $\tau(t)$. На рис. 6.2 касательные к графикам *1* и *2* проведены для момента времени, равного нулю. Экспоненциальная зависимость $\tau(t)$ имеет асимптоту $\tau_{\text{ó}}$. Точка *K* пересечения касательной с асимптотой дает время, равное постоянной времени нагрева $T_{\text{í}}$. Как видно из графиков рис. 6.2, постоянные времени для кривых *1* и *2* равны. Вообще говоря, касательную к графику $\tau(t)$ можно проводить для любого момента времени t_i (точка *B),* тогда подкасательная *DC* равна постоянной времени нагрева. Подкасательная – это отрезок между проекцией *(D)* точки касания (5) на асимптоту и точкой *(C)* пересечения касательной и асимптоты. Данный способ определения постоянной времени дает значительную ошибку.

Более точное значение постоянной времени нагрева может быть получено следующим образом. На графике $\tau(t)$ находится точка, соответствующая величине нагрева $\tau = 0{,}632\tau_{\text{ó}}$ (точка *A* на рис. 6.2), абсцисса этой точки равна постоянной времени нагрева.

Как следует из выражений (6.12) и (6.15), время нагрева или охлаждения двигателя равно бесконечности. Практически можно принять нагрев двигателя законченным за время, равное $3 \div 4$ постоянным времени от начала нагрева, когда нагрев достигает значения $(0{,}95 \div 0{,}98)\,\tau_{ó}$.

В процессе работы электрической машины потери в ней изменяются в соответствии с нагрузочной диаграммой привода; величина установившегося нагрева также не остается постоянной в течение всего времени работы. График нагрева двигателя в этом случае представляет собой ломаную линию (рис. 6.5).

Правильный выбор двигателя заключается в том, чтобы при работе электрической машины ее максимальный нагрев не превышал допустимое значение:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{доп} \qquad (6.18)$$

где $\tau_{\max}$ – максимальный нагрев двигателя, определяемый по нагрузочной диаграмме;

$\tau_{äîï}$ – допустимый нагрев, характеризующий класс нагревостойкости изоляции, используемой в двигателе.

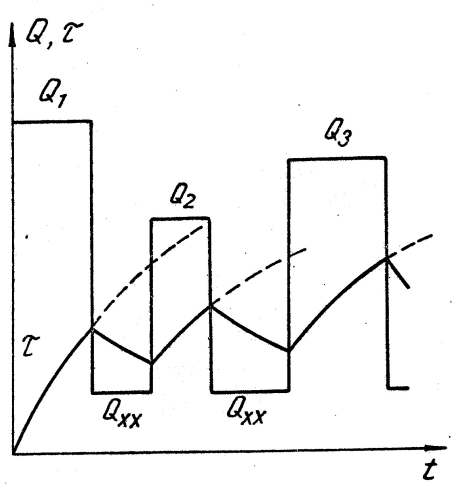


Рис 6.5. График нагрева при изменяющейся нагрузке электродвигателя

График зависимости $\tau(t)$ определяется нагрузочной диаграммой привода и может иметь весьма сложную форму. В зависимости от характера нагрева и охлаждения двигателя различают следующие основные режимы работы электроприводов. Продолжительный (длительный) режим работы, при котором время работы настолько велико, что нагрев двигателя достигает установившегося значения. В таком режиме работают вентиляторы, насосы, компрессоры, конвейеры, у которых время работы измеряется часами и даже сутками. Графики этого режима работы при постоянной нагрузке показаны на рис. 6.6, *а*. Данный режим работы характеризуется номинальной мощностью продолжительного режима. Номинальная мощность продолжительного режима – это такая мощность, которую может развивать двигатель сколь угодно долгое время, не нагреваясь сверх допустимого значения, определяемого классом нагревостойкости изоляции, используемой в двигателе. Кратковременным режимом работы называется такой режим, при котором длительность рабочего времени недостаточна для того, чтобы нагрев успел достичь установившегося значения, а пауза настолько продолжительна, что двигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды (чему соответствует нагрев, равный нулю). Упрощенные графики этого режима представлены на рис. 6.6, *б*. Кратковременный режим работы характеризуется номинальной продолжительностью и номинальной мощностью. Установлены следующие значения номинальной продолжительности кратковременного режима работы: 10, 30, 60 и 90 мин. Номинальная мощность кратковременного режима работы – это такая мощность, которую может развивать двигатель в течение номинальной продолжительности работы, не нагреваясь сверх допустимого значения. В кратковременном режиме работают механизмы шлюзов, поворотных железнодорожных кругов, подъемных мостов и т. д. Повторно-кратковременным режимом работы называется такой режим, при котором

периоды работы чередуются с отключением двигателя, при этом в период работы нагрев двигателя не успевает достичь установившегося значения, а во время паузы нагрев не успевает снизиться до нуля. Графики этого режима работы представлены на рис. 6.6, *в*. Режим характеризуется номинальной относительной продолжительностью включения и номинальной мощностью повторно-кратковременного режима работы. Относительная продолжительность включения определяется из следующего выражения:

$$ПВ = \frac{t_р}{t_р + t_0} \cdot 100 = \frac{t_р}{t_ц} \cdot 100, \qquad (6.19)$$

где *ПВ* – относительная продолжительность включения, %;

$t_р$ – время работы, с;

t_0 – время паузы, с;

$t_ц$ – время цикла, с.

В этом режиме работы продолжительность цикла не должна превышать 10 мин. Приняты следующие номинальные значения относительной продолжительности включения: $ПВ_н = 15, 25, 40, 60\%$.

Номинальная мощность повторно-кратковременного режима – это такая мощность, которую может развивать двигатель сколь угодно долгое время, не нагреваясь сверх допустимого значения, при условии чередования периодов включений и пауз. Такой режим работы является характерным для механизмов кранов, лифтов, металлорежущих станков и т. д. Условия нагрева и охлаждения двигателей, работающих в различных режимах, значительно отличаются, поэтому для каждого режима работы промышленностью выпускаются специальные двигатели. Однако сказанное не означает, что двигатели, изготовленные на один режим работы, не могут быть использованы при работе в другом режиме. Методы выбора мощности

двигателя для разных режимов работы имеют некоторые особенности, которые будут рассмотрены ниже.

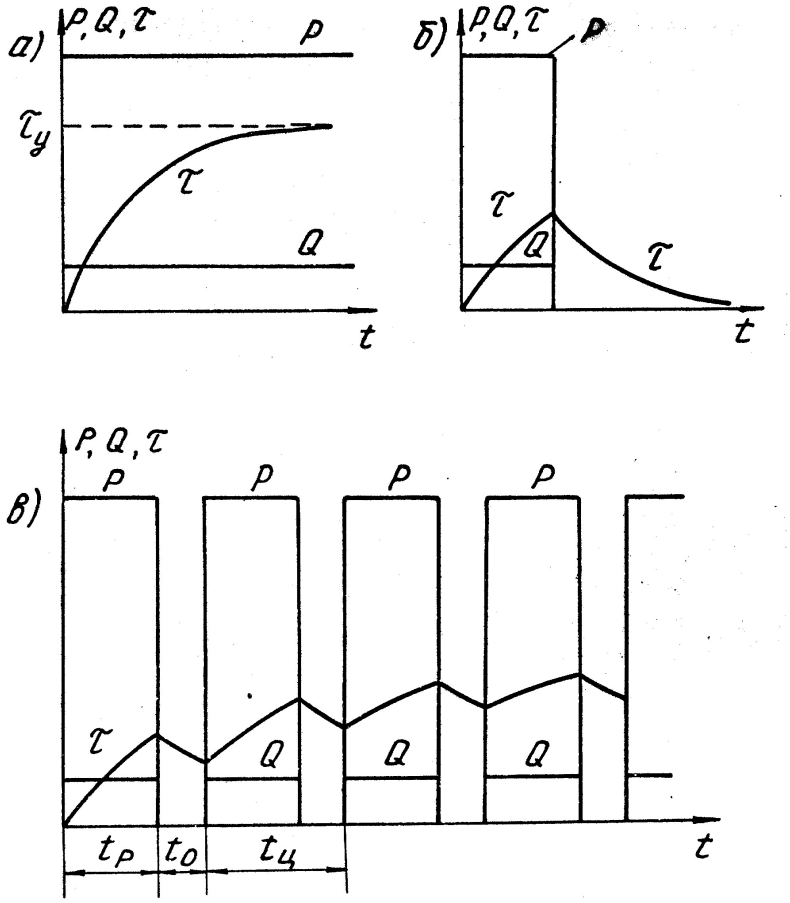


Рис 6.5. График нагрева при различных режимах работы электродвигателя:
а – длительный режим работы; *б* – кратковременный режим работы;
в - повторно-кратковременный режим работы

6.2. Выбор мощности электродвигателей при продолжительном режиме работы

Большое число механизмов работают с постоянной или незначительно изменяющейся нагрузкой без регулирования угловой скорости вращения вала рабочей машины. К таким механизмам относятся вентиляторы, насосы, конвейеры с равномерной загрузкой ленты и т. д. Расчет мощности

электродвигателя в этих случаях весьма прост, если известна потребляемая механизмом мощность. Двигатель, выбранный по мощности механизма с учетом потерь в передаточном устройстве, будет полностью нагружен по условиям нагрева изоляции его обмоток. При пуске и торможении привода потери в двигателе будут больше, чем номинальные, но они не повлияют на величину нагрева двигателя, поскольку такие приводы редко включаются и отключаются, а время пуска и торможения весьма незначительно (порядка нескольких секунд) по отношению ко времени работы (часы, а то и сутки). Лишь в исключительных случаях необходимо проверять достаточность пускового момента двигателя для механизмов, имеющих значительный момент сопротивления троганию или обладающих большим моментом инерции. Двигатель, мощность которого соответствует данной нагрузке, выбирается по каталогу. Если в каталоге нет двигателя данной мощности, то выбирается ближайший большей мощности и соответствующей угловой скорости вращения, при этом соблюдается условие:

$$P_{\text{í}} \geq P_{\text{ð}},$$

где $P_{\text{í}}$ – номинальная мощность, указанная в каталоге;

$P_{\text{ð}}$ – мощность, необходимая для работы привода.

Однако для большинства механизмов, работающих в длительном (продолжительном) режиме, нагрузка на валу может изменяться в значительной степени (рис. 6.7). Для данной нагрузочной диаграммы нельзя принять мощность двигателя, исходя из максимальной мощности по нагрузочной диаграмме, поскольку при этом двигатель большую часть времени будет недогружен. Если выбрать мощность двигателя по среднему значению нагрузки, то в этом случае двигатель будет перегружаться, т. к. при этом не учитывается квадратичная зависимость потерь от коэффициента загрузки двигателя (6.3). Выбранная по среднему значению мощность будет занижена, поскольку среднее квадратичное всегда больше среднего арифметического.

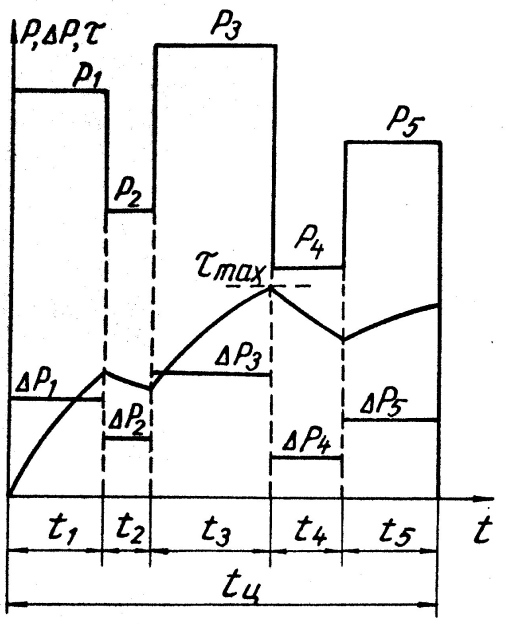


Рис. 6.7. Нагрузочная диаграмма и нагрев двигателя при продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой

Для двигателей, работающих в продолжительном режиме, существуют следующие методы выбора мощности:

1) Метод последовательных приближений.
2) Метод средних потерь.
3) Метод эквивалентного тока.
4) Метод эквивалентного момента.
5) Метод эквивалентной мощности.

Выбор мощности двигателя методом последовательных приближений заключается в следующем. Ориентировочно по нагрузочной диаграмме производственной машины (см. рис. 6.7) подсчитывают мощность электрического двигателя:

$$P_{\text{ð}} = \frac{k_{\text{ç}}}{\eta_{\text{ï}}} \cdot \frac{\sum P_i t_i}{\sum t_i}, \qquad (6.20)$$

где $k_{\text{ç}}$ – коэффициент запаса, равный 1,1 ÷ 1,3;

$P_{ð}$ – расчетная мощность;

$\eta_{ï}$ – коэффициент полезного действия передачи (редуктора);

$\sum t_i = t_{ö}$ – время цикла.

По расчетной мощности из каталогов предварительно выбирают подходящий по угловой скорости и условиям работы двигатель, у которого номинальная мощность не менее полученной по расчету $P_{í} \geq P_{ð}$. Далее производят проверку выбранного двигателя по условиям нагрева и перегрузочной способности. Для этого по паспортным данным двигателя и нагрузочной диаграмме определяют потери в двигателе ΔP_i на каждом участке нагрузочной диаграммы по выражениям (6.3) и (6.8). Значения постоянной времени нагрева $T_{í}$ и установившегося нагрева $\tau_{ó_i}$ для каждого участка нагрузочной диаграммы определяют по выражениям (6.17) и (6.16). Полученные данные позволяют построить кривые нагрева двигателя $\tau(t)$ для каждого участка нагрузочной диаграммы (см. рис. 6.7). По кривой нагрева находят его максимальное значение и проверяют выбранный двигатель по тепловой нагрузке, при этом должно удовлетворяться условие

$\tau_{max} = \tau_{äîï}$,

где $\tau_{äîï}$ – допустимый нагрев изоляции выбранного двигателя.

Если это условие не соблюдается, то принимается другой двигатель и весь расчет повторяется для вновь выбранного двигателя. Метод последовательных приближений связан с построением кривых нагрева, что требует больших затрат времени, поэтому этот метод применяется для расчетов мощных и ответственных приводов. На практике используют менее точные, но более простые методы проверки выбранного двигателя по условиям нагрева, например, метод средних потерь, не связанный с построением кривых нагрева двигателя.

Сущность метода средних потерь заключается в следующем. По нагрузочной диаграмме и выражению (6.20) ориентировочно выбирается мощность двигателя. По паспортным данным двигателя для каждого участка нагрузочной диаграммы определяют потери ΔP_i. Можно приближенно считать, что установившийся нагрев $\tau_{ó}$ при неизменных условиях охлаждения определяется величиной средних потерь в двигателе за время цикла:

$$\Delta P_{ñð} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{t_ö} . \qquad (6.21)$$

Вычисленные по (6.21) средние потери за цикл сравниваются с номинальными потерями:

$$\Delta P_í = \frac{P_í (1 - \eta_í)}{\eta_í} .$$

Если $\Delta P_{ñð} < \Delta P_í$, установившийся нагрев не превышает допустимый для класса изоляции выбранного двигателя: $\tau_{ñð} < \tau_{äîï}$. Если же средние потери за цикл превышают номинальные $\Delta P_{ñð} > \Delta P_í$, то двигатель будет перегреваться, т.е. средний за цикл нагрев превышает допустимое значение $\tau_{ñð} > \tau_{äîï}$. В обоих случаях необходимо выбрать другой двигатель, подсчитать потери мощности для каждого участка нагрузочной диаграммы и средние потери по выражению (6.21), а затем вновь сравнить средние потери с номинальными, т. е. проверить двигатель по условию нагрева методом средних потерь.

Действительный максимальный нагрев двигателя за время цикла может несколько превышать среднее значение, но при времени цикла, значительно меньшем постоянной нагрева $T_ö << T_í$, это расхождение незначительно. Однако необходимо следить, чтобы указанное условие соблюдалось, в

противном случае метод средних потерь нельзя применять для тепловой проверки выбранного двигателя.

В процессе работы угловая скорость вращения может регулироваться, в этом случае условия охлаждения двигателей с самовентиляцией ухудшаются. Это обстоятельство учитывается при подсчете средних потерь:

$$\Delta P_{\text{ñð}} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{\sum \beta_i t_i}, \qquad (6.22)$$

где β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи на t-м участке нагрузочной диаграммы, соответствующей значению угловой скорости на этом участке.

Коэффициент ухудшения теплоотдачи линейно зависит от угловой скорости вращения вала двигателя:

$$\beta = \beta_0 + (1 - \beta_0)\frac{\omega}{\omega_{\text{i}}}, \qquad (6.23)$$

где β_o – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном вале двигателя;

ω – текущее значение угловой скорости вращения вала;

ω_{i} – номинальное значение угловой скорости вращения двигателя.

Коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном вале двигателя равен:

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A}, \qquad (6.24)$$

где A_0, A – коэффициенты теплоотдачи при неподвижном двигателе и номинальной угловой скорости вращения вала соответственно.

В случаях, когда известен экспериментальный график зависимости тока нагрузки от времени $I(t)$, проверку двигателя по условиям нагрева можно произвести методом эквивалентного тока. Эквивалентный ток – это такой постоянный ток, который вызывает в двигателе те же потери, что и

действительно протекающий по нему ток. На рис. 6.8 представлен примерный график нагрузочной диаграммы тока двигателя при продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой. Потери в двигателе на i – м участке нагрузочной диаграммы:

$$\Delta P_i = k + I_i^2 R, \qquad (6.25)$$

где k – постоянные потери;

I_i – ток нагрузки (якоря двигателя) на i -м участке;

R – сопротивление якорной цепи.

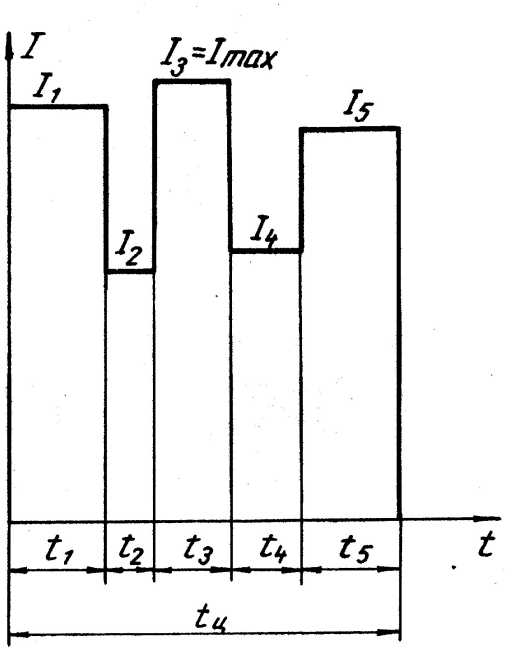


Рис 6.8. Нагрузочная диаграмма тока при ступенчатой нагрузке

Средние потери (при постоянном сопротивлении якорной цепи):

$$\Delta P_{\text{ñð}} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{\sum t_i} = \frac{\sum \left(k + I_i^2 R\right) t_i}{\sum t_i} = k + R \frac{\sum I_i^2 t_i}{t_i}. \qquad (6.26)$$

Эквивалентный ток $I_{\text{ýê}}$ вызывает те же потери в двигателе:

$$\Delta P_{\text{ñð}} = k + I_{\text{ýê}}^2 R. \qquad (6.27)$$

Из выражений (6.26) и (6.27) получаем эквивалентный ток:

$$I_{ýê} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{\sum t_i}} \quad . \qquad (6.28)$$

Для самовентилируемых двигателей при работе с переменной угловой скоростью вращения вместо $\sum t_i$ следует подставлять $\sum \beta_i t_i$. Проверка используемого двигателя по условиям нагрева заключается в сравнении эквивалентного и номинального токов. Должно выполняться условие: $I_í \geq I_{ýê}$. Кроме того, необходимо проверить двигатель на перегрузочную способность по току, для чего по нагрузочной диаграмме определяют максимальное значение тока $I_{\max}$. Должно выполняться условие $I_{\max} \leq I_í \lambda_I$. Если это условие не выполняется, то необходимо выбрать двигатель, исходя из его перегрузочной способности по току. Проверки по условиям нагрева в этом случае не требуется.

В более общем случае, когда ток нагрузки изменяется плавно (рис. 6.9), эквивалентный ток определяется из выражения:

$$I_{ýê} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2(t)dt} \quad , \qquad (6.29)$$

где T – полное время работы двигателя.

Если аналитическая зависимость $I(t)$ неизвестна, то ее график может быть разбит на участки с линейной зависимостью тока от времени (см. рис. 6.9), а затем для каждого участка определяется эквивалентный ток. Например, эквивалентный ток для первого участка, определяемого временем работы t_1, равен:

$$I_{ý1} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad . \qquad (6.30)$$

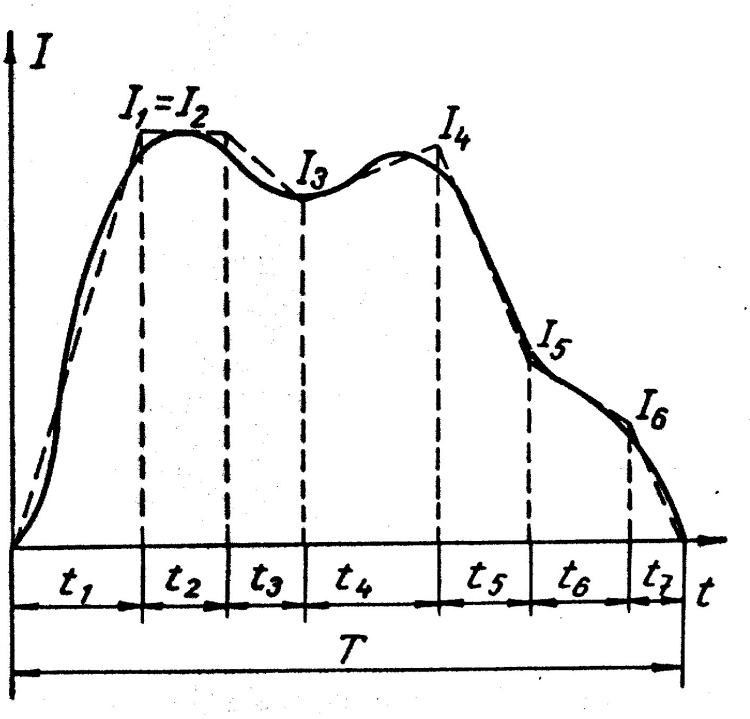


Рис. 6.9. Нагрузочная диаграмма при ступенчатом изменении момента

Для второго участка эквивалентный ток равен:

$$I_{э2} = I_2 .$$

Для третьего участка эквивалентный ток вычисляется по выражению:

$$I_{э3} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_2 I_3 + I_3^2}{3}} . \qquad (6.31)$$

Эквивалентный ток для полного цикла работы T определяется следующим образом:

$$I_{э} = \sqrt{\frac{\sum I_{эi}^2 t_i}{T}} . \qquad (6.32)$$

На практике часто нагрузочные диаграммы представлены в виде зависимости момента статического сопротивления от времени *M(t)* (рис. 6.10). Эквивалентный момент может быть определен аналогично эквивалентному току. Если считать, что магнитный поток двигателя постоянный, то электромагнитный момент двигателя пропорционален току нагрузки.

Подставляя в выражение (6.28) вместо тока момент, получим выражение для эквивалентного момента:

$$M_{э} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}} . \qquad (6.33)$$

По выражению (6.33) проверяется выбранный двигатель по условию его нагрева; кроме того, двигатель следует проверить по перегрузочной способности. С этой целью по нагрузочной диаграмме определяют максимальный момент и сравнивают его с допустимым для данного двигателя. Должно выполняться условие:

$$M_{max} \le M_{н} \lambda_{M} . \qquad (6.34)$$

Если условие (6.34) не выполняется, то необходимо выбрать двигатель большой мощности, исходя из условий его перегрузочной способности. Проверка двигателя по нагреву в данном случае не требуется.

Метод эквивалентной мощности применим, если в процессе работы угловая скорость вращения вала постоянна и электрический двигатель работает длительное время без остановок. Такой режим работы характерен для приводов насосов, вентиляторов и компрессоров. При постоянной угловой скорости вращения мощность на валу двигателя пропорциональна его моменту. В этом случае, заменяя в выражении (6.33) момент мощностью, получим выражение для эквивалентной мощности:

$$P_{э} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\sum t_i}} . \qquad (6.35)$$

Из рассмотренных «эквивалентных» методов проверки выбранного двигателя по условиям нагрева наиболее точным является метод эквивалентного тока. Рассмотрим область применения каждого из приведенных выше методов проверки выбранного двигателя по условиям нагрева.

Метод последовательных приближений является самым общим и не имеет ограничений, но требует значительный объем исходных данных, отсутствующих в справочниках, и больших затрат времени на построение графиков нагрева двигателя. Метод средних потерь имеет то ограничение, что время цикла должно быть существенно меньше постоянной времени нагрева. При выводе выражения для эквивалентного тока считалось, что «постоянные» потери в двигателе (потери в стали и потери на трение) неизменны и сопротивление якоря постоянно. Следовательно, этот метод неприменим, когда следует учитывать изменение «постоянных» потерь и при выборе мощности короткозамкнутых асинхронных двигателей с двойной беличьей клеткой и глубоким пазом, т. к. их сопротивление зависит от частоты тока в роторе, которая значительно изменяется при пуске и торможении двигателя.

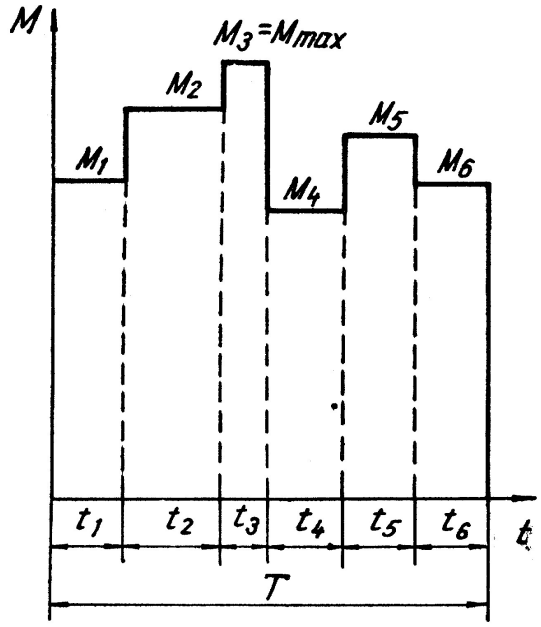


Рис. 6.10. Нагрузочная диаграмма привода при ступенчатом изменении нагрузки

На метод эквивалентного момента наложены те же ограничения, что и на метод эквивалентного тока. Кроме того, при выводе выражения для эквивалентного момента поток возбуждения двигателя считался постоянным, следовательно, этот метод неприменим для двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения, поток которых является функцией тока нагрузки. Все перечисленные выше ограничения относятся и к методу эквивалентной мощности. Кроме того, этот метод не может применяться для двигателей, угловая скорость вращения которых изменяется в процессе работы, особенно для часто запускаемых и останавливаемых приводов. Следует отметить, что для продолжительного режима работы применяются двигатели, предназначенные только для данного режима.

6.3. Выбор мощности электродвигателей при кратковременном режиме работы

По определению кратковременного режима нагрев двигателя при работе не успевает достичь установившегося значения, а в процессе охлаждения нагрев снижается до нуля. Ввиду этого при изучении нагрева двигателя вполне достаточно ограничиться только рабочей частью цикла, соответствующей работе привода.

На рис. 6.11 представлена упрощенная нагрузочная диаграмма рабочей машины при кратковременном режиме работы. Если для данного режима работы принять двигатель, предназначенный для продолжительного режима, и нагрузить его номинальной мощностью, равной $P_{í}$, то за время работы нагрев не успеет достичь установившегося значения $\tau_{äîï}$, и двигатель будет недоиспользован по нагреву (кривая *1* на рис. 6.11).

Для полного использования двигателя по нагреву и уменьшения вследствие этого его габаритов следует несколько перегрузить двигатель с тем, чтобы по

окончании времени работы его нагрев достиг допустимого значения, соответствующего классу нагревостойкости используемой изоляции обмоток двигателя. Величины механической и тепловой перегрузки двигателя характеризуются коэффициентами механической и термической перегрузки. При правильном выборе мощности двигателя его нагрев к концу рабочего периода $t_{ð}$ должен достичь значения $\tau_{äîï}$ (кривая *2* на рис. 6.11). В этом случае мощность двигателя будет меньше $P_{í}$, он будет перегружен механически, но по тепловому режиму перегружен не будет, поскольку его нагрев никогда не превысит допустимого значения.

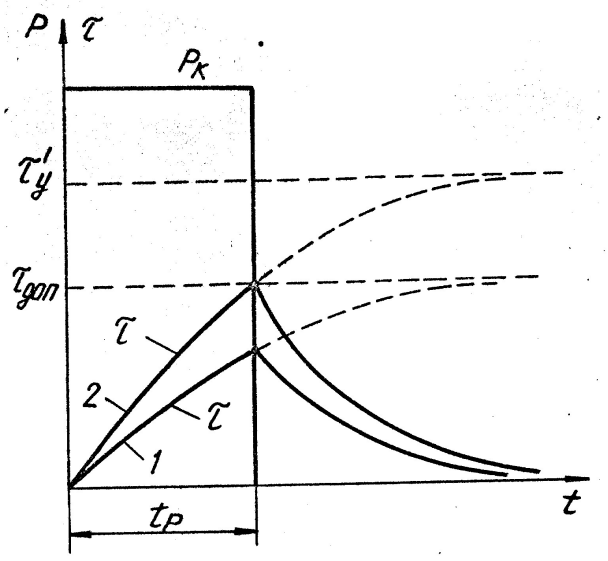


Рис 6.11. Нагрузочная диаграмма и график нагрева двигателя при кратковременном
режиме работы привода

Каждый раз нагрев двигателя начинается с нуля, и уравнение нагрева выглядит следующим образом:

$$\tau(t) = \tau'_{ó}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}\right), \qquad (6.36)$$

где $\tau'_{\text{ó}}$ – установившийся нагрев двигателя для продолжительной нагрузки, равной $P_{\text{í}}$.

В момент времени $t = t_{\text{ð}}$ нагрев должен достичь установившегося значения (условие полного использования двигателя по нагреву) $\tau(t_{\text{ð}}) = \tau_{\text{äîï}}$:

$$\tau_{\text{äîï}} = \tau'_{\text{ó}}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{í}}}}\right). \qquad (6.37)$$

Из выражения (6.37) получим отношение:

$$\frac{\tau'_{\text{ó}}}{\tau_{\text{äîï}}} = \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{í}}}}\right)^{-1}. \qquad (6.38)$$

Поскольку установившийся нагрев пропорционален потерям, то $\tau'_{\text{ó}} = \frac{Q_{\hat{\text{e}}}}{A}$; $\tau_{\text{äîï}} = \frac{Q_{\text{í}}}{A}$ и выражение (6.38) может быть представлено следующим образом:

$$p_{\text{ò}} = \frac{\tau'_{\text{ó}}}{\tau_{\text{äîï}}} = \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{í}}}}\right)^{-1}. \qquad (6.39)$$

где $p_{\text{ò}}$ – коэффициент термической перегрузки.

Номинальные потери в двигателе:

$$Q_{\text{í}} = k + \upsilon_{\text{í}}. \qquad (6.40)$$

Потери для кратковременной нагрузки:

$$Q_{\hat{\text{e}}} = k + \upsilon_{\hat{\text{e}}}. \qquad (6.41)$$

Если считать переменные потери пропорциональными квадрату мощности $\upsilon_{\hat{\text{e}}} = \upsilon_{\text{í}}\left(\frac{P_{\hat{\text{e}}}}{P_{\text{í}}}\right)^2$, то потери при кратковременной нагрузке равны:

$$Q_{\text{ê}} = k + \upsilon_{\text{í}} \left(\frac{P_{\text{ê}}}{P_{\text{í}}} \right)^2 . \qquad (6.42)$$

Подставляя (6.40) и (6.42) в (6.39), получим:

$$p_{\text{ò}} = \frac{k + \upsilon_{\text{í}} \left(\frac{P_{\text{ê}}}{P_{\text{í}}} \right)^2}{k + \upsilon_{\text{í}}} = \frac{a + p_{\text{ì}}^2}{a + 1}, \qquad (6.43)$$

где $p_{\text{ì}} = \frac{p_{\text{ê}}}{p_{\text{ì}}}$ – коэффициент механической перегрузки.

Из (6.43) определяют коэффициент механической перегрузки:

$$p_{\text{ì}} = \sqrt{(a+1)p_{\text{ò}} - a},$$

или с учетом выражения (6.39):

$$p_{\text{ì}} = \sqrt{\frac{(a+1)}{\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{ì}}}}\right)} - a} . \qquad (6.44)$$

Таким образом, для привода с нагрузочной диаграммой (см. рис. 6.11) мощность двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме, определяется из выражения

$$P_{\text{í}} \geq \frac{P_{\text{ê}}}{p_{\text{ì}}} . \qquad (6.45)$$

Выражение (6.44) показывает, насколько можно перегрузить двигатель, предназначенный для работы в длительном режиме, если его использовать в приводе с кратковременным режимом работы. Для кратковременного режима промышленность выпускает специальные двигатели различной мощности с номинальным временем работы $t_н$=10, 30, 60, 90 мин. Если время работы привода по нагрузочной диаграмме не совпадает с номинальным, то возникает необходимость перерасчета мощности с реального на номинальное время работы. Предположим, что время работы привода по нагрузочной

диаграмме равно 45 мин., а принимается двигатель с номинальным временем работы 60 мин. В этом случае мощность двигателя, выбранного по каталогу, может быть несколько ниже, чем мощность, определяемая по нагрузочной диаграмме. Коэффициент механической перегрузки определяется следующим образом. Нагрев двигателя при кратковременном режиме работы для реальной нагрузочной диаграммы протекает по выражению:

$$\tau(t) = \tau'_{\text{ó}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{í}}}}\right). \qquad (6.46)$$

Для правильно выбранного двигателя в момент времени $t_{\text{ð}}$ нагрев должен быть равным допустимому $\tau_{доп}$:

$$\tau\left(t_{\text{ð}}\right) = \tau_{\text{äîï}} = \tau'_{\text{ó}}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{í}}}}\right). \qquad (6.47)$$

Нагрев двигателя, работающего при номинальном кратковременном режиме, описывается уравнением:

$$\tau(t) = \tau_{\text{í}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{í}}}}\right), \qquad (6.48)$$

где $\tau_{\text{í}}$ – установившийся нагрев, соответствующий продолжительной нагрузке, равной $P_{\text{í}}$.

Для номинального времени работы нагрев двигателя, работающего в номинальном кратковременном режиме, соответствует допустимому значению $\tau_{\text{äîï}}$:

$$\tau\left(t_{\text{í}}\right) = \tau_{\text{äîï}} = \tau_{\text{í}}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{í}}}{T_{\text{í}}}}\right). \qquad (6.49)$$

Из выражений (6.47) и (6.49) определяется коэффициент термической перегрузки двигателя:

$$p_{\text{ò}} = \frac{\tau'_{\text{ó}}}{\tau_{\text{í}}} = \left(\frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{í}}}{T_{\text{í}}}}}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{í}}}}} \right). \qquad (6.50)$$

Тогда коэффициент механической перегрузки равен:

$$p_{\text{ì}} = \sqrt{\left(\frac{1 - e^{-\frac{t_{\text{í}}}{T_{\text{í}}}}}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ð}}}{T_{\text{í}}}}} \right)(a+1) - a}. \qquad (6.51)$$

Для двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы, $t_{\text{í}} = \infty$ и выражение (6.51) приводится к выражению (6.44).

Исходя из времени работы $t_{\text{ð}}$, определяемого по нагрузочной диаграмме, и принятого номинального времени работы $t_{\text{í}}$, по выражению (6.51) определяют коэффициент механической перегрузки и по каталогам выбирают подходящий двигатель, соответствующий условию (6.45).

6.4. Выбор мощности электродвигателей при повторно-кратковременном режиме работы

Нагрузочная диаграмма и нагрев двигателя при повторно-кратковременном режиме работы представлены на рис. 6.12. Как видно из этих графиков, за время работы нагрев двигателя не успевал достичь установившегося значения, а во время паузы не снижался до нуля; начальное и конечное значение нагрева для каждого цикла работы различное. Однако для достаточно удаленного цикла работы можно считать, что колебания нагрева при работе и остановках заключены в пределах от $\tau_{\text{í÷}}$ до $\tau_{\text{äîï}}$.

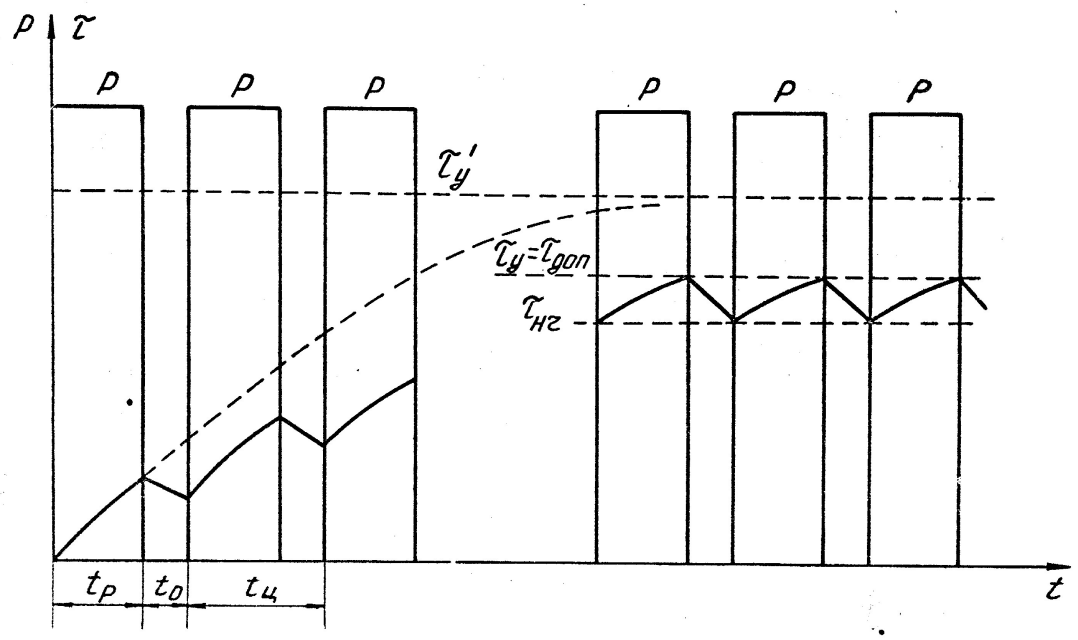


Рис. 6.12. Нагрузочная диаграмма и график нагрева двигателя при повторно-кратковременном режиме работы двигателя

Напишем уравнение нагрева при работе на достаточно удаленном цикле:

$$\tau(t) = \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T_н}} + \tau'_{уст}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_н}}\right). \qquad (6.52)$$

Начальный нагрев можно определить как нагрев в конце предыдущего цикла по уравнению охлаждения:

$$\tau(t) = \tau_{нач}\, e^{-\frac{t}{T_0}}, \qquad (6.53)$$

где T_0 – постоянная времени охлаждения.

За время, равное времени паузы $t = t_0$, нагрев достигнет начального (для последующего цикла) значения:

$$\tau_{нач} = \tau_{нач}\, e^{-\frac{t_0}{T_0}}. \qquad (6.54)$$

С учетом (6.54) выражение (6.52) принимает вид:

$$\tau(t) = \tau_{нач}\, e^{-\frac{t_0}{T_0}} e^{-\frac{t}{T_н}} + \tau'_{уст}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_н}}\right). \qquad (6.55)$$

Для правильно выбранного двигателя в конце рабочего периода при $t = t_ð$ нагрев достигает допустимого значения:

$$\tau_{äîï} = \tau_{äîï}\, e^{-\frac{t_o}{T_0}} e^{-\frac{t_ð}{T_í}} + \tau'_ó e\left(1 - e^{-\frac{t_ð}{T_í}}\right). \qquad (6.56)$$

Если считать постоянные времени нагрева и охлаждения одинаковыми, то выражение (6.56) можно привести к виду:

$$\tau_{äîï} = \tau_{äîï}\, e^{-\frac{(t_0 + t_ð)}{T_í}} - \tau'_ó\left(1 - e^{-\frac{t_ð}{T_í}}\right). \qquad (6.57)$$

Коэффициент термической перегрузки равен:

$$ð_ò = \frac{\tau'_ó}{\tau_{äîï}} = \left(\frac{1 - e^{-\frac{t_ö}{T_í}}}{1 - e^{-\frac{t_ð}{T_í}}}\right), \qquad (6.58)$$

где $t_ö = t_0 + t_ð$ – время цикла.

Существуют специальные двигатели, предназначенные для повторно-кратковременного режима работы; они характеризуются номинальной продолжительностью включения $ÏÂ_í$ или относительной продолжительностью включения ε:

$$\varepsilon = \frac{t_ð}{(t_0 + t_ð)} = \frac{t_ð}{t_ö}. \qquad (6.59)$$

Если реальное значение относительной продолжительности включения, определенное по нагрузочной диаграмме, не совпадает с номинальным, то возникает необходимость перерасчета мощности с реального на номинальное значение относительной продолжительности включения. Основой расчета является равенство эквивалентных потерь для реального и номинального режимов работы. Эквивалентные номинальные потери при повторно-кратковременном режиме работы:

$$\Delta P_{ýí} = \sqrt{\frac{\Delta P_í^2 t_{ðí}}{t_{ðí} + t_0}} = \sqrt{\Delta P_í^2 \varepsilon_í} \quad . \qquad (6.60)$$

Эквивалентные потери при повторно-кратковременном режиме работы, определенные для реальной нагрузочной диаграммы:

$$\Delta P_{ýïê} = \sqrt{\frac{\Delta P_{ïê}^2 t_ð}{t_{ðí} + t_0}} = \sqrt{\Delta P_{ïê}^2 \varepsilon_{ïê}} \quad . \qquad (6.61)$$

Приравнивая правые части выражений (6.60) и (6.61),получим

$$\Delta P_í^2 \varepsilon_í = \Delta P_{ïê}^2 \varepsilon_{ïê} \quad . \qquad (6.62)$$

Потери определяются по выражениям (6.40) и (6.42). После простых преобразований получим коэффициент механической перегрузки:

$$p_ì = \sqrt{(a+1)\frac{\varepsilon_í}{\varepsilon_{ïê}} - a} \quad . \qquad (6.63)$$

Если пренебречь постоянными потерями ($a = 0$), то выражение 6.63) принимает вид:

$$p_ì = \sqrt{\frac{\varepsilon_í}{\varepsilon_{âê}}} \quad . \qquad (6.64)$$

Промышленность выпускает двигатели с номинальной относительной продолжительностью включения $\varepsilon_í$ =0,15; 0,25; 0,4; 0,6. Эти двигатели обладают значительной перегрузочной способностью и повышенным пусковым моментом, что позволяет максимально и использовать их по условиям нагрева. После проверки двигателя по условиям нагрева необходимо проверить его на допустимую нагрузку и пусковой момент.

6.5. Диаграмма теплового режима двигателя

Температура окружающей среды может существенно отличаться от номинального значения (+40 °С). Особенно это относится к горячим цехам,

где температура окружающего воздуха постоянна и не подвержена сезонным колебаниям. Определение допустимой нагрузки двигателя при отклонении температуры окружающей среды от номинальной может быть выполнено на основе диаграммы теплового режима двигателя (рис. 6.13).

Диаграмма теплового режима для одной серии двигателей строится следующим образом. В осях координат $P / P_{í}$, Q строятся потери в двигателе в зависимости от нагрузки (левый квадрант рис. 6.13). В первом квадранте в осях координат ϑ, Q строится линейная зависимость потерь двигателя, отдаваемых в окружающую среду, от температуры нагрева двигателя. Эта прямая строится по двум точкам: $\vartheta_1 = +40^{\circ} C$, $Q = 0$ и $\vartheta_2 = \vartheta_{äîï}$, $Q = Q_{í}$, где $\vartheta_{äîï}$ – допустимая для данного класса нагревостойкость изоляции обмоток, $Q_{í}$ – номинальные потери в двигателе (прямая *ab).* На рис. 6.13 представлена диаграмма теплового режима двигателя с классом нагревостойкости изоляции обмоток E с предельно допустимой температурой обмоток 120 °С.

При изменении температуры окружающей среды изменяется количество тепла, отдаваемого двигателем; прямая, характеризующая рассеиваемое тепло, пойдет параллельно линии *ab* из точки, расположенной на оси температур и соответствующей значению температуры среды.

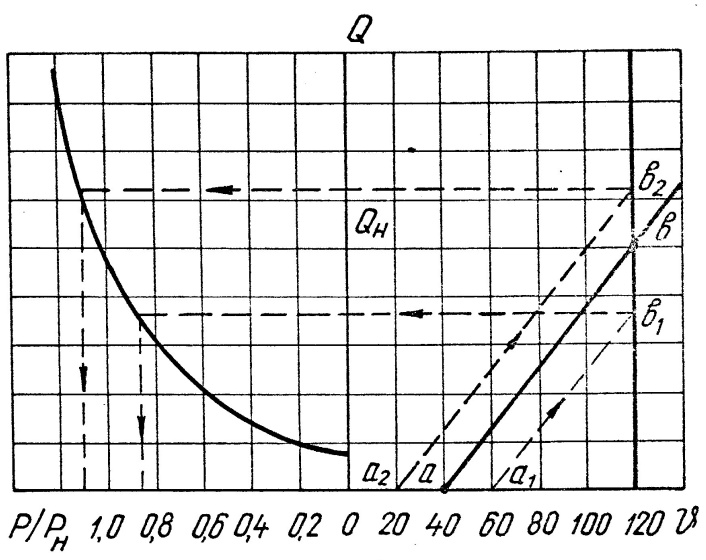


Рис. 6.13. Универсальная диаграмма теплового режима двигателя

Пересечение новой прямой с вертикалью, соответствующей допустимой температуре нагрева изоляции обмоток двигателя, определяет величину потерь и допустимой нагрузки двигателя. Например, при температуре окружающей среды +60 °С (прямая a_1b_1) допустимая нагрузка двигателя составляет 0,85 от номинальной. Если же температура окружающей среды составляет +20 °С, то двигатель может быть несколько перегружен; рассеиваемое тепло определяется линией a_2b_2. Допустимая температура нагрева обмоток достигается при нагрузке двигателя 1,1 от номинальной величины. Из диаграммы теплового режима двигателя следует, что даже незначительное превышение температуры окружающей среды существенно снижает допустимую нагрузку двигателя.

6.6. Определение допустимого числа включений для короткозамкнутых двигателей

Приводы значительного числа механизмов металлообрабатывающей и горной промышленности требуют большого числа включений. К ним

относятся металлообрабатывающие станки, механизм свинчивания - развинчивания бурового става и т. д. В этом случае имеют место значительные потери в двигателе за счет переходных процессов при пуске и торможении привода, которые значительно превосходят потери в установившемся режиме работы. В связи с этим возникает задача определения допустимого числа включения в час $z_{äîï}$. Этот показатель особенно важен для асинхронных короткозамкнутых двигателей, так как в этом случае все потери энергии выделяются в самой машине, тогда как для асинхронных двигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока потери рассеиваются в пусковых и тормозных сопротивлениях. Для асинхронных короткозамкнутых двигателей с большим числом включений в час методы эквивалентных величин не дают правильных результатов; в этом случае необходимо применять метод, основанный на непосредственном учете потерь, возникающих в двигателе при пуске, установившемся режиме работы и торможении.

Обычно предварительно выбранный двигатель проверяется на допустимое число включений в час. Для этого необходимо знать потери энергии на каждом участке работы двигателя и коэффициент ухудшения теплоотдачи при пуске, торможении и остановке асинхронного короткозамкнутого двигателя с самовентиляцией. Рабочий цикл состоит из периода пуска, работы с установившейся скоростью вращения, торможения и паузы, когда двигатель отключен от сети.

Под допустимым числом включений электродвигателя в час $z_{äîï}$ понимают такое число включений, при котором средняя температура после большого числа рабочих циклов будет равна предельно допустимой для данного класса изоляции.

Приближенно допустимое число включений в час равно:

$$z_{\text{äîï}} = 3600 \frac{\Delta p_{\text{í}} \beta_0 (1-\varepsilon) + \Delta P_{\text{í}} \varepsilon \left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{í}}}\right)}{(\Delta A_{\text{ï}} + \Delta A_{\text{ò}})}, \qquad (6.65)$$

где $\Delta P_{\text{í}}$ – потери в двигателе при номинальной нагрузке;

β_0 – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном вале двигателя;

ε – относительная продолжительность включения;

ΔP – реальные потери в двигателе при установившемся режиме работы;

$\Delta A_{\text{ï}}$ – потери энергии при пуске двигателя;

$\Delta A_{\text{ò}}$ – потери энергии при торможении двигателя.

Если в установившемся режиме двигатель работает с номинальной нагрузкой ($\Delta P = \Delta P_{\text{í}}$), то выражение (6.65) упрощается:

$$z_{\text{äîï}} = 3600 \frac{\Delta P_{\text{í}} \beta_{\text{í}} (1-\varepsilon)}{\Delta A_{\text{ï}} + \Delta A_{\text{ò}}}. \qquad (6.66)$$

Если двигатель выбран правильно по допустимому числу включений в час, то должно выполняться условие:

$$z_{\text{äîï}} \geq z; \qquad (6.67)$$

где z – действительное число включений в час, определяемое по нагрузочной диаграмме привода.

Если указанное условие не выполняется, то следует принять более мощный двигатель и вновь проверить его по допустимому числу включений в час.

Контрольные вопросы

1. Перечислить тепловые режимы работы электродвигателей.
2. Дать определение постоянной времени нагрева.
3. Что такое «эквивалентный ток»?

4. Назвать методы выбора мощности электрического двигателя для продолжительного режима работы.

5. Какой фактор определяет допустимую нагрузку двигателя?

6. Написать уравнение теплового баланса, объяснить физическую сущность входящих в это уравнение параметров и перечислить условия, при которых оно справедливо.

Список использованной литературы

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. М.: Государственное энергетическое издательство, 1963 г., 772с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982 г., 392 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоиздат, 1985 г., 560 с.
4. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990 г., 302 с.
5. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1986 г., 414 с.
6. Хализев Г.П. Электрический привод. М.: Высшая школа, 1977 г., 256с.
7. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. М.:Энергия, 1971 г., 432 с.
8. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981 г., 576 с.
9. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода М.: Энергия, 1974 г., 566 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Б1.О.28 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Форма обучения: очная, заочная, очно-заочная

Автор: Стариков В. С., доцент, канд. техн. наук.

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Электрификации горных предприятий	Горно-механический
(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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……...3

1. Указания по выполнению контрольной работы…….3

2. Учебно-методическое обеспечение дисциплины……4

Приложения:

Схема электроснабжения карьера…….6

Варианты заданий к контрольной работе……6

ВВЕДЕНИЕ

Цель дисциплины: получение базовых знаний для дальнейшего освоения дисциплин специального курса; формирование у студентов необходимых знаний и умений по современному электрическому приводу, что позволит им успешно решать теоретические и практические задачи в их профессиональной деятельности.

Целью методических рекомендаций является повышение эффективности процесса обучения по основной образовательной программе путем правильной организации и выполнения контрольной работы.

Контрольная работа предназначена для выработки умения дать лаконичный аргументированный полный ответ на вопрос изучаемого курса, снабженный выводами. Написание ее требует самостоятельности и ответственного отношения, способности работать с литературой по проблеме, знаний истории и теории вопроса, основных теоретических положений. Объем работы не должен превышать 8-10 страниц печатного или рукописного текста, и содержать титульный лист, основную часть работы, список использованной литературы.

1. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа предназначена для закрепления теоретического материла, приобретения навыков выполнения электротехнических расчетов и пользования справочной специализированной литературой.

Контрольная работа выполняется студентами по вариантам исходных данных, которые задаются преподавателем каждому студенту индивидуально. Исходные данные по вариантам заданий соответствуют схеме электроснабжения карьера (рис. 1) и приведены в табл.1 Приложения к настоящим методическим указаниям.

Контрольная работа выполняется на белой бумаге формата А4 с применением персонального компьютера шрифтом Times New Roman (размер шрифта 14, межстрочный интервал 1,5). В исключительных случаях допускается представить контрольную работу, выполненную аккуратно в ученической тетради рукописным образом. Выполненная контрольная работа должна быть сдана на кафедру ЭГП и зарегистрирована не позднее дня проведения предэкзаменационной консультации.

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться следующих общих требований:

- ✓ принятые решения должны иметь обоснования, сопровождаемые соответствующими расчетами и пояснениями;
- ✓ при выборе электрооборудования необходимо приводить его основные технические характеристики;
- ✓ схемы должны изображаться в условных графических обозначениях, предусмотренных действующими ГОСТ;
- ✓ работа выполняется с оставлением полей шириной 3 см для замечаний преподавателя.

При выполнении контрольной работы необходимо решить следующее:

1. выполнить расчет электрических нагрузок по карьеру;
2. выбрать, при необходимости, средства компенсации реактивной мощности;
3. определить количество и мощность силовых трансформаторов на главной понижающей подстанции (ГПП);
4. определить мощность и выбрать ПКТП для ламп ДКсТ и для буровых станков;
5. выполнить расчет воздушных и кабельных ЛЭП карьера;
6. произвести расчет защитного заземления электроустановок карьера.

Расчет электрических нагрузок рекомендуется проводить по установленной мощности и коэффициенту спроса. Результаты расчетов следует представить в виде таблицы – формуляра электрических нагрузок. При составлении формуляра электрических нагрузок все электроприемники карьера независимо от их напряжения следует сгруппировать по отдельным воздушным ЛЭП (ВЛ-1, ВЛ-2, ВЛ-3).

Для выбора средств компенсации реактивной мощности необходимо, прежде всего, определить величину средневзвешенного коэффициента мощности по карьеру. В зависимости от соотношения между расчетным значением и нормированным значением коэффициента реактивной мощности принимается решение о необходимости применения искусственной компенсации реактивной мощности. Методика выбора компенсирующих устройств изложена в [4].

Выбор числа и мощности трансформаторов на ГПП карьеров производится, исходя и расчетной нагрузки и категории электроприемников. При наличии на карьере электроприемников I и II категорий на ГПП устанавливается, как правило, не менее двух силовых трансформаторов, что необходимо для резервирования питания. Трансформаторы принимаются, как правило, одинаковой мощности, которая определяется с учетом их перегрузочной способности и требований по резервированию [4]. По величине расчетной мощности с помощью справочной литературы, указанной в [4], выбираются соответствующие трансформаторы.

При определении мощности силового трансформатора ПКТП для питания лампы ДКсТ следует учитывать его несимметричную работу. Расчетная мощность может быть определена по соответствующим выражениям, приведенным в [4].

Мощность силового трансформатора ПКТП для питания бурового станка определяется по суммарной установленной мощности электроприемников бурового станка с учетом группового коэффициента спроса, величина которого зависит от количества электроприемников в группе и может быть определена по соответствующим выражениям, приведенным в [4].Выбранный трансформатор для ПКТП бурового станка должен быть проверен по условию прямого пуска наиболее мощного в группе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

При расчете воздушных и кабельных ЛЭП карьера необходимо выбрать марку и сечение проводов воздушных ЛЭП (ВЛ-1, ВЛ-2, ВЛ-3), марку и сечение токоведущих жил кабелей для питания экскаваторов и буровых станков. При расчете воздушных ЛЭП следует учитывать, что ВЛ-1 является стационарной, а ВЛ-2 и ВЛ-3 являются передвижными. Гибкие кабели горных машин карьеров относятся к временным ЛЭП. Применяемые методы расчета воздушных и кабельных ЛЭП карьеров приведены в [4].

При расчете защитного заземления электроустановок карьера необходимо определить тип и количество электродов центрального заземлителя и сечение заземляющих проводников. Расчет производится для наиболее удаленного от центрального заземлителя электроприемника карьера. Центральный заземлитель сооружается, как правило, на борту карьера вблизи от ГПП. Методика расчета защитного заземления электроустановок карьеров изложена в [4].

На основании проведенных расчетов необходимо изобразить схему электроснабжения карьера с указанием на ней типов электрооборудования, марок воздушных и кабельных ЛЭП.

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Чеботаев Н. И. Электрооборудование и электроснабжение открытых горных работ: Учебник для вузов. – М.: Изд-во «Горная книга», 2006. – 474 с.

2. Электрификация горного производства: Учебник для вузов: В 2 т. / Под ред. Л. А. Пучкова и Г. Г. Пивняка. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2007. – Т.1. – 511 с.

3. Электропривод и электрификация приисков: Учебник для вузов / Г. А. Багаутинов, Ю. А. Марков, А. П. Маругин, В. С. Стариков. – М.: Недра, 1989. – 303 с.

4. Стариков В. С. Электроснабжение карьера (прииска): Учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 27 с.

5. Бекетов В. Ф. Методические разработки по лабораторным работам по электрооборудованию для студентов неэлектрических специальностей. Часть 2. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000.

ПРИЛОЖЕНИЯ

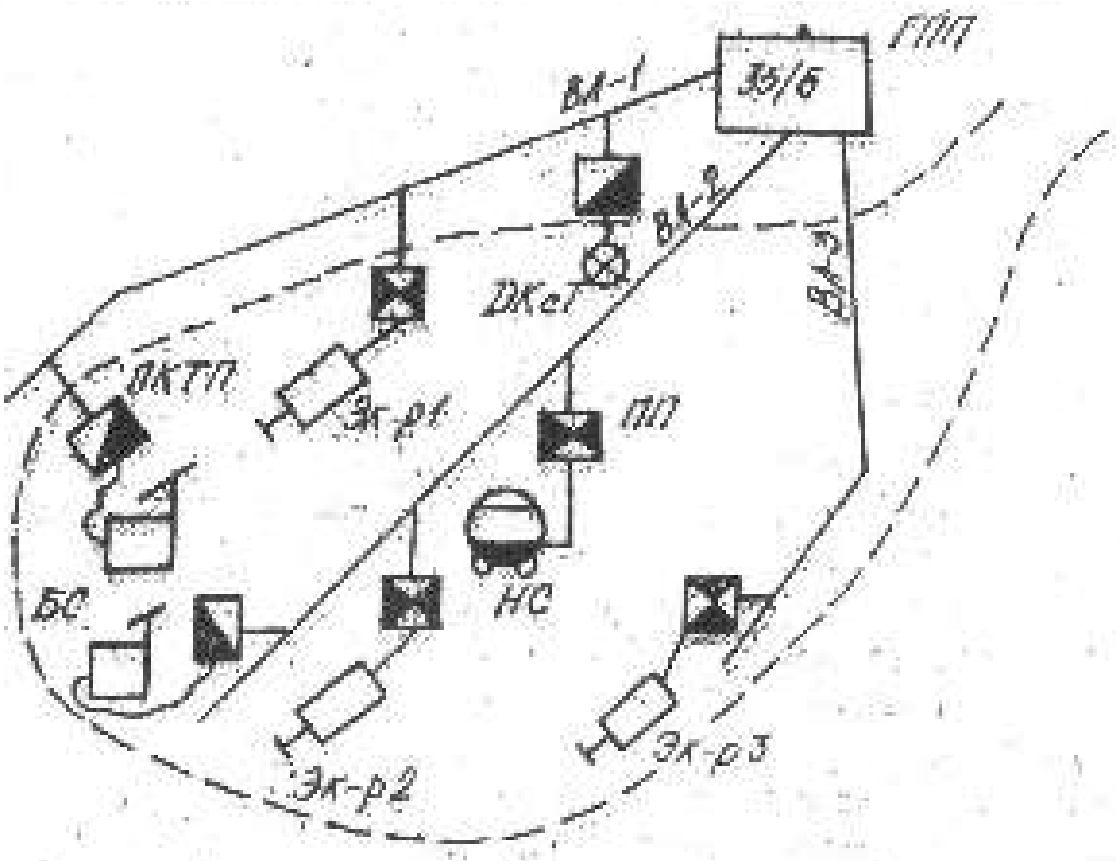


Рис. 1. Схема электроснабжения карьера

Варианты заданий к контрольной работе

Таблица 1

№ варианта	Тип экскаватора			Тип бур. станка (БС)	Мощность дв-ля насоса (НС), кВт	Мощность лампы ДКсТ, кВТ	Протяженность ВЛ, км		
	Эк-р 1	Эк-р 2	Эк-р 3				ВЛ-1	ВЛ-2	ВЛ-3
1	ЭКГ-8У	ЭКГ-8Н	ЭКГ-8Н	СБШ-250МН	500	20	0,8	1,8	1,5
2	ЭКГ-5У	ЭКГ-12	ЭКГ-12	СБШ-250МН	350	20	1,0	1,6	1,4
3	ЭКГ-5А	ЭКГ-12	ЭКГ-12	2СБШ-200	140	50	1,6	2,0	1,8
4	ЭКГ-8Н	ЭКГ-10	ЭКГ-8,3	СБШ-250	800	50	1,8	2,0	1,4
5	ЭКГ-10	ЭКГ-12У	ЭКГ-10	2СБШ-200	500	20	1,4	1,6	1,2

6	ЭКГ-12Ус	ЭКГ-5А	ЭКГ-5А	СБУ-160	350	20	2,0	1,8	1,6
7	ЭКГ-8У	ЭКГ-8Н	ЭКГ-8Н	СБО-2	200	100	1,8	1,6	1,4
8	ЭКГ-5У	ЭКГ-12	ЭКГ-12	СБШ-250	500	50	0,5	1,0	0,8
9	ЭКГ-8,3	ЭКГ-8Н	ЭКГ-8Н	2СБШ-200Н	350	20	0,6	0,8	1,2
10	ЭКГ-8Н	ЭКГ-5А	ЭКГ-5А	СВБ-2М	140	20	0,4	0,6	0,8
11	ЭКГ-12Ус	ЭКГ-8Н	ЭКГ-12	СБШ-250МН	500	50	1,0	1,2	0,8
12	ЭКГ-8У	ЭКГ-8Н	ЭКГ-8Н	2СБШ-200	800	100	0,8	1,0	1,4
13	ЭКГ-15	ЭКГ-10	ЭКГ-10	СБШ-320	500	20	1,6	1,6	1,2
14	ЭКГ-8У	ЭКГ-8Н	ЭКГ-10	СБР-160	300	50	2,0	2,0	1,8
15	ЭКГ-8Н	ЭКГ-10	ЭКГ-12	СБШ-250 МН	800	100	1,0	1,2	1,4
16	ЭКГ-10	ЭКГ-8И	ЭКГ-8И	СБШ-250	200	20	1,2	1,4	1,4
17	ЭКГ-12У	ЭКГ-10	ЭКГ-10	2СБШ-200	500	50	1,6	1,6	1,2
18	ЭКГ-5У	ЭКГ-5А	ЭКГ-5А	СБР-160	800	20	1,0	1,2	1,4
19	ЭКГ-15	ЭКГ-8Н	ЭКГ-8Н	2СБШ-200	800	20	1,5	1,7	1,6
20	ЭКГ-10	ЭКГ-12	ЭКГ-12	СБШ-320	500	50	0,8	1,0	1,2
21	ЭКГ-4,6Б	ЭКГ-8И	ЭКГ12,5	СБШ-250МН	500	20	1,8	2,0	1,4
22	ЭВГ-6	ЭКГ-8	ЭКГ-12,5	СБШ-250МН	350	20	1,8	1,6	1,4
23	ЭВГ-15	ЭКГ-12,5	ЭКГ-12,5	СБШ-320	140	50	1,4	1,6	1,2
24	ЭКГ-8	ЭКГ-8	ЭКГ-10	СБШ-250	800	50	0,6	0,8	1,2
25	ЭКГ-8И	ЭКГ-10	ЭКГ-12,5	2СБШ-200	500	20	1,2	1,4	1,4
26	ЭШ-6/60	ЭКГ-5А	ЭКГ-5А	СБО-2	200	20	1,0	1,2	0,8
27	ЭШ-10/60А	ЭКГ-8	ЭКГ-8	2СБШ-200	500	50	0,80	1,0	1,4
28	ЭШ-10/70	ЭКГ-12,5	ЭКГ-12,5	СБР-160	800	20	0,6	0,8	1,2
29	ЭШ-14/75	ЭКГ-8И	ЭКГ-8И	2СБШ-200	400	50	1,0	1,2	1,4
30	ЭШ-15/90А	ЭКГ-4,6Б	ЭКГ-4,6Б	СБШ-320	500	50	1,5	1,7	1,6

Примечания: 1) длину экскаваторного кабеля принять 250 м;
2) длину кабеля для бурового станка принять 120 м.

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.28 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Форма обучения: ***очная, заочная, очно-заочная***

год набора: 2025

Автор: Трапезников В. Т., старший преподаватель

Одобрены на заседании кафедры

Электрификации горных предприятий
(название кафедры)

Зав. кафедрой _____
(подпись)

Садовников М. Е.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 18.09.2024
(Дата)

Рассмотрены методической комиссией факультета

Горно-механический
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)

Осипов П. А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

КОМПЛЕКТ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

Темы № 1, 3, 6, 7, 8

Основные понятия

1. Электропривод состоит из таких основных частей, как…

а. силовая часть и система управление
б. механическая и динамическая
в. система регулирования
г. система устойчивости

2. Многодвигательный электропривод - это…

а. электропривод, который состоит из нескольких одиночных электроприводов, каждый из которых предназначен для приведения в действие отдельных элементов производственного агрегата
б. электропривод, который с помощью одного электродвигателя приводит в движение отдельную машину
в. трансмиссионный электропривод
г. электропривод, который служат для регулирования скорости

3. Экономичность регулируемого привода характеризуется…

а. затратами на его сооружения и эксплуатацию
б. затратами на его транспортировку
в. затратами на дополнительные приборы
г. не имеет никакие затраты

4. Плавность регулирования характеризуется…

а. числом устойчивых скоростей
б. числом устойчивых моментов
в. числом устойчивых сил
г. устойчивостью по всем характеристикам

5. Диапазон регулирования зависит от…

а. от нагрузки
б. от внешних сил
в. от внутренних сил
г. от скорости момента

Регулирование координат электропривода

1. Механическая характеристика производственного механизма связывает…

а. ускорение и момент сопротивления
б. угловую скорость и момент сопротивления
в. механическую и электрическую мощность
г. ускорение и угловую скорость

2. Подъёмные механизмы имеют механическую характеристику…

а. не зависящую от скорости

б. линейно – возрастающую
в. нелинейно – возрастающую
г. нелинейно – падающую

3. Вентиляторы и насосы имеют механическую характеристику…
а. не зависящую от скорости
б. линейно – возрастающую
в. нелинейно – возрастающую
г. нелинейно – падающую

4. Металлообрабатывающие станки имеют характеристику…
а. не зависящую от скорости
б. линейно – возрастающую
в. нелинейно – возрастающую
г. нелинейно – падающую

Электроприводы с синхронными двигателями

1. Для асинхронного двигателя не приемлем следующий вид электрического торможения…
а. сверхсинхронное
б. динамическое
в. переменное
г. торможение противовключением

2. Режим сверхсинхронного торможения у асинхронных двигателей возникает…
а. при скорости ниже синхронной
б. при номинальной скорости
в. при нулевой скорости
г. при скорости выше синхронной

3. Режим сверхсинхронного торможения ещё называют…
а. рекуперативным
б. повышенным
в. скоростным
г. обратным

4. В режиме сверхсинхронного торможения ЭДС двигателя…
а. меньше напряжения сети
б. больше напряжения сети
в. равно напряжению сети
г. равно 0

Взаимосвязанный электропривод

1. В критерии регулирования скорости в электроприводах не входит…
а. диапазон
б. плавность
в. стабильность

г. резкость

2. Диапазон регулирования скорости в электроприводах определяется отношением максимальной скорости вращения двигателя…
а. к минимальной
б. к средней
в. к номинальной
г. к текущей

3. Плавность регулирования скорости в электроприводах характеризуется…
а. отношение максимальной скорости к минимальной
б. количеством ступеней скорости внутри диапазона регулирования
в. стабильностью работы системы при изменении нагрузки
г. диапазоном регулирования напряжения сети

4. Коэффициент плавности регулирования скорости в электроприводах определяется как…
а. разница между синхронной скоростью двигателя и скоростью ротора
б. отношение момента нагрузки к моменту двигателя
в. отношение двух соседних значений скоростей
г. разница между двумя соседними скоростями

Энергетика электропривода

1. Наибольшая допустимая температура нагрева двигателя ограничивается…
а. температурой плавления обмоток
б. термической стойкостью его изоляции
в. механической стойкостью подшипников
г. уставкой тепловой отсечки теплового реле

2. Нагрев двигателя обусловлен рядом факторов, в которые не входит…
а. потери энергии в обмотках статора и ротора
б. потери на гистерезис и вихревые токи
в. потери электроэнергии в проводах питающей линии
г. трение в подшипниках

3. Повышение температуры электродвигателя продолжается до тех пор, пока…
а. электродвигатель включен в сеть электропитания
б. электродвигатель не достигнет скорости холостого хода
в. количество теплоты, отдаваемое поверхностью электродвигателя, не станет равным количеству теплоты, выделяемому электродвигателем
г. механическая мощность электродвигателя не станет равной электрической мощности, потребляемой из сети

4. Предельно допустимое превышение температура обмотки двигателя над температурой окружающей среды определяется разностью между предельно допустимой температурой изоляции двигателя и стандартной температурой окружающей среды, которая равна…
а. 20 ^{o}C
б. 24 ^{o}C

в. 30 °С
г. 40 °С

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПРОСА

1. Что такое механическая характеристика электропривода?
2. Написать выражение для электромагнитного момента двигателя постоянного тока?
3. Дать определение двигательного и тормозного режимов работы электродвигателя?
4. Чему равен момент да валу двигателя при работе в двигательном и тормозном режимах работы?
5. Дать определение естественной и искусственной механической характеристик электродвигателя?
6. Что такое жесткость механической характеристики? Классификация механических характеристик электрических двигателей по жесткости.
7. Назвать разновидности электропривода по этапам его развития.
8. Что такое совместная механическая характеристика электродвигателя и производственного механизма?
9. Дать определение статической устойчивости привода. Критерий статической устойчивости.
10. В чем принципиальное отличие активного момента статического сопротивления от реактивного. Привести примеры из практики.
11. Написать уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
12. Определить сопротивление якоря двигателя параллельного возбуждения по паспортным данным.
13. Что такое номинальное сопротивление двигателя постоянного тока?
14. Объяснить способ получения генераторного торможения для двигателя параллельного возбуждения.
15. Дать определение режима противовключения и перечислить способы его получения.
16. Достоинства и недостатки торможений противовключением.
17. Определить коэффициент жесткости механической характеристики двигателя параллельного возбуждения.
18. Перечислить параметры, влияющие на график механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
19. Показать на графике механической характеристики, что произойдет при уменьшении потока возбуждения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
20. Как влияет введение дополнительного сопротивления на скорость вращения в генераторном режиме работы с отдачей энергии в сеть при постоянном моменте статического сопротивления?
21. Написать уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении.
22. Показать на графике переход их двигательного режима в режим динамического торможения.
23. Построить механическую характеристику двигателя постоянного тока независимого возбуждения с номинальным сопротивлением цепи якоря.

24. Изложить методику графического способа определения сопротивлений пускового реостата.

25. Начертить Г-образную схему замещения трехфазного асинхронного двигателя.

26. Написать выражения для критического скольжения и критического момента асинхронного двигателя.

27. Определить по паспортным данным номинальное сопротивление ротора.

28. Перечислить способы пуска асинхронного двигателя.

29. Изложить методику построения естественной характеристики асинхронного двигателя по паспортным данным.

30. От чего зависит критическое скольжение асинхронного двигателя?

31. Перечислить тормозные режимы асинхронного двигателя.

32. Почему в режиме идеального холостого хода асинхронного двигателя ток статора не равен нулю?

33. С какой целью в цепь ротора асинхронного двигателя включают активное сопротивление?

34. Перечислить преимущества и недостатки трехфазного асинхронного двигателя перед двигателем постоянного тока.

35. На сколько изменится критический момент асинхронного двигателя при снижении напряжения сети на 10 %?

36. Перечислит способы регулирования скорости асинхронного двигателя.

37. Достоинства и недостатки системы генератор-двигатель.

38. Перечислить способы регулирования скорости по системе генератор-двигатель.

39. Написать уравнение механической характеристики двигателя в системе генератор-двигатель.

40. Почему жесткость механической характеристики двигателя в системе генератор-двигатель меньше жесткости механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, питаемого от сети.

41. Начертить семейство механических характеристик системы генератор-двигатель для двух зон регулирования скорости.

42. Что называется характеристикой холостого хода генератора?

43. Определить номинальный коэффициент полезного действия системы генератор-двигатель.

44. Перечислить достоинства синхронного двигателя.

45. Начертить механическую характеристику синхронного двигателя.

46. Что такое угловая характеристика синхронного двигателя?

47. Написать зависимость перегрузочной способности синхронного двигателя от угла между напряжением и ЭДС отмотки статора.

48. Начертить пусковую характеристику синхронного двигателя.

49. Перечислить способы пуска синхронного двигателя.

50. Какие тормозные режимы применяются для остановки синхронного двигателя?

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

дисциплина **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

I. Основы электропривода

1. Электропривод состоит из таких основных частей, как…

а. силовая часть и система управление

б. механическая и динамическая

в. система регулирования
г. система устойчивости

2. Многодвигательный электропривод - это…
а. электропривод, который состоит из нескольких одиночных электроприводов, каждый из которых предназначен для приведения в действие отдельных элементов производственного агрегата
б. электропривод, который с помощью одного электродвигателя приводит в движение отдельную машину
в. трансмиссионный электропривод
г. электропривод, который служат для регулирования скорости

3. Динамическое торможение ещё называется…
а. реостатное
а. торможение, связанное со скоростью
а. торможение, связанное с пусковым моментом
а. кинематическое торможение

4. Экономичность регулируемого привода характеризуется…
а. затратами на его сооружения и эксплуатацию
б. затратами на его транспортировку
в. затратами на дополнительные приборы
г. не имеет никакие затраты

5. Плавность регулирования характеризуется…
а. числом устойчивых скоростей
б. числом устойчивых моментов
в. числом устойчивых сил
г. устойчивостью по всем характеристикам

6. Диапазон регулирования зависит от…
а. от нагрузки
б. от внешних сил
в. от внутренних сил
г. от скорости момента

7. Количество тепла обозначается…
а. Q
б. P
в. A
г. I

8. Активные моменты могут быть как движущими и …
а. тормозными
б. вращающими
в. ускорительными
г. не подвижными

9. Реактивные моменты всегда направлены…
а. против движение
б. перпендикулярно
в. не имеют направления
г. могут иметь любое направление

10. Электродвигатель предназначен для…
а. преобразования механической энергии в электрическую
б. изменения параметров электрической энергии
в. преобразования электрической энергии в механическую
г. повышения коэффициента мощности линий электропередачи

11. В электроприводах используют двигатели…
а. только постоянного тока
б. только переменного тока
в. постоянного и переменного тока
г. внутреннего сгорания

12. Преобразователь в электроприводе предназначен для…
а. преобразования электрической энергии в механическую
б. преобразования параметров электрической энергии (тока, напряжения, частоты)
в. преобразования механической энергии в механическую
г. преобразования механической энергии в электрическую

13. В качестве преобразователя в электроприводах используют…
а. автотрансформаторы
б. частотные преобразователи
в. тиристорные преобразователи напряжения
г. все выше перечисленные ответы

14. Управляющему устройству электропривода не свойственна следующая функция…
а. включение и выключение электропривода
а. реверсирование электропривода
а. регулирование скорости электропривода
*а. передача механической энергии рабочей машине

15. Передаточное устройство предназначено для…
а. передачи механической энергии от электродвигательного устройства к исполнительным органам рабочей машины
б. передачи сигналов обратной связи
в. передачи электрической энергии к электродвигателю
г. передачи электрической энергии к управляющему устройству

II. Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей

1. Механическая характеристика производственного механизма связывает…
а. ускорение и момент сопротивления
б. угловую скорость и момент сопротивления
в. механическую и электрическую мощность
г. ускорение и угловую скорость

2. Подъёмные механизмы имеют механическую характеристику…
а. не зависящую от скорости
б. линейно – возрастающую
в. нелинейно – возрастающую
г. нелинейно – падающую

3. Вентиляторы и насосы имеют механическую характеристику…
а. не зависящую от скорости
б. линейно – возрастающую
в. нелинейно – возрастающую
г. нелинейно – падающую

4. Металлообрабатывающие станки имеют характеристику…
а. не зависящую от скорости
б. линейно – возрастающую
в. нелинейно – возрастающую
г. нелинейно – падающую

5. Для выбора рационального электропривода необходимо знать…
а. механическую характеристику рабочей машины
б. механическую характеристику электродвигателя
в. механическую характеристику рабочей машины и электродвигателя
г. нагрузочную характеристику рабочей машины

6. Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость между…
а. вращающим моментом электродвигателя и его угловой скоростью
б. моментом сопротивления и угловой скоростью
в. механической и электрической мощностью
г. вращающим моментом электродвигателя и моментом сопротивления

7. У всех электродвигателей скорость является…
а. возрастающей функцией момента двигателя
б. убывающей функцией момента двигателя
в. независящей от момента двигателя
г. нет правильного ответа

8. Величина определяемая, как отношение разности моментов, развиваемых электродвигателем, к соответствующей разности угловых скоростей называется…
а. твёрдость механической характеристики
б. прочность механической характеристики
в. мягкость механической характеристики
г. жёсткость механической характеристики

9. Механическая характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной ($\beta=\infty$) называется…
а. абсолютно жёсткая
б. жесткая
в. мягкая
г. абсолютно мягкая

10. Механическая характеристика с коэффициентом жесткости $\beta = 40$ - называется…
а. абсолютно жёсткая
б. жесткая
в. мягкая
г. абсолютно мягкая

11. Механическая характеристика с коэффициентом жесткости $\beta \leq 10$ называется…
а. абсолютно жёсткая
б. жесткая
в. мягкая
г. абсолютно мягкая

12. Синхронные электродвигатели обладают…
а. абсолютно жёсткой механической характеристикой

б. жесткой механической характеристикой
в. мягкой механической характеристикой
г. абсолютно мягкой механической характеристикой

13. Асинхронные двигатели в рабочей части механической характеристики обладают…
а. абсолютно жёсткой механической характеристикой
б. жесткой механической характеристикой
в. мягкой механической характеристикой
г. абсолютно мягкой механической характеристикой

14. Согласно уравнению движения электропривода вращающий момент электродвигателя уравновешивается…
а. динамическим моментом
б. моментом сопротивления и моментом сил трения
в. моментом сопротивления и динамическим моментом
г. моментом сопротивления

15. Момент, развиваемый электродвигателем, принимается положительным, если он направлен…
а. в сторону движения электропривода
б. в сторону, обратную движению электропривода
в. по оси вращения ротора электродвигателя
г. по касательной к окружности, описываемой ротором электродвигателя

16. Если момент электродвигателя больше момента сопротивления рабочей машины, то имеет место…
а. замедление электропривода
б. ускорение электропривода
в. работа в установившемся режиме
г. реверсирование электропривода

III. Характеристики и режимы работы двигателей постоянного тока

1. При установившимся режиме работы двигателя постоянного тока приложенное напряжение U уравновешивается…
а. падением напряжения в якорной цепи и ЭДС, наведённым в обмотке возбуждения
б. только падением напряжения в якорной цепи
в. ЭДС, наведенной в якоре в процессе его вращения
г. падением напряжения в якорной цепи и ЭДС, наведенной в якоре в процессе его вращения

2. Электромеханической характеристикой электродвигателя постоянного тока называется…
а. зависимость тока статора от скорости двигателя
б. зависимость тока якоря от скорости двигателя
в. зависимость тока статора от тока ротора
г. зависимость скорости двигателя от момента вращения

3. Характеристики электродвигателя, полученные при номинальных параметрах электродвигателя и отсутствии в его цепях добавочных сопротивлений, называются…
а. искусственными
б. естественными
в. физическими
г. параметрическими

4. Искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока можно получить за счет изменения…
а. только напряжения питающей сети U и магнитного потока возбуждения Ф
б. только напряжения питающей сети U и включения добавочного сопротивления R в цепь якоря двигателя
в. только магнитного потока возбуждения Ф и путем включения добавочного сопротивления R в цепь якоря двигателя
г. напряжения питающей сети U, магнитного потока возбуждения Ф и путем включения добавочного сопротивления R в цепь якоря двигателя

5. Скорость идеального холостого хода двигателя постоянного тока не зависит от…
а. напряжения питающей сети
б. магнитного потока возбуждения
в. сопротивления якорной цепи
г. конструктивных параметров двигателя

6. При введении добавочного сопротивления в цепь якоря электродвигателя постоянного тока…
а. изменяется скорость идеального холостого хода
б. изменяется жёсткость механической характеристики
в. изменяется скорость идеального холостого хода и жёсткость механической характеристики
г. ничего не происходит

7. При изменении напряжения питающей сети двигателя постоянного тока…
а. изменяется скорость идеального холостого хода
б. изменяется жёсткость механической характеристики

в. изменяется скорость идеального холостого хода и жёсткость механической характеристики
г. ничего не происходит

8. При изменении магнитного потока возбуждения двигателя постоянного тока…
а. изменяется скорость идеального холостого хода
б. изменяется жёсткость механической характеристики
в. изменяется скорость идеального холостого хода и жёсткость механической характеристики
г. ничего не происходит

9. Режим электродвигателя, при котором создаваемый им момент противодействует движению рабочей машины называется…
а. тормозным
б. противодействующим
в. обратным
г. холостым ходом

10. Режим торможения не свойственный двигателю постоянного тока называется…
а. рекуперативное торможение
б. динамическое торможение
в. торможение противовключением
г. сверхсинхронное торможение

11. Режим торможения возникающий во всех случаях, когда скорость вращения двигателя постоянного тока оказывается выше скорости идеального холостого хода называется…
а. рекуперативным
б. динамическим
в. торможением противовключением
г. сверхсинхронным торможением

12. Режим торможения получаемый при отключении якоря двигателя от сети и включении его на резистор называется…
а. рекуперативным
б. динамическим
в. торможением противовключением
г. сверхсинхронным торможением

13. Режим торможения, при котором обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием

внешнего момента или сил инерции вращается в противоположную сторону, называется
а. рекуперативным
б. динамическим
в. торможением противовключением
г. сверхсинхронным торможением

IV. Характеристики и режимы работы асинхронных электродвигателей

1. Основными электродвигателями, которые наиболее широко используются как в промышленности, так и в агропромышленном производстве являются…
а. синхронные двигатели
б. двигатели постоянного тока независимого возбуждения
в. асинхронные двигатели
г. двигатели постоянного тока последовательного возбуждения

2. Критическим моментом асинхронного двигателя называется момент…
а. пусковой
б. максимальный
в. минимальный
г. номинальный

3. Скольжение асинхронного двигателя - это…
а. амплитуда колебания электродвигателя при неполной затяжке лап статора
б. мера того, насколько ротор опережает в своем вращении магнитное поле статора
в. контактное сопротивление, образующееся при скольжении щёток по контактным кольцам
г. мера того, насколько ротор отстает в своем вращении от вращения магнитного поля статора

4. Угловая скорость вращения магнитного поля статора обозначается…
а. $щ_0$
б. щ
в. ц
г. S

5. Скорость вращения магнитного поля статора зависит…
а. от напряжения и числа пар полюсов
б. от частоты тока питающей сети и числа пар полюсов двигателя
в. только от числа пар полюсов двигателя

г. только от частоты тока питающей сети

6. Искусственные механические характеристики асинхронных двигателей не получают с помощью…
а. изменения напряжения питающей сети
б. изменения частоты тока питающей сети
в. изменения момента сопротивления
г. введения добавочных сопротивлений

7. момент, развиваемый двигателем, изменяется…
а. пропорционально частоте
б. обратно пропорционально силе тока
в. пропорционально скорости двигателя
г. пропорционально квадрату напряжения

8. Изменение напряжения сети влияет на…
а. момент двигателя и не влияет на его критическое скольжение
б. критическое скольжение и не влияет на момент двигателя
в. момент двигателя и на его критическое скольжение
г. не влияет не на момент двигателя не на его критическое скольжение

9. Добавочные сопротивления вводят в цепь статора…
а. только для уменьшения пусковых значений тока
б. для уменьшения пусковых значений тока и момента
в. только для уменьшения пусковых момента
г. только для увеличения пускового момента

10. При введении добавочного сопротивления в цепь статора асинхронного двигателя не изменяется…
а. момент пусковой
б. момент критический
в. синхронная скорость
г. критическая скорость

11. Включение добавочного сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя…
а. возможно для двигателя с короткозамкнутым ротором
б. возможно для двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором
в. невозможно
г. возможно для двигателя с фазным ротором

12. При включении добавочного сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя остаётся неизменным…
а. критический момент

б. пусковой момент
в. критическое скольжение
г. номинальный момент

13. Механическая характеристика асинхронного двигателя строится по…
а. трём точкам
б. пяти точкам
в. шести точкам
г. двум точкам

V. Тормозные режимы асинхронного двигателя

1. Для асинхронного двигателя не приемлем следующий вид электрического торможения…
а. сверхсинхронное
б. динамическое
в. переменное
г. торможение противовключением

2. Режим сверхсинхронного торможения у асинхронных двигателей возникает…
а. при скорости ниже синхронной
б. при номинальной скорости
в. при нулевой скорости
г. при скорости выше синхронной

3. Режим сверхсинхронного торможения ещё называют…
а. рекуперативным
б. повышенным
в. скоростным
г. обратным

4. В режиме сверхсинхронного торможения ЭДС двигателя…
а. меньше напряжения сети
б. больше напряжения сети
в. равно напряжению сети
г. равно 0

5. Для перевода асинхронного двигателя в режим противовключения необходимо изменить порядок подключения фаз обмоток статора путем переключения…
а. только фазы А и фазы В между собой
б. только фазы В и фазы С между собой

в. двух любых фаз между собой
г. всех трёх фаз между собой

6. В режиме противовключения асинхронного двигателя вращающееся магнитное поле…
а. останавливается
б. продолжает вращаться в том же направлении
в. переходит в пульсирующий режим
г. меняет направление вращения

7. Если в режиме торможения противовключением асинхронный двигатель в момент остановки не отключить от сети, то произойдёт…
а. разгон двигателя в противоположном направлении
б. перегрев обмоток двигателя
в. межвитковое короткое замыкание
г. переход в неполнофазный режим

8. Динамическое торможение асинхронного двигателя осуществляется…
а. сменой двух любых фаз на клеммах статора
б. включением обмотки статора на сеть постоянного тока
в. повышением момента нагрузки
г. сменой полюсов на обмотке ротора

9. При динамическом торможении асинхронного двигателя с фазным ротором обмотка ротора…
а. замыкается накоротко
б. подключается к трёхфазной сети
в. замыкается на внешнее сопротивление
г. подключается к сети постоянного тока

VI. Регулирование скорости в электроприводах

1. В критерии регулирования скорости в электроприводах не входит…
а. диапазон
б. плавность
в. стабильность
г. резкость

2. Диапазон регулирования скорости в электроприводах определяется отношением максимальной скорости вращения двигателя…
а. к минимальной
б. к средней
в. к номинальной
г. к текущей

3. Плавность регулирования скорости в электроприводах характеризуется…
а. отношение максимальной скорости к минимальной
б. количеством ступеней скорости внутри диапазона регулирования
в. стабильностью работы системы при изменении нагрузки
г. диапазоном регулирования напряжения сети

4. Коэффициент плавности регулирования скорости в электроприводах определяется как…
а. разница между синхронной скоростью двигателя и скоростью ротора
б. отношение момента нагрузки к моменту двигателя
в. отношение двух соседних значений скоростей
г. разница между двумя соседними скоростями

5. Плавность регулирования скорости в электроприводах растёт если…
а. коэффициент плавности стремится к бесконечности
б. коэффициент плавности стремится к нулю
в. коэффициент плавности стремится к значению синхронной скорости
г. коэффициент плавности стремится к единице

6. Стабильность работы на заданной скорости в электроприводах зависит от…
а. жёсткости механической характеристики
б. плавности регулирования скорости
в. диапазона регулирования скорости
г. пускового момента двигателя

7. Стабильность работы на заданной скорости в электроприводах характеризуется…
а. изменением скорости при заданном отклонении момента двигателя
б. изменением скорости при заданном отклонении момента нагрузки
в. изменением момента нагрузки при заданном отклонении скорости
г. изменением момента двигателя при заданном отклонении скорости

8. Виды направления регулирования скорости в электроприводах не включают в себя…
а. двухзонное
б. однозонное вниз
в. трехзонное
г. однозонное вверх

9. Допустимая нагрузка электропривода зависит от…
а. частоты тока питающей сети

б. напряжения питания
в. диапазона регулирования скорости
г. нагрева электродвигателя

10. Способ, не относящийся к способам регулирования скорости двигателей постоянного тока, называется…
а. изменение частоты тока питающей сети
б. введение добавочного сопротивления в цепь якоря
в. изменение магнитного потока двигателя
г. изменение подводимого к якорю двигателя напряжения

11. Регулирование скорости двигателя постоянного тока введением добавочного сопротивления в цепь якоря приводит к…
а. увеличению жёсткости механической характеристики
б. снижению жёсткости механической характеристики
в. сохранению жёсткости на постоянном уровне
г. повышению стабильности работы двигателя

12. Снижение жёсткости механической характеристики двигателя постоянного тока приводит к…
а. повышению стабильности работы двигателя
б. сохранению стабильности работы двигателя на постоянном уровне
в. снижению стабильности работы двигателя
г. неконтролируемому колебанию стабильности работы двигателя

13. Работа двигателя постоянного тока с добавочным сопротивлением в цепи якоря является не экономичным в связи с…
а. большими эксплуатационными затратами на обслуживание добавочных сопротивлений
б. необходимостью в высоко квалифицированном обслуживающем персонале
в. высокой стоимостью добавочных сопротивлений
г. значительными потерями энергии на дополнительное сопротивление

14. Ток возбуждения двигателя постоянного тока регулируется…
а. с помощью реостатов или регуляторов напряжения
б. с помощью частотных преобразователей
в. с помощью батарей конденсаторов
г. с помощью дросселей

15. Ослабление магнитного потока обмотки возбуждения двигателя постоянного тока приводит к…
а. уменьшение скорости двигателя
б. увеличение скорости двигателя
в. стабилизации скорости на одном уровне

г. экстренному торможению двигателя

16. В систему «генератор - двигатель», позволяющую регулировать скорость двигателя постоянного тока изменением подводимого к якорю напряжения, не входит…
а. асинхронный двигатель
б. двигатель постоянного тока
в. асинхронных генератор
г. генератор постоянного тока

17. К способам регулирования скорости асинхронного двигателя не относится…
а. изменение напряжения
б. смена числа пар полюсов
в. реостатное регулирование
г. смена полярности на обмотке якоря

18. Регулирование скорости введением активного сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя…
а. возможно только для асинхронного двигателя с фазным ротором
б. возможно для всех асинхронных двигателей
в. возможно только для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором
г. невозможно

19. Синхронная скорость асинхронного двигателя с двумя парами полюсов равна…
а. 3000
б. 1500
в. 1000
г. 750

20. При увеличении числа полюсов асинхронного двигателя в 2 раза его синхронная скорость…
а. уменьшается в 2 раза
б. не меняется
в. увеличивается в 2 раза
г. увеличивается в 4 раза

21. При частотном способе регулирования скорости асинхронного двигателя вместе с ростом частоты необходимо…
а. повышать сопротивление обмотки статора
б. снижать нагрузку
в. снижать напряжение

г. повышать напряжение

22. При регулировании скорости асинхронного двигателя за счет изменения напряжения питающей сети момент двигателя изменяется…
а. пропорционально квадрату напряжения
б. пропорционально напряжению
в. обратно пропорционально квадрату напряжения
г. обратно пропорционально напряжению

VII. Нагрев и охлаждение электродвигателей

1. Наибольшая допустимая температура нагрева двигателя ограничивается…
а. температурой плавления обмоток
б. термической стойкостью его изоляции
в. механической стойкостью подшипников
г. уставкой тепловой отсечки теплового реле

2. Нагрев двигателя обусловлен рядом факторов, в которые не входит…
а. потери энергии в обмотках статора и ротора
б. потери на гистерезис и вихревые токи
в. потери электроэнергии в проводах питающей линии
г. трение в подшипниках

3. Повышение температуры электродвигателя продолжается до тех пор, пока…
а. электродвигатель включен в сеть электропитания
б. электродвигатель не достигнет скорости холостого хода
в. количество теплоты, отдаваемое поверхностью электродвигателя, не станет равным количеству теплоты, выделяемому электродвигателем
г. механическая мощность электродвигателя не станет равной электрической мощности, потребляемой из сети

4. Предельно допустимое превышение температура обмотки двигателя над температурой окружающей среды определяется разностью между предельно допустимой температурой изоляции двигателя и стандартной температурой окружающей среды, которая равна…
а. 20 ^{o}C
б. 24 ^{o}C
в. 30 ^{o}C
г. 40 ^{o}C

5. Согласно ГОСТ 183-66 изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах и аппаратах, делятся по нагревостойкости на…

а. классы
б. группы
в. виды
г. категории

6. Электродвигатели сельскохозяйственного назначения изготовляются с изоляцией по нагревостойкости класса…
а. A
б. F
в. B
г. C

7. Предельно допустимая температура нагрева обмоток электродвигателя класса F, как наиболее примирительного в сельском хозяйстве равна…
а. 120 °C
б. 130 °C
в. 155 °C
г. 180 °C

8. На практике нагрев электродвигателя считается законченным, когда температура достигает…
а. 0,85…0,87 установившегося значения температуры
б. 0,87…0,92 установившегося значения температуры
в. 0,92…0,95 установившегося значения температуры
г. 0,95…0,98 установившегося значения температуры

9. Нагрузочная диаграмма электропривода представляет собой зависимость нагрузки электропривода от…
а. времени
б. скорости
в. момента двигателя
г. напряжения

10. ГОСТом предусматривается количество номинальных режимов работы электрических приводов равное…
а. 3
б. 8
в. 4
г. 6

11. Режимы работы электроприводов обозначаются буквой…
а. D
б. G

в. S
г. W

12. Одним из основных номинальных режимов работы электропривода не являются…
а. продолжительный
б. кратковременный
в. повторно-кратковременный
г. повторно-кратковременный с пусками

13. Температуру электродвигателя считают установившейся, если в течение часа работы двигателя она увеличивается не более чем на…
а. 1 ^{o}C
б. 10 ^{o}C
в. 5 ^{o}C
г. 20 ^{o}C

14. Установившееся значение температуры электродвигателя наступает через промежуток времени равный…
а. T_H
б. $4T_H$
в. $2T_H$
г. $10T_H$

15. Режим работы электродвигателя при неизменной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышение температуры всех частей двигателя достигает установившихся значений называется…
а. кратковременный
б. повторно-кратковременный
в. продолжительный
г. повторно-кратковременный с пусками

16. Продолжительный режим работы электропривода не свойственен…
а. насосам
б. вентиляторам
в. зерноочистительным машинам
г. подъёмно-транспортным механизмам

17. Режим работы электродвигателя, при котором рабочие периоды с неизменной номинальной нагрузкой чередуются с периодами отключения машины; при этом периоды нагрузки (рабочие периоды) недлительны и превышение температуры не достигает установившегося значения, а периоды паузы позволяют двигателю охладиться до температуры окружающей среды называется…

а. кратковременный
б. повторно-кратковременный
в. продолжительный
г. повторно-кратковременный с пусками

18. Промышленность выпускает электродвигатели со стандартной продолжительностью рабочего периода…
а. 20, 40, 70 и 100 мин
б. 10, 30, 60 и 90 мин
в. 5, 15, 25 и 50 мин
г. 1, 3, 5 и 9 мин

19. Режим работы электродвигателя, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения машины (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры могло достигнуть установившихся значений как при нагреве, так и при охлаждении называется…
а. продолжительный
б. кратковременный
в. повторно-кратковременный
г. повторно-кратковременный с пусками

20. ГОСТом установлено, что для повторно-кратковременного режима работы электродвигателя продолжительность цикла не превышает…
а. 5 мин
б. 15 мин
в. 20 мин
г. 10 мин

21. Для повторно-кратковременного режима работы электродвигателя относительная продолжительность включения ПВ составляет…
а. 15, 25, 40 и 60%
б. 10, 20, 50 и 90%
в. 1, 2, 5 и 9%
г. 25, 50, 75 и 100%

22. Если при работе двигателя момент и мощность рабочей машины не изменяются, то двигатель выбирают с номинальной мощностью, равной мощности нагрузки рабочей машины, делённой на…
а. КПД электродвигателя
б. КПД передачи
в. КПД источника электрической энергии
г. коэффициент активной мощности

23. Мощность электродвигателя выбираемого для электропривода насоса не зависит от…
а. производительности насоса
б. напора насоса
в. КПД электродвигателя
г. плотности перекачиваемой жидкости

24. При переменной продолжительной нагрузке нагрузка на валу электродвигателя может периодически меняться, при этом периодически меняются…
а. частота тока питающей сети
б. амплитуда напряжения питающей сети
в. коэффициент активной мощности электродвигателя
г. потери мощности в электродвигателе

25. Для проверки выбранного электродвигателя по нагреву на практике используют методы эквивалентных величин, в которые не входит…
а. метод эквивалентного напряжения
б. метод эквивалентного тока
в. метод эквивалентного момента
г. метод эквивалентной мощности

26. При проверке электродвигателя по нагреву с помощью метода эквивалентного тока необходимо что бы номинальный ток предварительно выбранного по каталогу электродвигателя был по отношению к эквивалентному току…
а. больше не менее чем в 2 раза
б. больше или равен
в. меньше или равен
г. меньше

27. При проверке электродвигателя по нагреву с помощью метода эквивалентного момента необходимо что бы номинальный момент предварительно выбранного по каталогу электродвигателя был по отношению к эквивалентному моменту…
а. больше не менее чем в 2 раза
б. меньше или равен
в. больше или равен
г. меньше

28. При проверке электродвигателя по нагреву с помощью метода эквивалентной мощности необходимо что бы номинальная мощность пред-

варительно выбранного по каталогу электродвигателя был по отношению к эквивалентной мощности…
а. больше не менее чем в 2 раза
б. меньше или равна
в. меньше
г. больше или равна

29. Если для кратковременного режима выбрать электродвигатель, предназначенный для работы в продолжительном режиме, но с мощностью кратковременного режима работы, то…
а. электродвигатель недоиспользуется по тепловому режиму
б. электродвигатель быстро перегреется
в. электродвигатель не сможет преодолеть момент сопротивления при пуске
г. электродвигатель будет работать в режиме холостого хода

30. При расчётах электропривода принимают, что минимальный пусковой момент двигателя, с учетом возможного снижения напряжения, больше статического момента рабочей машины при пуске в…
а. 1,5 раза
б. 1,25 раза
в. в 1,1 раза
г. в 2 раза

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.29 ОСНОВЫ РОССИЙСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННОСТИ

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

форма обучения: **очная**, **заочная, очно-заочная**

Авторы: Бачинин И. В. к.п.н, Старостин А. Н., к. ист. н.

Одобрены на заседании кафедры

Теологии
(название кафедры)

Зав. кафедрой _____
(подпись)

Бачинин И. В.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 25.09.2024
(Дата)

Рассмотрены методической комиссией

Горномеханического факультета
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)

Осипов П. А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

Содержание

Методические указания по освоению дисциплины 3
Освоение лекционного курса 3
Самостоятельное изучение тем курса 3
Подготовка к практическим (семинарским) занятиям 6
Подготовка к тестированию 8
Подготовка к промежуточной аттестации 9

Методические указания по освоению дисциплины

Освоение лекционного курса

Лекции по дисциплине дают основной теоретический материал, являющийся базой для восприятия практического материала. После прослушивания лекции необходимо обратиться к рекомендуемой литературе, прочитать соответствующие темы, уяснить основные термины, проблемные вопросы и подходы к их решению, а также рассмотреть дополнительный материал по теме.

Главное в период подготовки к лекционным занятиям – научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения. Четкое планирование своего рабочего времени и отдыха является необходимым условием для успешной самостоятельной работы. В основу его нужно положить рабочие программы изучаемых в семестре дисциплин.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтрашний день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Одним из важных элементов освоения лекционного курса является самостоятельная работа на лекции. Слушание и запись лекций – сложный вид вузовской аудиторной работы. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента. Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим студентом. Не надо стремиться записать дословно всю лекцию. Такое «конспектирование» приносит больше вреда, чем пользы. Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях. Конспект лекции лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать пункты плана лекции, предложенные преподавателям. Принципиальные места, определения, формулы и другое следует сопровождать замечаниями «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек. Лучше если они будут собственными, чтобы не приходилось просить их у однокурсников и тем самым не отвлекать их во время лекции. Целесообразно разработать собственную «маркографию» (значки, символы), сокращения слов. Не лишним будет и изучение основ стенографии. Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

Самостоятельное изучение тем курса

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебниками и книгами (а также самостоятельное теоретическое исследование проблем, обозначенных преподавателем на лекциях) – это важнейшее условие формирования научного способа познания. Основные приемы 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, а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и дипломных 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 научными руководителями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные книги, учебники и 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 научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того на сколько 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. Студенты с этой целью заводят 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 научного 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 научному 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 литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках учебной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с научным 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 практическим (семинарским) занятиям

Важной формой самостоятельной работы студента является систематическая и планомерная подготовка к практическому (семинарскому) занятию. После лекции студент должен познакомиться с планом практических занятий и списком обязательной и дополнительной литературы, которую необходимо прочитать, изучить и законспектировать. Разъяснение по вопросам новой темы студенты получают у преподавателя в конце предыдущего практического занятия.

Подготовка к практическому занятию требует, прежде всего, чтения рекомендуемых источников и монографических работ, их реферирования, подготовки докладов и сообщений. Важным этапом в самостоятельной работе студента является повторение материала по конспекту лекции. Одна из главных составляющих внеаудиторной подготовки – работа с книгой. Она предполагает: внимательное прочтение, критическое осмысление содержания, обоснование собственной позиции по дискуссионным моментам, постановки интересующих вопросов, которые могут стать предметом обсуждения на семинаре.

В начале практического занятия должен присутствовать организационный момент и вступительная часть. Преподаватель произносит краткую вступительную речь, где формулируются основные вопросы и проблемы, способы их решения в процессе работы.

Практические занятия не повторяют, а существенно дополняют лекционные занятия, помогая студентам в подготовке к промежуточной аттестации. Практические занятия являются одной из важнейших форм обучения студентов: они позволяют студентам закрепить, углубить и конкретизировать знания по курсу, подготовиться к практической деятельности. В процессе работы на практических занятиях студент должен совершенствовать умения и навыки самостоятельного анализа источников и научной литературы, что необходимо для научно-исследовательской работы.

Практическое (семинарское) занятие — это одна из организационных форм познавательной деятельности обучающихся, позволяющая закрепить полученные ранее знания, восполнить недостающую информацию, сформировать умения решать проблемы, укрепить позиции, научить культуре ведения дискуссии. Тематика обсуждения выдается на первых занятиях. Подготовка осуществляется во внеаудиторное время. Регламент – 3-5 мин. на выступление. В оценивании результатов наравне с преподавателем принимают участие студенты группы.

Обсуждение проблемы (нравственной, политической, научной, профессиональной и др.) происходит коллективно, допускается корректная критика высказываний (мнений) своих сокурсников с обязательным приведением аргументов критики.

Участие каждого обучающегося в диалоге, обсуждении должно быть неформальным, но предметным.

1. Россия: географические факторы и природные богатства.

№ п/п	Вопросы	Код компетенции
1.	Анализ предпосылок и факторов становления российской государственности (исторических, социально-экономических, географических).	УК-5
2.	Природные ресурсы и национальные богатства России.	
3.	Культуры этносов России и их основные достижения.	
4.	Религии этносов России.	

2. Многообразие российских регионов

№ п/п	Вопросы	Код компетенции
1.	Российская Федерация: основные этапы становления современного государственного устройства.	УК-5
2.	Географическое, политическое, социально-экономическое, многообразие российских регионов.	
3.	Свердловская область: природно-экономический потенциал.	
4.	История родного города на примере города Екатеринбурга – столицы Татарстана.	

Результатом обсуждения проблемы на практическом (семинарском) занятии не могут быть однозначные выводы и формулировки. Действие его всегда пролонгировано,

что дает студентам возможность для дальнейшего обдумывания рассмотренных проблемных ситуаций, для поиска дополнительной информации по обсуждаемой теме.

Незадолго до проведения практического (семинарского) занятия преподаватель разделяет группу на несколько подгрупп, которая, согласно сценарию, будет представлять определенную точку зрения, информацию. При подготовке к групповой дискуссии студенту необходимо собрать материал по теме с помощью анализа научной литературы и источников.

Используя знание материала, исходя из изложенных изначальных концепций, каждая группа должна изложить свою точку зрения на обсуждаемый вопрос, подкрепив ее соответствующими аргументами.

Каждый из групп по очереди приводит аргументы в защиту своей позиции. Соответственно другая группа должна пытаться привести контраргументы, свидетельствующие о нецелесообразности, пагубности позиции предыдущей группы и стремится доказать, аргументированно изложить свою позицию.

Подготовка к тестированию

Тестирование - система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

Тестовая система предусматривает вопросы / задания, на которые слушатель должен дать один или несколько вариантов правильного ответа из предложенного списка ответов. При поиске ответа необходимо проявлять внимательность. Прежде всего, следует иметь в виду, что в предлагаемом задании всегда будет один правильный и один неправильный ответ. Это оговаривается перед каждым тестовым вопросом. Всех правильных или всех неправильных ответов (если это специально не оговорено в формулировке вопроса) быть не может. Нередко в вопросе уже содержится смысловая подсказка, что правильным является только один ответ, поэтому при его нахождении продолжать дальнейшие поиски уже не требуется.

На отдельные тестовые задания не существует однозначных ответов, поскольку хорошее знание и понимание содержащегося в них материала позволяет найти такие ответы самостоятельно. Именно на это слушателям и следует ориентироваться, поскольку полностью запомнить всю получаемую информацию и в точности ее воспроизвести при ответе невозможно. Кроме того, вопросы в тестах могут быть обобщенными, не затрагивать каких-то деталей.

Тестовые задания сгруппированы по темам учебной дисциплины. Количество тестовых вопросов/заданий по каждой теме дисциплины определено так, чтобы быть достаточным для оценки знаний обучающегося по всему пройденному материалу.

При подготовке к тестированию студенту следует внимательно перечитать конспект лекций, основную и дополнительную литературу по той теме (разделу), по которому предстоит писать тест.

Для текущей аттестации по дисциплине «Основы российской государственности» применяются тесты, которые выполняются по разделам № 1-5.

Образец тестового задания

1. Ключевую роль в формировании мировоззрения играют:
- мысли
- эмоции
- ценности
-все перечисленное

2. Какое место в мире по площади занимает Россия:
- первое
- второе

- третье
- пятое

3. К преимуществам географического положения России относят:
- межграничное положение между Европой и Азией
- большая протяженность транспортных магистралей
- сложность управления страной
+ выход к большому количеству морей и двум океанам

4. С каким государством у России самая большая сухопутная граница:
- Казахстан
- Белоруссия
- Китай
- Монголия

5. Первое летописное упоминание о Москве связано с именем князя:
- Ярослава Мудрого
- Владимира Мономаха
- Александра Невского
- Юрия Долгорукого

Подготовка к промежуточной аттестации

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Основы российской государственности*» 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 российской государственности*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ И КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Б1.В.01 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПОВ

Направление подготовки

15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)

Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

год набора: 2025

Авторы: Хорошавин С. А., канд. техн. наук, доцент; Лагунова Ю. А., д-р техн. наук, профессор

Одобрены на заседании кафедры

Горных машин и комплексов
(название кафедры)

Зав. кафедрой _____
(подпись)

Лагунова Ю.А..
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 13.09.2024
(Дата)

Рассмотрены методической комиссией факультета

Горно-механического
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)

Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

Содержание

Введение 3
Лабораторная работа № 1. 3D-ne4amb: основные принципы и понятия 4
Контрольные вопросы 6
Лабораторная работа № 2. Основные установки 3D-ne4amu 6
Контрольные вопросы 8
Лабораторая работа № 3. Технологии 3D-ne4amu 15
Контрольные вопросы 17
Лабораторная работа № 4. Технологии оптического3D-сканирования 17
Контрольные вопросы 20
Инструкция по охране труда при работе с 3D-npuHmepoM 20
Общие требования безопасности 20
Требования безопасности перед началом работы 21
Требования безопасности во время работы 21
Требования безопасности после окончания работы 22
Контрольная работа по обратному проектированию 23
Список литературы 23

Введение

Традиционный способ выпуска изделий включает субтрактивные процессы удаления лишнего материала с заготовки механическим путем, изготовление большого количества деталей с последующей их сборкой или сваркой в готовое изделие. Теперь же функциональная деталь может быть разработана на компьютере и распечатана на принтере, создающем твердотельные объекты с помощью послойного наращивания материала. Цифровой дизайн может быть изменен: пара щелчков мышки в компьютерной программе - и вот уже готово изделие с улучшенной конструкцией. После запуска процесса печати принтеры работают автономно и не требуют вмешательства оператора до завершения всей процедуры. Установки аддитивного производства позволяют изготавливать прототипы и детали сложной геометрии, невозможной при использовании традиционных методов, легковесные конструкции и функционально интегрированные изделия. Как известно, существует несколько методов 3D-печати, однако все они являются производными аддитивной технологии изготовления изделий. Вне зависимости от того, какой 3D-принтер вы используете, построение заготовки осуществляется путем послойного добавления сырья. Несмотря на то, что термин Additive Manufacturing используется отечественными инженерами очень редко, технологии послойного синтеза фактически оккупировали современную промышленность.

Лабораторная работа № 1. 3D-ne4amb: основные принципы и понятия

Цель работы: ознакомиться с основными принципами, применяемыми в 3Г)-печ;1ти; изучить основные понятия.

Общие сведения.

По сути, 3D-печать - это создание объекта методом его послойного выращивания на основе трехмерной CAD-модели (модели, разработанной в системе автоматизированного проектирования). Зачастую также используется термин «аддитивное производство», поскольку при изготовлении детали применяется аддитивный метод - последовательное добавление материала слой за слоем (рисунок 1). В этом заключается отличие 3D-печати от традиционного метода производства изделий, который является субтрактивным и при котором лишний материал удаляется с заготовки при помощи механической обработки.

Рисунок 1 - Схема последовательности 3D-печати

3D-печать или «аддитивное производство» - процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Аддитивные технологии появились как способ автоматизации задач по формированию прототипов и изначально были известны под термином «быстрое прототипирование». На сегодняшний момент существенный спектр задач, для которых используются технологии, до сих пор находится в области быстрого выполнения прототипов изделий и деталей. Поскольку процесс создания деталей основан на цифровых компьютерных моделях, то для описания технологий 3D-печати изделий существует еще один термин - «цифровое производство». Любой 3D-принтер выращивает изделие послойно, а разбивка по слоям и геометрия слоев описывается в STL-файле. STL (STereoLithography - объемная литография) - формат файла, предназначенный для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях 3D-ne4amu.

Информация об объекте хранится как список нормалей и треугольных граней, которые описывают его поверхность. Для получения послойного STL-файла обычно применяется конвертор CAD-формата, встроенный в систему автоматизированного проектирования, которую используют инженерно-технические работники предприятия. На данный момент существует множество технологий 3D-печати, установок аддитивного производства и типов используемых материалов. Так, наибольшее распространение в 3D-принтерах получили титановые, алюминиевые и никелевые сплавы, конструкционная и нержавеющая сталь, сплав «кобальт - хром», жаропрочные сплавы, полиамидные пластики широкого спектра свойств, высокотемпературные пластики, жаропрочная керамика, фотополимерные пластики. Но, несмотря на широкий спектр названий, суть процесса не меняется - деталь изготавливается слой за слоем по трехмерной компьютерной модели с минимальными трудозатратами на подготовку производства и постпроцессинг. Несомненно, в зависимости от используемых материалов и сложности изготавливаемых деталей для организации производственного процесса 3D-печати требуется достаточно серьезная инжиниринговая подготовка - моделирование элементов поддержки (вспомогательных структур, необходимых для печати навесных элементов детали аналогично строительным подмостям, используемым при строительстве мостов над водным пространством), выбор оптимальной ориентации модели на рабочей платформе, оптимизация топологии изделий для снижения веса и расхода материала. В случае с металлическими деталями - моделирование вспомогательных элементов конструкции для теплоотвода в процессе печати. В рамках постобработки напечатанных деталей следует производить снятие деталей с рабочей платформы, удаление поддержек и вспомогательных элементов конструкции, а при необходимости и полировку поверхности. При работе с металлическими изделиями нужны повышенные механические свойства: деталь подвергают температурной обработке для закалки и отжига дефектов. Основные задачи, решаемые с помощью технологий 3D-печати, можно условно разделить на три группы:

1) быстрое создание прототипов, ускоряющее процесс разработки изделий;

2) создание конечных функциональных изделий сложной геометрии, легковесных конструкций, функционально интегрированных деталей;

3) создание оснастки для литьевых процессов - пресс-форм для литья пластиков, мастер-моделей для литья металлов по выплавляемым и выжигаемым моделям, форм для литья металлов в песчано-глинистых формах (ПГФ).

Задание

В соответствии с приведенным материалом структурировать данные в таблицу, в которой отразить различия между традиционными методами обработки по сравнению с 3D-печатью, указать преимущества и недостатки этих способов.

Контрольные вопросы

1 Что такое 3D-печать?
2 Отличие 3D-печати от традиционных методов обработки.
3 Материалы, применяемые при 3D-печати.
4 Что такое постпроцессинг? Его преимущества.
5 Какая последовательность работ при 3D-печати?

Лабораторная работа № 2. Основные установки 3D-ne4amu

Цель работы: ознакомиться с историей оборудования для 3D-печати; изучить особенности современных устройств и технологий.

История разработки технологий 3D-печати начинается в 1986 г., когда был выдан первый патент на установку стереолитографии (SLA). Этот патент принадлежал Чаку Халлу, американскому инженеру, который в 1983 г. разработал первую SLA-установку. После получения патента Халл создал компанию 3D Systems Corporation, которая и сейчас является одной из самых крупных и преуспевающих компаний-производителей оборудования 3D-печати. Первая коммерческая система быстрого прототипирования SLA-1 была выпущена компанией 3D Systems в 1987 г., первая продажа (после многочисленных тестов и испытаний) состоялась в 1988 г. 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 точности с высоким уровнем детализации. Помимо стереолитографии, в тот же период начали развиваться и другие технологии 3D-печати. В 1987 г. Карл Декард, сотрудник Техасского университета, подал заявку на патент, описывающий процесс быстрого прототипирования изделий с помощью технологии селективного лазерного спекания (SLS) (рисунок 2). Технология лазерного спекания была лицензирована компанией DTM Inc., приобретенной впоследствии компанией 3D Systems.

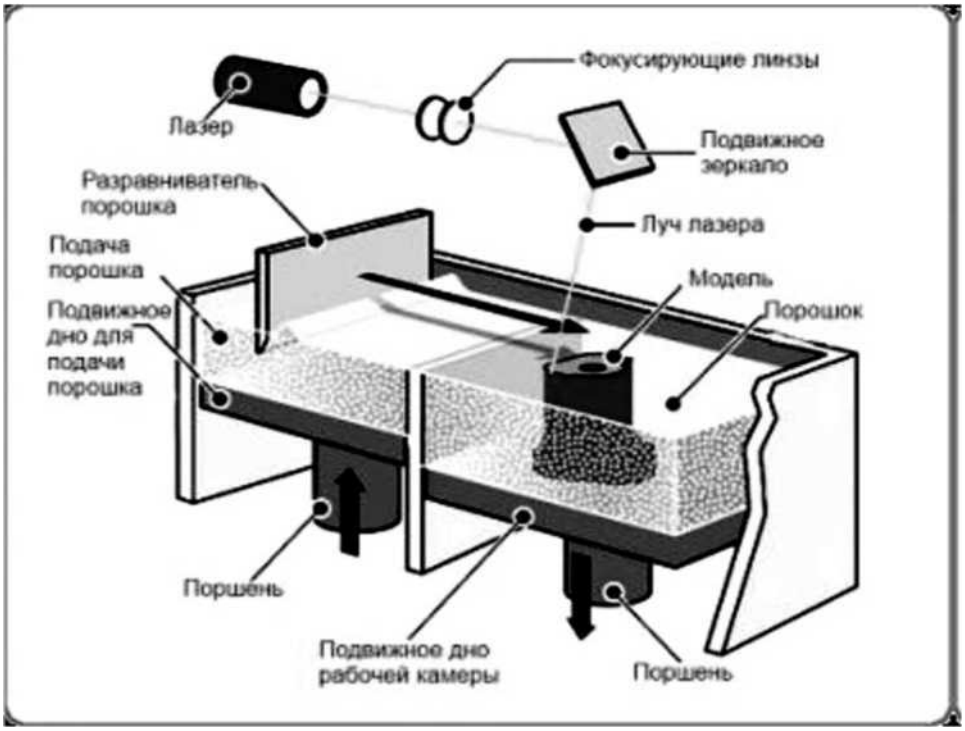


Рисунок 2 - Установка селективного лазерного спекания (SLS)

В 1989 г. Скотт Крамп, один из основателей компании Stratasys Inc., заявил о разработке технологии послойного наплавления (FDM) (рисунок 3), которая до сих пор используется компанией Stratasys Inc. и применяется на различных машинах начального уровня других производителей.

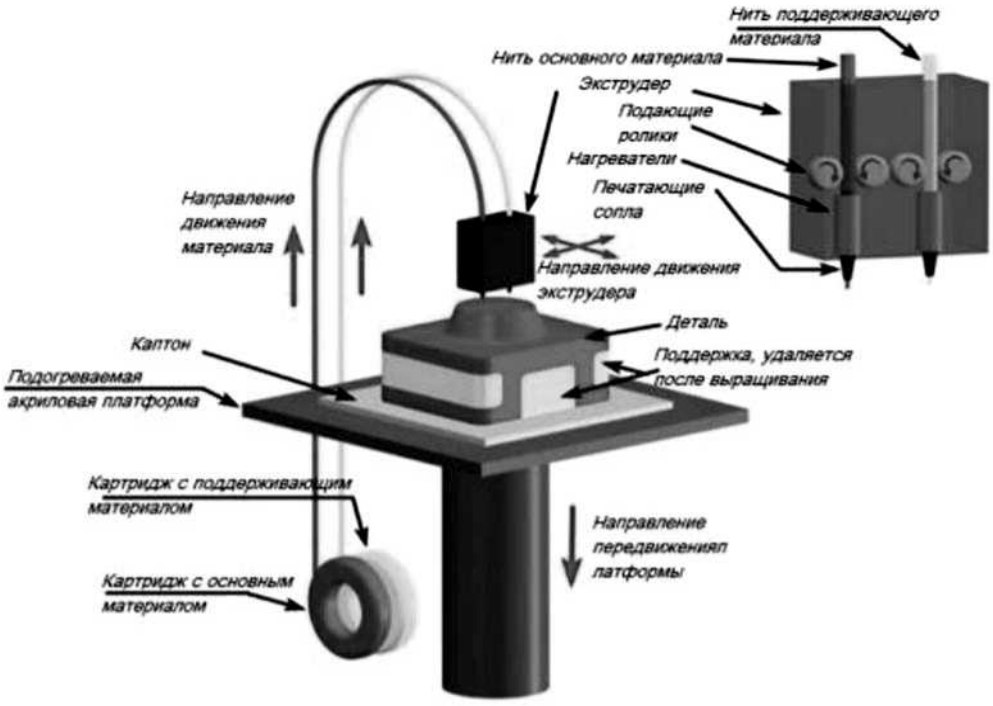


Рисунок 3 - Установка послойного наплавления (FDM)

Первым европейским производителем оборудования стала компания

EOS GmbH (Германия), которая после разработок технологий стереолитографии сконцентрировала свои усилия на развитии технологий лазерного спекания. Первая установка стереолитографии STEREOS 400 была поставлена в 1990 г. в отдел разработок концерна BMW, а в 1994 г. была выпущена первая установка лазерного спекания пластиковых порошков (SLS) EOSINT P 350, а также разработана машина EOSINT M160 - прототип первой установки для изготовления металлических деталей методом прямого лазерного спекания (DMLS). С середины 2000-х гг. начала проявляться диверсификация в развитии технологий 3D-печати - разработки стали развиваться в двух различных областях. Во-первых, как существующие, так и новые компании-производители оборудования сфокусировали свои усилия на создании настольных машин, обладающих доступной стоимостью и простотой применения. Данные 3D-принтеры используют простейшие технологии (FDM, Digital Light Processing (DLP)), имеют небольшие (настольные) габариты и позволяют реализовать преимущества аддитивных технологий дома либо в офисе для быстрого создания концептуальных прототипов.

Второе направление развития технологий - дорогие промышленные установки, направленные на решение задач по изготовлению конечных изделий средними и большими тиражами, по созданию деталей сложной геометрии. Заказчиками данного оборудования являются предприятия авиационной, космической, автомобильной, машиностроительной, медицинской и других отраслей промышленности, использующие промышленные 3D-принтеры в собственных производственных процессах. Развитие данного сегмента оборудования направлено в сторону увеличения размеров, скорости и качества изготовления деталей, смещая производственную парадигму с традиционных технологий на аддитивные.

Задание

В соответствии с представленным материалом в отчете предоставить краткую информацию об установках 3D-печати. По окончании практической работы будет организована экскурсия в лабораторию аддитивных технологий Белорусско-Российского университета.

Контрольные вопросы

1 Кем была запатентована первая установка по стереолитографии?

2 Особенности установки селективного лазерного спекания. Преимущества и недостатки метода.

3 Особенности установки послойного наплавления. Преимущества и недостатки метода.

4 Отличие современных промышленных установок от простейших настольных машин.

ОБЗОР ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Основные материалы для профессиональной и промышленной 3D-печати – это пластики в виде нитей/гранул или порошка, фотополимерные смолы, металлические порошки, воск и гипс. Обладая исключительно высокими качественными характеристиками, они с успехом используются в различных отраслях для прототипирования и изготовления функциональных деталей, и с развитием аддитивного производства их становится все больше.

Остановимся подробнее на каждом из материалов, применяемых в следующих технологиях:

1. Моделирование методом послойного наплавления полимерной нити или гранул (FDM);
2. Селективное лазерное спекание пластиков (SLS);
3. Стереолитография с использованием фотополимеров (SLA/DLP/LCD);
4. Селективное лазерное плавление металлов (SLM);
5. Послойное склеивание композитного порошка связующим веществом (Binder Jetting);
6. Многоструйная 3D-печать воском или фотополимером (MJP);
7. Полноцветная печать гипсом (CJP).

Пластик

Пластик – один их самых востребованных расходных материалов для аддитивного производства. Ассортимент термопластиков и композитов, предназначенных для FDM-печати, исключительно разнообразен и позволяет выбрать, исходя из поставленных задач, наиболее подходящие по физико-механическим свойствам материалы.

Рассмотрим расходные материалы FDM-принтеров. Это так называемые филаменты –

пластики в виде нитей, намотанных на катушки. Иногда они выпускаются в виде гранул.

FDM-технология лежит в основе не только домашних, но и профессиональных и промышленных 3D-принтеров, поэтому пластики активно используются на производстве, для изготовления прототипов и функциональных изделий в таких отраслях, как автомобилестроение, авиационная промышленность, бытовые товары, электроника, архитектура, медицина, наука и образование.

Преимущества пластиков для 3D-печати:

- широкий диапазон применений;
- разнообразие цветов и фактур материала;
- легкость механической обработки;
- удобство в использовании;
- гибкая структура материала;
- возможность печати крупных цельных изделий;
- относительно невысокая стоимость.

Основные виды пластиков

ABS-пластик. Обладает множеством положительных характеристик, включая повышенную ударопрочность при высокой эластичности и мягкости материала, а также простую механическую обработку. Высокая растворимость в ацетоне позволяет легко склеивать детали и сглаживать внешние поверхности изделий. Обычно ABS-пластик непрозрачен, но при необходимости легко окрашивается в любые цвета. Конечные изделия без окрашивания чувствительны к воздействию ультрафиолета и наделены невысокими электроизоляционными свойствами.

PLA-пластик. Имеет одни из самых низких температурных требований к 3D-принтеру. Ключевые составляющие PLA-пластика – это сахарный тростник и кукуруза, а в основе материала лежит молочная кислота. Регулируя ее уровень при производстве, можно получить различные свойства полимера, тем самым расширяя области его использования. Изделия из PLA-пластика обладают ровной и скользящей поверхностью. Материал нетоксичен, благодаря чему широко применяется для производства различных игрушек и сувениров. Имеет лишь один недостаток – недолговечность эксплуатации. Готовое изделие из пластика может прослужить до нескольких лет при минимальном использовании и температуре до +50 градусов.

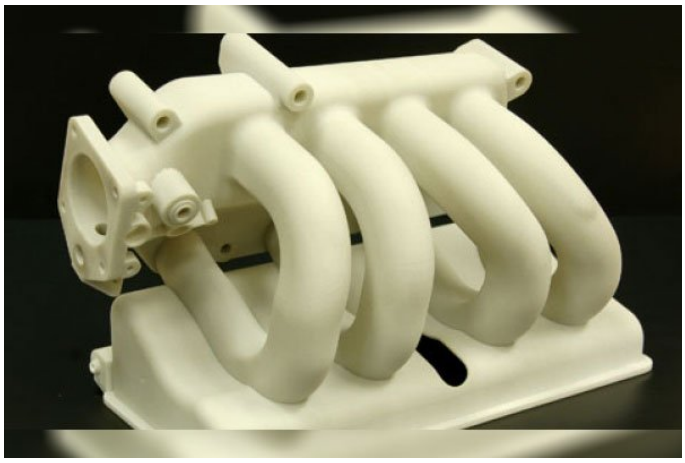
PETG / PET / PETT-пластик. PET, или полиэтилентерефталат, – наиболее распространенный вид пластика. Для 3D-печати «чистый» PET используют редко, применяя в основном его разновидность – PETG. PETG долговечен и обладает гораздо меньшей температурой переработки. Еще одной версией PET является PETT – более жесткий и достаточно популярный материал за счет своей прозрачности.

PC-пластик (поликарбонат). Обладает высокой прочностью и износостойкостью, а также повышенным сопротивлением физическим воздействиям и термостойкостью. Выдерживает температуру до 110°C. Материал про-

зрачный, гибкий, легко гнется и не деформируется. Отлично подходит для использования в автомобилестроении, медицине и приборостроении.

Полиамид и полистирол

Полиамид доступен в виде, как нити (гранул), так и порошка, спекаемого лазером. Список полиамидов обширен и включает в себя как самые простые пластики, так и специальные материалы, среди которых в 3D-печати используются:



- *стеклонаполненные* полиамиды, улучшающие физические свойства напечатанной модели;
- *угленаполненные* полиамиды, которые позволяют уменьшить вес конструкции, сохраняя при этом физико-механические свойства изделия;
- *металлонаполненные* полиамиды, необходимые в качестве барьерных материалов, например, при экранировании радиации.

Этот вид материалов для трехмерной печати задействован в таких областях, как машиностроение, аэрокосмическая отрасль, производство потребительских товаров и дизайн.

Полиамиды используются для изготовления конечных изделий, функционального тестирования и мелкосерийного производства, обеспечивая стабильную производительность и повторяемость изделий. Они дают возможность создавать конечные изделия с уникальными свойствами за один производственный цикл без последующей логистики и сборки компонентов.

Технологии печати, в которых применяются полиамиды, – FDM и SLS.

Еще один порошковый материал, используемый в 3D-печати по технологии SLS, – полистирол. Он представляет собой узкоспециализированное решение для промышленного литья и служит для создания форм и моделей с максимально качественной поверхностью. Этот материал дает возможность печатать изделия с разной геометрией на единой платформе, а выращенная из полистирола модель выжигается с минимальной зольностью.

Фотополимеры

Фотополимерная смола – один из самых перспективных и активно использующихся в аддитивном производстве материалов. Ее главное преимущество – универсальность. Под воздействием ультрафиолетового света или лазера фотополи-

1

меры, изначально находящиеся в жидком состоянии, затвердевают и могут приобретать совершенно разные механические свойства и характеристики.

Жесткие, эластичные, ударопрочные термопластики, прозрачные, полупрозрачные или разноцветные материалы – учитывая такое разнообразие, сферы применения изделий из фотополимеров практически безграничны.

Преимущества фотополимера:

- Качество. Изделия из фотополимерной смолы получаются гладкие и детализированные.
- Точность. Напечатанные на фотополимерном 3D-принтере объекты сложной геометрии могут иметь очень тонкие части – до 0,025 мм на 25,4 мм детали.
- Стабильность. Готовые модели и прототипы отличаются превосходными физическими и механическими свойствами.
- Легкая обработка. Фотополимерные модели легко склеиваются, шлифуются, красятся и т.д. – с ними можно делать буквально всё что угодно.

Благодаря всем этим качествам предприятия авиационной, автомобильной, ювелирной промышленности, оборонного комплекса, машиностроения и других отраслей по достоинству оценили 3D-печать с использованием фотополимеров.

Прототипы деталей самолетов, новых разработок двигателей – всё это изготавливается быстро и просто, в зависимости от поставленных задач, по технологиям стереолитографии (SLA/DLP/LCD) или многоструйной печати (MJP). Свойства и качество напечатанных изделий, а также нюансы процесса печати зависят от особенностей каждого из вышеупомянутых аддитивных методов.

Металлические сплавы

Металл для аддитивных установок выпускается в виде мелкодисперсных сферических гранул с величиной зерна от 4 до 80 микрон.

Применяемая технология заключается в сплавлении металлических порошков при помощи иттербиевого лазера и носит название селективного лазерного плавления (SLM).

Сегодня доступно около 20 материалов из металла, и их число будет расти. Это не только стандартные сплавы, но и уникальные высокотехнологичные материалы, которые предприятие может заказать для решения конкретных задач.

Из металлических порошков изготавливаются функциональные детали и технические прототипы, штампы, прессовые вставки, элементы пресс-форм для литья и другие изделия. Напечатанная на металлических 3D-принтерах продукция находит применение в аэрокосмической, нефтегазовой,

автомобильной, пищевой промышленности, машиностроении, электронике, медицине.

Виды сплавов, используемых в 3D-печати:

- нержавеющие (17-4PH, AISI 410, AISI 304L, AISI 316L, AISI 904L);
- инструментальные (1.2343, 1.2367, 1.2709);
- никелевые (Inconel 625, Inconel 718);
- цветных металлов (CuSn6);
- кобальт-хром (CoCr);
- алюминиевые (AlSi12);
- титановые (Ti6Al4V, Ti6Al4V).

Главное преимущество селективного лазерного плавления – это возможность создавать изделия исключительно высокой плотности и точности. Плотность напечатанных деталей в 1,5 раза выше, чем при литье. Кроме того, из металлических порошков можно вырастить мельчайшие детали сложных форм и фактур. 3D-печать металлами позволяет сократить цикл изготовления и уменьшить производственные расходы.

Воск

Это незаменимый материал для создания высокоточных выплавляемых моделей. Основные отрасли применения 3D-печати воском – ювелирное дело и литейное производство.

Раньше создание восковок и мастер-моделей было трудоемкой задачей, решение которой включало несколько этапов. С появлением восковых 3D-принтеров эта технология постепенно уходит в прошлое.

Воск идеально подходит для печати в ювелирной отрасли благодаря своим свойствам – хорошей выплавляемости (при t от 60°C) и легкости в постобработке. Еще один плюс восковой 3D-печати заключается в том, что стандартными методами производства вы при всем желании не сможете изготовить два совершенно идентичных образца. А 3D-принтеру такая возможность доступна.

Пожалуй, единственный недостаток воска – его хрупкость. При создании мастер-моделей сложных форм с тонкими стенками постобработку следует выполнять аккуратно.

Восковые мастер-модели отличаются точностью и высоким качеством поверхности. 3D-печать воском основана на технологии многоструйной печати (MultiJet Printing, MJP).

Песок

Песок используется как расходный материал в 3D-принтерах на основе технологии Binder Jett. Основное назначение – создание высокоточных сложных форм для литья металлом. Выпускается в виде порошка, который в процессе печати послойно склеивается связующим агентом. Использование этого аддитивного метода для изготовления песчаных литейных форм дает сильное конкурентное преимущество компаниям различных отраслей, в том числе машиностроения и автомобильной промышленности.

К видам песка, применяемым в аддитивном производстве, относятся кварцевый, хромированный, керамический, циркониевый и др. Чаще всего для изготовления песчано-полимерных форм используют кварцевый песок. Связующим веществом при 3D-печати является фурановая смола, поэтому песчаную форму не требуется запекать – она сразу готова к литью.

Используя BJ-принтеры, предприятие сможет значительно сократить сроки и расходы на подготовку производства новых и серийных изделий и создавать сложные детали – как небольшие, так и крупногабаритные. Время, необходимое для изготовления форм и деталей, может быть сокращено на 75 % по сравнению с традиционным производством, поскольку изделие можно отливать сразу после 3D-печати формы.

Гипс

Гипс – материал в виде порошка, который используется в аддитивном производстве для создания:

- сувенирной продукции;
- моделей для презентаций;
- архитектурных и конструкторских макетов;
- дизайнерских арт-объектов;
- прототипов деталей.

Преимущества гипса – в простоте, эффективности и универсальности его использования в 3D-печати для изготовления различных изделий. Материал распределяется по поверхности рабочего стола, сверху наносится клеящее средство, после чего снова наносится тонкий слой гипсового порошка. Напечатанные на 3D-принтере гипсовые изделия могут иметь любые цвета:

белый, синий, красный, фиолетовый и т.д. Цветовой спектр в отдельных принтерах достигает 6 миллионов оттенков.

Гипсовая печать выполняется по технологии ColorJet Printing (CJP). Максимальный на сегодня размер камеры построения аддитивной установки – 508381229 мм (в профессиональном 3D-принтере ProJet 860 Pro компании 3D Systems). При этом изделия из гипса можно склеивать между собой, тем самым получая изделия гораздо большего размера, чем предусматривает камера построения.

Лабораторная работа № 3. Технологии 3D-ne4amu

Цель работы: изучить основные современные технологии 3D-ne4amu, их преимущества и недостатки.

Сегодня можно говорить о существовании широкого спектра различных технологий 3D-печати. Более того, при профессиональных обсуждениях периодически упоминаются разработки все новых технологий, а на профильных выставках демонстрируются новые машины (пусть до промышленного применения добираются и не все из них). Далее рассмотрим самые распространенные и коммерчески востребованные процессы 3D-печати.

Fused Deposition Modelling (FDM) - метод послойного наплавления. Технология основана на печати методом послойного нанесения расплавленного пластика с помощью экструдера. Пластик подается в экструдер с разматываемой катушки в виде тонкой нити. Материалы: ABS- и PLA-пластики. Применение: простейшие прототипы и функциональные изделия из пластика.

Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP) - стереолитография. В данной технологии жидкий фотополимерный пластик слой за слоем затвердевает под воздействием ультрафиолетового лазера (SLA) либо светодиодного проектора (DLP). Качество поверхности и детализация выращенных моделей отвечает самым высоким требованиям. Материалы: фотополимерные пластики. В качестве материала поддержки используется сам фотополимер, поддержки удаляются механически. После печати и удаления поддержек деталь необходимо выдержать в ультрафиолетовой печи для достижения окончательной полимеризации пластика. Применение: печать высококачественных и детализированных прототипов, печать моделей для литья по выжигаемым моделям.

Multi-Jet Modeling (MJM) - многоструйное моделирование. Технология многоструйного моделирования подразумевает использование жидкого фотополимера, который наносится на рабочую платформу печатающей головкой через большое количество форсунок и послойно отверждается ультрафиолетовым проектором. Материалы: фотополимерные пластики, воск. В качестве поддержки используется воск, вымываемый теплой водой или выплавляемый в печи. Применение: печать высококачественных и детализированных прототипов, печать моделей для литья по выжигаемым и выплавляемым моделям.

ColorJet Printing (CJP) - цветное склеивание порошкового материала. Технология основана на послойном склеивании порошкового материала. Мелкозернистый гипсовый порошок раскатывается ракелем или роликом по рабочей поверхности. Склеивание в цельную деталь осуществляется выборочным нанесением на слой гипса специального связующего вещества с красящими добавками. Используется мелкозернистый порошок на гипсовой основе и связующее вещество различных цветов. Детали, полученные по данной технологии, являются цветными и могут использоваться как демонстрационные и выставочные образцы продукции. Материал: гипс. Поддержки как таковые отсутствуют, в качестве поддержки выступает несклеенный порошок.

Selective Laser Sintering (SLS) - селективное лазерное спекание. Суть технологии заключается в последовательном спекании слоев порошкообразного пластика с помощью лазеров высокой мощности. Порошок разравнивается ракелем по рабочей поверхности, после этого лазерный луч с помощью импульсного излучения заштриховывает соответствующий контур детали. Под воздействием высокоэнергетического лазерного луча шаровидные гранулы порошкового пластика спекаются между собой, образуя цельную деталь. Материалы: широкий спектр порошковых пластиков, керамика. Поддержки отсутствуют, в качестве поддержек выступает неспеченный порошок. Применение: печать прототипов, создание конечных изделий сложной геометрии, легковесных конструкций, производство функционально интегрированных деталей.

Selective Laser Melting (SLM) - селективное лазерное плавление. В данной технологии слои мелкозернистого металлического порошка под воздействием сверхмощного лазера сплавляются (спекаются) в среде инертного газа в цельнометаллические изделия. Металлический порошок разравнивается ракелем по рабочему пространству, затем контур детали заштриховывается импульсным лазером высокой мощности. Сферические гранулы металлического порошка сплавляются в цельнометаллическое изделие. Материалы: алюминий, титан, конструкционная сталь, нержавеющая сталь, никель, сплав «кобальт - хром». Поддержкой выступает несплавленный металлический порошок, но зачастую рекомендуется дополнительно моделировать поддержки для организации теплоотвода с целью снижения температурных деформаций детали. Применение: конечные изделия сложной геометрии, функциональная интеграция деталей, изготовление форм для литья пластиков. В зависимости от производителя оборудования данная технология также может носить название Direct Metal Printing (DMP) и Direct Metal Laser Sintering (DMLS).

Завершая обзор существующих технологий, хочется отметить, что сильные стороны аддитивного производства конечных изделий лежат в тех областях, где традиционное производство ограничено теми или иными барьерами, например, сложной формой детали, высоким весом или высокой стоимостью. Также 3D-печать является наиболее оптимальным способом сокращения времени разработки изделий за счет быстрого создания прототипов деталей и узлов. Помимо этого, аддитивные технологии незаменимы для бы-

строго и высокоточного создания литьевых форм и моделей.

Преимущества использования аддитивных технологий производства: изготовление изделия сложной геометрии;

- изготовление легковесных конструкций;
- изготовление бионических конструкций;
- выпуск изделий под конкретные требования заказчика;
- проведение функциональной интеграции изделий;
- создание форм и моделей для литья металла;
- сокращение времени разработки изделий за счет быстрого прототипирования;
- снижение производственных издержек.

Задание

По изученному материалу предоставить краткий отчет по основным технологиям, а также подготовить компьютерную модель образца детали, выданной преподавателем. Модель выполнить в САПР NX, Solidworks или Комиас-3Э и сохранить в формате STL для последующей передачи в постпроцессор для вывода управляющей программы.

Контрольные вопросы

1 Перечислите основные технологии для 3D-печати.

2 Выделите основные преимущества каждой из технологий.

3 Выделите недостатки каждой технологии.

Лабораторная работа № 4. Технологии оптического3D-сканирования

Цель работы: изучить основные технологии оптического 3D-сканирования.

Неотъемлемой составляющей развития аддитивных технологий являются технологии создания цифровых моделей физических объектов. Оптическое 3D- сканирование объектов - процесс получения компьютерной модели на основе геометрии исследуемого изделия. Данные технологии используются для метрологического контроля изделий, изготовленных как традиционным методом, так и с помощью аддитивных технологий. 3D-сканер позволяет сравнивать цифровую модель, полученную с помощью сканирования, и CAD- модель, на базе которой на ЧПУ или на 3D-принтере была изготовлена данная деталь. Также технологии сканирования физических объектов востребованы для реверс-инжиниринга, когда стоит задача разработать точную копию физического объекта. CAD-модель, полученная методом 3D-сканирования, позволяет измерять любые геометрические параметры изделий с помощью компьютерных алгоритмов, а также может быть использована для изготовления копии детали на 3D-принтере. Точность сканирования объектов составляет десятки микрон, что позволяет использовать технологии

3D-сканирования в машиностроении, автомобилестроении, приборостроении, на предприятиях аэрокосмической отрасли, а также в опытно-конструкторских бюро, НИИ и лабораториях.

Современные 3D-сканеры представляют собой высокотехнологичные устройства, основным назначением которых является создание трехмерных моделей различного рода физических объектов. Рассмотрим сканеры оптического типа, которые используются во многих профессиональных сферах и обладают массой уникальных возможностей.

Принцип работы оптических 3D-сканеров прост (рисунок 4). Процесс сканирования заключается в подсвечивании объектов создаваемым проектором структурированным светом и съемке отраженного света с определенных ракурсов. Объект сканирования засвечивают световой полоской или паттерном - эталонным монохромным рисунком. Перерабатывая отраженный сигнал и высчитывая расположение точек его поверхности на основе разницы между спроецированным и отраженным изображением, компьютер получает информацию для построения 3D-модели.

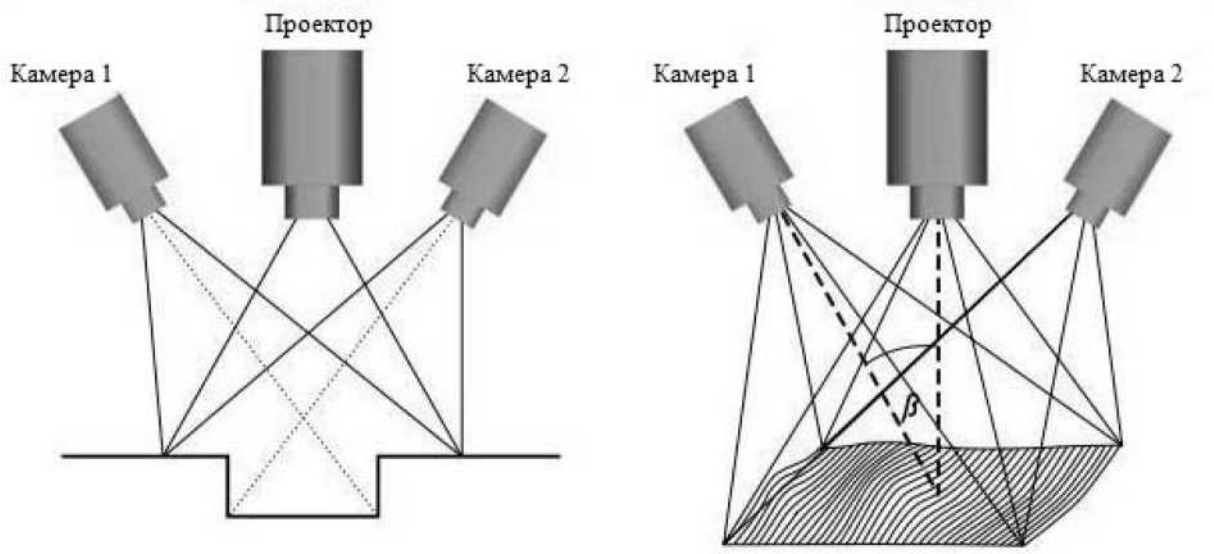


Рисунок 4 - Принцип работы оптического 3П-сканера

Все сканеры оптического типа делятся на ручные, настольные и напольные. Отдельные модели оснащены функцией цветного сканирования. Перейдем от теории к практике.

Реализованные возможности 3D-ne4amu хорошо демонстрирует примерный спектр применения этих технологий.

Авиационное подразделение General Electric - GE Aviation совместно с французским производителем авиационных двигателей Snecma разработало оптимизированную конструкцию топливной форсунки и изготовило методом аддитивных технологий 19 форсунок для установки в камеру сгорания на новый реактивный двигатель LEAP. Новое поколение пассажирских реактивных самолетов A320neo Airbus будет оснащено подобными типами двигателей. В 2015 г. в Тулузе успешно осуществлен первый полет опытного образца воздушного судна с двигателями LEAP. С 2016 г. GE Aviation намерено

выпускать подобные двигатели на коммерческой основе. Каждая топливная форсунка изготавливается аддитивным методом как единое изделие, что позволяет избежать сложной мехобработки и последующей сборки деталей. Также напечатанные форсунки могут выдерживать температуры до 2400 °C внутри камеры сгорания. Детали, изготовленные традиционным способом, теряют свои механические свойства при таких значениях температуры. Другими преимуществами перехода на аддитивный метод производства топливных форсунок стали:

- более низкие весовые характеристики (вес детали снижен на 25 %);
- упрощенная конструкция (18 деталей, необходимых для изготовления топливной форсунки традиционным методом, функционально интегрированы в одну);
- доступны новые элементы топологии детали (более сложные внутренние каналы охлаждения и прочностные элементы конструкции позволяют в 5 раз увеличить прочностные характеристики форсунок).

В сферу инжиниринговых услуг по переходу предприятий на цифровое производство также можно включить работы по оптимизации топологии изделий под 3D-печать и подготовку послойных STL-моделей к печати. Оптимизация топологии подразумевает изменение внутренней топологии деталей, снижение весовых характеристик и повышение их функциональности при сохранении прочностных и габаритных параметров. Оптимизация топологии необходима при решении задач перехода от традиционных методов изготовления деталей и узлов к цифровому производству. Подготовка STL-моделей к печати включает в себя выбор оптимальной ориентации модели на рабочей платформе и моделирование вспомогательных элементов конструкции для отвода тепла в процессе лазерного плавления металлических порошков.

Аддитивные технологии производства в первую очередь ориентированы на создание деталей сложной геометрии, функциональную интеграцию изделий либо на ограниченные тиражи продукции. Следует упомянуть и о технологических ограничениях на использование материала в процессах лазерного спекания и плавления - материал должен быть доступен в порошковой форме. Тем более, что имеются ограничения на использование аддитивных технологий в производстве. Это прежде всего высокая стоимость изготовления средних и больших тиражей деталей, а также ограниченный спектр материалов, которые доступны в порошковой форме.

Учитывая большое количество технологий 3D-ne4amu (со своими преимуществами и недостатками), сложно обобщить все факторы, влияющие на экологию при использовании аддитивных технологий производства, и сравнить их с традиционными технологиями. Но можно однозначно говорить, что общей характеристикой всех процессов промышленной 3D-печати является снижение расходного материала - при изготовлении аддитивным методом на деталь тратится существенно меньше материала, чем при изготовлении ее по традиционным субтрактивным технологиям. В дальнейшем к экологическим

преимуществам можно будет отнести снижение расхода топлива при доставке товаров - вместо отправки набора пластиковых деталей с фабрики изготовителя заказчик сможет распечатать их на 3D-nринтере. Для объективности надо заметить, что использование аддитивных технологий достаточно энергоемко. О лобби производителей традиционного оборудования ничего неизвестно, поскольку аддитивные технологии не являются конкурентом и полноценной заменой традиционным технологиям в широком спектре задач. Например, сферы применения термопласт-автомата и 3D-nринтера для печати пластиковых изделий различны. Так же как и металлический 3D-nринтер и мехобрабатывающий станок с ЧПУ не взаимозаменяемы.

Задание

Согласно пройденному материалу выбрать несколько деталей из предложенных преподавателем для дальнейшей обработки при помощи 3D-сканера. По полученному результату привести сравнительный анализ отсканированной модели с оригиналом. Для этого необходимо построить 3D-модель исследуемой детали и произвести геометрическое сравнение ее в среде САПР с отсканированной.

Контрольные вопросы

1 Опишите принцип работы 3D-сканера.
2 Преимущества и недостатки сканеров.
3 Сферы применения 3D-сканеров.

Инструкция по охране труда при работе с 3D-nрuHmepoM

Общие требования безопасности

1 К самостоятельной работе с 3D-nрuHТepoM допускаются лица, изучившие настоящую инструкцию при работе на 3D-принтере.

2 Во время работы на 3D-принтере на человека влияют следующие опасные и вредные факторы:

- испарения пластика;
- температура;
- шум.

3 При работе на 3D-принтере не допускается расположение рабочего места в помещениях без наличия естественной или искусственной вентиляции.

4 Для защиты пластика на катушке от прямых солнечных лучей должны предусматриваться солнцезащитные устройства (шторы, пленка с металлизированным покрытием, регулируемые жалюзи с вертикальными панелями и др.).

5 В помещении кабинета и на рабочем месте необходимо поддерживать

чистоту и порядок, проводить систематическое проветривание.

6 Обо всех выявленных во время работы неисправностях оборудования следует доложить руководителю, в случае поломки необходимо остановить работу до устранения аварийных обстоятельств. При обнаружении возможной опасности предупредить окружающих и немедленно сообщить руководителю; содержать в чистоте рабочее место и не загромождать его посторонними предметами.

Требования безопасности перед началом работы

1 Осмотреть и убедиться в исправности оборудования, электропроводки. В случае обнаружения неисправностей к работе не приступать. Сообщить об этом руководителю и только после устранения неполадок и его разрешения приступить к работе.

2 Проверить наличие и надёжность защитного заземления оборудования.

3 Проверить состояние электрического шнура и вилки.

4 Проверить исправность выключателей и других органов управления 3D-принтером.

5 При выявлении любых неисправностей принтер не включать и немедленно поставить в известность руководителя об этом.

6 Тщательно проветрить помещение с 3D-принтером, убедиться, что микроклимат в помещении находится в допустимых пределах: температура воздуха в холодный период года - 22 С...24 °С, в теплый период года - 23 °С...25 °С, относительная влажность воздуха - 40 %...60 %.

Требования безопасности во время работы

1 Включать и выключать 3D-прuНТер следует только выключателями, запрещается проводить отключение вытаскиванием вилки из розетки.

2 Запрещается снимать защитные устройства с оборудования и работать без них, а также трогать нагретый экструдер и столик.

3 Не допускать к 3D-принтеру посторонних лиц, которые не участвуют в работе.

4 Запрещается перемещать и переносить 3D-принтер во время печати.

5 Запрещается во время работы 3D-принтера пить рядом какие-либо напитки, принимать пищу.

6 Запрещается любое физическое вмешательство во время работы 3D-принтера, за исключением экстренной остановки печати или аварийного выключения.

7 Запрещается оставлять включенное оборудование без присмотра.

8 Запрещается класть предметы на или в 3D-принтер.

9 Строго выполнять общие требования по электробезопасности и пожарной безопасности, требования данной инструкции по охране труда при

работе на 3D-принтере.

10 Самостоятельно разбирать и проводить ремонт 3D-принтера категорически запрещается.

11 Суммарное время непосредственной работы с 3D-принтером в течение рабочего дня должно быть не более шести часов.

Требования безопасности после окончания работы

12 Отключить 3D-принтер от электросети, для чего необходимо отключить тумблер на задней части, а потом вытащить штепсельную вилку из розетки.

13Снять и протереть столик 3D-принтера, остывший до комнатной температуры, чистой влажной тканью либо промыть проточной водой и вытереть насухо. Установить столик обратно.

14 Убрать рабочее место. Обрезки пластика и брак убрать в отдельный пакет для переработки.

15 Тщательно проветрить помещение с 3D-принтером.

Контрольная работа по обратному проектированию

Задание по обратному проектированию:

Изучить оборудование 3D сканирования в аддитивном производстве.

Задание: описать виды 3D сканнеров. Расходные материалы. Правила эксплуатации и обслуживания. Особенности проектирования. Создать 3D файл с использованием 3D сканнера по заданной физической модели. Провести обратное проектирование предложенной преподавателем детали.

Список литературы

1 **Шишковский, И. В.** Основы аддитивных технологий высокого разрешения / И. В. Шишковский. - Санкт-Петербург: Из-во Питер, 2016. - 400 с.

2 **Зленко, М. А.** Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко - Москва: НАМИ, 2015. - 342 с.

3 Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / Под ред. А. Г. Григорьянц. - Москва: ИНФРА-М, 2018. - 280 с.

4 **Тарасова, Т. В.** Аддитивное производство: учебное пособие / Т. В. Тарасова. - Москва: ИНФРА-М, 2019. - 196 с.

5 **Берлинер, Э. М.** САПР в машиностроении: учебник для вузов / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов. - Москва: Форум, 2011. - 448 с.

6 Основы автоматизированного проектирования: учебник / Под ред. А. П. Карпенко. - Москва: ИНФРА-М, 2017. - 329 с.

7 **Шишов, О. В.** Современные технологии и технические средства информатизации: учебник / О. В. Шишов. - Москва: ИНФРА-М, 2017. - 462 с.

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 ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Б1.В.01 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПОВ

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

год набора: 2025

Авторы: Хорошавин С. А., канд. техн. наук, доцент; Лагунова Ю. А., д-р техн. наук, профессор

Одобрены на заседании кафедры

Горных машин и комплексов
(название кафедры)

Зав. кафедрой _____
(подпись)

Лагунова Ю.А..
(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 13.09.2024
(Дата)

Рассмотрены методической комиссией факультета

Горно-механического
(название факультета)

Председатель _____
(подпись)

Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

Введение

Цель дисциплины (модуля): формирование научного и практического представления о технике и технологии создания прототипов, овладение навыками создания новых изделий и механизмов техники или модернизации существующих аналогов.

Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины (модуля):

профессиональные

- изготовление прототипов (ПК-1.9);
- командная работа на производстве (ПК-1.10);

Результат изучения дисциплины (модуля):

Знать:

- основы трехмерного моделирования;
- основные инструменты редакторов трехмерного моделирования;
- способы формирования трехмерных объектов;
- виды материалов для прототипирования;
- принцип работы 3D-принтеров для прототипирования;
- способы и механизмы для преобразования движений;
- физико-технические эффекты, влияющие на решение конструкторских задач;
- особенности функционального конструирования;
- основные показатели технологичности конструкции, качественные и количественные методы оценки технологичности;
- требования ЕСКД.

Уметь:

- разрабатывать 3D модель объекта для будущих прототипов;
- выявлять основные элементы изделия для последующего разбиения изделия на слои;
- производить наладку 3D принтера;
- использовать технологии прототипирования для производства деталей и изделий;
- преобразовывать данные САПР в STL/AMF форматы, то есть передавать STL/AMF файлы на машины АП и вести их обработку;
- производить настройку машины, построение изделия; извлечение и очистку изделия; постобработку изделия.

Владеть:

- навыками 3D моделирования объекта для прототипирования;
- основами трехмерного моделирования;
- технологией прототипирования при изготовлении деталей и изделий;
- принципами работы аддитивных технологий, др. видами производства прототипов;
- методиками проектных и проверочных инженерных расчетов конструкций узлов технологических машин на прочность;
- навыками разработки рабочей проектной и технической документации, в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами, оформления законченных проектно-конструкторских работ.

1. ПОВТОРЕНИЕ ЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Тема 1: Введение. Общие приемы и методы изготовления деталей (прототипов).

Разработка концепции машин и устройств. Этапы и методы разработки концепции. Алгоритмические методы проектирования. Эвристические методы проектирования. Принятие решений при проектировании.

Тема 2: Основные технологии 3D печати. Аддитивные технологии.

Композиция – декомпозиция. Объединение – Дробление. Накапливание - Расходование. Преобразование – Восстановление. Колебание – Выравнивание. Управление - Неуправление. Концентрирование. Пропускание – Изолирование. Испускание – Поглощение. Сжатие – Разрежение. Фиксирование - Расфиксирование.

Соединение приводов. Последовательное соединение. Независимое параллельное соединение двигателя. Управление энергетическим потоком. Различные способы и механизмы для преобразования движений. Суммирование, реверсирование, прерывание, синхронизация движений. Преобразование движений.

Тема 3: Изучения различных кинематических решений в принтерах технологии FDM.

Центробежные силы. Инерция. Клин. Рычаг. Эксцентрик. Гидростатический эффект. Упругость. Сила тяжести. Теплопроводность материалов. Колебание. Трение. Закономерности истечения. Тепловое расширение материалов. Давление – Разрежение. Электромагнитные явления. Ферромагнитные частицы. Магнитострикция, пьезоэффект. Закон Гука. Тензометрия. Удар. Фазовое и псевдофазовое превращения. Лазер. Капилляр. Эффект струны. Эффект «память формы». Избирательный перенос при трении. Внутреннее трение. Ультразвуковое диспергирование.

Тема 4: Создание моделей в Компас 3D.

Схемы движений. Компоновка горной машины. Рациональная силовая схема. Разработка технического задания на проектирование. Формулировка задачи. Разработка технических требований с ограничениями. Основные показатели. Состав требований.

Тема 5: Запуск готовой модели на печать.

Обеспечение компактности конструкции. Совмещение различных функций. Выборка зазоров в кинематических цепях. Компенсация упругих деформаций деталей. Приводы перемещений узлов. Создание оригинальной конструкции. Морфологический анализ. Составление морфологической карты. Учет «мелочей» при конструировании. Учет ошибок конструирования. Метод анализа ошибок.

Тема 6: Фрезерная обработка как основной тип механообработки деталей прототипов

Явные и неявные ошибки. Ошибки функционирования. Ошибки формообразования. Кинематические ошибки. Ошибки компоновки. Конструкции механизмов, в которых не в полной мере учтены условия эксплуатации. Нерациональное восприятие нагрузок. Погрешности изготовления и сборки. Нерациональные конструкции. Недостатки оформления чертежей.

Тема 7: Программирование

Изменение формы. Изменение вида рабочих поверхностей. Изменение положения элементов. Преобразование структуры. Изменение связей. Преобразование в пространстве, во времени, преобразование движения и силы. Изменение материала. Использование аналогий. Использование инверсии. Совмещение функций.

Тема 8: Фрезеровка деталей. Основные элементы различных фрезерных станков

Функциональная целесообразность конструкции горной машины. Варианты конструкций. Расчетно-логический анализ по основным показателям работоспособности конструкции. Прямая и многокритериальная оптимизация. Качественные критерии работоспособности конструкции. Использование личного опыта и интуиции конструктора. Компромиссы при конструировании. Надежность, технологичность конструкции. Выход из тупи-

ковых ситуаций. «Парадоксы» конструкций. Конструктивный ряд. Типовые конструкции и модульный принцип конструирования. Конструкционный модуль. Конструирование с использованием каталогов. Конструирование с использованием аналогов.

Тема 9: Лазерная резка деталей.

Основные этапы создания машин. Проектирование. Конструирование. Технологическая подготовка производства. Изготовление и испытание опытных образцов. Освоение серийного производства. Показатели функционирования, надежности, эргономичности, эстетичности, технологичности, ресурсопотребления, безопасности, экологичности, конкурентоспособности. Конструирование и силовые схемы. Силы, действующие в конструкциях. Факторы, влияющие на выбор рациональной силовой схемы. Рациональное нагружение деталей. Избыточные и недостающие связи в конструкциях.

Тема 10: Основные элементы лазерной резки. Подготовка моделей для резки

3. ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание № 1

3.1.1. Выполнить макет шпоночного соединения

Шпоночные соединения — соединение охватывающей и охватываемой детали для передачи крутящего момента с помощью шпонки. Шпоночное соединение позволяет обеспечить подвижное соединение вдоль продольной оси.

Техническое задание

1. Сконструировать и изготовить макет шпоночного соединения (Рис. 1).
2. Выполнить чертеж макета шпоночного соединения согласно ГОСТ.
3. Макет должен зажимать вал диаметром, согласно выданному преподавателем варианту

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
$d_{вала}$=15 мм	$d_{вала}$=20 мм	$d_{вала}$=25 мм	$d_{вала}$=28 мм	$d_{вала}$=30 мм

4. В макете необходимо предусмотреть шпоночный паз шириной не менее 5 мм и длиной не менее 15 мм.
5. Форму охватывающей детали можно выполнить произвольно, но форма охватывающей поверхности должна обеспечивать люфт не более 1 мм.
6. После сборки соединения должно обеспечиваться осевое перемещение охватывающей детали с суммарным зазором (люфтом) не более 1мм;
7. Постобработку не производить.

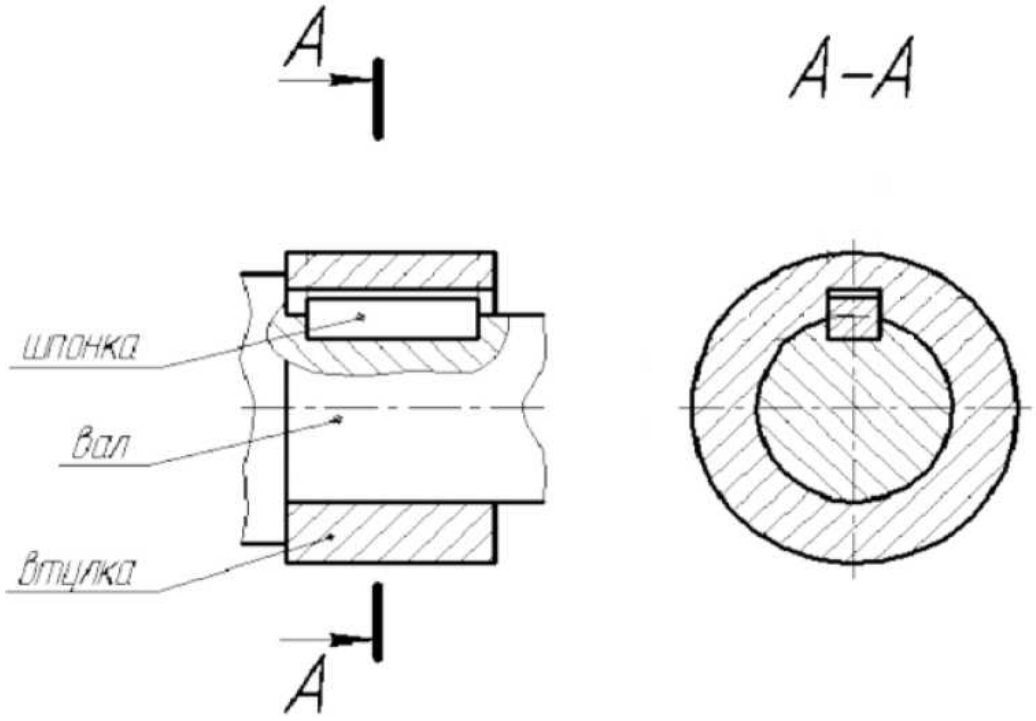


Рис. 1. Пример шпоночного соединения

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с заданием, разработать 3D-модель изделия «Макет шпоночного соединения» в CAD-системе, например:
   a) Компас 3D;
   b) FreeCad и др.

2. Модель **сохранить в формате по умолчанию** для членов жюри под номером участника.
3. Выполнить в CAD-системе чертеж макета соединения согласно ГОСТ. Чертеж **сохранить в формате .jpeg или .pdf** для членов жюри под номером участника.
4. Экспортировать (преобразовать) итоговый результат в формат для 3D- печати - .stl. Перенести файл на флэш-накопителе в CAM-программу управления 3В-принтером:
   a) Blender;
   b) 3D Builder;
   c) GoogleSketchUp;
   d) Maya;
   e) Cura;
   f) Tinkercad;
   g) Sketchup и др.
5. Модель **сохранить в формате .stl** для членов жюри под номером участника.
6. Открыть .stl файл изделия «Макет шпоночного соединения» в программе управления 3D-принтером. Выбрать оптимальные настройки печати: экструдер (если их несколько), скорость печати, заполнение.
7. **Сохранить снимок экрана** с настройками для печати **в формате .jpeg** для членов жюри под номером участника.
8. **Напечатать модель** и сдать преподавателям.

Рекомендации по изготовлению процесса печати на 3D принтере:

a. При разработке любой 3D-модели в программе следует размещать деталь на ее наибольшем из плоских оснований, поскольку принтер наращивает модель снизу вверх.

b. Не допускается отсутствие целостности сетки модели, рваная топология. Модель, состоящая из нескольких объектов, должна быть соединена в общую топологическую сетку, путем применения булеиновых операций или инструментов ретопологии, встроенных в программы 3В-моделирования.

c. Расположение частей модели не должно противоречить законам физики. 3Б-принтер не способен корректно распечатать абсолютно любую модель, и чем понятнее форма, тем ближе к задуманному будет результат печати.

d. Не допускается чрезмерная или недостаточная детализация модели. Следует учитывать, что при масштабировании модели часть деталей может быть утрачена ввиду технических возможностей принтера.

e. Не допускаются полностью пустотелые модели. У всех элементов

модели должна быть толщина стенки, либо оно должны быть замкнуты. Модели должны быть твердотелыми или с заполнением от 10 %.

f. Не допускается наложение и взаимопроникновение полигонов друг в
друга. В случае необходимости подобных решений следует использовать изменение структурной сетки (см. п. а))

g. Не допускается отсутствие касательных граней и поверхностей - расположенные слишком близко границы слипнутся ввиду технологических особенностей печати. Следует соблюдать дистанцию минимум 100 микрон (1 мкм = 0,001 мм = 0,0001 см).

№ п/п	Критерии оценивания	Баллы	Баллы по факту
1.	**Работа в CAD-системе**	**10**	
	Знание работы в CAD-системе (степень самостоятельности изготовления модели): - требуется постоянная помощь при работе с графическим редактором (0 балла), - испытывает затруднения при работе с графическим редактором, но после объяснения самостоятельно выполняет работу (2 балла); - самостоятельно выполняет все операции при изготовлении модели (5 баллов).	5	
	Технологичность (последовательность) моделирования объекта	2	
	Осознанность выполнения работы (конфигурации)	3	
2.	**Работа на 3D-принтере**	**5**	
	- Не печатал совсем (0 баллов); - Напечатал, но с отклонениями (2 балла); - правильно выбрал настройки печати, распечатал в соответствии с чертежом: (5 баллов).	5	
3.	**Оценка готовой модели**	**8**	
	Качество изделия. Соответствие чертежу. Модель требует серьёзной доработки (1 балл), Модель требует незначительной корректировки (2 балла); Модель не требует доработки - законченная модель) (4 балла).	4	
	Творческий подход	2	
	Рациональность действий в моделировании и прототипировании изделия	2	
4.	**Время изготовления - до 90 мин. (с одним перерывом 10 мин.).**	**2**	
5.	**Выполнение чертежа согласно ГОСТ**	**5**	
	Итого:	**30**	

3.1.2. Выполнить макет штифтового соединения

Штифтовые соединения предназначены для точного взаимного фиксирования деталей, а также для передачи небольших нагрузок. Штифтовое со-

единение относится к разъемным соединениям.

Штифтовое соединение образуется совместным сверлением соединяемых деталей и установкой в отверстия с натягом специальных цилиндрических или конических штифтов.

Техническое задание:

1. Сконструировать и изготовить макет штифтового соединения (Рис. 2).
2. Выполнить чертеж макета штифтового соединения согласно ГОСТ.
3. Диаметр вала согласно заданному варианту

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
25 мм	30 мм	35 мм	40 мм	45 м

4. Диаметр штифта согласно заданному варианту

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
4 мм	5 мм	6 мм	7 мм	8 мм

5. Макет должен собираться в прочное соединение;
6. Постобработку не производить.

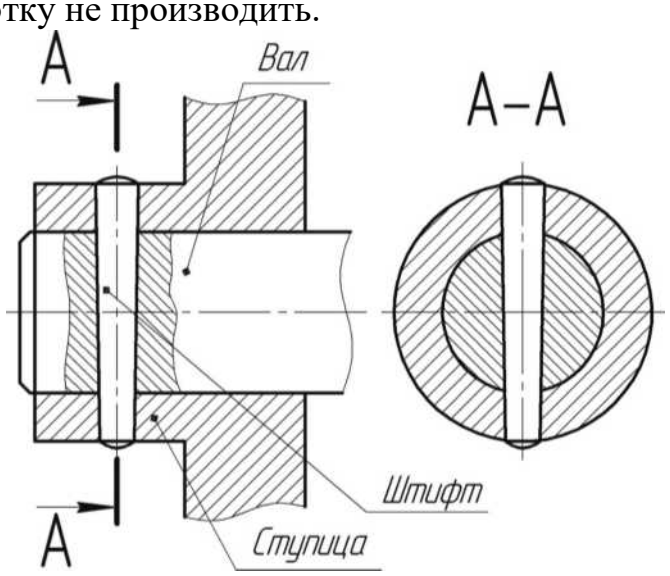


Рис. 2 Пример штифтового соединения

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с заданием, разработать 3D-модель изделия «Макет штифтового соединения» в CAD-системе, например:
   a. Компас 3D;
   b. FreeCad и др.
2. Модель **сохранить в формате по умолчанию** для членов жюри под номером участника.
3. Выполнить в CAD-системе чертеж макета штифтового соединения согласно ГОСТ. Чертеж **сохранить в формате .jpeg или .pdf** для членов жюри под номером участника.
4. Экспортировать (преобразовать) итоговый результат в формат для 3D- печати - .stl. Перенести файл на флэш-накопителе в CAM-программу управления 3В-принтером:

a) Blender;
b) 3D Builder;
c) GoogleSketchUp;
d) Maya;
e) Cura;
f) Tinkercad;
g) Sketchup и др.

5. Модель **сохранить в формате .stl** для членов жюри под номером участника.

6. Открыть .stl файл изделия «Макет штифтового соединения» в программе управления 3D-принтером. Выбрать оптимальные настройки печати: экструдер (если их несколько), скорость печати, заполнение.

7. **Сохранить снимок экрана** с настройками для печати **в формате .jpeg** для членов жюри под номером участника.

8. **Напечатать модель** и сдать членам жюри.

Рекомендации по изготовлению процесса печати на 3D принтере:

a. При разработке любой 3D-модели в программе следует размещать деталь на ее наибольшем из плоских оснований, поскольку принтер наращивает модель снизу вверх.

b. Не допускается отсутствие целостности сетки модели, рваная топология. Модель, состоящая из нескольких объектов, должна быть соединена в общую топологическую сетку, путем применения булеиновых операций или инструментов ретопологии, встроенных в программы 3В-моделирования.

c. Расположение частей модели не должно противоречить законам физики. 3В-принтер не способен корректно распечатать абсолютно любую модель, и чем понятнее форма, тем ближе к задуманному будет результат печати.

d. Не допускается чрезмерная или недостаточная детализация модели. Следует учитывать, что при масштабировании модели часть деталей может быть утрачена ввиду технических возможностей принтера.

e. Не допускаются полностью пустотелые модели. У всех элементов модели должна быть толщина стенки, либо оно должны быть замкнуты. Модели должны быть твердотелыми или с заполнением от 10%.

f. Не допускается наложение и взаимопроникновение полигонов друг в друга. В случае необходимости подобных решений следует использовать изменение структурной сетки (см. п. a).

g. Не допускается отсутствие касательных граней и поверхностей - расположенные слишком близко границы слипнутся ввиду технологических особенностей печати. Следует соблюдать дистанцию минимум 100 микрон (1 мкм = 0,001 мм = 0,0001 см)

№ п/п	Критерии оценивания	Баллы	Баллы по факту
1.	**Работа в CAD-системе**	**10**	

	Знание работы в CAD-системе (степень самостоятельности изготовления модели): - требуется постоянная помощь при работе с графическим редактором (0 балла), - испытывает затруднения при работе с графическим редактором, но после объяснения самостоятельно выполняет работу (2 балла); - самостоятельно выполняет все операции при изготовлении модели (5 баллов).	5	
	Технологичность (последовательность) моделирования объекта	2	
	Осознанность выполнения работы (конфигурации)	3	
2.	**Работа на 3D-принтере**	**5**	
	- Не печатал совсем (0 баллов); - Напечатал, но с отклонениями (2 балла); - правильно выбрал настройки печати, распечатал в соответствии с чертежом: (5 баллов).	5	
3.	**Оценка готовой модели**	**8**	
	Качество изделия. Соответствие чертежу. Модель требует серьёзной доработки (1 балл), Модель требует незначительной корректировки (2 балла); Модель не требует доработки - законченная модель) (4 балла).	4	
	Творческий подход	2	
	Рациональность действий в моделировании и прототипировании изделия	2	
4.	**Время изготовления - до 90 мин. (с одним перерывом 10 мин.).**	**2**	
5.	**Выполнение чертежа согласно ГОСТ**	**5**	
	Итого:	**30**	

3.1.3. Выполнить макет шлицевого соединения

Шлицевое (зубчатое) соединение — соединение вала (охватываемой поверхности) и отверстия (охватывающей поверхности) с помощью шлицев (пазов) и зубьев (выступов), радиально расположенных на поверхности. Обладает большой прочностью, обеспечивает соосность вала и отверстия, с возможностью осевого перемещения детали вдоль оси.

Техническое задание:

1. Сконструировать и изготовить макет шлицевого соединения (Рис. 3).
2. Выполнить чертеж макета шлицевого соединения согласно ГОСТ.
3. Макет должен содержать вал диаметром от 15мм до 30мм.
4. В макете необходимо выполнить не менее 6 пар зуб/шлиц.
5. Высота зуба не менее 4мм.
6. После сборки соединения должно обеспечиваться осевое перемещение охватывающей детали с суммарным зазором (люфтом) не более 1мм;
7. Постобработку не производить.

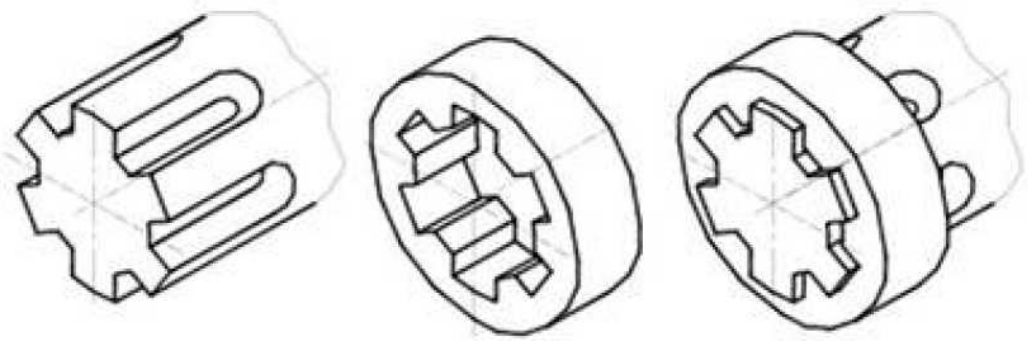


Рис. 3 Пример шлицевого соединения

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с заданием, разработать 3D-модель изделия «Макет шлицевого соединения» в CAD-системе, например:
   a. Компас 3D;
   b. FreeCad и др.
2. Модель **сохранить в формате по умолчанию** для членов жюри под номером участника.
3. Выполнить в CAD-системе чертеж макета шлицевого соединения согласно ГОСТ. Чертеж **сохранить в формате .jpeg или .pdf** для членов жюри под номером участника.
4. Экспортировать (преобразовать) итоговый результат в формат для 3D- печати - .stl. Перенести файл на флэш-накопителе в CAM-программу управления 3D-nринтером:
   a) Blender;
   b) 3D Builder;
   c) GoogleSketchUp;
   d) Maya;
   e) Cura;
   f) Tinkercad;
   g) Sketchup и др.
5. Модель **сохранить в формате .stl** для членов жюри под номером участника.
6. Открыть .stl файл изделия «Макет шлицевого соединения» в программе управления 3D-nриНТероМ. Выбрать оптимальные настройки печати: экструдер (если их несколько), скорость печати, заполнение.
7. **Сохранить снимок экрана** с настройками для печати **в формате .jpeg** для членов жюри под номером участника.
8. **Напечатать модель** и сдать членам жюри.

Рекомендации по изготовлению процесса печати на 3D принтере:

a. При разработке любой 3D-модели в программе следует размещать деталь на ее наибольшем из плоских оснований, поскольку принтер наращивает модель снизу вверх.

b. Не допускается отсутствие целостности сетки модели, рваная топология. Модель, состоящая из нескольких объектов, должна быть соединена

в общую топологическую сетку, путем применения булеиновых операций или инструментов ретопологии, встроенных в программы 3D-моделирования.

c. Расположение частей модели не должно противоречить законам физики. 3D-принтер не способен корректно распечатать абсолютно любую модель, и чем понятнее форма, тем ближе к задуманному будет результат печати.

d. Не допускается чрезмерная или недостаточная детализация модели. Следует учитывать, что при масштабировании модели часть деталей может быть утрачена ввиду технических возможностей принтера.

e. Не допускаются полностью пустотелые модели. У всех элементов модели должна быть толщина стенки, либо оно должны быть замкнуты. Модели должны быть твердотелыми или с заполнением от 10%.

f. Не допускается наложение и взаимопроникновение полигонов друг в друга. В случае необходимости подобных решений следует использовать изменение структурной сетки (см. п. a).

g. Не допускается отсутствие касательных граней и поверхностей - расположенные слишком близко границы слипнутся ввиду технологических особенностей печати. Следует соблюдать дистанцию минимум 100 микрон (1 мкм = 0,001 мм = 0,0001 см).

№ п/п	Критерии оценивания	Баллы	Баллы по факту
1.	**Работа в CAD-системе**	**10**	
	Знание работы в CAD-системе (степень самостоятельности изготовления модели): - требуется постоянная помощь при работе с графическим редактором (0 балла), - испытывает затруднения при работе с графическим редактором, но после объяснения самостоятельно выполняет работу (2 балла); - самостоятельно выполняет все операции при изготовлении модели (5 баллов).	5	
	Технологичность (последовательность) моделирования объекта	2	
	Осознанность выполнения работы (конфигурации)	3	
2.	**Работа на 3D-принтере**	**5**	
	- Не печатал совсем (0 баллов); - Напечатал, но с отклонениями (2 балла); - правильно выбрал настройки печати, распечатал в соответствии с чертежом: (5 баллов).	5	
3.	**Оценка готовой модели**	**8**	
	Качество изделия. Соответствие чертежу. Модель требует серьёзной доработки (1 балл), Модель требует незначительной корректировки (2 балла); Модель не требует доработки - законченная модель) (4 балла).	4	
	Творческий подход	2	

	Рациональность действий в моделировании и прототипировании изделия	2	
4.	**Время изготовления - до 90 мин. (с одним перерывом 10 мин.).**	**2**	
5.	**Выполнение чертежа согласно ГОСТ**	**5**	
	Итого:	**30**	

Задание № 2

3.2.1. Выполнить 3D-моделирование детали «Вал», разработать рабочие чертежи

	Длина вала, мм	d_1 , мм	d_2/ d_4, мм	d_3/ d_5, мм
Вариант 1	200	80	60/60	40/40
Вариант 2	220	100	80/80	60/60
Вариант 3	240	100	80/60	60/40
Вариант 4	260	120	100/100	80/80
Вариант 5	280	120	100/80	80/60
Вариант 6	300	140	120/120	100/100
Вариант 7	320	150	130/120	110/100
Вариант 8	340	160	140/120	120/100
Вариант 9	360	180	160/160	140/140
Вариант 10	380	200	180/180	160/160

3.2.2. Выполнить 3D-моделирование детали «Колесо зубчатое», разработать рабочие чертежи

	Диаметр вала, мм	m , мм	z	B, мм
Вариант 1	80	1,25	20	50
Вариант 2	100	1,5	25	52
Вариант 3	100	2,0	25	56
Вариант 4	120	2,5	30	58
Вариант 5	120	1,25	32	60
Вариант 6	140	1,5	40	62
Вариант 7	150	2,0	46	64
Вариант 8	160	2,5	50	70
Вариант 9	180	2,0	56	72
Вариант 10	200	2,5	58	80

3.2.3. Выполнить 3D-моделирование детали «Крышка» (10 вариантов), разработать рабочие чертежи

	Диаметр, мм	Толщина, B, мм
Вариант 1	80	30
Вариант 2	100	32
Вариант 3	100	36
Вариант 4	120	38
Вариант 5	120	40
Вариант 6	140	42
Вариант 7	150	44
Вариант 8	160	50
Вариант 9	180	52

Вариант 10	200	58

4. Выполнить 3D-моделирование детали «Ручка» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи.

5. Выполнить 3D-моделирование детали «Маслоуказатель» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи;

6. Выполнить 3D-моделирование детали «Корпус редуктора» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи;

7. Выполнить 3D-моделирование детали «Крышка редуктора» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи;

8. Выполнить 3D-моделирование детали «Подшипник» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи;

9. Выполнить 3D-моделирование детали «Вал-шестерня» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи;

10. Выполнить 3D-моделирование детали «Червяк» (варианты предложенные преподавателем), разработать рабочие чертежи.

Задание № 3

1. Выполнить печать 3D-модели детали «Вал» (по вариантам задания 2);

2. Выполнить печать 3D-модели детали «Колесо зубчатое» (по вариантам задания 2);

3. Выполнить печать 3D-модели детали «Крышка» (по вариантам задания 2);

4. Выполнить печать 3D-модели детали «Ручка» (по вариантам задания 2);

5. Выполнить печать 3D-модели детали «Маслоуказатель» (по вариантам задания 2);

6. Выполнить печать 3D-модели детали «Корпус редуктора» (по вариантам задания 2);

7. Выполнить печать 3D-модели детали «Крышка редуктора» (по вариантам задания 2);

8. Выполнить печать 3D-модели детали «Подшипник» (по вариантам задания 2);

9. Выполнить печать 3D-модели детали «Вал-шестерня» (по вариантам задания 2);

10. Выполнить печать 3D-модели детали «Червяк» (по вариантам задания 2).

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1.Что такое проектирование изделий?
2.Как вы понимаете понятие конструирование изделий?
3.Какие основные этапы включает в себя разработка изделия?
4. Какие этапы включает в себя жизненный цикл изделий?
5. Какие основные работы, выполняемые в процессе проектирования и конструирования, Вы знаете?
6. Что вы понимаете под понятиями модель и 3D-модель?
7. Какие этапы включает в себя жизненный цикл изделий?
8.Для чего предназначена система автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D»?
9. Какие компоненты включает в себя система автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D»?
10. Какие форматы файлов используются в программе «КОМПАС-3D»?
11.Что такое аддитивные технологии производства?
12.Что является основными историческими предпосылками появления аддитивных технологий?
13.Какие основные критерии выбора аддитивных технологий вы знаете?
14.Как можно классифицировать аддитивные технологии производства?

15.Какое оборудование применяется для быстрого прототипирования с использованием аддитивных технологий?
16.Что такое 3D – принтер?
17.Назовите основные технологии 3D-печати.
18.В каких отраслях промышленности используются технологии быстрого прототипирования?
19.Расскажите об особенностях применения ABS-пластика и его технических характеристиках?
20.Расскажите об особенностях применения PLA-пластика и его технических характеристиках?
21.Что такое субтрактивные технологии производства?
22.Как можно классифицировать субтрактивных технологий производства?
3.Какое оборудование применяется для быстрого прототипирования с использованием субтрактивных технологий?
24.Что такое 3D-гравер?
25.Что такое 3D-фрезер?
26.Какие форматы файлов применяются при 3D-моделировании и 3D-фрезеровании?
27. Общие термины быстрого прототипирования?.
28. Преимущества и проблемы быстрого прототипирования?
29. Классификация методов, систем и установок быстрого прототипирования?
30. Каковы пути повышения точности воспроизведения моделей и качества поверхности?
31. CAD/CAM/CAE для систем быстрого прототипирования.
32. STL формат данных для быстрого прототипирования?
33. Проблемы STL формата.
34. Дизайн в быстром прототипировании.
35. Методики сканирования и последовательность построения годных и негодных ячеистых (мозаичных) моделей.
36. Точность и ошибки воспроизведения 3D изделий средствами САПР, оценка качества и вопросы стандартизации.
37. Методы быстрого прототипирования с участием жидкой фазы.
38. Твердофазные методы быстрого прототипирования.
39. Методы быстрого прототипирования на порошковой основе.
40. Субтрактивные технологии быстрого прототипирования.
41. Быстрая инструментовка.
42. Обратное проектирование.
43. Аддитивные технологии в индустрии, архитектуре, искусстве.
44. Биопрототипирование и медицинские приложения.
45. Типовой технологический процесс обработки детали с применением станков с ЧПУ
46. Особенности проектирования технологических процессов для автоматических линий.
47. Контроль технологических параметров.
48. Классификация сложнопрофильных деталей.
49. Функциональное назначение и области применения сложнопрофильных деталей.
50. Материалы сложнопрофильных деталей.

5. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

№ п/п	Наименование	Кол-во экз.
1	Никонов В. КОМПАС-3D: создание моделей и 3D-печать. СПб.: Питер, 2020.	10

	208 с.: ил. (Серия «Учебное пособие»).	
2	Канесса Э. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития. 2013 г.	25
3	Лагунова Ю. А., Комиссаров А.П., Шестаков В.С. и др. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Горные машины. Т. IV-24, 2011. 496 с.	20
4	Должиков, В.П. Технологии наукоемких машиностроительных производств [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.П. Должиков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 304 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/81559	ЭОР
5	Черемисин, В. В. Дизайн-проектирование: генерация идеи, эскизирование, макетирование и визуализация: учебное пособие / В. В. Черемисин. — Тамбов: ТГУ им. Г.Р. Державина, 2020. — 116 с. — ISBN 978-5-00078-386-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/170368	ЭОР
6	Поляков А.Н. Основы быстрого прототипирования: учебное пособие/ А.Н.Поляков, А.И.Сердюк, К.С. Романенко, И.П.Никитина; Оренбург: ОГУ, 2014.-128 с. - Доступ из ЭБС «Университетская библиотека online» Режим доступа: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=259324	ЭОР
7	Каменев С. В., Романенко К. С. Технологии аддитивного производства : учебное пособие /; Оренбургский государственный университет. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – 145 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481769 . – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7410-1696-1. – Текст : электронный	ЭОР
8	Демидов А.В. Прототипирование деталей машин. Изд-во: Инфра-Инженерия, 2025	10

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению самостоятельной, практической и курсовой работы

Б1.В.02 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Форма обучения: ***очная, заочная, очно-заочная***

год набора: **2025**

Автор: Лагунова Ю. А., д.т.н., проф.

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Горных машин и комплексов	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Лагунова Ю.А..	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

КОМПЛЕКТ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Контрольная работа Изучение структуры технологического процесса ***по темам 1-3***

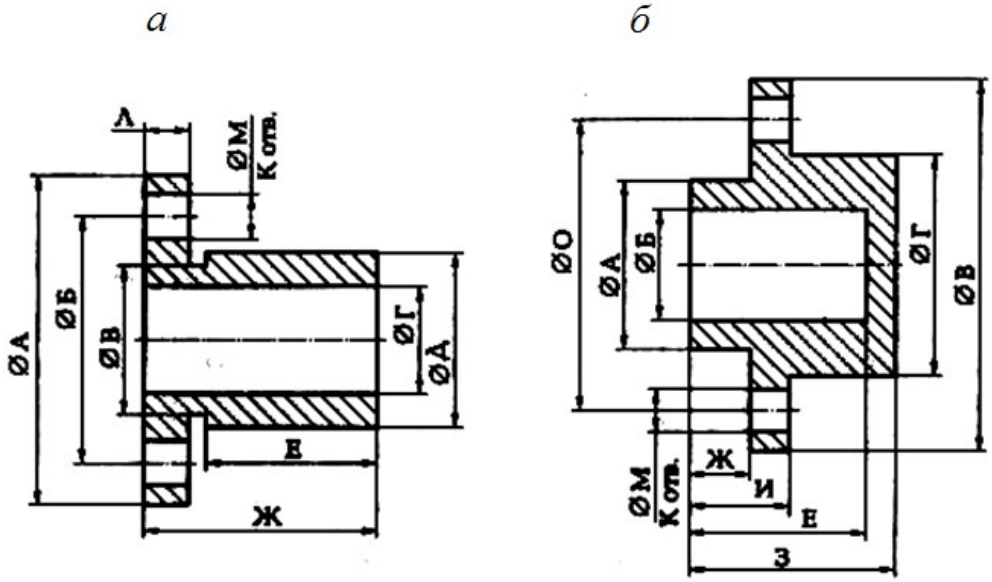


Рис. 1.1. Исходная информация для выполнения контрольной работы :
а – первая деталь; *б* – вторая деталь

Задание:

- выделить по прилагаемому к заданию чертежу детали (рис. 1.1, *б* и табл.1.1) основные операции механической обработки;
- по каждой операции назвать переходы, проходы, установы, позиции;
- показать операции с максимально возможной степенью дифференциации, когда каждая операция предельно проста, так как состоит из одного-двух простых переходов;
- показать одну операцию с максимально возможной степенью концентрации, когда совмещают ряд переходов для одновременной обработки несколько поверхностей;
- выделить вспомогательные переходы при обработке детали;
- показать одну операцию с максимально возможной степенью концентрации, когда совмещают ряд переходов для одновременной обработки несколько поверхностей;
- выделить вспомогательные переходы при обработке детали.

Таблица 1.1

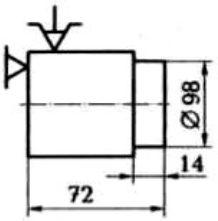
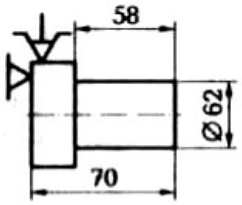
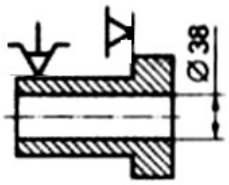
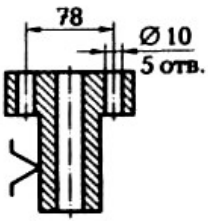
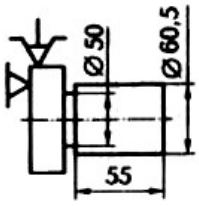
Индивидуальные варианты

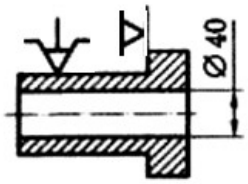
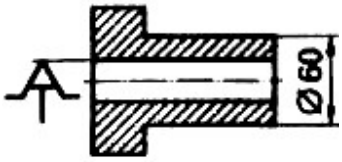
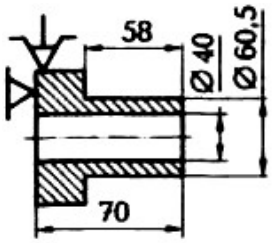
	варианты			
	1	2	3	4
Ø А	30*h*9	35*h*9	40*h*9	36*h*9
ØБ	25	30	34	30
Ø В	70	80	80	75
Ø Г	35	40	45	42
Ø М	8*H*9	10*H*9	12*H*9	10*H*9
Размер Ж	8	12	14	10
Размер З	25	30	32	28

Размер И	12	18	19	15
РазмерЕ	20	26	28	24
Ø О	50*js*l4	65*js*9	60*js*l4	55*jsl*4
Число К отверстий	2	4	6	4

Таблица 1.2

Пример выполнения контрольной работы (рис.1.1 (а))

Номер и наименование операции	Операционный эскиз	Содержание переходов
Основное задание		
05 – токарная черновая		Установить заготовку. Подрезать торец на размер 72 мм. Точить Ø98 мм за один проход на длину 14 мм. Снять деталь
10 – токарная черновая		Установить заготовку. Подрезать торец на размер 70 мм. Точить Ø62 мм за несколько проходов, выдерживая размер 58 мм. Снять деталь
15 – токарная черновая		Установить заготовку. Сверлить отверстие предварительно Ø20 мм. Расточить отверстие Ø38 мм. Снять деталь
20 –сверлильная		Установить заготовку. Сверлить 5 отверстий предварительно Ø9,6 мм. Зенкеровать 5 отверстий Ø 9,9 мм. Развернуть 5 отверстий Ø10Н9. Снять деталь
25 – токарная чистовая		Установить заготовку. Обточить Ø60,5 мм. Точить канавку Ø50 мм резцом шириной 5 мм. Снять деталь

30 – токарная чистовая		Установить заготовку. Расточить отверстие Ø40 мм. Снять деталь
35 – шлифовальная		Установить заготовку. Шлифовать наружную поверхность Ø60 мм. Снять деталь
40 – контрольная	См. рис. 2.1 и табл. 2.1	Контроль геометрических параметров
Дополнительное задание		
операция с высокой степенью концентрации		Установить заготовку. Подрезать торец на размер 70 мм. Точить Ø62 мм за несколько проходов, выдерживая размер 58 мм. Точить Ø60,5 мм. Сверлить центральное отверстие Ø20 мм. Расточить центральное отверстие Ø38 мм. Расточить центральное отверстие Ø40 мм. Точить канавку Ø50 мм резцом шириной 5 мм. Снять деталь

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПРОСА

1. Основные этапы процесса производства машин.
2. Общие понятия о типах производств.
3. Какие изделия машиностроения вы знаете?
4. Каковы основные этапы производственного процесса?
5. По каким признакам классифицируют технологические процессы машиностроения?
6. Какие элементы входят в структуру технологического процесса?
7. Как осуществляется классификация деталей по их конструктивным характеристикам?
8. Для чего используется технологическая классификация деталей?
9. Какова структура полного конструкторско-технологического кода детали?
10. Для решения каких задач используется классификация технологических операций?
11. Какова структура кода технологической операции?
12. Какие характерные признаки для разных типов производства вы знаете?
13. . Технологический переход
14. Установ, позиции, проход
15. Типы машиностроительных производств.
16. Характеристика массового производства

17. Коэффициент закрепления операций.
18. Поточное и не поточное производство
19. Характеристика серийного производства
20. Характеристика единичного производства
21. Классификация баз при механической обработке.
22. Основные принципы базирования. Примеры погрешностей базирования.
23. Исходные данные для проектирования технологического процесса.
24. Базирование детали при обработке. Конструкторская, измерительная, технологическая база.
25. Принцип единства баз.
26. Принцип постоянства баз
27. Как определить период стойкости инструмента, обеспечивающий минимум себестоимости технологической операции?
28. Как режимы обработки влияют на себестоимость технологического перехода?
29. Как влияет точность обработки на технологическую себестоимость технологического перехода?
30. Какие существуют методы расчета припусков на обработку?
31. В чем заключается расчетно-аналитический метод определения припуска?
32. Факторы, влияющие на величину припуска.
33. Основные принципы разработки маршрутного технологического процесса
34. Факторы, влияющие на точность обработки деталей.
35. Какие существуют виды погрешностей?
36. Что такое технологическая наследственность?
37. Что такое достижимая и экономическая точность обработки?
38. Какие существуют способы обеспечения точности обработки.
39. Точность обработки (общие понятия). Методы расчета точности.
40. Понятие о систематических и случайных погрешностях при обработке.
41. Методы учета случайных погрешностей при механической обработке.
42. Какие существуют методы борьбы с внутренними напряжениями в крупных отливках и штамповках.
43. Какие составляющие силы резания вызывают наибольшие деформации детали?
44. Какими свойствами определяется качество обработки детали.
45. Как качество поверхностного слоя (его параметры) влияет на эксплуатационные свойства детали?
46. Технологические характеристики получения заготовок методами литья.
47. Технологические характеристики получения заготовок методами пластического де формирования.
48. Факторы, влияющие на качество обработанной поверхности.
49. Жесткость технологической системы и ее влияние на точность обработки.
50. Экономическая и достижимая точность обработки.
51. Методы учета случайных погрешностей при механической обработке.
52. Понятие о систематических и случайных погрешностях при обработке.
53. Чем определяется вид заготовки?
54. Какие методы получения заготовок применяются в мелкосерийном, серийном, массовом производствах?
55. Какие методы обоснования эффективности применяются в серийном и массовом производствах?
56. Что такое техническое нормирование?
57. Что такое техническая норма времени на операцию?
58. Что такое штучное время на операцию?
59. Что такое норма выработки?
60. Структура нормы времени.

61. Для чего нужно определять трудоемкость обработки детали?
62. Какие существуют методы определения нормы времени?
63. Что такое подготовительно-заключительное время? Как оно определяется?
64. Параметры режима резания и их влияние на норму времени на операцию.
65. Что такое операционное время? Его составляющие.
66. Что такое технологический процесс?
67. Какие две задачи решают при проектировании технологического процесса?
68. Назовите необходимые данные для проектирования технологического процесса.
69. Назовите основные этапы разработки технологического процесса.
70. Нарезание зубчатых колес по методу обкатки.
71. Выбор вариантов при разработке технологического процесса.
72. Технологическая документация, ее виды и области применения.
73. Структура себестоимости изготовления деталей в машиностроении.
74. Какова степень проработки технологического процесса в зависимости от масштаба производства?
75. Что характеризует тип производства? Как определяется коэффициент серийности?
76. Типовые технологические процессы изготовления корпусных деталей.
77. Технология изготовления рычагов.
78. Типовые технологические процессы изготовления зубчатых колес
79. Типовые технологические процессы изготовления деталей типа «валы».
80. Типовые технологические процессы изготовления деталей типа « втулки»
81. Нарезание зубчатых колес по методу копирования.
82. Отделочная обработка зубчатых колес.
83. Методы нарезания наружной и внутренней резьбы.
84. Методы обработки шлицевых поверхностей.
85. В чем заключается типизация технологических процессов

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ КУРСОВЫХ РАБОТ

1. Проектирование технологического процесса изготовления зубчатого колеса
2. Проектирование технологического процесса изготовления промежуточного вала
3. Проектирование технологического процесса изготовления шлицевого вала
4. Проектирование технологического процесса изготовления вала-шестерни
5. Проектирование технологического процесса изготовления втулки

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Тест 1

1.**Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:**
Для всех классов деталей признаются нетехнологичными следующие элементы:
1. отверстия с L/D<5;
2. отверстия, расположенные под углом к оси;
3. глухие отверстия с резьбой;
4. открытые с одной или с двух сторон пазы.

2.При черновой обработке точность после сверления будет . . .
1. JT11
2. JT14
3. JT8
4. JT4

3.Прибор принцип которого, основан на измерении микро неровностей поверхности путем ощупывания ее алмазной иглой:
1. профилометр;
2. профилограф;
3. оптические приборы;
4. осциллограф.

4. Производство, в котором при достаточно большом количестве одинаковых выпусков изделий изготовление их ведется путем непрерывного выполнения на рабочих местах одних и тех же постоянно повторяющихся операций:
1. Единичное
2. Серийное
3. Индивидуальное
4. Массовое

5. На величину припуска не влияет:
1. Толщина дефектного поверхностного слоя
2. Сумма припусков на черновую обработку
3. Сумма припусков на чистовую обработку
4. Погрешность измерения

6. Основные факторы, влияющие на величину припусков:
1. материал заготовки
2. конфигурация и размеры заготовки
3. вид заготовки и способ её изготовления
4. требования в отношении механической обработки

7. Часть операции, выполняемая при одном закреплении заготовки на станке или в приспособлении:
1. Технологическая операция
2. Установ
3. Технологический переход
4. Вспомогательный переход

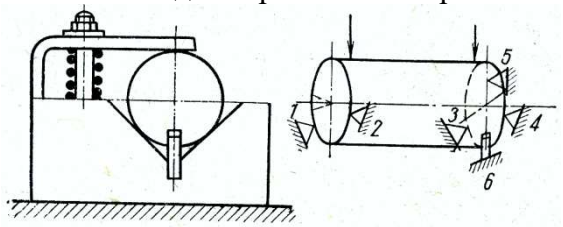
8. Укажите неправильное условие при установлении нормы времени?
1. в норму времени не должно включаться время на исправление забракованных деталей
2. в норму времени не должны быть включены те ручные приемы, которые могут быть выполнены одновременно с работой станка
3. в норму времени должны входить потери времени, из-за каких либо организационных неполадок
4. должны быть применены наиболее эффективные для данной работы приспособления и инструменты

9. Какой материал не используют для изготовлении валов:
1. Высокоуглеродистые стали
2. Низкоуглеродистые стали
3. Конструкционные и легированные стали
4. Чугун

10. Чему равен угол метрической резьбы треугольного профиля?
1. 50°
2. 55°
3. 60°
4. 65°

11. Каким методом в единичном производстве получается требуемый размер?
1.Пробных проходов
2.Автоматического получение требуемого размера
3.Однопроходный
4.Разовый

12. Какой вид базирования изображен на рисунке?



1. базирование призмы в тисках;
2. схема установки детали на поверхность;
3. базирование детали (правило шести точек);
4. базирование цилиндрической детали на призме.

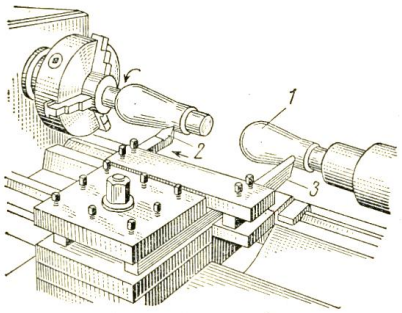
13. Технологической задачей при изготовлении валов не является:
1. Обеспечение заданной точности
2. Обеспечение точности формы
3. Обеспечение точности взаимного расположения поверхностей
4. Обеспечение заданной температуры при обработке

14. Под производственным процессом понимают:
1. Совокупность отдельных процессов, осуществляемых для получения из материалов и заготовок готовых изделий, машин
2. Последовательное изменение формы, размеров и свойств материала в целях получения детали

3. Совокупность отдельных процессов, осуществляемых для получения материалов и заготовок
4. Процесс по изменению и последующему определению состояния предмета производства

15. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
Детали типа валов признаются технологичными, если они отвечают следующим требованиям:
1. возможность вести обработку проходными резцами;
2. увеличение диаметров поверхностей от середины к торцам вала;
3. жесткость вала обеспечивает достижение необходимой точности при обработке;
4. возможность замены открытых шпоночных пазов закрытыми.

16. Что показано на рисунке?



1. Обтачивание фасонной поверхности по копиру.
2. Одновременное обтачивание фасонных поверхностей.
3. Обтачивание фасонной поверхности призматическим резцом.
4. Обтачивание фасонной поверхности упорным резцом.

Тест 2

1.Погрешность базирования возникает вследствие:

1. несовмещения установочной базы с измерительной;
2. совмещение технологической, конструкторской и измерительной баз;
3. полное совпадение баз.
4. полное не совпадение баз

2.Основное (технологическое) время для точения на токарных станках:

1. $t_0 = \frac{l*i}{n*s}$ 2. $t_0 = \frac{l}{n*s}$ 3. $t_0 = \frac{l}{3n*s}$ 4. $t_0 = \frac{L}{S_M}$

3.Время технического обслуживания рабочего места затрачивается рабочим на уход за рабочим местом в процессе работы; сюда входит:
1. время на осмотр и опробование станка;
2. время на подналадку и регулировку станка в процессе работы;
3. время на перемещение инструмента;
4. время на измерение

4. Признаком соответствия детали заданным требованиям не является:
1.Точность формы и размеров

2.Точность взаимного расположения поверхностей
3.Степень шероховатости поверхности
4.Время изготовления

5. Вид обработки, применяемый преимущественно для точной обработки отверстий (брусками):
1. Шлифование
2. Хонингование
3. Сверление
4. Фрезерование

6. Выбрать неверное утверждение
1. Конструкция детали должна состоять из унифицированных стандартных элементов
2. Детали могут изготавливаться из любых типов заготовок
3. Размеры и поверхности деталей должны иметь оптимальную точность и шероховатость
4. Метод изготовления должен обеспечивать возможность обработки одновременно нескольких деталей

7.Какой вид термической обработки используется для упрочнения поверхностного слоя деталей:
1. Отпуск
2. Закалка
3. Химико-термическая обработка
4. Закалка ТВЧ

8.Поверхность, от которой при измерении производится непосредственный отсчет размеров.
1. Установочная база
2. Вспомогательная установочная база
3. Измерительная база
4. Сборочная база

9.Тип производства, при котором изделия изготовляются единичными экземплярами разнообразными по конструкции или размерам:
1. массовое
2. Единичное
3. Серийное
4. Поточно-массовое

10.Для чего служит притирка?
1. Для отделочной обработки деталей из цветных металлов и сплавов
2. Для чистовой отделки наружных цилиндрических поверхностей
3. Для окончательной отделки предварительно отшлифованных поверхностей детали
4. Для чистовой обработки поверхности мягким кругом с нанесённым на него мелкозернистым, абразивным порошком

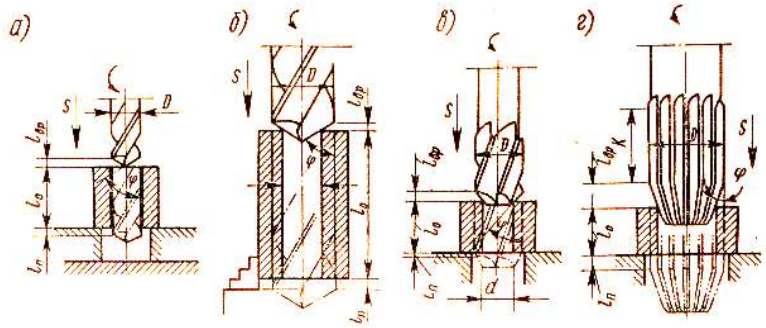
11.По какой формуле определяется основное время резания?
1. $to = \frac{L+y}{So \times n} \times i$;*
2. $to = tп.з. + tус. + tв.о. + tуп. + tиз. + tв. + tшт.$;
3. $to = tус. + tв.о. + tуп. + tиз.$;

4. $to = tшт + \frac{tпз}{n}$.

12. Факторы, не влияющие на величину припусков:
1. Способ обработки
2. Режим резания металла
3. Материал заготовки
4. Материал инструмента

13. Слой металла, подлежащий удалению с поверхности заготовки в процессе обработки для получения готовой детали:
1. Припуск
2. Допуск
3. Напуск
4. Запуск

14. По какой из схем определяют длину прохода инструмента при обработке отверстия методом зенкерования?



Схемы для определения длины прохода инструментов при обработке отверстий

15. Типом производства не является:
1. Серийное
2. Массовое
3. Поточное
4. Единичное

16.Выберите Н**ЕВЕРНОЕ** утверждение:
Для всех классов деталей признаются нетехнологичными следующие элементы:
1. отверстия с L/D<5;
2. отверстия, расположенные под углом к оси;
3. глухие отверстия с резьбой;
4. открытые с одной или с двух сторон пазы.

Тест 3

1.Поверхность, лишающую заготовку или изделие 3-х степеней свободы называют:
1. установочной базой;
2. направляющей базой;
3. опорной базой.
4. двойной направляющей

2.Производство, в котором при достаточном большом кол-ве одинаковых выпусков изделий изготовление их ведется путем непрерывного выполнения на рабочих местах одних и тех же постоянно повторяющихся операций:
1. Единичное 2. Серийное 3. Массовое 4. Мелкосерийное

3.Основная характеристика деталей машин или приборов:
1. жесткость;
2. точность;
3. мощность;
4. размер.

4. Поверхность, заменяющая ее совокупность поверхностей, ось, точку детали или сборочной единицы, по отношению к которым ориентируются другие детали, обрабатываемые или собираемые на данной операции:
1.. Плоская
2.. Цилиндрическая
3.. Основная
4.. База

5. К методам обработки плоских поверхностей не относится:
1.. Строгание
2.. Фрезерование
3.. Шлифование
4.. Точение

6.Установочной базой называется поверхность, при установке на которую тело лишается . . . степеней свободы.
1. двух
2. трёх
3. пяти
4. шести

7. Поверхность, которая служит для установки детали при обработке и сопрягается с другой деталью, совместно работающей в собранной машине, или оказывает влияние на работу данной детали в машине называется …. технологической базой.
1. измерительной
2. вспомогательной
3. основной
4. сборочной

8. В чем заключается принцип совмещения баз?
1. В том, что сборочная база является установочной
2. В том, что сборочная база является измерительной
3. В том, что для выполнения всех операций обработки детали используют одну и ту же базу
4. В том, что сборочная база является одновременно установочной и измерительной

9. Поверхность, от которой при измерении производится непосредственный отсчет размеров, называется:
1. Основной установочной базой
2. Сборочной базой
3. Измерительной базой

4. Конструктивной базой

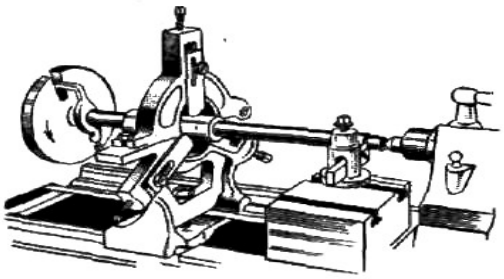
10.Факторы, влияющие на величину припусков:
Материал инструмента
Материал заготовки
Режим резания металла
Способ обработки

11. При обработке наружных поверхностей тел вращения базой для выполнения ряда операций будут являться:
1. Цилиндрическая поверхность
2. Торцы детали
3. Центровые отверстия
4. Крайние шейки детали

12.Изделие, изготовленное из однородного материала без применения сборочных операций?
1. деталь
2. сборочная единица
3. комплекс
4. комплект

13. В результате несоответствия действительных движений заготовки и инструмента движениям, предусмотренным кинематической схемой станка:
1. Увеличивается шероховатость
2. Повышается точность изготовления
3. Снижается время обработки
4. Возникает погрешность обработки

14. Что изображено на рисунке?



1. Обработка вала на токарном станке в центрах с применением неподвижного люнета
2. Обработка вала на токарном станке в центрах с применением подвижного люнета
3. Установка вала в центрах с поводковым патроном
4. Шлифование вала

15. Вид обработки, осуществляемый с помощью абразивного инструмента:
1. Точение
2. Протягивание
3. Сверление
4. Шлифование

16. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
Для всех классов деталей признаются нетехнологичными следующие элементы:
1. отверстия с L/D<5;

2. отверстия, расположенные под углом к оси;
3. глухие отверстия с резьбой;
4. открытые с одной или с двух сторон пазы.

Тест 4

1. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
Вспомогательное время, связанное с переходом, включает:
1. время на изменение частоты вращения шпинделя;
2. время на изменение величины и направления подачи;
3. время на смену инструмента;
4. получение приспособления исполнителем работы на складе.

2. Поверхность детали ,которая служит только для её установки при обработке, не сопрягается с другой деталью совместно работающей в собранной машине :
1. Основной установочной базой
2. Измерительной установочной базой
3. Конструктивной базой
4. Вспомогательной установочной базой

3. Звено, получаемое при построении размерной цепи последним:
1. конечное звено;
2. замыкающее звено;
3. последнее звено.

4. При обработке наружных поверхностей тел вращения базой для выполнения ряда операций будут являться:
1. Цилиндрическая поверхность
2. Торцы детали
3. Центровые отверстия
4. Крайние шейки детали

5. Явление переноса свойств от предыдущей к последующей операции и сохранение этих свойств называется . .
1. технологическим наследованием
2. техническим наследованием
3. конструктивной наследственностью
4. технологической последовательностью

6. Что неверно?
1. Конструкция детали должна состоять из унифицированных стандартных элементов
2. Детали могут изготавливаться из любых типов заготовок
3. Размеры и поверхности деталей должны иметь оптимальную точность и шероховатость
4. Метод изготовления должен обеспечивать возможность обработки одновременно нескольких деталей

7. Какой способ установки обеспечивает закрепление и придание определенного положения детали для обработки с достаточно высокой точностью и с наименьшей затратой времени?
1. установка детали на столе станка по разметке
2. установка детали в специальном приспособлении
3. установка детали непосредственно на столе станка

4. установка детали в универсальном приспособлении

8. По какой формуле определяется основное (технологическое) время для точения на токарных станках?

1. $t_0 = \frac{l*i}{n*s}$ 2. $t_0 = \frac{l}{n*s}$ 3. $t_0 = \frac{l}{3n*s}$ 4. $t_0 = \frac{L}{S_M}$

9.Норма штучного времени на обработку определяется по формуле:

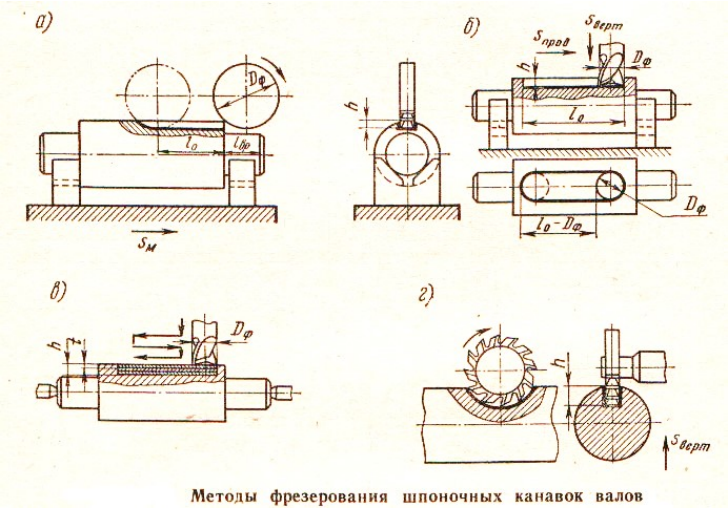
1. $t_{ШТ} = t_O + t_B + t_{ОБ} + t_ф$
2. $t_{ШТ} = t_O + t_B$
3. $t_{ШТ} = t_{шт} * n + T_{пз}$
4. $t_{ШТ} = t_O + t_B + t_{Т.ОБ} + t_{О.ОБ} + t_ф$

10. При каком шлифовании деталь не закрепляется в центрах?
1. Шлифование способом поперечной подачи
2. Шлифование абразивной лентой
3. Бесцентровое шлифование
4. Шлифование способом продольной подачи

11. Производство, характеризующееся широкой номенклатурой изготовляемых или ремонтируемых изделий и малым объемом их выпуска:
1. Массовое
2. Серийное
3. Единичное
4. Широко номенклатурное

12. Законченная часть технологического перехода в виде однократного перемещения инструмента относительно заготовки сопровожденного изменением формы, размеров, шероховатости поверхности или свойств заготовки?
1. вспомогательный ход
2. рабочий ход
3. вспомогательный переход
4. технологический переход

13. На каком рисунке указан метод фрезерования шпоночной канавки вала фрезой с маятниковой подачей?



Методы фрезерования шпоночных канавок валов

14. Деталь, содержащая систему отверстий и плоскостей, координированных друг относительно друга:
1. Корпус
2. Станина
3. Стол
4. Подставка

15. Измерительной базой называется:
1. Поверхность, от которой производится отсчет размеров
2. Поверхность, которой она устанавливается для обработки в определенном положении, относительно станка
3. Поверхность, которая определяет положение данной детали относительно других деталей в узле
4. Обработанная поверхность, которая служит для последующей обработки

16. Погрешность базирования возникает вследствие:
1. не совмещения установочной базы с измерительной;
2. совмещение технологической, конструкторской и измерительной баз;
3. полное совпадение баз.
4. полное не совпадение баз

Тест 5

1. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. отрубка – операция полного отделения части заготовки;
2. прошивка – устранение искажения формы поковок путем пластического деформирования;
3. протяжка – увеличение длины исходной заготовки за счет уменьшения поперечного сечения;
4. осадку применяют для получения поковок с большим поперечным сечением из заготовок меньшего поперечного сечения.

2.Сколько шпинделей имеет фрезерно-центровальный станок?
1.)3 2.)4 3.) 6 4.) 1

3. Производство, характеризующееся широкой номенклатурой изготовляемых или ремонтируемых изделий и малым объемом их выпуска:

1. Массовое
2. Серийное
3. Единичное
4. Широко номенклатурное

4. При обработке наружных поверхностей тел вращения базой для выполнения ряда операций будут являться:
1. Цилиндрическая поверхность
2. Торцы детали
3. Центровые отверстия
4. Крайние шейки детали

5.Определить тип производства, если коэффициент загрузки оборудования равен 1 ($К_{з.о.}$= 1).
1. единичное производство
2. мелкосерийное производство
3. массовое производство
4. крупносерийное производство

6.Установочной базой называется поверхность, при установке на которую тело лишается ... степеней свободы.
1. двух
2. трёх
3. пяти
4. шести

7. Какая карта содержит описание технологического процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям различных видов работ в технологической последовательности с указанием данных по оборудованию, оснастке, материальным и трудовым нормативам?
1. карта эскизов
2. маршрутная карта
3. операционная карта
4. карта технологического процесса

8. Время, которое не входит в норму штучного времени и определяется отдельно на всю партию деталей, называется?
1. Подготовительно-заключительное время
2. Оперативное время
3. Основное время
4. Калькуляционное время

9. С какой операции начинается механическая обработка валов из прутка:
1. Центрование
2. Точение
3. Обдирка
4. Разрезание

10. Обтачивание заготовок с точностью обработки шероховатости от *Rz* 80 до *Rz* 40:
1. Черновое
2. Чистовое

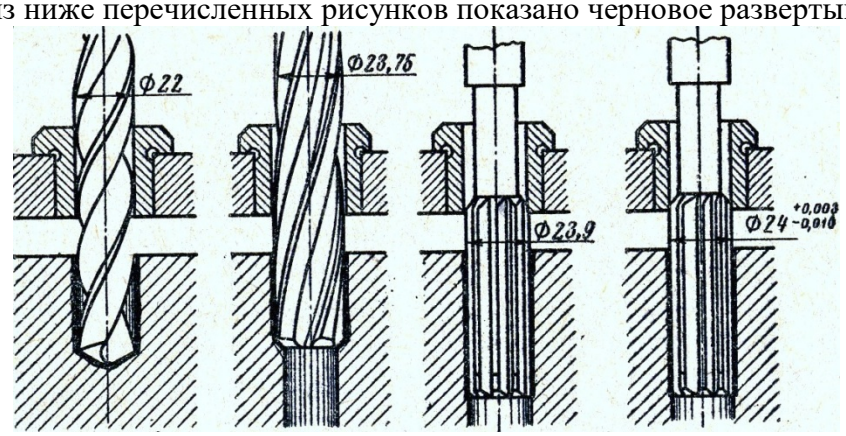
3. Чистовое точное и тонкое
4. Чистовое, чистовое точное

11. Принцип совмещения баз заключается в том, что ……
1. для выполнения всех операций используют одну и ту же базу.
2. необходимо совмещать сборочную, установленную измерительную
3. необходимо совмещать чистовую и черновую базу
4. в качестве установочной базы можно использовать только измерительную базу

12. Постоянные по значению и знаку погрешности, которые возникают при обработке называют
1. систематическими
2. случайными
3. систематически постоянными
4. специальными

13. Поверхность, лишающую заготовку или изделие 3-х степеней свободы называют:
1. установочной базой;
2. направляющей базой;
3. опорной базой.
4. двойной направляющей

14. На каком из ниже перечисленных рисунков показано черновое развертывание?



1 2 3 4

15. Процесс, связанный с изменением размеров, формы или свойств материала заготовки, выполняемый в определенной последовательности:
1. Процесс изготовления
2. Технологический процесс
3. Производственный процесс
4. Операционный процесс

16. Факторы, не влияющие на выбор способа получения заготовки:
1. Условия эксплуатации, испытываемые напряжения и нагрузки
2. Материал, геометрическая форма и размеры
3. Экономический фактор и тип производства
4. Время ее изготовления и срок службы парка оборудования

Тест 6

1.Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. основные операции ковки – осадка, протяжка, прошивка, отрубка, гибка, правка;
2. из-за невозможности выполнения отдельных элементов детали в участках этих элементов назначают напуск, который удаляют при последующей обработке;
3. ковкой целесообразно выполнять ребра жесткости и выступы на поверхности заготовки;
4. горячая штамповка выполняется на молотах и прессах, открытых и закрытых штампах.

2. Два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначены для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций:
1. деталь 2. Сборочные единицы (узлы) 3. комплекс 4. комплект

3. Степень соответствия изготовленной детали заданным размерам, форме и иным характеристикам:
1. Точность обработки
2. Чистота обработки
3. Погрешность
4. Технологичность

4. Основное и вспомогательное время в сумме составляет:
1. Оперативное время
2. Подготовительно – заключительное время
3. Штучно – калькуляционное время
4. Время организационного обслуживания

5. Вал не технологичен, если:
1. отношение длины вала к его диаметру меньше 10
2. отношение длины вала к его диаметру больше 10
3. отношение длины вала к его диаметру равно 1
4. отношение длины вала к его диаметру больше 5

6.Как определяется коэффициент серийности?
1. $К_с = \frac{\tau}{T_{ср}}$ 2. $К_с = \frac{T_{ср}}{\tau}$ 3. $К_с = \frac{\tau}{T_{ср} + \tau}$ 4. $К_с = \frac{T_o}{T_{ср}}$

7. Процесс чистовой обработки поверхности мягким кругом (например фетровым) с нанесенным на него мелкозернистым абразивным порошком, смешанным со смазкой называется:
1. шлифование
2. суперфиниш
3. полирование
4. выглаживание

8. $t_B = \frac{60 \times Fa \times m}{D}$; что характеризует данная формула?
1. Величина такта выпуска при поточно-серийном производстве
2. Величина такта выпуска при поточно-массовом производстве
3. Величина такта выпуска при переменно-серийном производстве

4. Величина такта выпуска при единичном производстве

9. Время нарезания резьбы резцом определяется:

1. $t_O = \frac{l + l_{bp} + l_n}{n * S} * g$

2. $t_O = \frac{l + l_{bp} + l_n}{n_P * S} * i + \frac{l + l_{вр} + l_п}{n_o * S} * i$

3. $t_O = \frac{(l_o + l_{bp} + l_n)}{n * S}$

4. $t_O = \frac{(l_o + l_{bp} + l_n) * П * Д_H}{S * S_O * n_p * z_p} * i$

10. Содержание маршрутной карты:
1. содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям различных видов работ втехнолог. последовательности и указанием данных по оборудованию, оснастке и т. п..
2. содержит графическую иллюстрацию тех. процесса изготовления детали.
3. содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям отдельного вида работ.
4. содержит описание операции тех. процесса изготовления изделия с расчленением по переходам и указанием данных по оборудованию, оснастке и т. п.

11. Вид отделочной обработки цилиндрических наружных поверхностей деталей колеблющимися брусками:
1. Бесцентровое шлифование
2. Хонингование
3. Суперфиниш
4. Шлифование способом продольной подачи

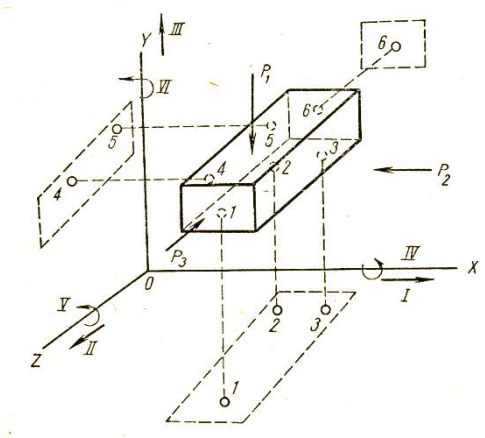
12. Слой материала, удаляемый с заготовки для достижения заданной точности и качества обрабатываемой поверхности, называют?
1.общий припуск
2. допуск
3. предварительный допуск
4. промежуточный припуск

13. Производство, в котором при достаточно большом количестве одинаковых изделий изготовление их ведется путем непрерывного выполнения на рабочих местах одних и тех же постоянно повторяющихся операций:
1. Единичное
2. Серийное
3. Индивидуальное
4. Массовое

14. В состав вспомогательного времени не входит:
1. Время управления станком и перемещения инструмента
2. Время на установку, закрепление и снятие приспособления, инструмента и детали
3. Время на приемы измерения
4. Подготовительно – заключительное время

15. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
Вспомогательное время, связанное с переходом, включает:
1. время на изменение частоты вращения шпинделя;
2. время на изменение величины и направления подачи;
3. время на смену инструмента;
4. получение приспособления исполнителем работы на складе.

16. Что изображено на рисунке?



1. Измерительные, технологические, конструкторские, основные и вспомогательные базы.
2. Схема базирования детали (правило 6 точек).
3. Измерительные, технологические базы.
4. Измерительные, технологические, конструкторские базы.

Тест 7

1. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. время перерывов на отдых исчисляется суммарно в % к оперативному времени;
2. в массовом производстве настройку станка, инструмента и приспособлений и подготовку рабочего места до начала рабочей смены производит сам станочник;
3. в основное время входит время, затрачиваемое на врезание и перебег инструмента;
4. время на приемы измерения детали – вспомогательное время.

2. Сборка, при которой надлежащая посадка соединяемых деталей, изготовленных также по предельным калибрам, но с большими допусками, путем предварительного подбора их по размерам:
1. Сборка с полной взаимозаменяемостью
2. Сборка с неполной взаимозаменяемостью
3. Индивидуальный подбор
4. Групповой подбор

3. Поверхность детали, которой она устанавливается для обработки относительно станка (приспособления) и режущего инструмента:
1. Вспомогательная база
2. Измерительная база
3. Сборочная база
4. Установочная база

4. К классу втулок не относятся:

1. Вкладыши
2. Гильзы
3. Буксы
4. Диски

5. Уменьшение высоты заготовки за счёт увеличения площади поперечного сечения - это:
1. раскатка
2. отрубка
3. высадка
4. осадка

6. Как определяется такт выпуска деталей?

1. $\tau = \frac{60 \cdot F_g \cdot m}{N}$ 2. $\tau = \frac{60 \cdot F_g \cdot m \cdot a}{N}$ 3. $\tau = \frac{60 \cdot T_o}{F_g \cdot m}$ 4. $\tau = \frac{N}{60 \cdot F_g \cdot m}$

7. По какой из указанных формул определяется основное технологическое время при точении?

1. $t_o = \frac{l \cdot s}{n \cdot i}$ 3. $t_o = \frac{s \cdot i}{n \cdot l}$ 2. $t_o = \frac{l \cdot n}{i \cdot s}$ 4. $t_o = \frac{l \cdot i}{n \cdot s}$

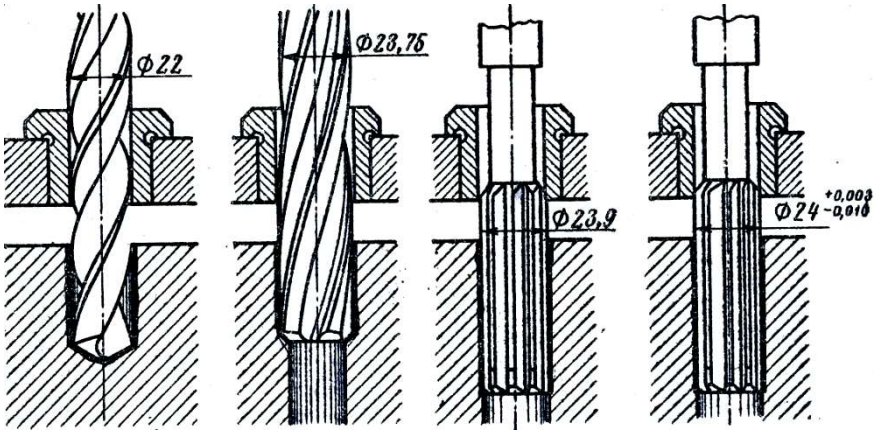
8. На какие две группы делятся припуски?
1. Общие и межоперационные
2. Главные и второстепенные
3. основные и промежуточные
4. Большие и маленькие

9. Вид отделочной обработки цилиндрических поверхностей деталей
1. Бесцентровое шлифование:
2. Шлифование абразивной лентой
3. Суперфиниш
4. Шлифование способом продольной подачи

10. Производство, в котором при достаточном большом кол-ве одинаковых изделий изготовление их ведется путем непрерывного выполнения на рабочих местах одних и тех же постоянно повторяющихся операций:
1. Единичное
2. Серийное
3. Массовое
4. Мелкосерийное

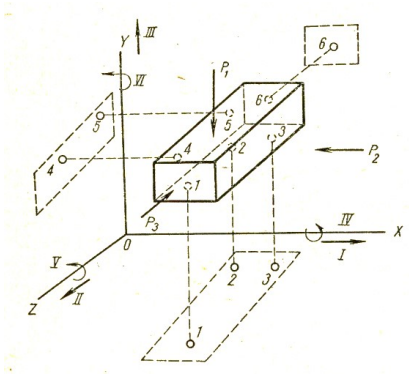
11. Часть операции, выполняемая при одном закреплении заготовки на станке или в приспособлении:
1. Технологическая операция
2. Установ
3. Технологический переход
4. Вспомогательный переход

12. На каком из ниже перечисленных рисунков показано черновое развертывание?



1 2 3 4

13.Что изображено на рисунке?



1. Измерительные, технологические, конструкторские, основные и вспомогательные базы.
2. Схема базирования детали (правило 6 точек).
3. Измерительные, технологические базы.
4. Измерительные, технологические, конструкторские базы.

14. Признаком соответствия детали заданным требованиям не является:
1. Точность формы и размеров
2. Точность взаимного расположения поверхностей
3. Степень шероховатости поверхности
4. Время изготовления

15. Детали класса валов с небольшим перепадом диаметров большей частью изготавливают из:
1. Проката
2. Поковок
3. Штамповок
4. Отливок

16. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. в норму времени не должны входить потери из-за каких-либо организационных неполадок;

2. в норму времени должны быть включены те ручные приемы, которые могут быть выполнены одновременно с работой станка;
3. под техническим нормированием понимается установление нормы времени на выполнение определенной работы или нормы выработки в штуках в единицу времени;
4. техническая норма времени служит основой для оплаты работы, калькуляции себестоимости детали или изделия.

Тест 8

1.Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. время перерывов на отдых исчисляется суммарно в % к оперативному времени;
2. в массовом производстве настройку станка, инструмента и приспособлений и подготовку рабочего места до начала рабочей смены производит сам станочник;
3. в основное время входит время, затрачиваемое на врезание и перебег инструмента;
4. время на приемы измерения детали – вспомогательное время.

2. Определение Оперативного времени осуществляется суммой:
1. Основное и вспомогательное
2. Основное и подготовительно-заключительное время
3. Основное и время управление станком
4. Основное, вспомогательное и подготовительно-заключительное время

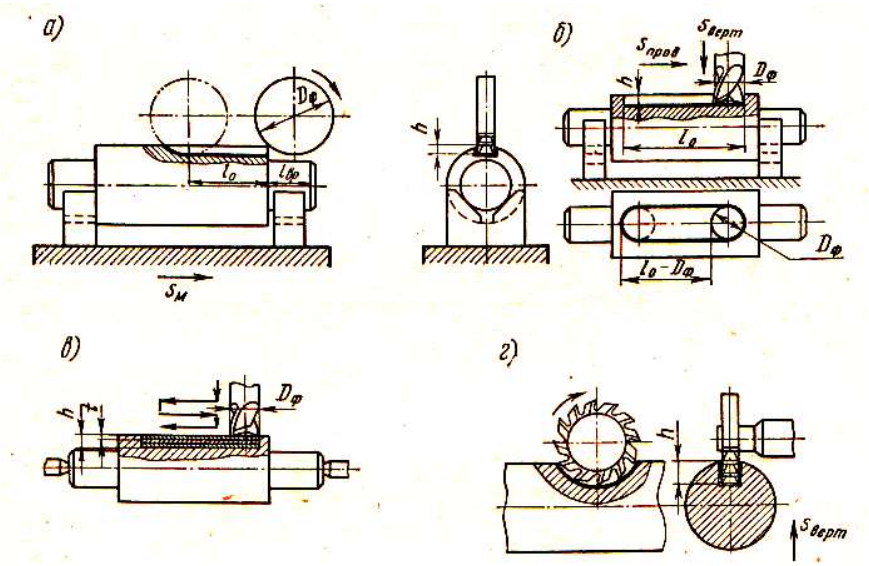
3. Заготовками для изготовления деталей машин не служат:
1. Отливки чугунные, стальные, из цветных металлов, из пластмасс
2. Поковки и штамповки
3. Прокат стали и цветных металлов
4. Прокат чугуна

4. Припуск на обработку равен:
1. Разности размера заготовки и размера готовой детали
2. Сумме размера заготовки и размера готовой детали
3. Произведению размера заготовки и размера готовой детали
4. Разности размера заготовки к размеру готовой детали

5. Поверхности, относительно которых при обработке задаётся расстояние до инструмента, есть . . .
1. технологические базы
2. конструкторские базы
3. измерительные базы
4. эксплуатационные базы

6. Какой материал используют при изготовлении валов:
1. Высокоуглеродистые стали
2. Низкоуглеродистые стали
3. Конструкционные и легированные стали
4. Чугун

7. На каком рисунке указан метод фрезерования шпоночной канавки вала фрезой с маятниковой подачей?



Методы фрезерования шпоночных канавок валов

8. Во Время организационного обслуживания рабочего места в течение смены; входит:
1. время управления станком - пуск в ход, останов, перемена скорости и подачи и т. д.
2. время на правку инструмента оселком (резца или алмазом (шлифовального; круга) в процессе работы;
3. время на смену затупившегося инструмента;
4. время на чистку и смазку станка.

9.Часть операции, выполняемая при одном закреплении заготовки на станке или в приспособлении:
1. Технологическая операция
2. Установ
3. Технологический переход
4. Вспомогательный переход

10. Основное (технологическое) время при точении

1. $t_0 = \frac{l*i}{n*s}$ 2. $t_0 = \frac{l}{n*s}$ 3. $t_0 = \frac{l}{3n*s}$ 4. $t_0 = \frac{L}{S_M}$

11. Какой вид термической обработки используется для упрочнения поверхностного слоя деталей:
1. Отпуск
2. Закалка
3. Химико-термическая обработка
4. Закалка ТВЧ

12. Увеличение шероховатости при уменьшении скорости резания происходит в результате:
1. образования налета
2. образования наклепа
3. образования нароста
4. усадки стружки

13. При обработке наружных поверхностей тел вращения базой для выполнения ряда операций будут являться:
1. Цилиндрическая поверхность
2. Торцы детали
3. Центровые отверстия
4. Крайние шейки детали

14. На величину припуска не влияет:
1. Толщина дефектного поверхностного слоя
2. Сумма припусков на черновую обработку
3. Сумма припусков на чистовую обработку
4. Погрешность измерения

15. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. в норму времени не должны входить потери из-за каких-либо организационных неполадок;
2. в норму времени должны быть включены те ручные приемы, которые могут быть выполнены одновременно с работой станка;
3. под техническим нормированием понимается установление нормы времени на выполнение определенной работы или нормы выработки в штуках в единицу времени;
4. техническая норма времени служит основой для оплаты работы, калькуляции себестоимости детали или изделия.

16.Штучное время при неавтоматизированном производстве?

1. $t_ш = t_о + t_В + t_Т + t_{орг}$

2. $t_ш = t_о + t_В + t_Т + t_{орг} + t_П$

3. $t_ш = t_В + t_Т + t_{орг} + t_П$

4. $t_ш = t_о + t_В + t_Т + t_П$

Тест 9

1. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. на точность механической обработки деталей влияют температурные деформации детали и инструмента, вызванные их нагревом;
2. на точность механической обработки влияет износ режущего инструмента;
3. неточность обработки возможна из-за деформаций, возникающих под влиянием внутренних напряжений в материале детали;
4. внутренние напряжения появляются в результате равномерного охлаждения отдельных частей заготовок, изготовленных литьем, ковкой, штамповкой и т. д.

2. Основные факторы, влияющие на величину припусков:
1. материал заготовки
2. конфигурация и размеры заготовки
3. вид заготовки и способ её изготовления
4. требования в отношении механической обработки

3. Интервалом времени, через который периодически производится выпуск изделий определенного наименования и типоразмера, называется:

1. Среднее штучное время
2. Основное время
3. Такт выпуска
4. Фонд рабочего времени

4. Метод сверхточной чистовой обработки:
1. Шлифование
2. Хонингование
3. Протягивание
4. Суперфиниш

5. Тип производства, при котором изделия изготовляются единичными экземплярами разнообразными по конструкции или размерам:
1. массовое 2. Единичное 3. Серийное 4. Поточно-массовое

6. Законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента, поверхностей, образуемых обработкой, или режима резания – это . .
1. технологический ход
2. вспомогательный переход
3. технологический переход
4. вспомогательный ход

7. В каком виде заготовки припуски на обработку меньше?
1. литье
2. ковка
3. прокат
4. штамповка

8. Содержание маршрутной карты:
1. содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям различных видов работ втехнолог. последовательности и указанием данных по оборудованию, оснастке и т. п..
2. содержит графическую иллюстрацию тех. процесса изготовления детали.
3. содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям отдельного вида работ.
4. содержит описание операции тех. процесса изготовления изделия с расчленением по переходам и указанием данных по оборудованию, оснастке и т. п.

9. Какой вид термической обработки используется для упрочнения поверхностного слоя деталей:
1. Отпуск
2. Закалка
3. Химико-термическая обработка
4. Закалка ТВЧ

10. Поверхность детали, которая служит только для её установки при обработке, не сопрягается с другой деталью совместно работающей в собранной машине:
1. Основной установочной базой
2. Измерительной установочной базой
3. Конструктивной базой
4. Вспомогательной установочной базой

11.Необходимое количество опор при установке детали по плоскости
1. 3 2. 8 3. 15 4. 6

12. Фиксированное положение, занимаемое закрепленной обрабатываемой заготовкой совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции?
1. установ
2. позиция
3. зажим
4. положение

13. Основное и вспомогательное время в сумме составляет:
1. Оперативное время
2. Подготовительно – заключительное время
3. Штучно – калькуляционное время
4. Время организационного обслуживания

14. Вид обработки, применяемый преимущественно для точной обработки отверстий (брусками):
1. Шлифование
2. Хонингование
3. Сверление
4. Фрезерование

15. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. на точность механической обработки деталей влияют температурные деформации детали и инструмента, вызванные их нагревом;
2. на точность механической обработки влияет износ режущего инструмента;
3. неточность обработки возможна из-за деформаций, возникающих под влиянием внутренних напряжений в материале детали;
4. внутренние напряжения появляются в результате равномерного охлаждения отдельных частей заготовок, изготовленных литьем, ковкой, штамповкой и т.д.

16. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. время перерывов на отдых исчисляется суммарно в % к оперативному времени;
2. в массовом производстве настройку станка, инструмента и приспособлений и подготовку рабочего места до начала рабочей смены производит сам станочник;
3. в основное время входит время, затрачиваемое на врезание и перебег инструмента;
4. время на приемы измерения детали – вспомогательное время.

Тест 10

1. Что неверно?
1. Конструкция детали должна состоять из унифицированных стандартных элементов
2. Детали могут изготавливаться из любых типов заготовок
3. Размеры и поверхности деталей должны иметь оптимальную точность и шероховатость
4. Метод изготовления должен обеспечивать возможность обработки одновременно нескольких деталей

2. Качество обрабатываемой поверхности характеризуется:
1. физическими свойствами поверхностного металла;
2. физико-химическими свойствами поверхностного металла;

3. физико-механическими свойствами поверхностного слоя металла;
4. механическими свойствами поверхностного металла.

3. Технологической задачей при изготовлении валов не является:
1. Обеспечение заданной точности
2. Обеспечение точности формы
3. Обеспечение точности взаимного расположения поверхностей
4. Обеспечение заданной температуры при обработке

4. Корпусные массивные детали не изготавливают из заготовок, полученных из:
1. Серого и ковкого чугунов
2. Углеродистой стали
3. Модифицированного чугуна
4. Черной пластмассы

5. При черновой обработке точность после развёртывания будет . . .
1. JT11
2. JT14
3. JT8
4. JT4

6. Поверхность, от которой при измерении производится непосредственный отсчет размеров, называется:
1. Основной установочной базой
2. Сборочной базой
3. Измерительной базой
4. Конструктивной базой

7. Заготовками для изготовления деталей машин не служат:
1. Отливки чугунные, стальные, из цветных металлов, из пластмасс
2. Поковки и штамповки
3. Прокат из стали и цветных металлов
4. Прокат из чугуна

8. Обтачивание заготовок с точностью обработки до шероховатости от Rz 80 до Rz 40:
1. Черновое
2. Чистовое
3. Чистовое точное и тонкое
4. Чистовое, чистовое точное

9. Какой материал используют при изготовлении валов:
1. Высокоуглеродистые стали
2. Низкоуглеродистые стали
3. Конструкционные и легированные стали
4. Чугун

10. Сколько шпинделей имеет фрезерно-центровальный станок?
1. 3 2. 4 3. 6 4. 1

11. Что не относится к процессу обработки заготовок деталей машин резанием?
1. Протягивание

2. Волочение
3. Хонингование
4. Доводка

12. Штучное время при неавтоматизированном производстве?

1. $t_ш = t_o + t_B + t_T + t_{орг}$

2. $t_ш = t_o + t_B + t_T + t_{орг} + t_П$

3. $t_ш = t_B + t_T + t_{орг} + t_П$

4. $t_ш = t_o + t_B + t_T + t_П$

13. К классу втулок не относятся:
1. Вкладыши
2. Гильзы
3. Буксы
4. Диски

14. Поверхность детали, которая, служит для установки детали при обработке и сопрягается с другой деталью, совместно работающей в собранной машине, или оказывает влияние на работу данной детали в машине, называется?
1. Основной
2. Установочной
3. Вспомогательной
4. Измерительной

15. Изделие, изготовленное из однородного материала без применения сборочных операций?
1. деталь
2. сборочная единица
3. комплекс
4. комплект

16. Выберите НЕВЕРНОЕ утверждение:
1. в норму времени не должны входить потери из-за каких-либо организационных неполадок;
2. в норму времени должны быть включены те ручные приемы, которые могут быть выполнены одновременно с работой станка;
3. под техническим нормированием понимается установление нормы времени на выполнение определенной работы или нормы выработки в штуках в единицу времени;
4. техническая норма времени служит основой для оплаты работы, калькуляции себестоимости детали или изделия.

Тест 11

1. В зависимости от привода молоты могут быть механические, электрические, гидравлические, пневматические, паровоздушные, магнитные.Каких молотов нет?
1. механических, электрических
2. паровоздушных, магнитных
3. пневматических
4. электрических, магнитных

2. Чем выше точность заготовок:
1. тем меньше число операций их механической обработки и тем ниже точность готовых деталей.
2. тем больше число операций их механической обработки и тем выше точность готовых деталей.
3. тем больше число операций их механической обработки и тем ниже точность готовых деталей.
4. тем меньше число операций их механической обработки и тем выше точность готовых деталей.

3. Слой металла, подлежащий удалению с поверхности заготовки в процессе обработки для получения готовой детали:
1. Припуск
2. Допуск
3. Напуск
4. Запуск

4. Типом производства не является:
1. Серийное
2. Массовое
3. Поточное
4. Единичное

5. Тип производства, при котором изделия изготовляются единичными экземплярами разнообразными по конструкции или размерам:
1. массовое
2. Единичное
3. Серийное
4. Поточно-массовое

6. В результате несоответствия действительных движений заготовки и инструмента движениям, предусмотренным кинематической схемой станка:
1. Увеличивается шероховатость
2. Повышается точность изготовления
3. Снижается время обработки
4. Возникает погрешность обработки

7. Уменьшение высоты заготовки за счёт увеличения площади поперечного сечения - это:
1. раскатка
2. отрубка
3. высадка
4. осадка

8. Норма штучного времени на обработку определяется по формуле:

1. $t_{ШТ} = t_O + t_B + t_{ОБ} + t_ф$
2. $t_{ШТ} = t_O + t_B$
3. $T_{ШТ} = t_{шт} * n + T_{пз}$

4. $t_{ШТ} = t_O + t_B + t_{Т.ОБ} + t_{О.ОБ} + t_ф$

9. Укажите, какое время не входит во вспомогательное?
1. время на перемещение инструмента
2. время на установку, закрепление и снятие приспособления, инструмента и детали во время работы
3. время на смену затупившегося инструмента
4. время на приемы измерения детали

10. Основное (технологическое) время при фрезеровании
1. $t_0 = \frac{l*i}{n*s}$ 2. $t_0 = \frac{l}{n*s}$ 3. $t_0 = \frac{l}{3n*s}$ 4. $t_0 = \frac{L}{S_M}$

11. Определение оперативного времени осуществляется суммой:
1. Основное и вспомогательное
2. Основное и подготовительно-заключительное время
3. Основное и время управление станком
4. Основное, вспомогательное и подготовительно-заключительное время

12. Повышение твердости поверхностного слоя детали после обработки называется
1. нарост
2. наклеп
3. усадка
4. остаточные напряжения

13. Поверхности детали, которыми она устанавливается для обработки в определенном положении относительно станка (приспособления) и режущего или другого рабочего инструмента называется:
1. установочными базами
2. вспомогательными базами
3. измерительными базами
4. сборочными базами

14. Решающим фактором при выборе станка является:
1. экономичность процесса обработки
2. наименьшие затраты времени на обработку
3. необходимость использования имеющихся станков
4. соответствие основных размеров станка количеству деталей, подлежащих обработке

15. Метод сверхточной чистовой обработки цилиндрической поверхности:
1. Шлифование
2. Хонингование
3. Протягивание
4. Суперфиниш

16. При обработке заготовок зубчатых колес чистовой технологической базой является?
1. поверхность зубьев колеса
2. посадочное отверстие
3. шпоночный паз
4. наружный диаметр

Тест 12

1.Установочной базой называется поверхность, при установке на которую тело лишается . ... степеней свободы.
1. двух
2. трёх
3. пяти
4. шести

2. Время организационного обслуживания рабочего места затрачивается рабочим на уход за рабочим местом в течение смены; сюда входит:
1. время управления станком, пуск в ход, останов, перемена скорости и подачи и т.д.
2. время на правку инструмента оселком (резца или алмазом (шлифовального; круга) в процессе работы;
3. время на смену затупившегося инструмента;
4. время на чистку и смазку станка .

3. Вид обработки, осуществляемый с помощью абразивного инструмента:
1. Точение
2. Протягивание
3. Сверление
4. Шлифование

4. Измерительной базой называется:
1. Поверхность, от которой производится отсчет размеров
2. Поверхность, которой она устанавливается для обработки в определенном положении, относительно станка
3. Поверхность, которая определяет положение данной детали относительно других деталей в узле
4. Обработанная поверхность, которая служит для последующей обработки

5. Поверхности, относительно которых при обработке задаётся расстояние до инструмента, есть . . .
1. технологические базы
2. конструкторские базы
3. измерительные базы
4. эксплуатационные базы

6. Какая карта содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям отдельного вида работ, выполняемых в одном цехе в технологичной последовательности, суказаниям данных по оборудованию, оснастке, материалам и трудовым нормативам:
1. Карта эскизов
2. Маршрутная карта
3. Оперативная карта
4. Карта технологического процесса

7. Режим резания металла включает в себя следующие определяющие его основные элементы, укажите неправильный элемент.
1. число оборотов шпинделя станка
2. подача

3. глубина резания
4. сила резания

8. Производство, в котором при достаточном большом кол-ве одинаковых выпусков изделий изготовление их ведется путем непрерывного выполнения на рабочих местах одних и тех же постоянно повторяющихся операций:
1. Единичное
2. Серийное
3. Массовое
4. Мелкосерийное

9. Поверхность, от которой при измерении производится непосредственный отсчет размеров, называется:
1. Основной установочной базой
2. Сборочной базой
3. Измерительной базой
4. Конструктивной базой

10. Что называют технологическим процессом:
1. это последовательность изготовления детали из заготовки;
2. это совокупность отдельных процессов, осуществляемых для получения из материалов и полуфабрикатов готовых машин;
3. это процесс сборки или разборки оборудования подлежащего ремонту;
4. это процесс обработки заготовки на металлорежущих станках.

11. В каких случаях можно не учитывать погрешность закрепления заготовки:
1. при совмещении технологической и конструкторской баз
2. при совмещении технологической и измерительной баз
3. при совмещении технологической и эксплуатационной баз
4. при совмещении всех баз

12. Общий (суммарный) припуск включает в себя:
1. толщину дефектного поверхностного слоя, подлежащего снятию за первый черновой проход режущего инструмента
2. суммы припусков на все промежуточные операции, учитывающие влияние ряда факторов (погрешность формы, пространственное отклонение, погрешность установки, операционные допуски на размеры, класс шероховатости поверхности и т.п.)
3. величину отрицательного отклонения от номинального размера заготовки
4. все выше перечисленные величины

13. Корпусные массивные детали не изготавливают из заготовок, полученных из:
1. Серого и ковкого чугунов
2. Углеродистой стали
3. Модифицированного чугуна
4. Черной пластмассы

14. В чем заключается принцип совмещения баз?
1. В том, что сборочная база является установочной
2. В том, что сборочная база является измерительной
3. В том, что для выполнения всех операций обработки детали используют одну и ту же базу
4. В том, что сборочная база является одновременно установочной и измерительной

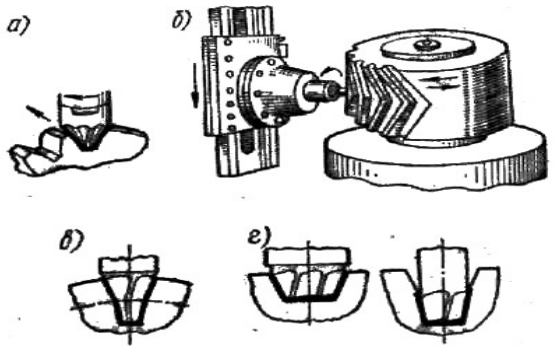
15. Погрешности, которые возникают при обработке, постоянные по значению и знаку, называют?
1. систематическими
2. случайными
3. систематически постоянными
4. специальными

16. Факторы, не влияющие на выбор способа получения заготовки:
1. Условия эксплуатации, испытываемые напряжения и нагрузки
2. Материал, геометрическая форма и размеры
3. Экономический фактор и тип производства
4. Время ее изготовления и срок службы парка оборудования

Тест13

1. На рисунке приведены эскизы нарезания зубчатых колёс пальцевыми фрезами.

На каком эскизе изображено черновое нарезание двууглловой фрезой?



1. а 2. б 3. в 4. г

2. Погрешности, допущенные в размерах и форме деталей и их взаимном расположении называют:
1. арифметическая погрешность:
2. случайная погрешность;
3. геометрическая погрешность;
4. систематическая погрешность.

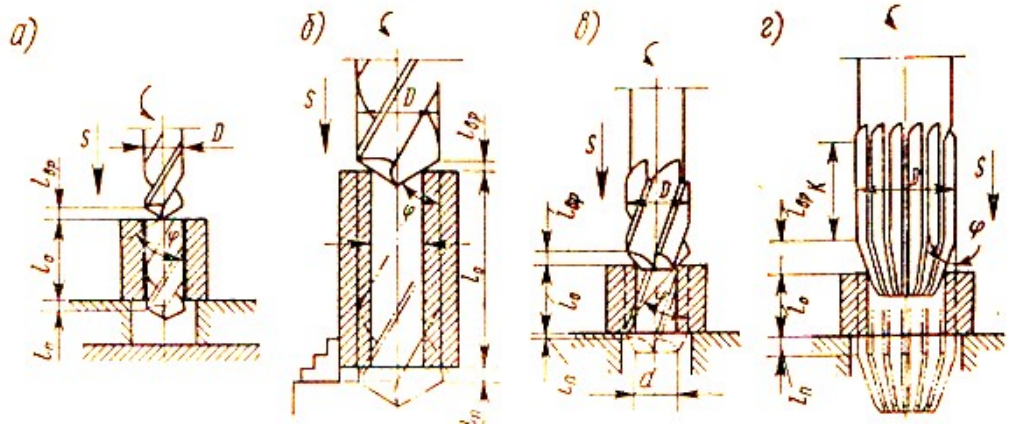
3. Деталь, содержащая систему отверстий и плоскостей, координированных друг относительно друга:
1. Корпус
2. Станина
3. Стол
4. Подставка

4. Факторы, не влияющие на выбор способа получения заготовки:
1. Условия эксплуатации, испытываемые напряжения и нагрузки
2. Материал, геометрическая форма и размеры
3. Экономический фактор и тип производства
4. Время ее изготовления и срок службы парка оборудования

5. Законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента, поверхностей, образуемых обработкой, или режима резания – это..
1. технологический ход
2. вспомогательный переход
3. технологический переход
4. вспомогательный ход

6. С какой операции начинается механическая обработка валов:
1. Центрование 2. Правка 3. Обдирка 4. Разрезание

7. По какой из схем определяют длину прохода инструмента при обработке отверстия методом зенкерования?



8. Поверхность детали, которая служит только для её установки при обработке, не сопрягается с другой деталью совместно работающей в собранной машине:
1. Основной установочной базой
2. Измерительной установочной базой
3. Конструктивной базой
4. Вспомогательной установочной базой

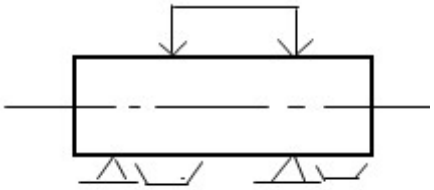
9. Какая карта содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям отдельного вида работ, выполняемых в одном цехе в технологичной последовательности, суказаниям данных по оборудованию, оснастке, материалам и трудовым нормативам:
1. Карта эскизов
2. Маршрутная карта
3. Оперативная карта
4. Карта технологического процесса

10. Что называют основной установочной базой?
1. такие поверхности детали, которыми она устанавливается для обработки в определенном положении, относительно станка;
2. поверхность детали, которая служит для установки детали при обработке и сопрягается с другой деталью, совместно работающей в собранной машине, или оказывает влияние на работу данной детали в машине;
3. поверхность детали, которая служит только для её установки при обработке, не сопрягается с другой деталью, совместно работающей в собранной машине, и не оказывает влияние на работу данной детали в машине;

4. поверхность, от которой при измерении производится непосредственный отчет размеров.

11. Скольких степеней свободы лишена деталь при следующей схеме базирования
1. 6 2. 5 3. 3 4. 4

12. Степень соответствия изготовленной детали заданным размерам, форме и иным характеристикам:
1. Точность обработки
2. Чистота обработки
3. Погрешность
4. Технологичность



13. Процесс, связанный с изменением размеров, формы или свойств материала заготовки, выполняемый в определенной последовательности:
1. Процесс изготовления
2. Технологический процесс
3. Производственный процесс
4. Операционный процесс

14. По какой формуле определяется основное (технологическое) время для точения на токарных станках?

1. $t_0 = \frac{l*i}{n*s}$ 2. $t_0 = \frac{l}{n*s}$ 3. $t_0 = \frac{l}{3n*s}$ 4. $t_0 = \frac{L}{S_M}$

15. Слой материала, удаляемый для достижения заданной точности и качества обрабатываемой поверхности, называют?
1. припуск
2. окончательная термическая обработка
3. предварительная термическая обработка
4. промежуточная термическая обработка

16. Признаком соответствия детали заданным требованиям не является:
1. Точность формы и размеров
2. Точность взаимного расположения поверхностей
3. Степень шероховатости поверхности
4. Время изготовления

Тест 14

1. При черновой обработке точность после сверления будет . .
1. JT11 2.JT14 3.JT8 4.JT4

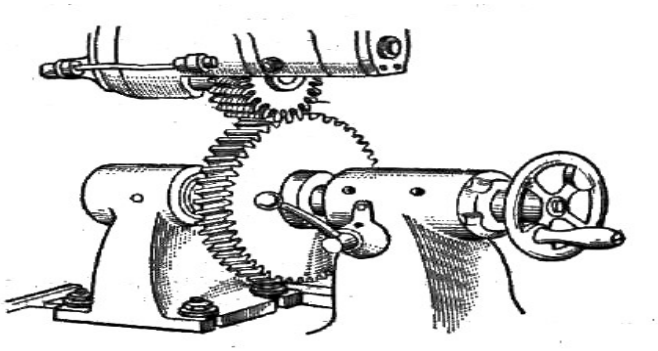
2. При установлении нормы времени необходимо обеспечить следующие условия:
1. в норму времени должны быть включены те ручные приемы, которые могут быть выполнены одновременно с работой станка, т.е перекрыты машинным временем;
2. в норму времени должно включаться время на исправление забракованных деталей или на изготовление взамен их новых;
3. должны быть применены наиболее эффективные для данной работы приспособления и инструменты.

3. Процесс, связанный с изменением размеров, формы или свойств материала заготовки, выполняемый в определенной последовательности:
1. Процесс изготовления
2. Технологический процесс
3. Производственный процесс
4. Операционный процесс

4. В состав вспомогательного времени не входит:
1. Время управления станком и перемещения инструмента
2. Время на установку, закрепление и снятие приспособления, инструмента и детали
3. Время на приемы измерения
4. Подготовительно – заключительное время

5. Слой металла, подлежащий удалению с поверхности заготовки в процессе обработки для получения готовой детали:
1. Припуск
2. Допуск
3. Напуск
4. Запуск

6. Какой вид отделки зубчатых колёс показан на рисунке?



1. Обкатка
2. Шевингование
3. Шлифование
4. Хонингование

7. Время нарезания резьбы резцом:

1. $t_O = \frac{l + l_{bp} + l_n}{n * S} * g$
2. $t_O = \frac{l + l_{bp} + l_n}{n_P * S} * i + \frac{l + l_{вр} + l_n}{n_o * S}_n * i$
3. $t_O = \frac{(l_o + l_{bp} + l_n)}{n * S}$
4. $t_O = \frac{(l_o + l_{bp} + l_n) * П * Д_H}{S * S_O * n_p * z_p} * i$

8. Сколько шпинделей имеет фрезерно-центровальный станок?
1. 3 2.4 3. 6 4. 1

9. Время нарезания резьбы на валах определяется:

1. $t_O = \frac{l + l_{bp} + l_n}{n * S} * g$
2. $t_O = \frac{l + l_{bp} + l_n}{n_P * S} * i + \frac{l + l_{вр} + l_n}{n_o * S}_n * i$
3. $t_O = \frac{(l_o + l_{bp} + l_n)}{n * S}$
4. $t_O = \frac{(l_o + l_{bp} + l_n) * П * Д_H}{S * S_O * n_p * z_p} * i$

10. Поверхность, от которой при измерении производится непосредственный отсчет размеров, называется:
1. Основной установочной базой
2. Сборочной базой
3. Измерительной базой
4. Конструктивной базой

11. Как называется установочная база детали, которая служит только для её установки?
1. Установочная
2. Вспомогательная
3. Основная
4. Измерительная

12. Заготовками для изготовления деталей машин не служат:
1. Отливки чугунные, стальные, из цветных металлов, из пластмасс
2. Поковки и штамповки
3. Прокат из стали и цветных металлов
4. Прокат из чугуна

13. Признаком соответствия детали заданным требованиям не является:
1. Точность формы и размеров
2. Точность взаимного расположения поверхностей
3. Степень шероховатости поверхности
4. Время изготовления

14. Время, которое не входит в норму штучного времени и определяется отдельно на всю партию деталей, называется?
1. Подготовительно-заключительное время
2. Оперативное время
3. Основное время
4. Калькуляционное время**.**

15. Законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте, называется?
1. производственно-технологическим процессом
2. технологическим процессом
3. производственным процессом
4. технологической операцией

16. Законченная часть технологического перехода в виде однократного перемещения инструмента относительно заготовки сопровожденного изменением формы, размеров, шероховатости поверхности или свойств заготовки?
1. вспомогательный ход
2. рабочий ход
3. вспомогательный переход
4. технологический переход

Тест 15

1. Детали типа валов признаются технологичными, если они отвечают следующим требованиям:
1. возможность вести обработку проходными резцами;
2. увеличение диаметров поверхностей от середины к торцам вала;
3. жесткость вала обеспечивает достижение необходимой точности при обработке (*l*:*d*<15 ... 17).;
4. возможность замены закрытых шпоночных пазов открытыми.

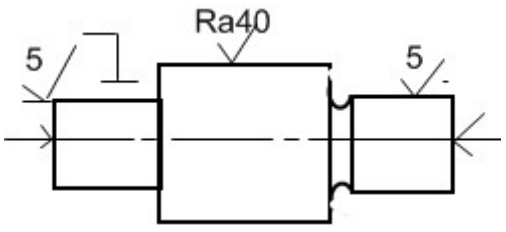
2. Содержание маршрутной карты:
1. содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям различных видов работ в технолог.последовательности и указанием данных по оборудованию, оснастке и т. п.
2. содержит графическую иллюстрацию тех. процесса изготовления детали.
3. содержит описание тех. процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям отдельного вида работ.
4. содержит описание операции тех. процесса изготовления изделия с расчленением по переходам и указанием данных по оборудованию, оснастке и т. п.

3. Сколько основных переходов потребуется для обработки валика:
1) 4
2) 6
3) 5
4) 3

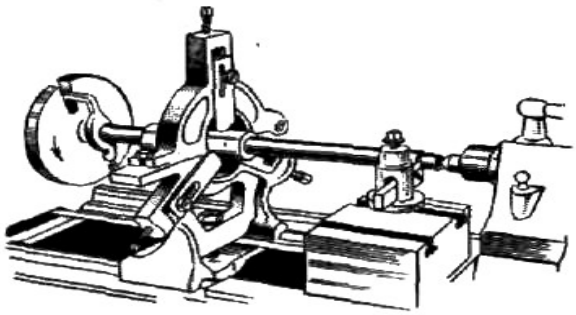
4. Процесс, связанный с изменением размеров, формы или свойств материала заготовки, выполняемый в определенной последовательности:
1. Процесс изготовления
2. Технологический процесс
3. Производственный процесс
4. Операционный процесс

5. Как называется явление повышение твердости поверхностного слоя после обработки:
1. нарост
2. остаточное явление
3. наклеп
4. усадка

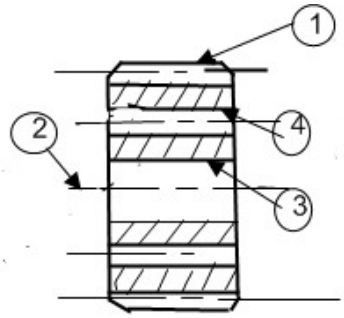
6. Что изображено на рисунке?



1. Обработка вала на токарном станке в центрах с применением неподвижного люнета
2. Обработка вала на токарном станке в центрах с применением подвижного люнета
3. Установка вала в центрах с поводковым патроном
4. Шлифование вала



7. Какой вид шлифования является методом особо чистой доводки поверхности деталей:



1. Бесцентровое шлифование
2. Шлифование абразивной лентой
3. Суперфиниш
4. Шлифование способом продольной подачи

8. Законченная часть технологической операции характеризуемая постоянством применяемого инструмента, поверхностей образуемых обработкой и режимом обработки.

1. Технологический процесс;
2. Вспомогательный процесс;
3. Технологический переход;
4. Вспомогательный ход.

9. Определение оперативного времени осуществляется суммой:
1. Основное и вспомогательное
2. Основное и подготовительно-заключительное время
3. Основное и время управление станком
4. Основное, вспомогательное и подготовительно-заключительное время

10. Металлизация это:
1. Анодно-механическое разрезание металла
2. Покрытие посредством распыления, расплавленного металла.
3. Холодная правка металлических деталей
4. Обработка в растворе серной кислой меди

11. Основное и вспомогательное время в сумме составляет:
1. Оперативное время
2. Подготовительно – заключительное время
3. Штучно – калькуляционное время
4. Время организационного обслуживания

12. Укажите конструкторскую базу на детали:
1. 1
2. 2
3. 3

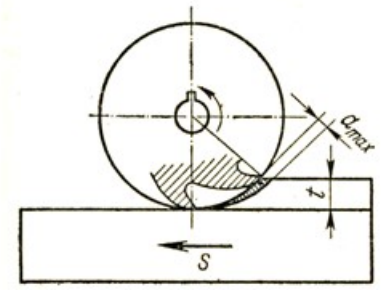
4. 4

13. Интервалом времени, через который периодически производится выпуск изделий определенного наименования и типоразмера, называется:
1. Среднее штучное время
2. Основное время
3. Такт выпуска
4. Фонд рабочего времени

14. При обработке наружных поверхностей тел вращения базой для выполнения ряда операций будут являться:
1. Цилиндрическая поверхность
2. Торцы детали
3. Центровые отверстия
4. Крайние шейки детали

15. Операция по созданию чистовой технологической базы при обработке валов?
1. Фрезерно-центровальная
2. Токарная
3. Обдирочная
4. Разрезная

16. На данной схеме изображено?
1. Попутное фрезерование.
2. Встречное фрезерование
3. Продольное фрезерование.
4. Поперечное фрезерование.



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

1. Основные этапы процесса производства машин.
2. Общие понятия о типах производств.
3. Общие понятия о базировании заготовок и погрешность базирования.
4. Классификация баз при механической обработке.
5. Основные принципы базирования. Примеры погрешностей базирования.
6. Исходные данные для проектирования технологического процесса.
7. Основные правила построения плана обработки отдельных поверхностей при механической обработке.
8. Технологические характеристики получения заготовок методами литья.
9. Технологические характеристики получения заготовок методами пластического деформирования.
10. Технологичность конструкции деталей машин. Показатели технологичности.
11. Общие понятия о припусках и способах их определения.
12. Расчетно-аналитический метод определения минимальных припусков и межоперационные размеры.
13. Состав штучного времени при механической обработке.

14. Расчет основных элементов штучного времени.
15. Производственный и технологические процессы. Их сущность
16. Структура технологического процесса механической обработки. Причины, определяющие постоянство этой структуры.
17. Принципы концентрации и дифференциации при построении технологических процессов.
18. Основные принципы разработки маршрутного технологического процесса.
19. Типизация технологических процессов.
20. Метод групповой обработки в машиностроении.
21. Составные части технологического процесса.
22. Точность обработки (общие понятия). Методы расчета точности.
23. Качество поверхности и его влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.
24. Критерии оценки шероховатости поверхности и методы определения шероховатости.
25. Факторы, влияющие на качество обработанной поверхности.
26. Жесткость технологической системы и ее влияние на точность обработки.
27. Экономическая и достижимая точность обработки.
28. Методы учета случайных погрешностей при механической обработке.
1. Технологическая подготовка производства. Ее состав и значение.
29. Понятие о систематических и случайных погрешностях при обработке.
30. Основные этапы технологического процесса изготовления осей и валов.
31. Обработка конических поверхностей.
32. Обработка фасонных и эксцентричных поверхностей.
33. Методы учета случайных погрешностей при механической обработке.
34. Основные этапы технологии изготовления корпусных деталей.
35. Технология изготовления рычагов.
36. Методы изготовления зубчатых колес.
37. Нарезание зубчатых колес по методу обкатки.
38. Нарезание зубчатых колес по методу копирования.
39. Отделочная обработка зубчатых колес.
40. Методы нарезания наружной и внутренней резьбы.
41. Методы обработки шлицевых поверхностей.
42. Выбор вариантов при разработке технологического процесса.
43. Технологическая документация, ее виды и области применения.
44. Структура себестоимости изготовления деталей в машиностроении.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание 1. При обработке нежестких валиков (l/d = 10) в центрах. Часть учащихся работала проходными резцами с углом в плане $\varphi = 45^{o}$, другие – проходными упорными резцами. В результате детали, выточенные резцом с углом $\varphi = 45^{o}$, имели бочкообразную форму на наружной цилиндрической поверхности, а те, что обрабатывались упорным резцом, были сданы без дефекта. Ваши размышления о причине этого несовпадения.

Задание 2. В процессе обтачивания наружной цилиндрической поверхности и подрезания торца на заготовках обратил внимание, что

– при подрезании торца на заготовках у него остается не срезанный уступ;

– процесс резания сопровождается вибрациями и тонким свистящим звуком

– резец, которым он работал, быстро износился по задней поверхности и требует переточки.

Станок, на котором он работал, был нормальной жесткости. В чем причина наблюдаемых токарем явлений?

Задание 3. Обработка заготовки из стали 20 проводилась резцами из быстрорежущей стали марки Р6М5 на следующем режиме резания: t = 2 мм, S = 0,4 мм/об, V = 105 м/мин. Интенсивность износа этих резцов намного повысилась, что сказалось в сокращении периода стойкость с расчетных 40 минут до фактических 15 минут. Как вы думаете, почему?

Задание 4. Токарь в процессе обтачивания наружной цилиндрической поверхности и подрезания торца на заготовках обратил внимание, что

- при подрезании торца на заготовках у него остается не срезанный уступ
- процесс резания сопровождается вибрациями и тонким свистящим звуком;
- резец, которым он работал, быстро износился по задней поверхности и требует переточки. Станок, на котором он работал, был нормальной жесткости. В чем причина наблюдаемых токарем явлений?

Задание 5. При обработке нежестких валиков (l/d = 5) в патроне. Часть учащихся работала проходными резцами с углом в плане φ = 45°, другие – проходными упорными резцами. В результате детали, выточенные резцом с углом φ = 45°, имели конусную форму на наружной цилиндрической поверхности, а те, что обрабатывались упорным резцом, были сданы без дефекта. Ваши размышления о причине этого несовпадения.

Задание 6. Деталь (втулку) изготовляют в условиях серийного производства и из горячекатаного проката, разрезанного на штучные заготовки. Все поверхности обрабатываются однократно. Токарная операция выполняется согласно двум операционным эскизам по установкам (рис.1.).

Требуется: произвести анализ операционных эскизов и других исходных данных; установить содержание операции и сформулировать ее наименование и содержание; установить последовательность обработки заготовки в данной операции; описать содержание операции по переходам.

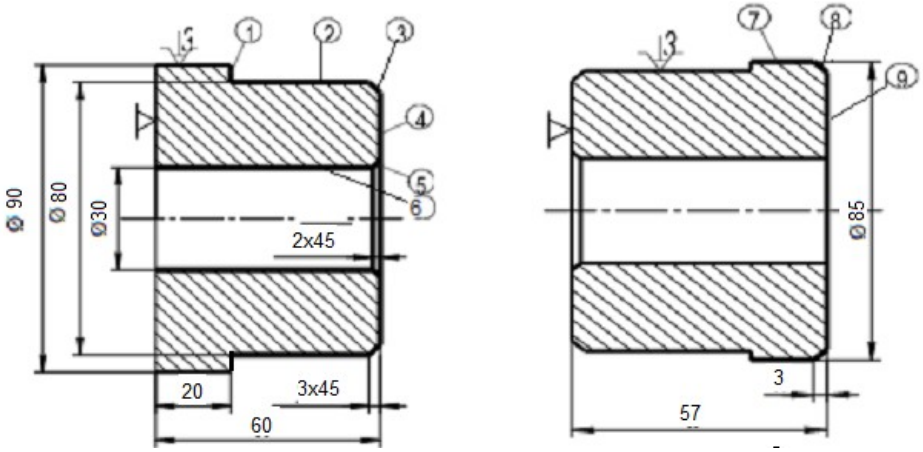


Рис.1 Операционные эскизы

*Задание 7.*На наружной поверхности вала (рис. 2.) задан допуск формы, обозначенный условным знаком по СТСЭВ 368–76. Окончательную обработку этой поверхности предполагается выполнить шлифованием на круглошлифовальном станке модели 3М151.

Требуется: установить наименование и содержание условного обозначения указанного отклонения; установить возможность выдержать требование точности формы этой поверхности при предполагаемой обработке.

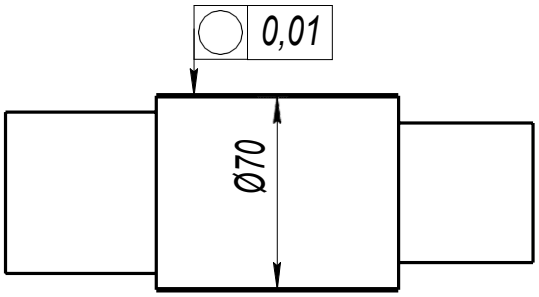


Рис. 2.2. Эскиз вала

*Задание 8.***.** На рис. 3 изображено приспособление для обработки на станке. Нужно, пользуясь рисунком, выявить технологическую базу, принятую для базирования заготовки, и представить схему базирования заготовки; сделать вывод о правильности выбора опорных точек по количеству и размещению их.

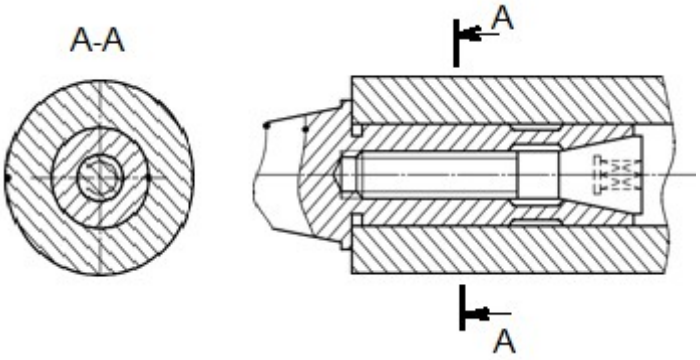


Рис. 3. Приспособление – оправка.

Задание 9. С целью повысить технико-экономическиепоказатели технологического процесса предложено два варианта выполнения у детали элементов в конструкции корпуса, изготовляемого из отливок (рис. 4 *а, б*).

Требуется оценить их технологичность.

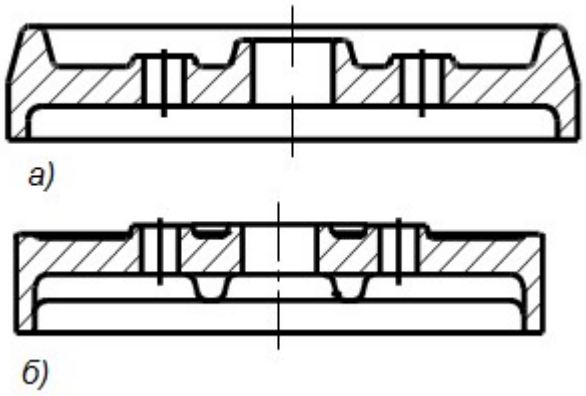


Рис. 4. Варианты отливок

Задание 10. Один и тот же элемент конструкции детали машины может быть, конструктивно решен различно. Эти решения представляют двумя эскизами (варианты на рис. 5).

Требуется провести анализ сравниваемых эскизов конструкций на технологичность и обосновать выбор элемента конструкции детали.

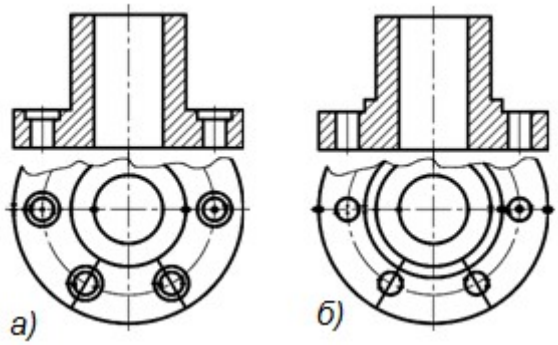


Рис. 5. Варианты конструкции

Задание 11. Многоступенчатый вал (рис. 6) изготовляется из штампованной поковки повышенной точности (I класс). Заготовка прошла фрезерно-центровальную обработку, в результате которой были подрезаны торцы и созданы центровые отверстия.

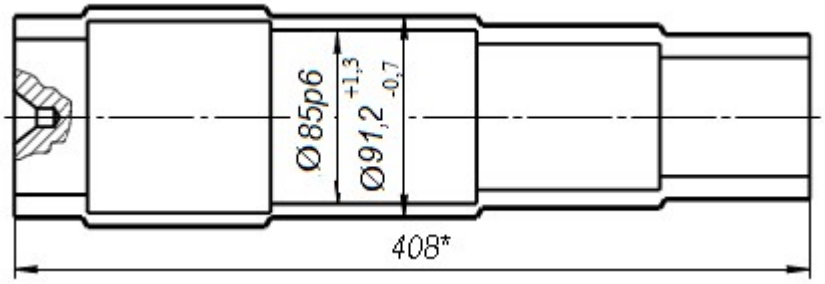


Рис. 6. Заготовка – поковка

Наружная цилиндрическая поверхность одной ступени вала имеет диаметр $d_д$= 85p6$\left(85^{+0,3}_{-0,1}\right)$ шероховатостьюRa 1,25. Ступень исходной заготовки имеет диаметр $d_o = 91{,}2^{+1,3}_{-0,7}$,шероховатость Rz250 (Ra60).

Требуется: выбрать последовательность обработки и провести анализ исходных данных; установить статистическим методом (по таблицам) операционные припуски на каждый переход; рассчитать промежуточные размеры для выполнения каждого технологического перехода.

Задание 12. У цилиндрических втулок с наружным диаметром $d = 80_{-0,2}$ мм и внутренним $D = 40^{+0,05}$ мм требуется фрезеровать шпоночный паз шириной$B = 18^{+0,1}$ мм, выдерживая размер $H = 70_{-0,02}$ и $h = 90^{+0,3}$ мм (рис. 6). Смещение оси шпоночного паза е относительно диаметральной плоскости втулки не должно превышать 0,1 мм.

Для проектирования приспособления выбрать одну из шести показанных схем установки, для которой расчетная погрешность базирования при выполнении размеровB, H и h и отклонение от соосности минимально.

Максимальный зазор при установке заготовки на палец или во втулку S_{max}= 0,01 мм. Допуск на изготовление установочного пальца и центрирующей втулки равен 0,02 мм.

Оценить возможные преимущества каждого метода базирования с точки зрения простоты и надежности установки. Для всех шести способов показать теоретические схемы базирования.

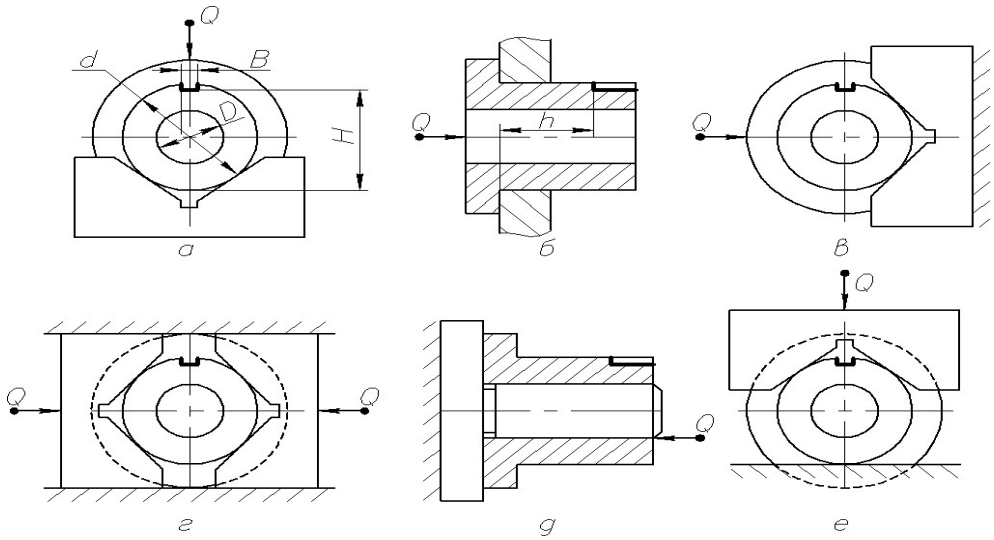


Рис. 7. Схемы установки

Задание 13. На эскизе (рис. 8) обозначено техническое требование к точности взаимного расположения поверхностей детали. Предполагается окончательную обработку верхней плоскости выполнить чистовым фрезерованием на вертикально-фрезерном станке согласно операционному эскизу, изображенному на рис. 7.

Требуется: изложить наименование и содержание технического требования; установить по технологическим справочникам точность взаимного расположения поверхностей детали в зависимости от типа оборудования; сделать заключение о возможности выполнить указанное требование.

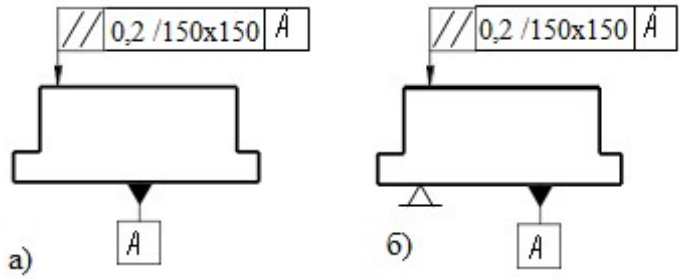


Рис. 8
а) конструктивные требования; б) операционный эскиз

Задание 14. На рабочем чертеже детали «Вал ступенчатый» показаны допуски на взаимное расположение поверхностей вала (рис. 9).

Требуется: описать содержание указанного допуска; перечислить возможные способы обработки и условия выполнения указанных требований к точности; указать способ контроля.

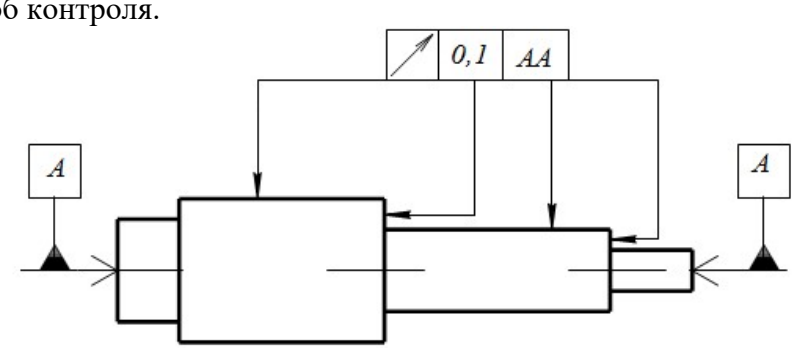


Рис. 9. Требования к расположению поверхностей

*Задание 15.***.** Ступенчатый вал (рис. 10) подвергается черновой токарной обработке в условиях мелкосерийного производства. В качестве заготовки принимается горячекатаный прокат круглого сечения нормальной точности. Исходная заготовка – штучная диаметром 80 мм, массой 17 кг. Токарной обработке предшествовала обработка торцов с выдерживанием размера 430 мм и зацентровка их с двух сторон. Материал детали – сталь 40Х ГОСТ 4543–74 (δ_B = 700МПа).
Требуется спроектировать токарно-винторезную операцию на указанную обработку.

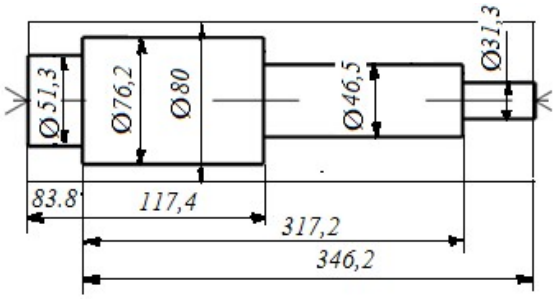


Рис. 10. Эскиз детали

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

по дисциплине

Б1.В.03 ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Направление подготовки

15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)

Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Авторы: Глинникова Т. П., Волегов С. А.

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Эксплуатации горного оборудования	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой	Председатель
(подпись)	*(подпись)*
Симисинов Д. И.	Осипов П. А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение …… 3
1. Общие положения……..... 3
1.1. Состав и объем контрольной работы…….3
1.2. Методические рекомендации к выполнению контрольной работы……. 3
2. Варианты контрольных заданий …….. 4
Литература…….…….. 11

ВВЕДЕНИЕ

Особое место в подготовке выпускников машиностроительных специальностей занимает их технологическая подготовка, основы которой закладываются при изучении дисциплины «Технология конструкционных материалов».

Цель курса – дать будущим специалистам понятие о технологическом процессе, а также знания по выбору технологических методов производства и обработки заготовок машиностроительных изделий, обеспечивающих высокое качество продукции, экономию материалов, высокую производительность труда. Дать понятие о конструкционных материалах, их строении, свойствах и методах получения.

Задачи курса – изучение технологических методов получения и обработки заготовок и деталей машин, их технико-экономических характеристик и областей применения; принципиальных схем типового оборудования, оснастки, инструмента и приспособлений; основных вопросов технологичности конструкций заготовок с учетом их производства; технико-экономических характеристик процессов; техники безопасности и охраны окружающей среды.

1. Общие положения

1.1. Состав и объем контрольной работы

Контрольная работа выполняется в виде реферата объемом 10-15 машинописных листов формата А4, шрифт № 14, 1,5 интервала, Times New Roman.

Содержание работы:

- ответ на вопросы по заданию; примеры;
- список использованной литературы.

Титульный лист должен содержать:

- наименование учебного заведения, кафедры;
- подзаголовок (Контрольная работа по дисциплине «Технология конструкционных материалов»);
- номер варианта;
- фамилия, и. о. студента; номер группы;
- фамилия, и. о. преподавателя;
- год выполнения работы

1.2. Методические рекомендации к выполнению контрольной работы

Студенты, обучающиеся очно, выполняют одну контрольную работу. Задание и выбор вариантов находятся в соответствующих разделах настоящих методических указаний.

Ответы должны быть краткими, аргументированными и точными. При описании производственных процессов необходимо приводить схемы соответствующего оборудования с описанием его устройства и принципа действия. А для формообразующих процессов к тому же привести эскизы применяемых инструментов и оснастки.

В задачи контрольной работы входит изучение: физической сущности основных технологических методов получения заготовок и их обработки; технологических возможностей методов, их назначения, достоинств, недостатков и областей применения; принципиальных схем работы технологического оборудования, инструментов, приспособлений и оснастки; основ технологичности конструкций заготовок и деталей машин с учетом методов их получения и обработки.

2. Варианты контрольных заданий

Вариант 1

1. Исходные материалы для металлургии: руда, флюсы, огнеупоры, топливо; металлургическое производство и его продукция;
2. Производство цветных металлов
3. Определение углов токарного резца в статической системе координат, их назначение и влияние на процесс резания.

Вариант 2

1. Производство чугуна, выплавка чугуна, физико-химические процессы доменной плавки.
2. Литейные свойства сплавов: жидкотекучесть, усадка, смачиваемость, газопоглощение, химическая активность, ликвация. Сравнение литейных свойств стали и чугуна.
3. Формообразование зубчатых колес резанием. Сущность методов нарезания зубчатых колес копированием и обкатыванием. Основные преимущества и недостатки методов.

Вариант 3

1. Сущность процессов шлакования; роль шлаков и флюсов в металлургии (на примере доменной плавки).
2. Литье по выплавляемым моделям: исходные материалы и технология изготовления оболочки; область применения способа. Схематически изобразите основные этапы: получение модели в прессформе, блок моделей, нанесение оболочки, выплавление модельного состава, полученный блок отливок.
3. Виды и сущность программного управления металлообрабатывающими станками. Упрощенная структурная схема цикловой системы управления.

Вариант 4

1. Сущность доменного процесса; исходные материалы для получения чугуна, продукты доменной плавки, оценка эффективности работы доменной печи. Схема и принцип работы доменной печи.

2. Литье в песчаные формы: конструкция формы, литейная оснастка, формовочные материалы, область применения. Преимущества и недостатки литья в песчаные формы.

3. Особенности устройства металлообрабатывающих станков с ЧПУ. Назначение и основные преимущества станков.

Вариант 5

1. Сталь. Сущность процесса получения стали методом прямого восстановления железа из руды. Приведите примеры восстановительных химических реакций при прямом восстановлении железа из руды.

2. Основные законы обработки давлением: постоянства объема наименьшего сопротивления, подобия; использование их в практике.

3. Основные конструктивные части металлорежущих инструментов. Основные поверхности и кромки токарного резца.

Вариант 6

1. Сущность процессов шлакования; роль шлаков и флюсов в металлургии (на примере доменной плавки).

2. Инструментальные материалы: инструментальные стали, твердые сплавы, режущая керамика, сверхтвердые инструментальные материалы. Их назначение и обозначение.

3. Схема образования стружек при резании металлов. Основные виды стружек и способы стружколомания.

Вариант 7

1. Окислительно-восстановительные реакции в металлургии (на примере производства чугуна и стали).

2. Устройство привода подачи токарно-винторезного станка и его основные элементы; механизмы реверса, гитары сменных зубчатых колес, множительные механизмы, предохранительные муфты, ходовые валы и винты.

3. Тепловые процессы при сварке: эффективная тепловая мощность, тепловой баланс, погонная энергия. Влияние нагрева на строение сварного шва и околошовной зоны. Горячие и холодные трещины при сварке. Методы борьбы с горячими и холодными трещинами.

Вариант 8

1. Сущность доменного процесса; исходные материалы для получения чугуна, продукты доменной плавки, оценка эффективности работы доменной печи. Схема и принцип работы доменной печи.

2. Объемная штамповка; роль объемной штамповки в машиностроении. Сущность открытой и закрытой штамповки; способы получения сложных заготовок.

3. Основные способы разработки управляющих программ для металлообрабатывающих станков с программным управлением.

Вариант 9

1. Литье в кокиль: требования к кокилю и отливкам, облицованные кокили; область использования процесса. Принципиальная схема кокиля. Преимущества и недостатки пресса.

2. Металлобрабатывающие станочные системы (МСС). Назначение и их классификация. Основные виды и составные части гибких производственных систем. Металлообрабатывающие автоматические линии, их разновидности и основные составные части.

3. Прокатка металла: роль продукции прокатного производства в машиностроении; измерение деформации при прокатке, условие захвата заготовки валками, валки и калибры, продукция прокатного производства, периодический прокат. Принципиальная схема продольной прокатки.

Вариант 10

1. Сталь. Сущность процесса получения стали методом прямого восстановления железа из руды. Приведите примеры восстановительных химических реакций при прямом восстановлении железа из руды.

2. Классификация отливок и способов литья по масштабу производства и технологическому принципу (примеры литья в разовые и постоянные формы).

3. Автоматическая и механизированная сварка под флюсом: Принципиальные схемы, сварочные материалы, преимущества процесса и область применения.

Вариант 11

1. Литье под давлением: сущность процесса, область использования. Принципиальная схема формы для литья под давлением. Преимущества и недостатки процесса.

2. Формирование деталей машин электрофизикохимическими методами. Назначение, преимущества и недостатки методов. Сущность электроэрозионных, электрохимических, ультразвуковых и лучевых методов.

3. Строение и свойства электрической дуги. Требования к источникам сварочного тока. Напряжение холостого хода для источников постоянного и переменного тока. Внешняя характеристика источника сварочного тока.

Вариант 12

1. Сущность процесса передела чугуна на сталь. Сравнительная характеристика основных способов производства стали: в конвертерах, мартенах, электропечах.

2. Сверление. Основные типы сверлильных станков и их назначение. Параметры режима резания при сверлении (V, S, t, ТО) и последовательность их рационального сочетания.

3. Способы окончательной обработки рабочих поверхностей деталей машин поверхностным пластическим деформированием: обкатывание, выглаживание, дорнирование, ударное раскатывание, центробежная обработка и чеканка. Назначение способов, инструменты и схема обработки

Вариант 13

1. Кислородно-конвертерный способ получения стали: исходные материалы, технология, технико-экономические показатели. Схема кислородного конвертера.

2. Литье в оболочковые формы: исходные материалы, технология изготовления оболочки; область применения способа. Схема получения отливки. Преимущества и недостатки литья в оболочковые формы.

3. Устройство приводов главного движения токарно-винторезных станков: движители, клиноременные передачи, механизмы включения и выключения привода, механизмы реверса, множительные механизмы, тормоза.

Вариант 14

1. Мартеновский способ получения стали: исходные материалы, технология, технико-экономические показатели; работа и устройство двухванного мартена. Схемы мартеновской печи и двухванного мартена.

2. Классификация способов окончательной обработки рабочих поверхностей деталей машин с использованием абразива и методами поверхностного пластического деформирования. Хонингование, суперфиниш, доводка (притирка) и полирование: назначение, инструменты, схема обработки.

3. Основные литейные сплавы: чугуны, силумины, бронзы, стали; связь их литейных свойств с технологией изготовления и качество литейной продукции.

Вариант 15

1. Плавка стали в электропечах: сущность процесса исходные материалы, преимущества, область использования. Схема электропечи для выплавки стали.

2. Литейные свойства сплавов: жидкотекучесть, усадка, смачиваемость, газопоглощение, химическая активность, ликвация. Сравнение литейных свойств стали и чугуна.

3. Дуговая сварка в углекислом газе: принципиальная схема, источники сварочного тока, сварочные материалы, режимы сварки; область применения.

Вариант 16

1. Пути повышения качества стали: обработка синтетическими шлаками, дегазация вакуумированием, электрошлаковый переплав. Объясните сущность каждого метода и дайте схему электрошлакового переплава.

2. Износ и стойкость металлорежущих инструментов. Причины износа и параметры, характеризующие износ на примере токарных резцов. Определение стойкости металлорежущих инструментов. Обозначение стойкости и средняя ее величина у токарных резцов.

3. Наклеп обработанных поверхностей заготовок из металла при обработке резанием. Схема, поясняющая образование наклепа. Отрицательные и положительные свойства наклепа поверхности. Способы борьбы с отрицательными свойствами наклепа.

Вариант 17

1. Производство стали сущность процесса.

2. Пластичность металлов, влияние на пластичность химического состава, температуры нагрева, схемы напряженного состояния, скорость деформации.

3. Понятие о горячей и холодной обработке металлов давлением. Наклеп и рекристаллизация. Изменение механических свойств при наклепе и при последующем нагреве.

Вариант 18

1. Сущность процесса передела чугуна на сталь. Сравнительная характеристика основных способов производства стали: в конвертерах, мартенах, электропечах.

2. Листовая штамповка; использование листовой штамповки в машиностроении. Основные операции листовой штамповки: вырубка заготовок, усилие вырубки; вытяжка, коэффициент вытяжки, усилие вытяжки. Принципиальные схемы вырубки и вытяжки. Формула для подсчета усилия вырубки.

3. Металлургические процессы при сварке: диссоциация веществ, насыщение металла O, N, H, процессы раскисления, шлакования, рафинирования металла сварного шва.

Вариант 19

1. Кислородно-конвертерный способ получения стали: исходные материалы, технология, технико-экономические показатели. Схема кислородного конвертера.

2. Центробежное литье: сущность процесса, область использования, преимущества и недостатки. Принципиальная схема центробежного литья.

3. Ковка металла; область использования ковки, деформация металла при ковке, основные операции, оборудование для ковки и область его использования. Принципиальные схемы.

Вариант 20

1. Мартеновский способ получения стали: исходные материалы, технология, технико-экономические показатели; Схемы мартеновской печи. Классификация способов сварки по технологическому принципу, по степени механизации, по энергетическому принципу

2. Силы резания. Схема, поясняющая образование силы сопротивления резанию. Силы, действующие на резец при продольном точении их использование в практике.

3. Пайка металлов: флюсы и припои при пайке. Принципиальное различие между сваркой и пайкой.

Вариант 21

1. Плавка стали в электропечах: сущность процесса исходные материалы, преимущества, область использования. Схема электропечи для выплавки стали.

2. Нагрев металлов перед обработкой давлением. Основные параметры нагрева: температурный интервал обработки давлением, скорость нагрева, время выдержки заготовки в печи; способы нагрева.

3. Ацетилено-кислородная сварка: сущность процесса, оборудование, режимы сварки.

Вариант 22

1. Пути повышения качества стали: обработка синтетическими шлаками, дегазация вакуумированием, электрошлаковый переплав. Объясните сущность каждого метода и дайте схему электрошлакового переплава.

2. Аргонодуговая сварка: принципиальные схемы и разновидности, область использования.

3. Основные типы токарных станков и их использование в основных видах производства. Классификация токарных резцов по характеру выполняемых операций, по направлению подачи, по форме головки, по конструкции. Основные виды приспособлений к токарным станкам и их назначение.

Вариант 23

1. Разливка стали; разливка в изложницы, непрерывная разливка; строение стального слитка. Представьте схемы разливки в изложницы сверху и снизу, схему непрерывной разливки стали; схемы слитков спокойной и кипящей стали.

2. Схема, поясняющая образование нароста на резце и обработанной поверхности при точении металла. Причины образования нароста, положительные и отрицательные его свойства. Способы устранения нароста на резце при точении металлов.

3. Параметры режима шлифования на примере круглого наружного шлифования и последовательность определения их рационального сочетания. Схемы продольного круглого, глубинного шлифования и шлифования врезанием.

Вариант 24

1. Выбор метода и способа и способа получения заготовки, основные факторы, влияющие на выбор способа получения заготовки.

2. Ручная дуговая сварка: принципиальная схема, источники тока, сварочные материалы, режимы сварки. Приведите примеры: марки электродной проволоки, марка электрода, тип электрода

3. Основные виды шлифования их преимущества и недостатки. Технологические возможности шлифования по шероховатости и точности. Формообразование при шлифовании.

Вариант 25

1. Разливка стали; разливка в изложницы, непрерывная разливка; строение стального слитка. Представьте схемы разливки в изложницы сверху и снизу, схему непрерывной разливки стали; схемы слитков спокойной и кипящей стали.

2. Схемы методов копирования, следов, касания и обкатки при формообразовании деталей машин резанием.

3. Основные способы отделки рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес; шевингование, хонингование, шлифование, притирка, обработка, модификация зубьев. Назначение способов, инструменты и схемы обработки.

Вариант 26

1. Классификация отливок и способов литья по масштабу производства и технологическому принципу (примеры литья в разовые и постоянные формы).

2. Тепловые явления при резании металлов. Причины образования тепла. Отрицательное влияние образующегося тепла на заготовку и инструмент. Смазочно-охлаждающие технологические средства.

3. Классификация фрез по видам обрабатываемых поверхностей (плоских и фасонных), по конструкции фрез, по виду режущих зубьев, инструментальному материалу.

Вариант 27

1. Характеристика основных способов получения машиностроительных профилей; их сравнительная характеристика (прокатка, прессование, волочение). Принципиальные схемы указанных процессов

2. Сварочные материалы: сварочная проволока, сварочные электроды, флюсы, защитные газы. Марки электродной проволоки, тип и марка электрода. Состав и свойства электродных покрытий.

3. Формообразование деталей машин на токарных станках (Dr, Ds). Способы формообразования, выполняемые на универсальных токарно-винторезных станках. Разновидности токарной обработки; точение, растачивание, подрезание, отрезание. Технологические возможности токарной обработки по шероховатости и точности.

Вариант 28

1. Контактная сварка: стыковая, точечная, шовная, принципиальные схемы. Физическая сущность процесса контактной сварки. Выбор режима сварки.

2. Классификация и системы обозначения металлорежущих станков. Классификация металлообрабатывающих станков по виду обработки; степеням точности. Системы обозначения для серийных и специализированных станков.

3. Сверление. Формообразование отверстий (Dr, Ds). Шероховатость и точность отверстий, получаемых сверлением в конструкционных сталях. Классификация спиральных сверл по конструкции, длине, форме получаемых отверстий, инструментальному материалу, типу хвостовика и направлению стружкоотводящих канавок. Основные части спирального сверла.

Вариант 29

1. Сущность формообразования деталей машин резанием лезвийными и абразивными инструментами, методами поверхностного пластического деформирования; электроэрозионными, электрохимическими, ультразвуковыми и лучевыми методами.

2. Точность, обеспечиваемая при протягивании в деталях из конструкционных сталей. Формообразование при протягивании (Dr, Ds). Основные типы протяжек станков, используемых в промышленности. Основные части протяжек и прошивок. Параметры режима резания при протягивании.

3. Схемы нарезания зубчатых колес на зубофрезерных и зубодолбежных станках.

Вариант 30

1. Основные характеристики процессов формообразования деталей машин резанием: скорость резания, скорость подачи, глубина резания, ос-

новное технологическое время при вращательном движении инструмента (заготовки). Определение рабочих движений инструмента (заготовки) при формообразовании деталей (Dr, Ds, Dk, De) (например, точения).

2. Зенкерование и развертывание. Цели зенкерования и развертывания. Шероховатость и точность отверстий в конструкционных сталях, достигаемые при зенкеровании и развертывании. Классификация зенкеров и разверток: по виду привода, форме обрабатываемых отверстий по конструкции; по инструментальным материалам. Основные части зенкера и развертки. Параметры режима резания при сверлении и развертывании.

3. Оборудование для объемной штамповки, его характеристика и область использования. Принципиальные схемы.

Рекомендуемая литература:

1. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей / Под ред. .-5-е изд., исправленное М. Машиностроение, 2004.-512 с., ил.

2. Кучер А. М. Технология конструкционных материалов. Учебник – СПб, 2003 г.

3. Кнорозов, Б. В. и др. Технология металлов и материаловедение. М.: Металлургия, 1987. – 800 с.

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

Хазин М. Л.,Глинникова Т. П., Волегов С. А.

Технология конструкционных материалов

Учебно-методическое пособие по практической и самостоятельной работе по темам «Обработка металлов давлением», «Сварка», «Обработка металлов резанием» для студентов направления бакалавриата: 15.03.01- «Машиностроение», 15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 15.02.01 -«Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» *очного и заочного обучения*

Екатеринбург
2016

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

ОДОБРЕНО
методической комиссией
горно-механического факультета
«___» _____ 2016 г.
Председатель комиссии
_____проф. Барановский В. П.

Хазин М. Л., Глинникова Т.П., Волегов С.А.

Технология конструкционных материалов

Учебно-методическоепособие по практической и самостоятельной работе по темам
«Обработка металлов давлением», «Сварка»,
Обработка металлов резанием»
для студентов направления бакалавриата:
150700 - «Машиностроение»,
151000 - «Технологические машиныи оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования
151031 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования(по отраслям)»
очного и заочного обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2016

Рецензент: *А. П. Комиссаров*, д-р техн. наук, профессор кафедры ГМК Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры эксплуатации горного оборудования 18 ноября 2016 г. (протокол № 3) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Хазин М. Л., Глинникова Т. П., Волегов С. А.

Технология конструкционных материалов: Учебно-методическое пособие по практической и самостоятельной работе по темам «Обработка металлов давлением», «Сварка», «Обработка металлов резанием», «Литье», «Металлургическое производство» для студентов направления бакалавриата: 15.03.01 – «Машиностроение», 15.03.02 – «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования 15.02.01 - «Монтаж техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)» очного и заочного обучения / М. Л.Хазин, Т. П. Глинникова, С. А. Волегов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 80 с.

Учебно-методическое пособие составлено для проведения практических и самостоятельных работ по дисциплине "Технология конструкционных материалов" В пособии изложены краткие теоретические сведения о получении металлов и методах их обработки давлением, сваркой, резанием,литьем. Приведены задания по каждой теме в соответствии с рабочей программой дисциплины «Технология конструкционных материалов», перечень основной и дополнительной литературы. В приложении приводятся справочные таблицы, необходимые для решения задач.

©Хазин М. Л., Глинникова Т. П., Волегов С. А.,
© Уральский государственный горный университет

Оглавление

1. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ 5
19. Опишите технологию производства гнутых профилей. 9
1.3. Волочение 9
1.4. Ковка 12
2. СВАРКА 17
2.1. Ручная сварка покрытыми электродами 21
3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ 31
4. Литье
5. Получение металлов

1. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

1.1. Общая характеристика способа

Обработка металлов давлением - один из прогрессивных способов получения заготовок и деталей сложной конфигурации. При этом методе повышается коэффициент использования металла, уменьшаются отходы, улучшаются свойства металла, под влиянием приложенных внешних сил происходит изменение формы заготовок без нарушения их сплошности.

Основной задачей всех видов обработки давлением является придание металлу желаемой формы посредством процесса пластической деформации. В результате пластической деформации изменяются не только форма и размеры заготовки, но и структура и свойства исходного металла.

При обработке металлов давлением в заготовке под действием внешних сил возникают напряжения. Если они невелики, происходит упругая деформация, при которой атомы металла смещаются от положений устойчивого равновесия на очень малые расстояния, не превышающие межатомные. После снятия нагрузки атомы вследствие межатомного взаимодействия возвращаются в исходные положения устойчивого равновесия. Форма тела полностью восстанавливается и никаких остаточных изменений в металле не происходит. С увеличением внешней нагрузки напряжения в заготовке растут, что ведет к смещению атомов от положений устойчивого равновесия на расстояния, значительно превышающие межатомные. После снятия нагрузки атомы занимают новые места устойчивого равновесия, поэтому форма тела не восстанавливается. Такое необратимое изменение формы тела называется **пластической деформацией.** Способность металла подвергаться пластической деформации называется **пластичностью**.

Характер пластической деформации зависит от соотношения процессов упрочнения иразупрочнения. Принято различать виды деформации и, соответственно, виды обработки давлением.

Горячая деформация – деформация, после которой металл не получает упрочнения. Рекристаллизация успевает пройти полностью, новые равноосные зерна полностью заменяют деформированные зерна, искажения кристаллической решетки отсутствуют. Деформация-

имеет место при температурах выше температуры начала рекристаллизации.

Неполная горячая деформация характеризуется незавершенностью процесса рекристаллизации, которая не успевает закончиться, так как скорость ее недостаточна по сравнению со скоростью деформации. Часть зерен остается деформированными и металл упрочняется. Возникают значительные остаточные напряжения, которые могут привести к разрушению. Такая деформация наиболее вероятна при температуре, незначительно превышающей температуру начала рекристаллизации. Ее следует избегать при обработке давлением.

При *неполной холодной деформации* рекристаллизация не происходит, но протекают процессы возврата. Температура деформации несколько выше температуры возврата, а скорость деформации меньше скорости возврата. Остаточные напряжения в значительной мере снимаются, интенсивность упрочнения снижается.

При *холодной деформации*разупрочняющие процессы не происходят. Температура холодной деформации ниже температуры начала возврата.

Холодная и горячая деформации не связаны с деформацией с нагревом или без нагрева, а зависят только от протекания процессов упрочнения и разупрочнения. Поэтому, например, деформация свинца, олова, кадмия и некоторых других металлов при комнатной температуре является с этой точки зрения горячей деформацией.

Основными схемами деформирования объемной заготовки, применяемые в промышленности являются:

– сжатие между плоскостями инструмента – ковка;
– ротационное обжатие вращающимися валками – прокатка;
– затекание металла в полость инструмента – штамповка;
– выдавливание металла из полости инструмента – прессование;
– вытягивание металла из полости инструмента – волочение.

1.2. Методические указания

Изучая обработку металлов давлением, следует обратить внимание на различие между упругой и пластической видами деформации.

Основным видом обработки материалов давлением является прокатка.Рассматривая процесс прокатки, следует изучить схему и сущность процесса: как происходить захват металла валками и какие видыдеформации различают при прокатке. При изучении технологии

изготовления отдельных видов проката надо обратить внимание на последовательность операций выполняемых отдельными машинами и механизмами.

Необходимо усвоить понятия горячей и холодной обработки давлением, явления, которыми они охарактеризуются: наклеп и рекристаллизация.Для обеспечения равномерного прогрева заготовки по высоте и сечению нужно правильно выбрать режим нагрева.

Путем прессования,в отличие от проката, когда используются пластичные материалы, при деформации сплавов пониженной пластичности, можно получать сложные по форме и точные по размеру профили.При изучении прессования необходимо запомнить, что этот способ применяют для обработки давлением труднодеформируемых сталей и сплавов цветных металлов.

Прессование производят на прессах. Изготовление изделий малых сечений методами проката и прессования обычно энергетически нецелесообразно.

Для производства проволоки, прутков, фасонных профилей и труб малого сечения более рационально использовать процесс ***волочения*** материалов. Необходимо понять сущность процесса волочения при получении прутков, фасонных профилей и труб, а также изучить устройство инструмента (волоки) и оборудования (волочильные станы). Технологические операции волочения проводят после предварительной подготовки металлических заготовок: применяют различные виды смазки в зависимости от обрабатываемого металла и его назначения. Волочение проводят обычно в холодном состоянии, что приводит к появлению в металле наклепа. Для снятия наклепа на некоторых этапах волочения применяют промежуточныйили так называемый межоперационный отжиг.

Крупные изделия сложной формы изготавливают методом ковки. Рассматривая технологию свободной ковки, обратите внимание на необходимость учета припусков, допусков и напусков, их размеров и назначения изделий.

При знакомстве с горячей и холодной объемной штамповкой изучите два способа: в открытых и закрытых штампах. Затем следует рассмотреть устройство и принцип работы штамповочных молотов и прессов.

При рассмотрении технологии листовой штамповки следует различать штампы простого, последовательного и совмещенного действия, механизмы подачи и перемещения листового материала, уда-

ления изделий и отходов.Обратите внимание на новые и специальные методы листовой штамповки, их преимущества и недостатки, перспективы развития.

Вопросы для самопроверки:

1. На чем основана обработка металлов давлением? Опишите сущность обработки металлов давлением.
2. В чем заключается преимущество обработки металлов давлением посравнению с обработкой резанием?
3. Как влияет обработка давлением на структуру и свойства металла?
4. Как изменяется микроструктура металла после обработки давлением? Какие нагревательные устройства применяются перед обработкой металла давлением? Опишите их устройство и назначение.
5. Объясните сущность процесса прокатки. Рассмотрите основные виды прокатки.
6. Опишите технологию производства сортовых профилей.
7. Опишите технологию производства листового проката.
8. Опишите технологию производства бесшовных труб.
9. Опишите технологию производства сварных труб.
10. Опишите технологию производства специальных видов проката.
11. Опишите основные операции ковки и применяемый инструмент. Приведите эскизы.
12. Какое оборудование применяется для ковки? Рассмотрите последовательность операций процесса ковки. Опишите их содержание и назначение.
13. В чем заключается сущность процесса горячей объемной штамповки? Приведите схемы штамповки в открытых и закрытых штампах.
14. Какое применяется оборудование для горячей объемной штамповки?
15. Дайте описание технологии холодной штамповки. Ответ иллюстрируйте схемами выдавливания.
16. Рассмотрите технологический процесс прессования (выдавливания) труб.

17. Что такое волочение? Сущность процесса волочения проволоки, применяемое оборудование и порядок выполнения технологических операций.

18. Дайте описание технологического процесса волочения труб, применяемого при этом оборудования и инструментов.

19. Опишите технологию производства гнутых профилей.

Работа №1. Волочение

Краткие теоретические сведения

Волочение это процесс обработки давлением, при котором пластическая деформация заготовки в холодном состоянии осуществляется за счет ее протягивания через постепенно сужающееся отверстие в инструменте, называемом волокой или фильерой. Конфигурация отверстия инструмента определяет форму получаемого профиля изделия.

Схемы волочения прутка и трубы и примеры профилей представлены на рис. 1.1. Волочение труб можно производить без оправки и на оправке, если требуется уменьшить наружный диаметр и толщину стенки.

В связи с тем, что величина деформации за один проход ограничена,товеличина вытяжкинедолжна превышать 1,05 ... 1,5.

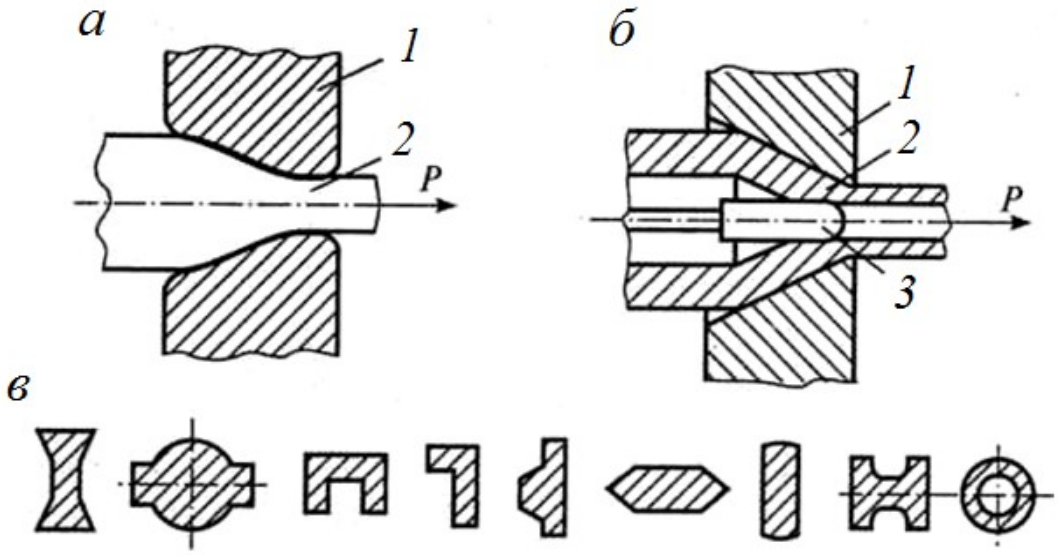


Рис. 1.2. Схемы волочения прутка (*а*), трубы (*б*) и примеры профилей, получаемых волочением (*в*):
1 – фильера; *2* – заготовка; *3* – оправка

Если суммарная деформация металла превышает предельную пластичность (сужение) металла, то необходимо проведение промежуточногорекристаллизационного отжига заготовки перед следующим волочением для устранения пластической деформации и восстановления пластичности металла заготовки. При необходимости отжиг проводится несколько раз.

Истинная деформация, в отличие от относительной деформации, отражает смысл процесса деформирования. При больших деформациях (> 60 %) значения истинной и условной деформаций существенно различаются (истинное удлинение меньше относительного).

Относительное сужение

$$\psi = \frac{S_0 - S_к}{S_к}.$$

Истинное сужение заготовки

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_к}.$$

Истинная и относительнаядеформация металла заготовкисвязаны между собой соотношением

$$e = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right).$$

Общая вытяжка заготовки за весь цикл обработки составляет

$$\mu_{общ} = \left(\frac{d_0}{d_к}\right)^2.$$

Общее истинное сужение заготовки

$$\Psi_{общ} = \psi_1 + \psi_2 + \ldots + \psi_i + \ldots + \psi_n = \sum_{i=0}^{n} \psi_i.$$

Диаметр проволоки после одного прохода

$$d_{п1} = d_0 z = d_0 \sqrt{\frac{1}{\mu_1}}$$

Количество проходов для достиженияпредельной величины истинной деформации

$$n = \frac{\frac{\ln d_к}{d_0}}{\ln z}.$$

где d_0; $d_к$ –начальный и конечный диаметр прутка,мм;

φ – относительная деформация (сужение) заготовки;

n – число проходов;

ψ_i – относительное сужение металла заготовки за i-проход;
μ_i – вытяжка заготовки за i-проход;
S_0 и $S_к$– начальная и конечная площадь основания заготовки, мм^2.

Задача № 1

Определить количество проходов n заготовки, необходимых для получения волочением прутка диаметром $d_к$ (мм) из заготовки диаметром d_0 (мм). Допустимая вытяжка за проход для материала заготовки составляет μ_i. Определить вытяжку за последний проход, чтобы выдержать заданный диаметр готового изделия $d_к$.

Варианты исходных данных к задаче № 1

Вариант	d_0	$d_к$	μ_i	Вариант	d_0	$d_к$	μ_i
1	10	3,0	1,2	11	14	5,0	1,2
2	10	2,5	1,4	12	14	4,0	1,4
3	10	1,0	1,4	13	14	3,0	1,4
4	16	4,0	1,25	14	15	5,0	1,25
5	16	3,0	1,45	15	15	4,0	1,45
6	16	2,0	1,45	16	15	3,0	1,45
7	18	4,0	1,15	17	17	6,0	1,15
8	18	3,0	1,2	18	17	5,0	1,2
9	18	2,0	1,2	19	17	4,0	1,2
10	20	5,0	1,2	20	20	6,0	1,2

Задача № 2

Обосновать необходимость промежуточного отжига заготовки при волочении прутка диаметром $d_к$ (мм) из заготовки диаметром d_0 (мм). Определить расчетом, после какого прохода необходим рекристаллизационный отжиг, если предельная пластичность (сужение) металла составляетψ (%), а допустимая вытяжка металла за проход - μ_i. Определить также количество отжигов за полный цикл обработки.

Варианты исходных данных к задаче №2

Вариант	d_0	$d_к$	μ_i	ψ	Вариант	d_0	$d_к$	μ_i	ψ
1	12	3,0	1,25	50	11	14	5,0	1,2	50
2	12	2,5	1,3	55	12	14	4,0	1,4	55
3	12	1,5	1,2	60	13	14	3,0	1,4	60

4	14	4,0	1,4	50	14	15	5,0	1,25	50
5	14	3,0	1,35	55	15	15	4,0	1,45	55
6	14	3,0	1,2	60	16	15	3,0	1,45	60
7	16	4,0	1,4	50	17	17	6,0	1,15	50
8	16	5,0	1,35	55	18	17	5,0	1,2	55
9	16	4,0	1,25	60	19	17	4,0	1,2	60
10	18	3,0	1,15	50	20	20	6,0	1,2	50

Задача № 3

Определить необходимое число проходов n и диаметр d_{in} (мм) волоки на отдельных проходах при волочении прутка диаметром $d_к$ (мм) из заготовки диаметром d_0 (мм). Допустимая вытяжка металла заготовки за проход составляет μ_i.

Варианты исходных данных к задаче №3

Вариант	d_0	$d_к$	μ_i	Вариант	d_0	$d_к$	μ_i
1	16	14	1,25	11	15	13	1,25
2	16	12	1,30	12	15	12	1,30
3	16	13	1,20	13	15	11	1,20
4	18	15	1,25	14	17	15	1,25
5	18	14	1,30	15	17	14	1,30
6	18	16	1,20	16	17	13	1,20
7	20	17	1,25	17	19	17	1,25
8	20	16	1,30	18	19	16	1,30
9	10	6,5	1,25	19	9	15	1,25
10	22	20	1,15	20	20	18	1,15

Работа №2. Ковка

Краткие теоретические сведения

Ковка – один из способов обработки металлов давлением, при котором инструмент оказывает многократное воздействие на нагретую заготовку, в результате чего она, деформируясь, постепенно приобретает заданную форму и размеры. Различают ковку ручную и машинную, осуществляемую с помощью молотов и прессов.

К основным операциям машинной ковки относятся осадка, протяжка, прошивка, гибка, сварка, скручивание, отрубка и раскатка (рис. 1.3).

Осадка – уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения. Осадку производят бойками или осадочными плитами. Заготовки, у которых отношение высоты к диаметру более 2,5, осаживать не рекомендуется во избежание возможного продольного искривления. Осадка части заготовки называется **высадкой**. Операции машинной ковки выполняют на различных типах молотов и гидравлических прессах.

Относительная деформации в направлении осадки

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_1},$$

где h_0 – высота образца до осадки;h_1 – высота образца после осадки.

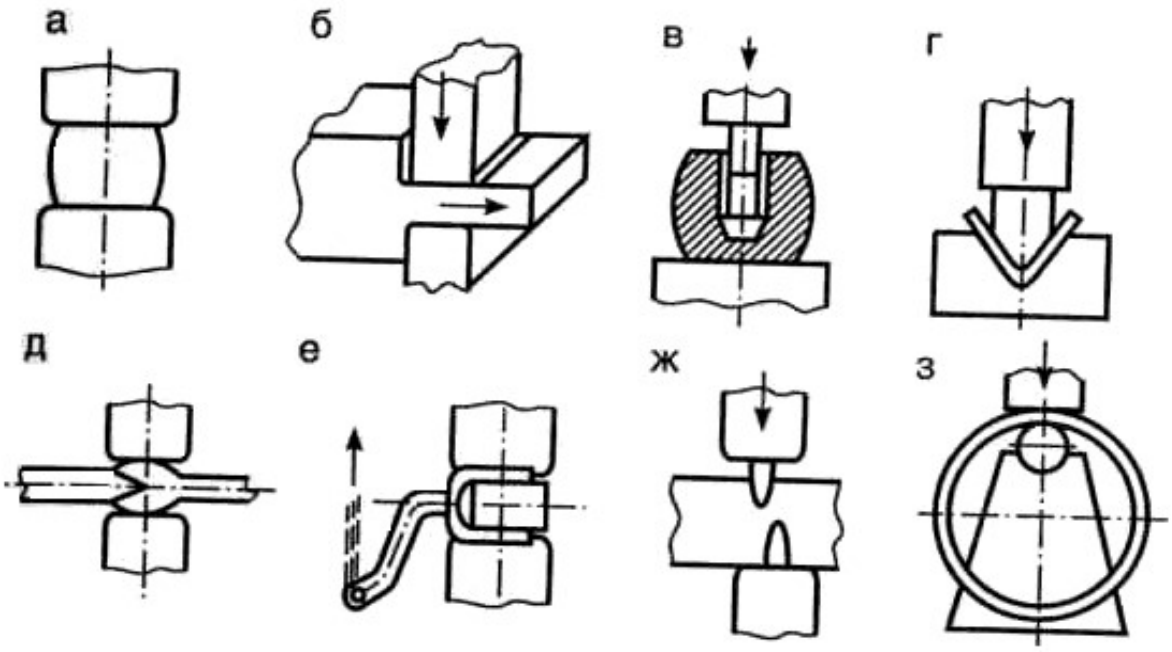


Рис. 1.3. Схема основных операций машинной ковки:
а – осадка; *б* – протяжка; *в* – прошивка; *г* – гибка; *д* – сварка;
е – скручивание; *ж* – отрубка; *з* – раскатка

Удельное усилие при осадке заготовок цилиндрической формы может быть определено по формуле

$$P = \sigma_т\left(1 + \frac{f \cdot d_1}{4h_1}\right),$$

где $\sigma_т$– предел текучести металла при температуре деформации;f– коэффициент трения между заготовкой и инструментом (0,3-0,5);h_1 – высотазаготовки после осадки; d_1–диаметр заготовки после осадки.

Сила деформирования при осадке

$$P_д = P \cdot W \cdot \psi_м \cdot S, \text{ (Н)},$$

где W – скоростной коэффициент при осадке (W = 1 при осадке прессом, S– площадь заготовки при осадке; W = 2,5 при осадке молотом); $\psi_м$ – масштабный коэффициент (табл.1).

Работа деформации

$$A_д = W\psi_м PV\ln\frac{h_0}{h_1}, \text{ (Дж)},$$

где V – объем заготовки, м^3.

Энергия одного удара молота

$$E = mgH\eta, \text{ (Дж)},$$

где m –масса молота, кг;

H– высота падения молота, м;

g– ускорение свободного падения 9,8 м/с^2;

η – коэффициент полезного действия, 0,85.

Средний диаметр осаженной поковки

$$d_1 = d_о\sqrt{(h_о / h_1)}, \text{мм}.$$

Число ударов молота

$$n = \frac{A_д}{E} .$$

Объем осаживаемой заготовки

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2 h_0}{4} .$$

Поскольку объем заготовки не изменяется, то диаметр заготовки после осадки

$$d_1 = \sqrt{\frac{4V_0}{\pi h_1}} .$$

Таблица 1.1

Масштабный коэффициент $\psi_м$ для определения усилия деформирования при обработке давлением

Масса поковки, кг	0 - 1500	1500 - 60000	60000 - 80000	80000 -200000
$\psi_м$	10	9 - 8	7 - 6	5 - 4

Таблица 1.2.

Временное сопротивление разрыву (МПа) некоторых сталей при повышенных температурах

Марка стали	Температура испытаний, °С				
	700	800	1000	1100	1200
20	145	96	54	38	23
45	170	110	50	34	27
30ХГС	175	85	37	21	10
40Х	175	98	24	11	11

Примечание: для отожженной углеродистой стали отношение $\sigma_т/\sigma_в$ составляет примерно 0,5; а для отожженной легированной стали – 0,5-0,6.

Таблица 1.3

Температурные интервалы ковки и штамповки конструкционных, углеродистых и легированных сталей

Марки сталей	Рекомендуемый интервал температур ковки в ^{0}С	Марки сталей	Рекомендуемый интервал температур ковки,^{0}С
Ст.0 – Ст.3	1300 - 700	35Х, 38ХА, 40ХА	1180 - 820
Ст.4, Ст.5	1250 - 750	25Н, 30Н, 25НА, 30НА, 12Х18Н12Т	1220 - 800
Ст.6, Ст.7	1200 - 750	40ХГ, 40ХГА	1180 - 800
10, 15	1300 - 750	12ХН2, 12ХН2А, 12ХН3	1180 - 800
20, 25, 30, 35	1250 - 750	30ХН3, 30ХН3А, 37ХН3А	1160 - 850
40, 45, 50, 55	1200 - 750	37ХС, 40ХС, 40ХСА	1150 - 830
15Г, 20Г, 30Г	1230 - 800	27СГ, 35СГ	1230 - 800
40Г, 50Г	1200 - 800	70Г	1180 – 780
40Г2, 45Г2, 50Г2	1180 - 830	15ХГ, 30ХГС	1230 – 850

Температурные интервалы начала и конца ковки для углеродистых сталей

Марка стали	Температуры ковки	
	начала	конца
Ст 1	1300	900
Ст 2	1250	850
Ст 3	1200	850
Сталь У7, У8, У9	1150	800
Сталь У10, У12, У13	1130	870

Задача № Д.1

Определить усилие деформирования $P_д$ гидравлического ковочного пресса, необходимое для осадки стальной заготовки размерами d_0 (мм), h_0(мм) до высоты $h_{пок}$(мм). Температура окончания осадки T = 1100°С.

Варианты исходных данных к задаче № Д.1

№ вар.	Марка стали	d_0	h_0	$h_{пок}$	№ вар.	Марка стали	d_0	h_0	$h_{пок}$
1	45	1040	2100	950	11	12Х18 Н12	1040	2100	950
2	40Х	1100	2200	970	12	30	1100	2200	970
3	20	1200	2300	1000	13	30ХГС	1200	2300	100 0
4	30ХГС	1040	2150	960	14	30	1040	2150	960
5	45	1100	2250	950	15	40Х	1100	2250	950
6	40Х	1200	2350	970	16	20	1200	2350	970
7	20	1040	2100	1000	17	12Х18Н12	1040	2100	1000
8	30ХГС	1100	2200	960	18	30	1100	2200	960
9	45	1200	2300	950	19	40Х	1200	2300	950
10	40Х	1040	2100	970	20	12Х18 Н12	1040	2100	970

Задача № Д.2.2

Определить массу молота*m* и число ударов *n*, необходимых для осадки стальной заготовки с начальными размерами d_0 (мм), h_0 (мм) до высоты h_1 (мм). Расчет *m*выполнить для температуры окончания ковки, расчет *n* выполнить для средней температуры ковки при высоте падения молота H= 0,8 м.

Варианты исходных данных к задаче № Д.2.2

№ вар.	Марка стали	d_0	h_0	h_1	№ вар.	Марка стали	d_0	h_0	h_1
1	45	100	140	70	11	12Х18Н12	100	140	70
2	40Х	120	300	80	12	30	120	300	80
3	20	150	350	100	13	30ХГС	150	350	100
4	30ХГС	100	150	80	14	30	100	150	80
5	45	120	250	70	15	40Х	120	250	70
6	40Х	130	200	100	16	20	130	200	100
7	20	110	210	80	17	12Х18Н12	110	210	80
8	30ХГС	120	250	120	18	30	120	250	120
9	45	90	80	90	19	40Х	130	180	90

10	40Х	100	150	80	20	12Х18Н12	100	150	80

2. СВАРКА

2.1. Общая характеристика способа

Сварка является наиболее важным способом получения неразъемных соединений из различных материалов, свариваются металлы и сплавы, керамика, стекло, пластмассы, разнородные материалы. Сварка применяется во всех областях техники.

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений в результате возникновения атомно-молекулярных связей между соединяемыми деталями.

Сварные соединения можно получать двумя принципиально разными путями: сваркой плавлением и сваркой давлением.

Сварка плавлением обычно возможна только в тех случаях, когдасвариваемые металлы образуют при расплавлении единую сварочную ванну, т.е. растворяются друг в друге в жидком состоянии. Поэтому она применяется длясварки однородных металлов.

При *сварке давлением*обязательным является совместная пластическая деформация деталей сжатием зоны соединения. Этим обеспечивается очистка свариваемых поверхностей от пленок загрязнений, изменение их рельефа и образование атомно-молекулярных связей. Пластической деформации обычно предшествует нагрев, так как с ростом температуры уменьшается значение деформации, необходимой для сварки и повышается пластичность металла.

Нагрев свариваемых деталей осуществляется разными способами: электрической дугой, газокислородным пламенем, пропусканием тока, лазером и т.д. По-разному обеспечиваются защита зоны сварки от воздействия воздуха и ее принудительная деформация.

При дуговой сварке источником теплоты является электрическая дуга, которая горит между электродом и заготовкой.Сварочной дугой называется мощный электрический разряд между электродами, находящимися в среде ионизированных газов и паров.

В зависимости от материала и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие разновидности дуговой сварки (рис.2.1):

• сварка неплавящимся (графитовым или вольфрамовым) электродом *1* дугой прямого действия *2* (рис. 2.1, *а*), при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла *3*, либо с применением присадочного металла *4;*

• сварка плавящимся электродом (металлическим) *1* дугой прямого действия с одновременным расплавлением основного металла и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом (рис. 2.1, *б*);

• сварка косвенной дугой *5*, горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами, при этом основной металл нагревается и расплавляется теплотой столба дуги (рис. 2.1, *в*);

• сварка трехфазной дугой, при которой дуга горит между каждым электродом и основным металлом (рис. 2.1, *г*).

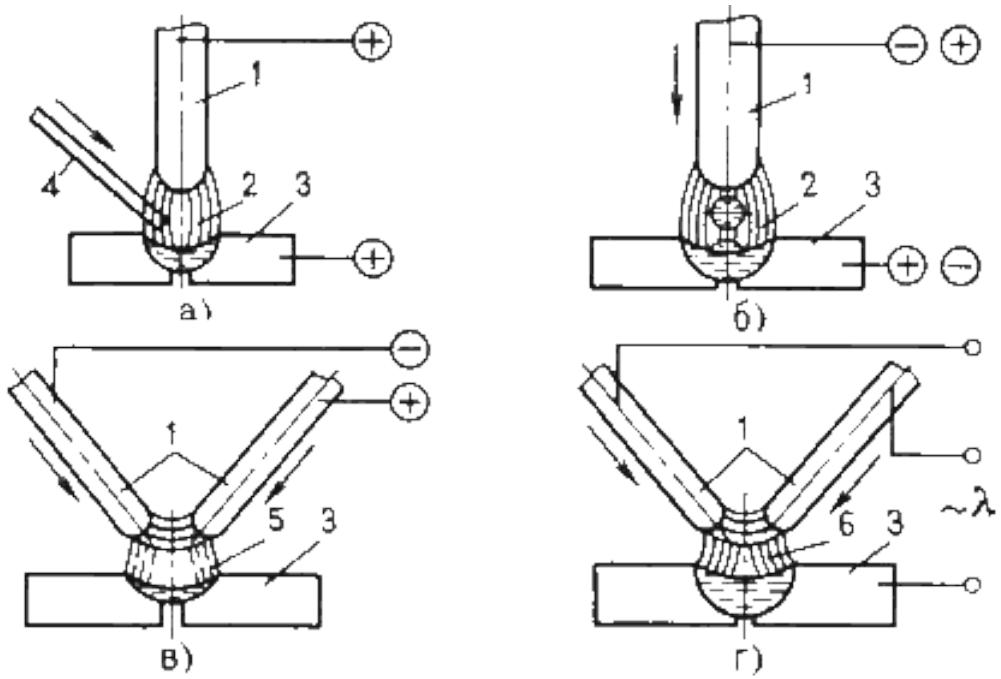


Рис. 2.1. Схемы дуговой сварки

Разновидности дуговой сварки различают по способу защиты дуги и расплавленного металла и степени механизации процесса.

Ручную дуговую сварку (РДС)выполняют сварочными электродами, которые подают вручную в дугу и перемещают вдоль заготовки. В процессе сварки металлическим покрытым электродом дуга горит между стержнем электрода и основным металлом.

Ручная сварка позволяет выполнять швы в любых пространственных положениях: нижнем, вертикальном, горизонтальном, вертикальном, потолочном. Ручная сварка удобна при выполнении корот-

ких криволинейных швов в любых пространственных положениях, при выполнении швов в труднодоступных местах, а также при монтажных работах и сборке конструкций сложной формы.

Электроды для РДС представляют собой проволочные стержни с нанесенным покрытием. Стержень электрода изготовляют из специальной сварочной проволоки из стали повышенного качества-ГОСТ2246-70 предусматривает 56 марок стальной сварочной проволоки диаметром 0,3 – 12 мм. Все марки сварочной проволоки разделяют на 3 группы: углеродистую, легированную и высоколегированную.

По назначению стальные электроды по ГОСТ 9466-75 подразделяют на 4 класса:

- для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей (ГОСТ 9467-75);
- для сварки теплоустойчивых сталей (ГОСТ 9467-75);
- для сварки высоколегированных сталей (ГОСТ 10052-75);
- для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами (ГОСТ 1051-75).

Внутри каждого класса электроды делятся на типы (всего 73 типа). В маркировке указывается тип электродов, начинающийся с буквы Э, затем следуют цифры, которые указывают минимальный гарантированный предел прочности в кг/мм^2. Например, Э42 ($\sigma_в \approx$ 420 МПа), Э50 ($\sigma_в$ = 500 МПа). Буква А в обозначении указывает, что металл шва, наплавленный этим электродом, имеет повышенные пластические свойства. Такие электроды применяют при сварке наиболее ответственных швов.

Для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей предусмотрено девять типов электродов (Э38, Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А, Э55, Э60); для сварки легированных и конструкционных сталей повышенной и высокой прочности пять типов (Э70, Э85, Э100, Э125, Э150) (табл. 5).

Условное обозначение электродов для сварки конструкционных сталей состоит из обозначения марки электрода, типа электрода, диаметра стержня, типа покрытия, номера ГОСТа.

Пример:УОНИ– 13/45 – Э42А – 4,0 – Ф ГОСТ 9467-75.

Расшифровка:

УОНИ – 13/45 – марка электрода;Э42А –тип электрода (Э – электрод для дуговой сварки;42 – минимальный гарантированный предел прочности металла шва в кгс/мм^2; А – гарантируется получе-

ние повышенных пластических свойств металла шва); 4,0 – диаметр электродного стержня в мм;Ф– фтористокальциевый тип покрытия.

Марка электрода (УОНИ – 13/45, АН-1, АНО-1, 03С-6 и др.) характеризует также его технологические свойства: род и полярность тока, возможность сварки в различных пространственных положениях (оговорены в ГОСТе и справочной литературе по сварке).

Основными преимуществами сварных соединений являются: экономия металла; снижение трудоемкости изготовления корпусных деталей; возможность изготовления конструкций сложной формы из отдельных деталей, полученных ковкой, прокаткой, штамповкой.

Сварным конструкциям присущи и некоторые недостатки: появление остаточных напряжений; коробление в процессе сварки; плохое восприятие знакопеременных напряжений, особенно вибраций; сложность и трудоемкость контроля.Дефекты швов являются следствием неправильного выбора или нарушения режима сварки.Виды внешних и внутренних дефектов сварных швов устанавливают методами дефектоскопии.

2.2. Методические указания

Следует ознакомиться с классификацией способов сварки, их краткой характеристикой и особенностями применения в машиностроении, отметив преимущества сварки по сравнению с другими способами изготовления и ремонта деталей.

Обратить внимание на виды дефектов сварки и пайки,причины их возникновения и методы предупреждения.

Вопросы для самопроверки:

1. Опишите физические основы получения сварного соединения.
2. Приведите классификацию методов сварки. Опишите их преимущества и недостатки.
3. Что называется свариваемостью металлов?
4. Какие типы сварных соединений Вы знаете?
5. Изложите различные способы электродуговой сварки.
6. Какие виды автоматизированных процессов сварки Вы знаете?
7. В чем сущность способа автоматической сварки? Начертите ее технологическую схему.
8. Опишите процесс электрошлаковой сварки.
9. Опишите принципиальную схему аргоно-дуговой сварки и ее преимущества перед другими способами сварки в среде защитных газов.

10. В чем состоит сущность газовой сварки?

11. Изложите сущность электродуговой резки металлов. Какое при этом применяется оборудование и каковы принципы его работы?

12. Расскажите о газовой резке металлов и областях ее применения.

13. Приведите примеры контроля качества сварных швов.

14. Опишите технологию контактной роликовой сварки стальных листов.

15. Опишите технологию дуговой сварки под слоем флюса труб большого диаметра изстали 18ХГТ в условиях серийного производства.

16. Начертите схему контактной роликовой (шовной) сварки. Опишите, в чем состоят еедостоинства и недостатки.

17. Изобразите схему контактной точечной сварки. Опишите области ее применения.

18. В чем заключаются физические основы холодной сварки и сварки трением. Области ихприменения.

19. Изложите способы сварки ультразвуком и взрывом, диффузионной сварки в вакууме, газопрессовой сварки.

20. Расскажите о структурных превращениях стали в зоне термического влияния.

21. Каковы особенности сварки и контроля углеродистых и низколегированных сталей?

22. Каковы особенности сварки чугунных отливок?

23. Расскажите о способах сварки Cu, Al и их сплавов.

24. Опишите технологию сварки емкостей из стали 14XI7T толщиной 8 мм. В чем состоитособенность сварки высокохромистых сталей?

25. Какие физические явления сопутствуют пайке металлов? Какие применяются припои икаков их состав?

26. В чем состоят различия в технологии пайки мягкими и твердыми припоями?

27. Приведите примеры дефектов сварных швов и способы их контроля.

28. Опишите методы устранения дефектов сварки и пайки.

2.1. Ручная сварка покрытыми электродами

Краткиетеоретическиесведения

Основной задачей при проведении процесса сварки является разработка режима сварки. Режим дуговой сварки – совокупность факторов, обеспечивающих получение сварочного шва хорошего качества и заданных размеров. К таким факторам относятся род и полярность**сварочного**тока, его величина, тип и марка электрода, его диаметр, напряжение на дуге, положение шва в пространстве, скорость**сварки**.

Род**сварочного**тока – постоянный или переменный – и его полярность зависит от марки и толщинысвариваемогометалла.Эти данные,а также типы и марки электродовприводятся в справочных таблицах.

Диаметр электрода в зависимости от толщинысвариваемыхдеталей можно выбрать по табл. 4.

Присваркемногослойных швов первый шов сваривают электродом диаметром не более 4 мм, а при диаметре электрода большем этого может быть непровар корня шва.

Диаметр электрода присваркевертикальных швов не более 5 мм, потолочных – не более 4 мм независимо от толщинысвариваемогометалла. Привыборедиаметра электрода длясваркиугловых и тавровых соединений принимается во внимание катет шва. Диаметр электрода при катете шва – 3...5-3...4 мм, при катете 6...8-4...5 мм.

Величинасварочноготока в зависимости от диаметра электрода печатается на упаковке электродов.

Длясваркив нижнем положении величинусварочноготока можно определить по формуле:

$$I_{св} = (40...60)\, d,$$

где $I_{св}$ – величина**сварочного**тока, А; 40...60 – коэффициент, зависящий от типа и диаметра электрода; d – диаметр электрода, мм.

При сварке конструкционных сталей:

- для электродов диаметром 3...6 мм величина**сварочного**тока:$\boldsymbol{I_{св} = (20 + 6d)\, d}$**;**
- для электродов диаметром менее 3 мм:$\boldsymbol{I_{св} = 30d}$.

Величина**сварочного**тока зависит как от диаметра электрода, так и от длины его рабочей части, состава покрытия, его положения в пространстве**сварки**.

Интервал изменения $I_{св}$ = 150 ... 400 А, напряжение U = 16 ... 30 В.

Дляпластинстолщинойh<10ммсварнойшоввыполняетсяоднослойным,приh>10мм–многослойным,т.е.заполнениесварныхшвовбольшойтолщиныпроизводитсязанесколькопроходовэлектрода.Чтобыобеспечитькачествошванавсютолщинусвариваемыхизделий,производитсяразделкакромоксвариваемыхповерхностей.Присваркепластинтолщинойhменее6ммразделкакромокнепроизводится,приh>6ммвыполняетсяразделкаподугломв30°.

Ручнаясваркаприменяетсядлякоротких-
швов,криволинейных,любыхпространственных,втруднодоступныхме
стахпримонтажеисборкесложныхконструк-
ций.Токипроизводительностьнаплавкиограничены,таккакприбольшо
мтокестерженьэлектроданагреваетсяипокрытиеотслаивается.Плотнос
тьтоканаходитсявпределах10...20А/мм^2.

Учитываязаданнуюмаркусталиивременноесопротивлениеразрыв
а ста-
ли(табл.1),выберитетипэлектрода(табл.5).Еслисварноесоединениедол
жноработатьприударныхнагруз-
ках,выбирайтеэлектродсповышеннымипластическимисвойствами.

Однимизосновныхпараметровврежимаручнойдуговойсваркиявля
етсядиаметрэлектрода$d_э$(мм).Длястыковыхсоединенийдиаметрэлектр
одавыбираютвзависимостиоттолщинысвариваемыхкромок(табл.4).

Втабл.7представленынаиболеечастоприменяемыеэлектроды.

Каждомутипуэлектродасоответствуетнесколькомарок.Втабл.7ук
азаныдиаметрыикоэффициентынаплавкиэлектродов.Коэффициентнап
лавкиоцениваетмассуэлектродногометал-
ла,перешедшуювсварнойшоввтечениечасагорениядуги,отнесеннуюко
дномуамперусварочногото-
ка.Учитывая,чтопроизводительностьсваркипрямопропорциональнако
эффициентунаплав-
ки,атипэлектродаиегодиаметружевыбран,подберитемаркуэлектродаиз
табл.7.

Длинадуги$L_д$(мм)значительновлияетнакачествосварки.Короткая
дугагоритустойчивоиспокой-
но.Онаобеспечиваетполучениевысококачественногошва,таккакраспла
вленныйметаллэлектродабыстропроходитдуговойпромежутокименьш
еподвергаетсяокислениюиазотирова-
нию.Нослишкомкороткаядугавызывает“примерзание”электрода,дуга
прерывает-
ся,нарушаетсяпроцесссварки.Длиннаядугагоритнеустойчивоихаракт
ернымшипени-
ем.Глубинапроплавлениянедостаточная,расплавленныйметаллэлектр
одаразбрызгиваетсяибольшеокисляетсяиазотируется.Шовполучаетсяб
есформен-
ным,аметаллшвасодержитбольшоеколичествооксидов.Длинудугимож
ноопределитьпоформуле

$$L_д=0,5(d_э+2), \qquad (2.2)$$

где$d_э$–диаметрэлектрода(мм).

Самоеширокоепримененинашладугасжесткойхарактеристикой, когданапряжение$U_д$(В)практическинезависитотсилытокаипропорциональноеёдлине$L_д$.Такаядугагоритустойчивоиобеспечиваетнормальныйпроцесссварки.

$$U_д=a+pL_д,(2.3)$$

где$L_д$–длинадуги(мм),a(В) – коэффициент,характеризующийпадениенапряжениянаэлектродах(прииспользовании стальных электродов a=10-12В),p(В/мм) – коэффициентхарактеризующийпадениенапряжениянa1ммдлиныдуги(p=2,0-2,5В/мм).

Количество металла, необходимого для создания сварного шва $Q_н$ (г)

$$Q_н=10^{-3}lS\gamma,(2.4)$$

гдеl–длинасвариваемогошва(мм),S–площадьпоперечногосеченияшва(мм^2),γ–плотностьэлектродногометалла(длясталиγ=7,8г/см^3).ДляодностороннегостыковогошвабезскосакромокплощадьпоперечногосеченияS:

$$S=bh,(2.5)$$

гдеh–толщинасвариваемогометалла(мм),b–зазор(расстояние)междусвариваемымидеталями(мм).

ДляодностороннегошвасV-образнымскосомдвухкромокплощадьпоперечногосеченияS:

$$S=h(b–1)+0,5(h^2+1),(2.6)$$

гдеhиbуказанныевышеконструкционныеэлементысварногошва.

Величинузазорамеждусвариваемымидеталямиберёмизтабл.3.

Основноевремягорениядуги$t_о$(ч)составляет

$$t_о=Q_н/(I_{св}\cdot\alpha_н),(2.7)$$

где$Q_н$–массанаплавленногометалла(г),$I_{св}$–силасварочноготока(А),$\alpha_н$–коэффициентнаплавки(г/А-ч),(табл.7).

Скоростьсварки$V_{св}$(м/ч)

$$V_{св}=10^{-3}l/t_о,(2.8)$$

гдеl–длинасварногошва(мм),$t_о$–основноевремягорениядуги(ч).

Процесссваркивключаетнетольковремягорениядуги,новспомогательныеопера-ции(установкуэлектрода,поворотдеталиит.д.).Этодополнительноевремязависитоторганизациирабочегоме-ста,квалификациисварщикаиучитываетсякоэффициентомпроизводительностиM.

Полноевремясварки$t_п$(ч)определяемаяпоформуле

$$t_п = t_о / M, \quad (2.9)$$

где$t_о$–основноевремягорениядуги(ч),M–коэффициентпроизводительности,(M=0,6–0,8).

Массурасплавленногометалла$Q_р$(г)можноопределить,подчитавмассурасплавленныхэлектродов

$$Q_р = 10^{-3}\gamma\pi d^2(l_э - l_{ог})\, n/4, \quad (2.10)$$

гдеγ–плотностьэлектродногометалла,$d_э$диаметрэлектрода(мм),$l_э$–длинаэлектрода(мм)(табл.4),$l_{ог}$–длинаогарка(мм),(принимают$l_{ог}$=50мм),n–числоэлектродов.Расходэлектродов(кг)на1кгнаплавленногометалла–1,6-1,7.

Взаключении,определяютполныйрасходэлектроэнергиинасваркуА(кВт·ч)

$$A = I_{св} U_д t_о, \quad (2.11)$$

где$I_{св}$–силасварочноготока(А),$U_д$–напряжениедуги(В),$t_о$–основноевремягорениядуги(ч).

Для расчета основных параметров режима электродуговой сварки воспользоваться табл.2*.

Задача С.1

Разработать технологический процесс ручной дуговой сварки плавящимся электродом с покрытием в нижнем положении со стыковым соединением свариваемых элементов.

В табл. 1 приведены исходные данные для выполнения задания № 1.

Таблица 2.1

Исходные данные для выполнения задания С.1

№ варианта	Марка стали	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_в$, МПа	Толщина свариваемой стали, Н, мм	Длина шва l, мм
0	09Г2СД	450	11,0	460
1	10Г2С1*	500	1,5	400
2	08ГДН*	400	2,0	300
3	15Г	420	2,5	650
4	20	420	3,0	260
5	15*	400	3,5	230
6	Ст3	400	4,0	200

7	14ХГС	500	4,5	180
8	08ГДНФ	500	5,0	150
9	09Г2С*	500	5,5	260
10	12Г2СМФ	700	6,0	240
11	14ГХНМ	700	6,5	200
12	15Х	700	7,0	190
13	16ГС*	500	7,5	340
14	12ГН2МФАЮ	850	8,0	260
15	14Х2ГМР	800	8,5	375
16	20Х	800	9,0	330
17	12ХГН2МФБАЮ	900	9,5	300
18	18ХГТ	1000	10,0	270
19	16Г2АФ	600	10,5	500
20	15Г2СФ	560	11,0	460
21	16Г2АФД	580	11,5	440
22	09Г2*	450	12,0	400
23	20Г	460	12,5	373
24	10ХСНД	540	13,0	347
25	17Г1С	520	13,5	330
226	Ст4	440	14,0	280
27	10Г2*	450	14,5	325
28	25*	460	15,0	310
29	14Г2	460	15,5	290
30	10Г2С1Д	520	16,0	280

* Сварное соединение работает при ударных нагрузках

Задача С.2

Для изготовления из листа толщиной h (мм) цилиндрической обечайки диаметром D (мм) и длиной L (мм) разработать режим ручной дуговой сварки, определить расход электродов.

Варианты исходных данных для задачи С.2

№ вар	Марка стали	h	D	L	№ вар.	Марка стали	h	D	L
1	Ст3	6	500	1000	11	10	8	700	2000
2	10	7	700	1500	12	20	9	800	2100
3	20	8	800	1600	13	Ст3	6	650	2000
4	Ст3	9	900	2000	14	10	7	650	2200
5	10	6	550	1500	15	20	8	850	2500
6	20	7	600	2000	16	Ст3	9	1000	2500
7	Ст3	8	750	2200	17	10	6	700	1700

8	10	9	950	2500	18	20	7	550	1600
9	20	6	600	1900	19	Ст3	8	900	2000
10	Ст3	7	500	1200	20	10	9	1100	2300

Задача С.3

Для изготовления из листа толщиной *h* (мм) конического днища для обечайки диаметром *D* (мм) с углом конуса α (град) разработать режим ручной дуговой сварки, определить расход электродов.

Варианты исходных данных для задачи С.3

№ вар.	Марка стали	*h*	*D*	α	№ вар.	Марка стали	*h*	*D*	α
1	10	6	500	45	11	20	6	550	80
2	20	7	700	50	12	Ст3	7	650	75
3	Ст3	8	800	55	13	10	8	750	70
4	10	9	900	60	14	20	9	850	65
5	20	6	1000	70	15	Ст3	6	950	60
6	Ст3	7	1200	75	16	10	7	1100	55
7	10	8	800	80	17	20	8	650	50
8	20	9	900	85	18	Ст3	9	750	45
9	С3	6	700	0	19	10	6	50	80
10	10	7	600	85	20	20	7	950	85

Задача С.4

Для изготовления из листа толщиной *h* (мм) конического перехода длиной *L* (мм) между трубопроводами *D* (мм), *d* (мм) разработать режим ручной дуговой сварки, определить расход электродов.

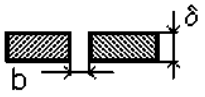
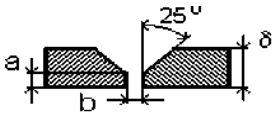
Варианты исходных данных для задачи С.4

№ вар.	Марка стали	*h*	*L*	*D*	*d*	№ вар.	Марка стали	*h*	*L*	*D*	*d*
1	20	6	100	203	127	11	Ст3	6	250	299	159
2	Ст3	7	200	219	133	12	10	7	350	325	168
3	10	8	300	245	140	13	20	8	300	203	140
4	20	9	350	273	146	14	Ст3	9	200	219	146
5	Ст3	6	250	294	152	15	10	6	100	245	152
6	10	7	150	325	159	16	20	7	150	273	159

7	20	8	300	203	133	17	Ст3	8	250	299	168
8	Ст3	9	200	219	140	18	10	9	350	325	180
9	10	6	100	245	146	19	20	6	300	203	146
10	20	7	150	273	152	20	Ст3	7	200	219	152

Таблица 3

Тип сварного шва

Наименование соединения	Условное обозначение	Форма подготовки кромок	Толщина металла h, мм	Зазор b, мм	Выполнение шва
Шов стыковой односторонний без скоса кромок	С2		1,5–2,5 3,0–4,0	1 2	
Шов стыковой односторонний с V-образным скосом двух кромок	С17		4,5–7,5 8,0–13,5 14,0–16,0	3 4 5	

a – притупление кромок, a = 1 мм

Таблица 4

Диаметр электрода

Толщина свариваемого металла h, мм	1,5–2,0	2,5–4,0	4,5–7,0	7,5–10,0	Более 10,0
Диаметр электрода $d_э$, мм	2	3	4	5	6
Коэффициент пропорциональности k, А/мм	30	35	40	45	50
Длина электрода $l_э$, мм	250	300	350	450	450

Таблица 2.5

Тип электрода

Тип электрода	Механические свойства металла сварного шва		
	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_в$,	Относительное удлинение ε,	Ударная вязкость KCU, МДж/м^2

	МПа	%	
Э38	380	14	0,3
Э42	420	18	0,8
Э42А	420	22	1,5
Э46	460	18	0,8
Э46А	460	22	1,4
Э50	500	16	0,7
Э50А	500	20	1,3
Э55	550	20	1,2
Э60	600	18	1,0
Э70	700	14	0,6
Э85	850	12	0,5
Э100	1000	10	0,5
Э125	1250	8	0,4
Э150	1500	6	0,4

Таблица 2.7

Марка электрода

Тип электрода	Марка электрода	Диаметр электрода $d_э$, мм	Коэффициент наплавки $\alpha_н$, г/А·ч
Э42	ОЗС-23	2; 3	8,5
	ВСЦ-4	3; 4	9,5
	ОМА-2	2; 2,5; 3	8
	АНО-6	4; 5	10
Э42А	УОНИ-13/45	2; 2,5; 3; 4; 5	8,5
	СМ-11	3; 4; 5	10
Э46	АНО-4	3; 4; 5	8,5
	ОЗС-6	3; 4; 5; 6	10
	МР-3	3; 4; 5; 6	7,5
	ОЗС-21	3; 4; 5	8,5
Э46А	ВН-48	2,5; 3; 4; 5; 6	11
	ОЗС-22Р	3; 4; 5; 6	10
	УОНИ-13/55К	3; 4; 5	9,5
Э50	ВСЦ-4А	3; 4	9,5
Э50А	УОНИ-13/55	2; 2,5; 3; 4; 5	9
	АНО-11	3; 4; 5	9,5
	ДК-50	4; 5	10
Э55	УОНИ-13/55У	4; 5; 6	10
Э60	ВСЦ-60	5; 6	10
	УОНИ-13/65	2; 2,5; 3; 4; 5	9,5
	ОЗС-24	3; 4	9,5

Э70	ВСФ-75У	4	9
Э85	УОНИ-13/85	2; 2,5; 3; 4; 5	10
	НИАТ-3М	2; 2,5; 3; 4; 5	9,5
	ВСФ-85	3; 4	9,5
Э100	ОЗШ-1	2; 2,5; 3; 4; 5	8,5

Таблица 2*

Расчет основных параметров режима электродуговой сварки

№	Определяемая величина	Буквенное обозначение, ед. измерения	Расчетная формула или источник информации	Численная величина
1	Тип сварного шва	С...	табл. 3	С 17
2	Тип электрода	Э...	табл. 5	Э 46
3	Диаметр электрода	$d_э$, мм	табл. 4	6
4	Марка электрода		табл. 7	ОЗС-6
5	Коэффициент пропорциональности	К, А/мм	табл. 4	50
6	Сила сварочного тока	$I_{св}$, А	$I_{св} = Kd_э$	300
7	Длина дуги	$L_д$, мм	$L_д = 0{,}5(d_э + 2)$	4
8	Напряжение дуги	$U_д$, В	$U_д = \alpha + \beta L_д$	18
9	Площадь поперечного сечения	S, мм^2	$S = b \cdot h$	
			$S = 8(h - 1) + 0{,}5(h_2 + 1)$	94
10	Масса наплавленного металла	$Q_н$, г	$Q_н = 10\text{-}3lS\gamma$	337,27
11	Коэффициент наплавки	$\alpha_н$, г/А·ч	табл. 7	10
12	Основное время горения дуги	$t_о$, ч	$t_о = Q_н / I_{св}\,\alpha_н$	0,11
13	Скорость сварки	$V_{св}$, м/ч	$V_{св} = 10\text{-}3l/t_о$	4,09
14	Полное время сварки	$T_п$, ч	$T_п = t_о/M$	0,22
15	Длина электрода	$l_э$, мм	табл. 4	450
16	Число слоев	n	табл. 6	4
17	Масса расплавленного металла	$Q_р$, г	$Q_р = 10\text{-}3\gamma\pi d_э^2(l_э - l_{ог})n/4$	352,68
18	Коэффициент потерь	ψ, %	$\psi = 10^2(Q_р - Q_н)/Q_р$	4,4
19	Расход электроэнергии на сварку	А, кВт-ч	$А = I_{св}U_д t_о$	594
20	Зазор (расстояние) между свариваемыми деталям	В, мм	табл. 3	

21	Длина сварного шва	l , мм	табл. 1	

$\alpha = 10$, $\beta = 2$; $\gamma = 7{,}8$ г/см^3; $l_{ог} = 50$ мм; $M = 0{,}5$

3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

3.1. Общая характеристика способа

Обработка резанием – технологический процесс изготовления деталей, заключающийся в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Для осуществления процесса резания необходимо относительное движение между заготовкой и режущим инструментом. Совокупность относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданной поверхности, называют кинематической схемой обработки. Движения резания – это движения, обеспечивающие снятие слоя металла со всей обрабатываемой поверхности.

Примеры схем обработки различных поверхностей (рис. 3.1).

На обрабатываемой заготовке различают три поверхности: обработанную (3), полученную на заготовке в результате обработки; обрабатываемую (*1*), подлежащую обработке, и поверхность резания (*2*), образуемую режущей кромкой инструмента (рис. 1, *а – г*).

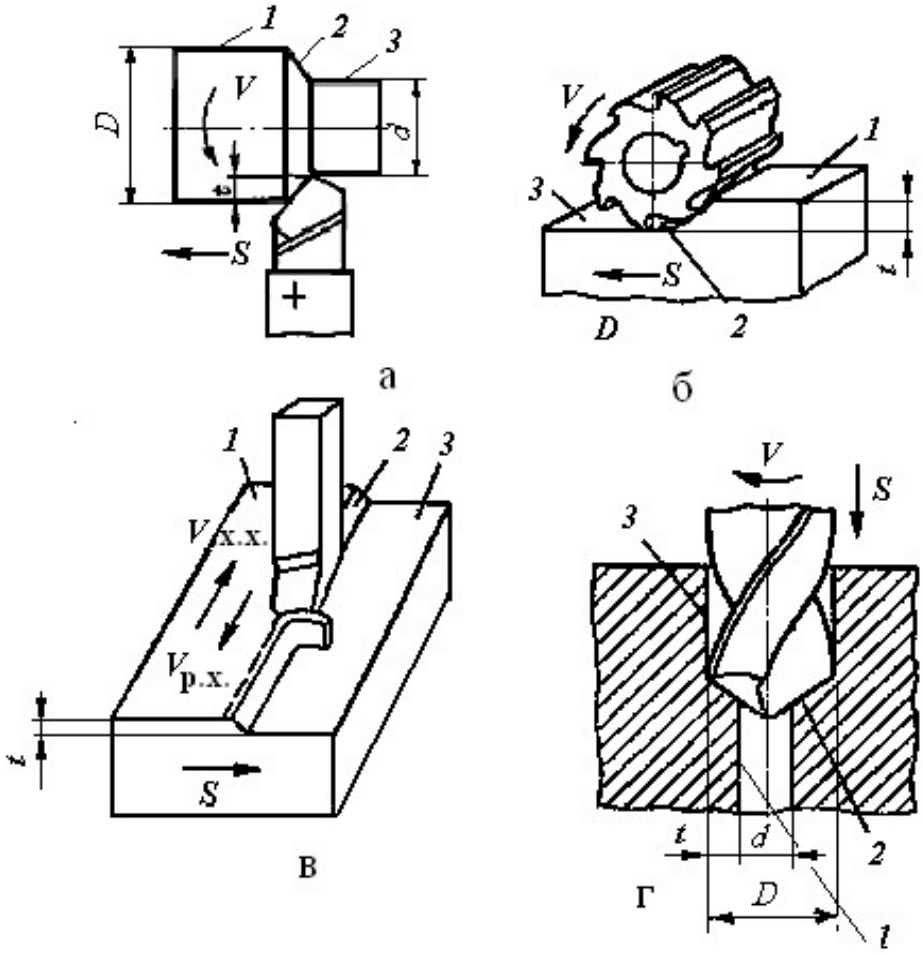


Рис. 3.1 Схемы обработки заготовок:
а) точением. *б*) фрезерованием, *в*) строганием,
г) сверлением (рассверливанием)

Процесс обработки задаётся **режимом резания**. Элементами режима резания являются **скорость резания, подача и глубина резания**. Совокупность этих значений принято называть **режимом резания**. Режим резания выбирается в следующей последовательности:

- глубина резания – *t*,
- подача – *S*,
- скорость резания – *V*.

Глубина резания – определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное по нормали. Глубина резания измеряется в мм (рис. 1.1).

$t = (D - d)/2$ (*а* и *г* – при точении и рассверливании);

$t = d/2$(при сверлении); $t = H - h$ (*б* и *в*)при фрезеровании и строгании)

Глубина резания зависит от следующих факторов:

– величины припуска *а* (слой металла, подлежащий удалению в процессе обработки),

– вида обработки (черновая или чистовая),

– мощности станка.

Глубина резания может быть равна припуску $t = a$, или $t = a / i$, если припуск снимается за несколько проходов (i – количество ходов, за которое снимется весь припуск при данной глубине резания).

***Подача* (*S*)** – это перемещение заготовки или инструмента в направлении движения подачи за цикл движения резания.

При точении и сверлении подача задается в миллиметрах за 1 оборот (мм/об), при фрезеровании подача может быть задана в миллиметрах на зуб (мм/зуб), в миллиметрах в минуту (мм/мин), при строгании – в миллиметрах за двойной ход стола (мм / дв. х).

Величина подачи зависит от требований к обработанной поверхности: шероховатости и точности поверхности – чем выше точность и чистота обработки, тем меньше величина подачи.

Скорость резания* (*V*)** – скорость перемещения точки режущей кромки инструмента относительно заготовки. Скорость резания измеряют в метрах в минуту ***при всех видах обработки резанием, кроме шлифования и полирования (метры в секунду).

Если главное движение резания является вращательным, то скорость резания определяется по формуле

$$V = \pi D n /1000,$$

где D – диаметр заготовки или инструмента, мм; n – частота вращения заготовки или инструмента, об/мин.

При возвратно-поступательном движении скорость резания определяется по формуле

$$V = 2L n (k + 1) /1000,$$

где L – длина хода инструмента или детали при обработке данной поверхности, мм;

n – число двойных ходов в минуту ($n = 500 \cdot V / L \cdot (k + 1)$);

k– коэффициент отношения скорости рабочего хода к скорости холостого хода ($k = V_{рх}/V_{хх}$).

К элементам процесса резания относится также основное технологическое время $T_о$, затрачиваемое непосредственно на обработку резанием данной поверхности (изменение формы и размеров заготовки).

Основное время определяется по формуле:

$$T_о = L \cdot i / S \cdot n,$$

где $L = l + l_1 + l_2$,

l – длина обрабатываемой поверхности,

l_1 – величина врезания инструмента,
l_2 – величина перебега инструмента.

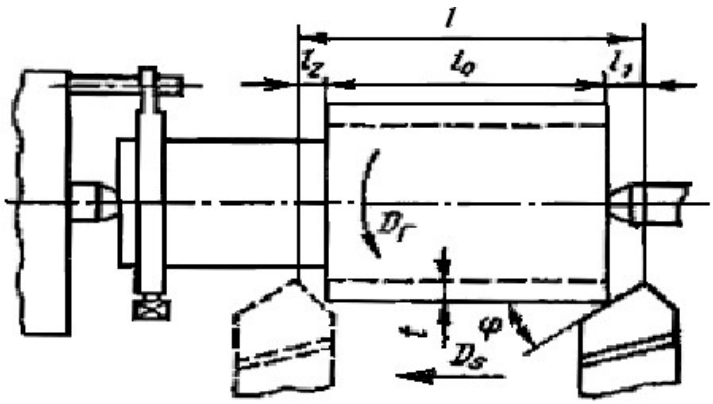


Рис. 1.2. Схема к расчётуT_o при обработке цилиндрической поверхности

3.2. Методические указания

Обработка металлов резанием связана с превращением в стружку значительного количества металлов. Это привело к тому, что обработка резанием в некоторой степени потеснена малоотходными технологиями (точное литье, обработка давлением и др.). Однако обработка резанием остается главным средством изготовления высокоточных деталей в машиностроении с заданной точностью и чистотой поверхности.Резание металлов представляет собой сложный процесс, включающий ряд взаимодействующих явлений, к которым относится: упругое и пластическое деформирование, интенсивное трение, выделение тепла, образование нароста, явление наклепа, износ инструмента, усадка стружки.

При изучении этой темы следует обратить внимание на физико-химические процессы, происходящие при резании, и их роль в формировании поверхностного слоя обрабатываемой детали. Необходимо разбираться в видах режущих инструментов и способах их эффективного использования.

Необходимо ознакомиться с современным состоянием развития теории и технологии обработки материалов резанием, классификацией поверхностей и методов их обработки, требованиями к технологичности деталей, обрабатываемых резанием, кинематикой процесса резания, классификацией движений и геометрией срезаемого слоя.

Следует запомнить определение, обозначения и размерности элементов режима резания, элементы резца и его углы.

Изучите силы, действующие на резец, влияние различных показателей на скорость резания, а также скоростное и силовое резание как резерв повышения производительности труда.

При изучении материалов, из которых изготовляются резцы, следует обратить внимание на марки быстродействующих и твердых сплавов, особенно на минералокерамические сплавы, имеющие высокую износостойкость и дешевые в изготовлении.

Высокие требования, предъявляемые к технико-эксплуатационным характеристикам современных машин, обеспечиваются высокой точностьюразмеров и другими показателями качества деталей этих машин. Поэтому роль металлорежущих станков для высококачественной обработки деталей в машиностроении не уменьшается.

Современные станки – это сложные разнообразные механизмы, использующие различные методы осуществления движений и управления рабочим циклом, обеспечивающие обработку деталей любой конфигурации и различных размеров.

При изучении темы следует обратить внимание на движения инструмента и детали при обработке на различных станках. Необходимо разбираться в технологических возможностях станков разных видов.

Следует изучить принятую в России классификацию металлорежущих станков, подробно рассмотреть приводы и передачи станков различных групп. Для чтения кинематических схем станков нужно знать условные обозначения различных узлов в соответствии с ГОСТами.

Необходимо рассмотреть основные виды токарных, сверлильных, расточных, строгальных, долбежных, протяжных, фрезерных, шлифовальных работ, применяемые инструменты, а также технологические требования, предъявляемые к деталям, обрабатываемым на различных станках.

Все металлорежущие станки разделяют на группы по характеру выполняемых работ и виду применяемых инструментов. Подробно рассмотрите принятую в России классификацию и уясните единую систему условного обозначения станков, понимаемую как нумерация. Затем подробно рассмотрите технологии обработки резанием, выполняемые на разных металлорежущих станках.

Обработка на токарных станках. С использованием рисунков рассмотрите основные узлы токарно-винторезного станка и поймите, почему токарные станки часто называют универсальными. Проанализируйте типы станков токарной группы.

Обработка на сверлильных и расточных станках. Поймите, что понимают под обработкой круглых отверстий на станках сверлильной группы.

Обработка на фрезерных станках. Уясните, что такое фрезерование и какие типы фрез для этого используют.

Обработка на строгальных, долбежных и протяжных станках. С учетом видов обработки поверхностей строганием выделите особенности этой группы станков. Изучите типаж инструментов, используемых для этих целей. Составьте схему работ на станках этой группы.

Обработка на шлифовальных и отделочных станках. Изучите процесс шлифования и инструмент, используемый для этих целей. Обратите внимание, что шлифование также относится к операциям резания и разберите с чем это связано. Рассмотрите методы шлифования и типы шлифовальных станков. Для всех рассмотренных технологийрезания изучите возможные виды работ.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего используют станки токарной группы?
2. Почему токарные станки часто называют универсальными?
3. Что понимают под зенкованием и развертыванием крупных отверстий.
4. Какие основные типы фрез существуют?
5. В чем особенности строгальных станков?
6. Что понимают под процессом шлифования?
7. Что понимают под абразивным инструментом?
8. Для каких целей используют в механообработке роботы и манипуляторы?

Токарная обработка

Задача. На токарно-винторезном станке производится наружное продольное точение заготовки D=68 мм до d=62 мм (рис. 2). Длина обрабатываемой поверхности l=280мм, длина заготовки L= 430 мм. Шероховатость обработанной поверхности Ra=25 мкм. Заготовка -

поковка стальная 40Х с пределом прочности 700 МПа. Способ крепления заготовки - в центрах. Обработка ведется с охлаждением.

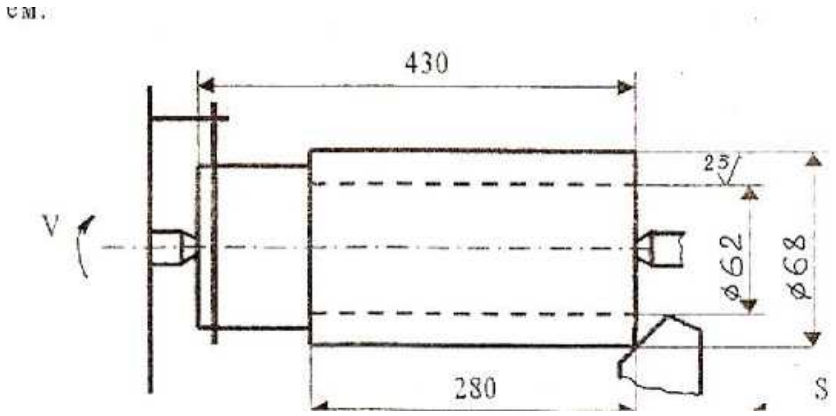


Рис. 2. Схема обработки

Необходимо:
Выбрать токарный станок;
Выбрать режущий инструмент;
Выполнить эскиз резца;
Назначить режимы резания;
Определить машинное время.

Решение

Исходя из условий задачи (размеров заготовки, характера обработки), выбираем токарно-винторезный станок модели 16К20, имеющий следующие технические характеристики: мощность двигателя $N_{дв}$=10 КВт, к.п.д.=0,75, высота центров =215 мм, расстояние между центрами 2000 мм.

Материал режущей части инструмента выбираем исходя из физико-механических свойств обрабатываемого материала и характера обработки (Приложение таблица 1). При черновом обтачивании конструкционной стали марки 40Х с глубиной резания t= 3 мм на средних станках рекомендован твердый сплав марки Т15К6 (WC-79%, TiC-15%, Co-6%) либо быстрорежущая сталь марки Р6М5 (W-6%, Mo-5%, C-1%). Так как в последнее время большее предпочтение отдано инструменту из твердого сплава, выбираем материал пластинки Т15К6. Державка резца изготавливается из качественной конструкционной стали группы 1 марки 45 ($\sigma_в$=610 МПа, НВ= 197).

При выборе значений геометрических параметров резца следует учитывать материал заготовки, вид обработки, материал режущей

части инструмента, сечение державки и жесткость системы СПИД (Приложение таблицы 2, 3). Выбираем форму передней поверхности резца - радиусную с фаской. Фаску с отрицательным передним углом делают для упрочнения режущей кромки резца с пластинками из твердого сплава. Радиусная лунка обеспечивает завивание сходящей стружки. Геометрические параметры режущей части (рис. 3): передний угол γ=10° (при черновой обработки конструкционных материалов с НВ<240), задний угол α =6° (при черновой обработке), угол наклона главной режущей кромки λ =0 (точение без ударных нагрузок), углы в плане φ =45°, φ' =15° (при жесткой системе СПИД), угол фаски$\gamma_ф$=-5°, ширина фаски *f*=0,8 мм.

Используя выбранные данные геометрических параметров режущей части резца, выполним эскиз токарного проходного резца с пластинкой из твердого сплава марки Т15К6, сечение державки 16 × 25 мм.

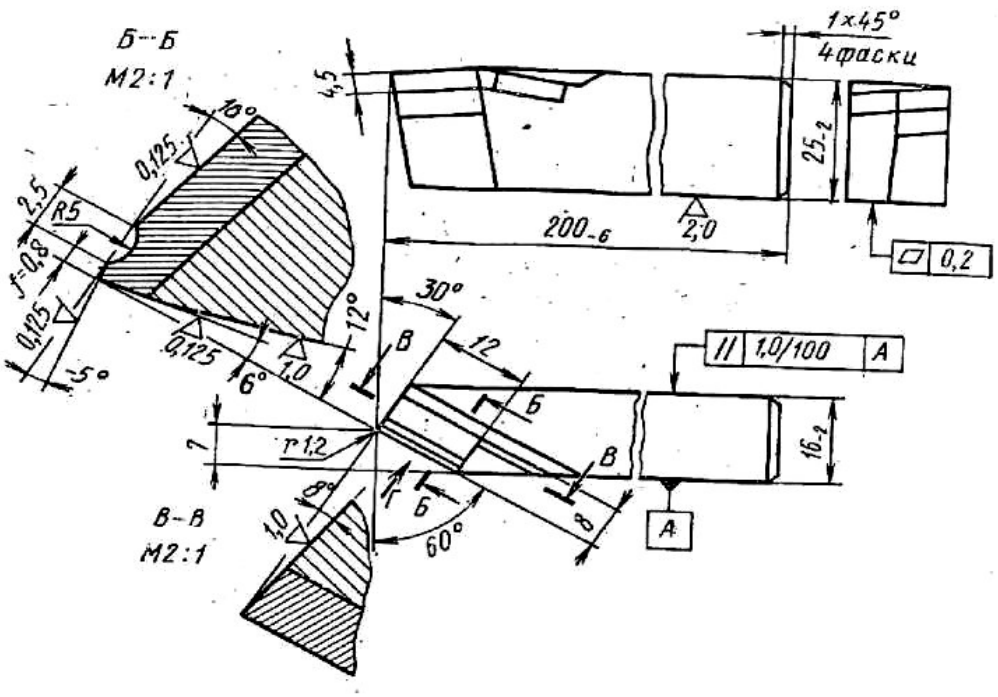


Рис. 3. Эскиз резца

Назначаем режимы резания.

Глубину резания определяем по формуле

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{68 - 62}{2} = 3 \text{ (мм)}$$

Т. к. при черновой обработке за один проход инструмента можно снять *t*=5-7 мм, то данная обработка будет проходить за один про-

ход. Причем шероховатость обработанной поверхности Ra=25 мкм будет обеспечена.

Подачу назначаем по таблице 4 (Приложения). Для обработки заготовки из конструкционной стали, диаметром до 100 мм, глубинной резания t=3мм, сечением державки 16×25 мм - подача $S_{таб}$=1,2 мм/об.

Данную подачу корректируем по паспорту станка 16К20, выбрав ближайшее меньшее значение:

$$S_ф = 1 \text{ мм/об.}$$

Период стойкости определим по таблице 9 (Приложения):

$$T = 30 \text{ мин.}$$

Скорость резания при наружном точении определяем по формуле

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{340}{30^{0,2} 3^{0,15} 1^{0,45}} 0,97 = 142 \text{ (м/мин).}$$

$K_V = 1,07 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 0,94 = 0,97$, где

$K_{MV} = \frac{750}{700} = 1,07$, $K_{ПV} = 1$, $K_{ИV} = 1$, $K_{φV} = 1$, $K_{φW} = 0,97$, $K_г = 0,94$.

(Приложение таблицы 11,12,15,16 согласно заданным условиям). Определяем частоту вращения шпинделя, соответствующую найденной скорости резания, по формуле (3)

$$n_р = \frac{1000 V_р}{\pi D} = \frac{100 \cdot 142}{3,14 \cdot 68} = 665 \text{ (об/мин).}$$

Корректируем частоту вращения шпинделя по паспорту станка 16К20,выбрав фактическое значение частоты вращения из ближайшего меньшего.

$$n_ф = 500 \text{ об/мин.}$$

Определяем действительную скорость резания по формуле (5)

$$V_д = \frac{\pi D n_ф}{1000} = \frac{3,14 \cdot 68 \cdot 500}{1000} = 107 \text{(м/мин).}$$

Определяем мощность, затраченную на резание, по формуле (6) и силу резания по

$$P_z = C_{PZ} \cdot t^{Y} \cdot S_Ф \cdot V_Д \cdot K_{PZ}, \quad (5)$$

Из таблицы 16 (Приложения) выписываем коэффициенты и показатели степеней для данных условий обработки. C_{PZ}=300, x=1, y=0,75, n=0,15.

Учитываем поправочный коэффициент на силу резания K_{PZ}, представляющий собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания.

$$K_{PZ} = K_{MPZ} K_{\varphi} K_{\gamma} K_{\lambda} K_{r} = 0{,}94 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0{,}94$$

Численные значения этих коэффициентов выбираем в таблице 15, 16 (Приложения):

$K_{MPZ} = \left(\frac{700}{750}\right)^{0,75} = 0{,}94$, K_{φ} = 1, при $\varphi = 45^{o}$; K_{γ} = 1 при = 10^{o}; K_{λ} = 1 при $\lambda = 0^{o}$;

K_r на силу резания при заданных условиях обработки не влияет.

$$P_Z = C_{PZ} \cdot t^{X} \cdot Sj \cdot V_{Д} \cdot K_{PZ} = 300 \cdot 3^{1} \cdot 1^{0,75} - 107^{-0,15} \cdot 0{,}94 = 419(\text{Н}).$$

$$N_e = \frac{P_z \cdot V_{д}}{60 \cdot 1020} = 7{,}1 \ \text{кВт}.$$

Проверяем достаточность мощности привода станка по условию:

$$N_e < N_{CT}$$

На станке 16К20 N_{CT}=10 · 0,75 = 7,5 кВт.

7,1<7,5, т.е. обработка возможна.

• Определяем основное технологическое время по формуле

$$L = I + y + \Delta = 280+3+2=285 \ (\text{мм}),$$

где длина обрабатываемой поверхности l=280 мм, величина врезания $y = t \cdot \text{ctg}\varphi = 3 \cdot \text{ctg}45^{0} = 3 \cdot 1 = 3(\text{мм})$, величину перебега принимаем Δ=2 мм.

Тогда

$$t_0 = \frac{Li}{n_{ф} S_{ф}} = \frac{285 \cdot 1}{500 \cdot 1} = 0{,}57 \ (\text{мин}).$$

Задача Р.1.

Определить минутную подачу резца $\boldsymbol{S_м}$ (мм/мин) при обтачивании на токарном станке заготовки диаметром $\boldsymbol{D}$ (мм) со скоростью резания $\boldsymbol{v}$(м/мин) и подачей резца за один оборот заготовки$\boldsymbol{S}$(мм/об)**.**

Варианты исходных данных к задаче Р.1

№	*D*	*V*	*S*	№	*D*	*V*	*S*
1	140	88	0,6	11	387	233	0,6
2	37	233	0,43	12	90	177	0,43
3	90	177	0,87	13	120	119	0,87
4	120	119	0,7	14	72	280	0,7
5	72	280	0,78	15	64	200	0,78
6	64	200	0,17	16	160	80	0,17
7	160	80	0,18	17	54	170	0,18
8	54	170	0,3	18	43	216	0,3
9	43	216	0,23	19	210	133	0,23
10	210	133	0,52	20	140	88	0,52

Задача Р.2.

Определить основное время $\boldsymbol{T_0}$при подрезании сплошного торца заготовки диаметром $\boldsymbol{D_0}$(мм) на токарном станке за один проход. Припуск на обработку (на сторону) $\boldsymbol{h}$(мм)**.** Частота вращения шпинделя $\boldsymbol{n}$(об/мин)**;** подача резца $\boldsymbol{S}$(мм/об)**.** Резец проходной отогнутый с главным углом в плане $\boldsymbol{\varphi}$**=** 45°**.** Перебег резца $\boldsymbol{\Delta}$**=** 1…3 мм**.** Начертить схему обработки поверхности.

Варианты исходных данных к задаче Р.2

№	*D*	*h*	*n*	*S*	№	*D*	*h*	*n*	*S*
1	140	2,5	1000	0,32	11	300	2	1250	0,32
2	37	3	800	0,43	12	90	3	800	0,43
3	90	2	2000	0,24	13	120	1	2000	0,87
4	120	3	315	0,12	14	72	2	315	0,7
5	72	1,5	800	0,28	15	64	2	800	0,78
6	64	3	500	0,17	16	160	3,5	500	0,17
7	160	2	1250	0,18	17	54	1,5	1250	0,18
8	54	3	400	0,3	18	43	2	400	0,3
9	43	2	630	0,23	19	210	1,8	630	0,23
10	210	1,5	1250	0,52	20	140	2,3	1250	0,52

Задача Р.3.

Определить основное время T_0при отрезании кольца от заготовки, имеющей форму трубы с наружным диаметромD(мм) и внутренним – d(мм), на токарном станке резцом с пластиной из твердого сплава**.** Частота вращения шпинделя n(об/мин)**;** подача резца S(мм/об)**.** Перебег резца Δ**=** 1…2 мм**.** Начертить схему обработки поверхности.

Варианты исходных данных к задаче Р.3

№	*D*	*h*	*n*	*S*	№	*D*	*h*	*n*	*S*
1	140	80	1000	0,32	11	300	120	1250	0,32
2	70	35	800	0,43	12	90	30	800	0,43
3	90	40	2000	0,24	13	120	60	2000	0,87
4	120	65	315	0,12	14	72	34	315	0,7
5	72	36	800	0,28	15	64	24	800	0,78
6	64	20	500	0,17	16	160	70	500	0,17
7	160	80	1250	0,18	17	54	20	1250	0,18
8	54	25	400	0,3	18	43	10	400	0,3
9	43	20	630	0,23	19	210	120	630	0,23
10	210	100	1250	0,52	20	140	100	1250	0,52

Задача Р.4.

Определить мощность $N_{рез}$, затрачиваемую на резание и моментсопротивления резанию $M_{ср}$, если при продольном точении заготовкидиаметромD(мм) со скоростью резания V(м/мин) тангенциальнаясила резания составила P_z(Н). Начертите схему расположения составляющих силы резания для рассматриваемого случая обработки резанием.

Варианты исходных данных к задаче Р.4

№	*D*	*V*	P_z	№	*D*	*V*	P_z
1	140	75	2750	11	380	75	2750
2	160	130	2200	12	90	170	2200
3	90	170	3000	13	120	119	3000
4	120	110	1050	14	72	120	1050
5	75	180	2050	15	64	200	2050
6	64	100	3000	16	160	80	3000
7	160	80	4000	17	54	170	4000
8	80	170	1600	18	43	160	1600
9	30	150	1500	19	210	133	1500

10	210	130	1000	20	140	88	1000

Для решения предлагаемых задач по резанию металлов и режущему инструменту следует пользоваться справочными таблицами [5-9] и справочными материалами Приложения В, а также источниками [1;4].

5. Литейное производство

5.1. Общая характеристика способа

Литьё - получение изделий путем заливки жидкого металла в формы и егопоследующего затвердевания.

Теоретически, литьем можно получить сколь угодно сложное по форме изделие. На практике, литьё, как и все методы формообразования, имеет существенные ограничения.

Они связаны:

- с трудностями изготовления формы для заливки жидкого металла;

- с невозможностью заполнения жидким металлом сколь угодно тонкого

рельефа; это технологическое свойство металла, называемое

"жидкотекучестью", связано с вязкостью жидкого металла, его поверхностным натяжением, смачиваемостью материала формы жидким металлом и рядом других факторов;

- с усадкой металла при застывании, которая определяется разностью объемов, занимаемых жидким и затвердевшим металлом и изменением его объема (размеров) при охлаждении до комнатной температуры. Усадка, а особенно неравномерное охлаждение отливки в форме, приводит к ее короблению, возникновению внутренних напряжений, а, иногда, даже к разрушению.

Однако литьё позволяет получать самые сложные по форме изделия, в том числе и произведения искусства…

Литьё - древнейший технологический процесс. В средние века литьем изготавливали колокола для церквей, пушки, монументы и т.д.

5.2. Методические указания

Литейное производство - отрасль машиностроения, использующаяся для изготовления фасонных заготовок или деталей путем заливки расплавленного металла в специальную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки (детали).

При изучении этой темы необходимо рассмотреть такие явления как жидкотекучесть, усадка, трещинообразование, газовые раковины и пористость отливок.

Затем необходимо разобраться в технологических процессах получения отливок различными способами: в песчано-глинистых формах, в оболочковых формах, по выплавляемым моделям, в металлических формах (кокилях), центробежным литьем под давлением, специализированными способами.

Студент должен последовательно рассмотреть литье в металлические формы (кокиль), центробежное литье, точное литье по выплавляемым моделям, литье в оболочковые формы.

Далее необходимо рассмотреть технологические этапы получения отливки, то есть сборку и заливку литейных форм, охлаждение отливок, их выбивку и очистку.

Затем следует ознакомиться с особенностями изготовления отливок из различных сплавов.

Изучить оборудование, применяемое в литейных цехах для плавки и проведения других технологических операций.

Особое внимание следует обратить на основные виды дефектов отливок, отметив влияние нарушений технологического процесса и нетехнологичности конструкций отливок на появление различных видов брака литья. Рекомендуется ознакомиться с современными методами и аппаратурой, применяемой для контроля всех стадий процесса изготовления отливок и используемых материалов. Следует четко уяснить, какие дефекты можно подвергнуть исправлению, и какие отливки являются окончательным браком.

Вопросы для самопроверки:

1. Что понимается под жидкотекучестью литейных сплавов? Как проводят испытания на жидкотекучесть сплавов?
2. Что такое усадка литейных сплавов? Опишите способы предупреждения усадочныхраковин и пористости отливок.
3. В результате, каких явлений образуются трещины в отливках? Как бороться с этим видом брака?

4. Какие применяются меры для уменьшения возможности образования газовых раковин и пористости отливок?

5. Какие формовочные и стержневые смеси используют в литейном производстве? Их характеристики и методы испытания.

6. Дайте описание схемы работы литейного конвейера. Рассмотрите вопросы механизации и автоматизации изготовления литейных форм.

7. Машины для получения отливок под давлением, схема их устройства и принцип действия. Области применения отливок, изготовленных способом литья под давлением.

8. Перечислите свойства серого чугуна как литейного и конструкционного материала.

Укажите, для каких целей применяются в машиностроении чугунные отливки? Приведите химические составы нескольких марок серого и модифицированного чугунов с указанием их механических свойств.

9. Изложите способы получения ковкого чугуна: виды ковкого чугуна, в чем особенности изготовления литейных форм для получения ковкого чугуна?

10. Опишите технологию изготовления отливок из алюминиевых сплавов.

11. Опишите технологию изготовления отливок из магниевых сплавов.

12. Опишите технологию отливок из медных сплавов.

13. Назовите виды дефектов при получении отливок и способы их устранения. Как, с применением какой аппаратуры и на каких стадиях изготовления производится контроль отливок?

6. Основы металлургического производства

6.1. Общая характеристика способа

Металлы и их сплавы в настоящее время являются основным материалом для производства машин, приборов и других технических устройств.

Это определяется сочетанием их свойств, которым в данное время не обладают другие конструкционные материалы.

К таким свойствам относятся:

- механические: прочность, твердость, пластичность, ударная вязкость ...

- теплофизические: жаропрочность, теплопроводность, низкий коэффициент линейного расширения...

- химические: устойчивость в агрессивных средах, биологическая инертность

- технологические: свариваемость, литейные свойства (жидкотекучесть, степень усадки при затвердевании, склонность к ликвации элементов), пластичность...

Современное металлургическое производство представляет собой комплекс различных производств, базирующихся на месторождениях руд и коксующихся углей, энергетических комплексах. Оно включает:

– шахты и карьеры по добыче руд и каменных углей;

– горно-обогатительные комбинаты, где обогащают руды, подготавливая их к плавке;

– коксохимические заводы (подготовка углей, их коксование и извлечение из них полезных химических продуктов);

– энергетические цехи для получения сжатого воздуха (для дутья доменных печей), кислорода, очистки металлургических газов;

– доменные цехи для выплавки чугуна и ферросплавов или цехи для производства железорудных металлизованных окатышей;

– заводы для производства ферросплавов;

– сталеплавильные цехи (конвертерные, мартеновские, электросталеплавильные);

– прокатные цехи (слиток в сортовой прокат).

Основная продукция чёрной металлургии:

– чугуны: передельный, используемый для передела на сталь, и литейный, для производства фасонных отливок;

– железорудные металлизованные окатыши для выплавки стали;

– ферросплавы (сплавы железа с повышенным содержанием марганца, кремния, ванадия, титана и т.д.) для легированных сталей;

– стальные слитки для производства проката,

– стальные слитки для изготовления крупных кованных валов, дисков (кузнечные слитки).

Основная продукция цветной металлургии:

– слитки цветных металлов для производства проката;

– слитки для изготовления отливок на машиностроительных заводах;

– лигатуры – сплавы цветных металлов с легирующими элементами для производства сложных легированных сплавов;

– слитки чистых и особо чистых металлов для приборостроения и электротехники.

6.2. Методические указания

Получение чугуна в доменных печах относится к пирометаллургическому способу. Исходными материалами являются руды, флюсы и топливо. Изучите виды руд, флюсы и их назначение, топливо, используемое при производстве чугуна, принцип работы доменной печи и физико-химические процессы, протекающие при получении чугуна. Ознакомьтесь со способами прямого восстановления железа из руды, этапами этого процесса.

Ознакомьтесь с рудами для получения меди, алюминия, магния, титана; способами их обогащения. Изучите работу агрегатов для получения этих металлов, способы рафинирования.

Краткие теоретические сведения

Процессы получения стали из чугуна и скрапа сводятся к снижению примесей и углерода путем окислительных процессов с сталеплавильных печах. Ознакомьтесь с принципом работы современных конвертеров, мартеновских и электродуговых печей. Изучите физико-химические процессы, протекающие в печах. Изучите способы разливки стали и ознакомьтесь с технико-экономическими показателями различных способов получения стали.

Восстановление металла проводится несколькими способами.

Термохимическое восстановление металла осуществляется воздействием на соединение металла каким-либовосстановителем при высокой температуре.Термохимическим способом восстанавливают многие металлы.

Например, железо обычно содержится в руде в виде окислов Fe_2O_3 или Fe_3O_4 и восстанавливается угарным газом (CO), образующимся при горении кокса (продукта переработки каменного угля) в доменных печах. В зонах 4-6 происходит горение кокса в потоке воздуха поступающего через фурмы и образуется угарный газ при тем-

пературе 1600-1750°С, который, воздействуя на окислы железа, приводит к их восстановлению:

$$Fe_2O_3 + CO \text{ --- } Fe_3O_4 + CO_2 + Q$$
$$Fe_2O_3 + CO_2 \text{ --- } FeO + CO_2 - Q$$
$$FeO + CO \text{ --- } Fe + CO_2 + Q$$

Образующееся железо, в виде капель, стекает в горн, откуда периодически выпускается. Сверху печи также периодически происходит подсыпка шихты (смеси руды, кокса и флюсов). Таким образом горение в печи поддерживается непрерывно в течении длительного времени, от 5 до 10 лет.

В образующемся железе при высокой температуре растворяется углерод кокса, что приводит к получению сплава железа с углеродом, при содержании последнего выше 2% (но не более 6,67%). Такой сплав весьма тверд и хрупок и называется чугуном.

Суточная производительность доменной печи достигает 2500 тонн чугуна.Хотя чугун, как конструкционный материал, применяется для отливкизаготовок различных деталей машин (станины, корпуса двигателей, зубчатые колеса и т.д.) , но большая его часть перерабатывается в сталь – сплав железа с углеродом при содержании углерода менее 2%.

Понизить содержание углерода в чугуне и, тем самым, превратить его всталь можно окисляя избыточный углерод в жидком чугуне. Для этогопримeняются конвертерный и мартеновский методы получения стали.

Плавку медных руд ведут в пламенных печах, в которых происходит восстановление меди, но из-за высокого содержания в руде соединений железа и серы образуется "медный штейн", в котором содержится 20-50% меди, 20-40% железа и 22-25% серы.

Полученный штейн перерабатывается в черновую медь в конвертерах. Продувая через жидкий штейн воздух, проводят окисление железа, которое всплывает на поверхности в виде окислов, сера выгорает с образованием огромного количества окиси серы, используемой как сырьё для производства серной кислоты.

В результате процесса получают черновую медь (98,5-99,5 % Cu), которую можно использовать для производства медных сплавов, но которая не пригодна для электротехнической промышленности (для производства проводов).

Конвертерный способ получения сталисостоит в окислении избыточного углерода продувкой через жидкий чугун кислорода.

При этом, естественно, сгорает и некоторая часть железа. Реакция является экзотермической, поэтому в жидкий чугун можно добавить некоторую часть металлического лома, который при продувке кислородом расплавляется.

Процесс протекает довольно быстро (менее 20мин).Производительность процесса зависит от объема конвертера (от 3 до250тонн).

При таком производстве стали химический состав ее зависит от содержания примесей в руде. Невозможно получить высококачественные легированные стали и переработка стального лома возможна только в ограниченных количествах, в то время как в промышленности накапливается его огромная масса.

Мартеновский способ получения стализаключается в плавке шихты за счет горения топлива, в качестве которого используютсягорючие газы, мазут, угольная пыль.При этом возможно производить контроль состава, вводить легирующие элементы.

В зависимости от вида процесса, в печь загружаются:

- жидкий чугун + руда - "рудный процесс".
- твердый чугун + металлический лом - "скраппроцесс"
- жидкий чугун+ металлический лом + руда -"скрапрудный процесс".

Вопросы для самопроверки:

1. В чем заключается сущность производства стали из чугуна? Какие существуют разновидности процессов получения стали?
2. Поясните сущность современных способов повышения качества стали: вакууммированием при разливке, электрошлаковым и вакуумно-дуговым методами переплавки и укажите области применения каждого из них.
3. Охарактеризуйте продукты доменного производства и укажите область применения каждого из них.
4. Опишите существующие способы разливки стали. Чем отличается спокойная сталь от кипящей? Опишите процесс кристаллизации спокойной стали в изложнице.
5. Опишите способы разливки стали. Укажите преимущества и недостатки каждого способа.

Задача №8.1.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,0% C, 2,3% Si, 0,9% Mn. Выплавка производится вагранoчным способом из чушко-

вого чугуна ЛК1, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компоненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара Si и Mn при выплавке.

Задача №8.2.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,2% C, 2,4% Si, 1,1% Mn. Выплавка производится вагранoчным способом из чушкового чугуна ЛК2, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компоненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара Si и Mn при выплавке.

Задача №8.3.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,0% C, 2,3% Si, 1,5% Mn. Выплавка производится вагранoчным способом из чушкового чугуна ЛК3, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компоненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара *Si* и Mn при выплавке.

Задача №8.4.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,0% C, 2,3% Si, 0,9% Mn. Выплавка производится вагранoчным способом из чушкового чугуна ЛК4, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компоненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара Si и Mn при выплавке.

Задача №8.5.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,2% C, 2,1% Si, 1,2% Mn. Выплавка производится вагранoчным способом из чушкового чугуна ЛК5, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компо-

ненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара Si и Mn при выплавке.

Задача №8.6.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,1% C, 2,2% Si, 1,1% Mn. Выплавка производится ваграночным способом из чушкового чугуна ЛК6, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компоненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара Si и Mn при выплавке.

Задача №8.7.

Рассчитать шихту для выплавки чугуна состава 3,0% C, 2,3% Si, 0,9% Mn. Выплавка производится ваграночным способом из чушкового чугуна ЛК7, возврата собственного производства и стального лома. Масса металлической завалки 200 кг. Неметаллические компоненты шихты: кокс – 10%, флюсы – 3% металлической завалки. Расчет произвести с учетом угара Si и Mn при выплавке.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Материал режущей части резца

материал режущей части – пластины из ТС, РК, СТМ					
условие эксплуатации			материал пластины		
обработка	припуск	глубина резания, мм	рекомендуемы й для усредненных условий	повышенной износостойкости	повышенной прочности
обтачивание и подрезание					
1. конструкционные, подшипниковые и инструментальные стали (НВ 110-130)					
1.1 мелкие и средние станки					
черно-вая	непрерывный	св. 1,5 до 3	т15к6,мс111	вок- 60,в3, тн20,кнт 16, вп1195	т14к8, вп1255
		св. 3 до 7	Т14К8,МС2210, ВП1255	Т15К6,КНТ16,МС111	Т5К10,МС1460
		св. 7 до 15	Т5К10,МС2215, ВП1255	Т5К12,	МС146
	Прерывистый	св. 1,5 до 3	Т14К8,МС2210, ВП1255	Т15К6,МС111, ВП1195	Т5К10,МС1460
		св. 3 до 7	Т5К10,МС1460	Т14К8,МС2210	Т5К12,МС146
		св. 7 до 15	Т5К12,МС146	Т5К10,МС1460	ТТ7К12

Чистовая	Непрерывный	До 1	ВО-13,ВШ-75	Композит1 0	Т30К4,ТН20
		св. 1 до 3	Т30К4,	ВОК-71	ТН20,ТТ5К6
1.2 Крупные и тяжелые станки					
Черновая	Непрерывный	св. 3 до 7	Т14К8, МС2215	Т15К6,МС111	Т5К10,МС1465
		св. 7 до 15	Т5К10,МС1460	Т14К8,МС2215	Т5К12,МС146
		св. 15 до 45	Т5К10	-	ТТ7К12,Т5К12
Черновая	Прерывитый	св. 3 до 7	Т5К10, МС131	Т15К6, МС2215	МС1465,МС1460
		св. 7 до 15	Т5К10, МС131	Т14К8,ВП5510	Т5К12, МС146

		св. 15 до 45	Т5К12	Т5К10	ТТ7К12
Чисто вая	Непрерывный	до 2	ВОК-60, В3	Композит1 0	Т30К4,Т15К6
		св. 2 до 7	Т30К4	ВОК-60	Т15К6
2. Коррозийно-стойкая сталь					
2.1 Мелкие и средние станки					
Черно вая и чисто вая	Непрерывный	св. 1,5 до 3	ВК6-М	ВК10-ОМ, ВК3,ТТ18 К6, Т15К6	ВК10- ОМ,ТТ10К8-Б
		св. 3 до 7	ВК10-ОМ, ТТ10К8-Б	ВК6- М,ТТ18К6	ВК10-ХОМ
		св. 7 до 15	ВК10-ХОМ	ВК10-ОМ,ТТ10К 8-Б	ВК15- ХОМ,ВК8
Черновая и чистова я	Прерывистый	св. 1,5 до 3	ВК10- ОМ,ТТ10К8-Б	ВК6-М	ВК10-ХОМ
		св. 3 до 7	ВК10-ХОМ	ВК10-ОМ,ТТ10К 8-Б	ВК15- ХОМ,ВК8
2.2 Крупные и тяжелые станки					
Черновая и чистовая	Непрерывный	св. 3 до 7	ВК10- ОМ,ТТ10К8-Б	ВК6-М, ВК6-ОМ	ВК10-ХОМ
		св. 7 до 15	ВК10-ХОМ	ВК10-ОМ, ТТ10К8-Б	ВК15-ХОМ
		св. 15 до 30	ВК15- ХОМ,ВК8	ВК10- ХОМ	-
	Прерывистый	св. 3 до 7	ВК10-ХОМ	ВК10-ОМ, ТТ10К8-Б	ВК15- ХОМ,ВК8
		св. 7 до 15	ВК15-ХОМ. ВК8	ВК10- ХОМ	-
		св. 15 до 30	ВК15-ХОМ, ВК8	ВК10- ХОМ	-

Таблица №2

Геометрические параметры режущей части резца

Операция	Обрабатываемый материал		Обработка	Припуск	α	γ	γФ	Параметры лезвия при H, мм			
								16:20	25:32	40:50	63:80
	группа	твердость						r=f0, мм			
Резцы из твердого сплава											
Об та чи ва ние и по дре за ние	Констр укцио нная сталь	НВ<240	Чер-новая	непрер	6	10	-5	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,8	1,8-2,4
				Пре рыв	5	-6	-	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,8	1,8-2,4
			Чис-товая	Непре рыв.	8	15	-5	0,6-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
		НВ<240 -330	Чер новая	Непре рыв.	6	8	-5	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,8	1,8-2,4
				Пре рыв	5	-8	-	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,8	1,8-2,4
			Чис товая	Непре рыв.	8	10	-	0,6-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
	Коррозийностойк ая сталь		Чер новая	Непре рыв.	6	15	-3	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
			Чис товая	Непре рыв.	8	20	-3	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2
	Чугун, медные сплавы высокой твердости		Чер новая	Непре рыв. Преры в.	6	8	-5	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
			Чис товая	Непре рыв.	8	10	-	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,6
	Медные сплавы низкой твердости и алюминий		Чер новая	Непре рыв. и пре рыв.	6	15	-	0,8-1,0	1,0-1,2	1,0-1,2	1,6-2,0
			Чис товая	Непре рыв.	8	25	-	0,6-0,8	0,8-1,0	0,8-1,0	1,2-1,6
	Сталь закаленная и от-беленный чугун		Чис товая	Непре рыв.	12	- 10	-	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2
От ре за ние про	Констр укцио нная сталь	НВ<240	-	-	6	15	-5	0,4-0,6	0,6-0,8	1,2-1,6	1,0-1,2
		НВ<240 -330	-	-	8	10	-5	0,8-1,0	1,0-1,2	0,8-1,0	1,6-2,0

	Коррозийностойк	-	-	8	15	-3	0,4-	0,6-	1,0-	1,0-

ре за ние	ая сталь						0,6	0,8	1,2	
	Чугун, медные сплавы высокой твердости	-	-	6	8	-	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4
	Медные сплавы низкой твердости и алюминий	-	-	8	30	-	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4

Таблица 3

Геометрические параметры режущей части резца (углы в плане)

Типы резцов	Условия работы	Главный угол в плане, φ	Вспомогательный угол в плане, φ1
Резцы проходные	Жесткая система СПИД; L/D<6	10-30	5-10
	Средняя жесткая система СПИД; L/D=6-12	45-60	10-15
	Нежесткая система СПИД; L/D=12-15	75-90	15-20
Резцы подрезные (S поперечная)	-	30-70	25-45
Резцы отрезные, прорезные	-	80-90	1-3
Резцы расточные	Жесткая система СПИД	40-60	20-25
	Нежесткая система СПИД	60-75	20-25

Таблица 4

Подачи при черновом наружном точении резцами с пластинами из твердого сплава и быстрорежущей стали

Диаметр детали, мм	Размеры державки резца, мм	Обрабатываемый материал									
		Сталь конструкционная углеродистая, легированная и жаропрочня					Чугун и медные сплавы				
		Подача S мм/об, при глубине t мм									
		До 3	Св.3 до 5	Св.5 до 8	Св.8 до 12	Св.12	До.3	Св.3 до 5	Св.5 до 8	Св. 8 до	Св. 12
До 12	От16*25 до25*25	0,3-0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Св.20 до	От16*25	0,4-	-	-	-	-	0,4-	-	-	-	-

40	до25*25	0,5					0,5				
>40>60	От16*25 до25*25	0,5-0,9	0,4-0,8	0,3-0,7	-	-	0,6-0,9	0,5-0,8	0,4-0,7	-	-
>60 >100	От16*25 до25*25	0,6-1,2	0,5-1,1	0,5-0,9	0,4-0,8	-	0,8-1,4	0,7-1,2	0,6-1,0	0,5-0,9	-
>100 >400	От16*25 до25*25	0,8-1,3	0,7-1,2	0,6-1,0	0,5-0,9	-	1,0-1,5	0,8-1,9	0,8-1,1	0,6-0,9	-
>400 >500	От20*30 до40*60	1,1-1,4	1,0-1,3	0,7-1,2	0,6-1,2	0,4-1,1	1,3-1,6	1,2-1,5	1,0-1,2	0,7-0,9	-
>500 >600	От20*30 до40*60	1,2-1,5	1,0-1,4	0,8-1,3	0,6-1,3	0,1-1,2	1,5-1,8	1,2-1,6	1,0-1,4	0,9-1,2	0,8-1,0
>600 >1000	От25*40 до40*60	1,2-1,8	1,1-1,5	0,9-1,4	0,8-1,4	0,7-1,3	1,5-2,0	1,3-1,8	1,0-1,4	1,0-1,3	0,9-1,2
>1000 >2500	От30*40 до40*60	1,3-2,0	1,3-1,8	1,2-1,6	1,1-1,5	1,0-1,5	1,6-2,4	1,6-2,0	1,4-1,8	1,3-1,7	1,2-1,7

Примечание: 1. Нижнее значения подач соответствует меньшим размерам державки резца и более прочным обрабатываемым материалам, верхнее значение подач- большим размерам державки резца и менее прочным обрабатываемым материалам.

При обработке жаропрочных сталей и сплавов подачи свыше 1 мм/об не применять.

При обработке прерывистых поверхностей и при работах с ударными нагрузками табличные значения подач следует уменьшать на коэффициент 0,75- 0,85.

При обработке закаленных сталей табличные значения подач следует уменьшать на коэффициент 0,8 для стали HRC 44-56 и на коэффициент 0,5 для стали с HRC 57-62.

Таблица 5

Подачи при прорезании канавок и отрезании

Диаметр обработки, мм	Ширина резца, мм	Обрабатываемый материал	
		Сталь конструкционная углеродистая и легированная, стальное литье	Чугун, медные и алюминиевые сплавы
Токарные, токарно-револьверные станки			
До 20	3	0,06-0,08	0,11-0,14
Св.20до 40	3-4	0,1-1,12	0,16-0,19
Св.40до 60	4-5	1-0,13-0,16	0,20-0,24
Св.60до 100	5-8	0,16-0,23	0,24-0,32
Св.100до 150	6-10	0,18-0,26	0,3-0,4
Св.150	10-15	0,28-0,36	0,4-0,55
Карусельные станки			

До 2500	10-15	0,35-0,45	0,55-0,60
Св. 2500	16-20	0,45-0,60	0,60-0,70

Примечание: 1. При отрезании сплошного материала диаметром более 60 мм приближение резца к оси детали до 0,5 радиуса; табличные значения подач следует уменьшить на 40%-50%.
Для закаленной конструкционной стали. Табличные значения подач следует уменьшить на 30% при HRC< 50 и на 50% - при HRC>50.
При обработке резцами, установленными в револьверной головке, табличные значения следует умножать на коэффициент 0,8

Таблица 6 Подачи при обтачивании, подрезании и растачивании. Чистовая обработка

Форма пластины	Радиус при вершине r, мм	Подача S мм/об при требуемой шероховатости поверхности											
		Ra=12.5			Ra=6.3			Ra=3.2			Ra=1.6		
		Обрабатываемый материал											
		Конст. сталь	Корр. стойк. сталь	Чугун	Конст. сталь	Корр. стойк. сталь	Чугун	Конст. сталь	Корр. стойк. сталь	Чугун	Конст. сталь	Корр. стойк. сталь	Чугун
Многогранная	0,5	0,51	0,29	0,44	0,34	0,2	0,29	0,21	0,12	0,19	0,13	0,09	0,1
	0,8	0,60	0,34	0,52	0,39	0,24	0,34	0,24	0,14	0,22	0,15	0,11	0,1
	1,2	0,69	0,41	0,61	0,45	0,38	0,39	0,29	0,17	0,27	0,18	0,13	0,1
	1,6	0,77	0,46	0,58	0,50	0,32	0,44	0,31	0,19	0,29	0,1	0,14	0,1
	2,0	0,82	0,50	0,71	0,55	0,35	0,47	0,34	0,21	0,31	0,21	0,16	0,2
	2,5	0,90	0,55	0,77	0,59	0,38	0,51	0,37	0,23	0,34	0,23	0,17	0,2
Круглая	6,0	-	-	-	0,80	-	0,69	0,50	-	0,45	0,32	-	0,3
	9,5	-	-	-	0,91	-	0,81	0,57	-	0,53	0,37	-	0,3
	11	-	-	-	1,0	-	0,85	0,63	-	0,56	0,42	-	0,37

Поправочный коэффициент KS= KS1+ KS2+ KS3, на подачу для измененных

условий работы						
Вид обработки		Обтачивание		Подрезание	Растачивание	
KS1		1,0		0,9	0,8	
Налич ие СОЖ	БЕЗ сож	С использованием СОЖ	Материал пластины		БРС	ТС	РК
KS2	1,0	1,15	KS3		0,9	1,0	1,1

Таблица 7

Период стойкости резцов

Черновая обработка				Чистовая обработка			
Резцы токарные	Высота державки Н,мм	Пери од стой кости Т, мин для ТС	Пери од стой кости Т, мин для БРС	Резцы токарные	Высота дер-жавк и Н,мм	Период стой кости Т, мин для ТС	Пери-од стой-кос ти Т, мин для БРС
Проход ные	С20по40	30	30	Проход ные	С20по40	60	60
Подрез ные	С50по80	60	60	Подрез ные	С50по80	90	90
Расточ ные	С16по40	30	30	Расточ ные	С16по40	60	60
Отрезные	С16по40	30	30	-	-	-	-
Прорезные	С50по80	60	60	-	-	-	-

Таблица 8

Значение коэффициента CV и показателей степени в формуле скорости резания при обработке резцами

Вид обработки	Материал режущей части резца	Характеристи ка подачи S, мм/об	Коэффициент и показатели степени			
			CV	x	y	n
Конструкционная углеродистая сталь						
Наружное продольное точение проходными резцами	ТС	До 0,3	420	0,15	0,20	0,20
		Св.0,3 до0,7	350		0,35	
		Св.0,7	340		0,45	
То же, резцами с доп. лезвиями	ТС	S<t	292	0,30	0,15	0,18
		S>t		0,15	0,30	
Отрезание	ТС	-	47	-	0,80	0,18
	БРС	-	23,7	-	0,66	

Фасонное точение	БРС	-	22,7	-	0,50	0,3

						0
Нарезание крепежной резьбы	ТС	-	244	0,23	0,30	0,20
	БРС	Черновые ходы: P<2 мм	14,8	0,70	0,30	0,11
		P>2 мм	30	0,60	0,25	0,08
		Чистовые ходы	41,8	0,45	0,30	0,13
Серый чугун						
Наружное продольное точение проходными	ТС	S<0,40	292	0,15	0,20	0,20
		S>0,40	243		0,40	
То же, резцами с доп. лезвиями	ТС	S<t	324	0,40	0,20	0,28
		S>t		0,20	0,40	
Отрезание	ТС	-	68,5	-	0,40	0,20
Нарезание крепежной резьбы	ТС	-	83	0,45	-	0,33
Ковкий чугун						
Наружное продольное точение проходными	ТС	S<0,40	317	0,15	0,20	0,20
		S>0,40	215		0,45	
Отрезание	ТС	-	86	-	0,4	0,20

Таблица 9

Поправочные коэффициенты, учитывающие влияниегеометрических параметров резца на скорость резания

Главный угол в плане	Коэффициент $K_{\varphi V}$	Вспомогательный угол в плане φ_1^0	Коэффициент $K_{\varphi 1 V}$	Радиус при вершине	Коэффициент K_{rV}
20	1,4	1	1,0	1	0,9
30	1,2	1	0,97	2	1,0
45	1,0	2	0,94	3	1,0
60	0,9	3	0,91	5	1,3
75	0,8	4	0,87		
90	0,7	5			

Таблица 10

Поправочный коэффициент K_{MV}, учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на скорость резания

Обрабатываемый материал	Материал режущей части инструмента			
	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь		
	Расчетная формула			
Сталь конструкционная углеродистая и легированная, стальное литье	KMV=750/σB	nV K =Cm□ 750 □ —— MV □□ □□ □ □ B □		
Чугун серый	1, 25 KMV= □ 190 □¯¯	nV KMV= □ 190 □ ——		
Чугун ковкий	1, 25 KMV= □ 150 □¯¯	nV KMV= □ 190 □ ——		
Обрабатываемый материал	Коэффициент обрабатываемости Cm	Показатели степени nv		
		точение	сверление	фрезерование
Сталь: Углеродистая (C<0,6%)	1,0	1,75	0,9	0,9
Углеродистая (C>0,6%)	0,8	1,75	0,9	1,0
Автоматная	1,2	1,75	1,0	-
Никелевая	1,0	1,75	0,9	1,0
Хромистая	0,8	1,75	0,9	1,45
Хромоникелевая	0,9	1,50	0,9	1,35
Хромомолибденовая, хром	0,7	1,25	0,9	1,0
Алюминиевая и близкие к ним	0,7	1,25	0,9	1,0
Хромомарганцевая, хромкремневая близкие к ним	0,7	1,50	0,9	1,0
Инструментальная быстрорежущая	0,6	1,25	0,9	1,0
Чугун: Серый	-	1,70	1,3	0,95
Ковкий	-	1,70	1,3	0,85

Таблица 11

Поправочный коэффициент KMV, учитывающий влияние физико-механических свойств жаропрочных и коррозийно-стойких сталей и сплавов на скорость резания

Марки сталей и сплава	σВ, МПа	Усреднение значение коэф. KMV	Марки сталей и сплава	σВ, МПа	Усредненное значение коэф. KMV
12Х8Н9Т	550	1,0	ХН60ВТ	750	0,48
13Х11Н2В2М Ф	1100-1460	0,8-0,3	ХН77ТЮ	850-1000	0,40
14Х17Н2	800-1300	1,0-0,75	ХН35ВТ	-	0,26
13Х14Н3В2Ф Р	700-1200	0,5-0,4	ХН70ВМТЮ	950	0,50
17Х12Н8Г8М ФБ	-	0,95-0,72	ХН55ВМТК Ю	1000-1250	0,25
45Х14Н14В2 М	700	1,06	ХН65ВМТЮ	1000-1250	0,20
10Х11Н20Т3Р	720-800	0,85	ХН35ВТЮ	900-1000	0,22
12Х21Н5Т	820-10000	0,65	ВТ3-1; ВТ3	900-950	0,40
20Х23Н18	600-620	0,80	ВТ5; ВТ4	950-1200	0,70
31Х19Н9МВБ Т	600-620	0,40	ВТ6; ВТ8	750-950	0,35
15Х18Н12С4Т Ю	730	0,50	ВТ14	900-1200	0,53-0,43
ХН78Т	780	0,75	12Х13	900-1400	1,5-1,2
ХН75МБТЮ	-	0,53	30Х13; 40Х13	600-1100	1,3-0,9

Таблица 12

Поправочный коэффициент KMV, учитывающий влияние физико- механических свойств медных и алюминиевых сплавов на скорость резания

Медные сплавы	KMV	Алюминиевые сплавы	KMV
Гетерогенные: НВ>140 НВ 100-140	0,7 1,0	Силумин и литейные сплавы (закаленные), σВ=400-500 МПа, НВ>60	0,8
Свинцовистые при основной гетерогенной структуре	1,7	Дюралюминий (закаленный), σВ=400-500 МПа, НВ>100	0,8
Гомогенные	2,0	Силумин и литейные сплавы σВ=100-200 МПа, НВ>65	1,0
Сплавы с содержанием свинца <10% при основной гомогенной структуре	4,0	Дюралюминий, σВ=300-400 МПа, НВ<140	1,0

Медь	8,0	Дюралюминий, σВ=200-300 МПа,	1,2
Сплавы с содержанием свинца >15%	12,0		

Таблица 13 Поправочный коэффициент K_{nV}, учитывающий состояние поверхности заготовки на скорость резания

Состояние поверхности заготовки					
Без корки	С коркой				
	Прокат	поковка	Стальное и чугунное литье		Медные и алюминиевые сплавы
			обычное	С загрязненной коркой	
коэффициент KnV					
1,0	0,9	0,8	0,8-0,6	0,5-0,6	0,9

Таблица 14

Поправочный коэффициент КИV, учитывающий влияние материала режущей части инструмента на скорость резания

Обрабатываемый материал	Значение коэффициент КИV в зависимости от марки инструментального материала						
Сталь конструкционная	Т15К12В 0,35	Т5К1 0 0,65	Т14К 8 0,8	Т15К6 1,0	Т30К4 1,4	ВК8 0,4	
Сталь коррозийно- стойкая и жаропрочная	ВК8 1,0	Т5К1 0 1,4	Т15К 6 1,9	Р18 0,3			
Сталь закаленная	HRC 35-50				HRC 51-62		
	Т15К6 1,0	Т30К 4 1,25	ВК6 0,85	ВК4 1,0	ВК6 0,92	ВК8 0,74	ВК8 0,83
Серый и ковкий чугун	ВК8 0,83	ВК6 1,0	ВК4 1,1	ВК3 1,15	ВК2 1,25		
Сталь, чугун, медные и алюминиевые сплавы	Р18, Р9 1,0	ВК4 2,5	В68 2,7	9ХС 0,6	ХВГ 0,6	У12 А 0,5	

Таблица 15

Поправочный коэффициент КМР для стали и чугуна, учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на силовые зависимости

Обрабатываемый материал	Расчетная формула	Показатель степени мр при определении		
		Составляющей PZ силы резания при обработке резцами	Крутящего момента М и осевой силы Ро при сверлении	Окружной силы резания PZ при фрезеровании
Сталь конструкционная углеродистая и легированная				
σВ<600 МПа		0,75/0,35	0,75/0,75	0,3/0,3
σВ>600 МПа	np	0,75/0,75	0,75/0,75	0,3/0,3
Серый чугун	np КМР= □ НВ □ □ □	0,4/0,55	0,6/0,6	1,0/0,55
Ковкий чугун	np КМР= □ НВ □ □ □	0,4/0,55	0,6/0,6	1,0/0,55
В числителе приведены значения показателя степени мр для твердого сплава, в знаменателе- для быстрорежущей стали.				

Таблица 16

Значение коэффициента CPZ и показателей степеней в формуле силы резания при обработке резцами

Обрабатываемый материал	Материал режущей части резца	Вид обработки	Коэффициент и показатели степеней			
			CPZ	x	y	n
Конструкцион ная сталь и стальное литье	ТС	Обтачивание, подрезание, растачивание	300	1,0	0,75	-0,15
		То же резцами с доп. лезвиями	384	0,90	0,90	
		Отрезание и прорезание	408	0,72	0,8	0
		Нарезание резьбы	148	-	1,7	0,71

	БРС	Обтачивание, подрезание, растачивание	200	1,0	0,75	0
		Отрезание и	247		1,0	

		прорезание				
		Фасонное точение	212		0,75	
Сталь жаропрочная	ТС	Обтачивание, подрезание, растачивание	204	1,0	0,75	0
Серый чугун	ТС	Обтачивание, подрезание, растачивание	92	1,0	0,75	0
		То же резцами с доп. лезвиями	123		0,85	
		Нарезание резьбы	103	-	1,8	0,82
	БРС	Отрезание и прорезание	158	1,0	1,0	0
Ковкий чугун	ТС	Обтачивание, подрезание, растачивание	81	1,0	0,75	0
		Отрезание и прорезание	139		1,0	
Медные сплавы	БРС	Обтачивание, подрезание, растачивание	55	1,0	0,66	0
		Отрезание и прорезание	75		1,0	
Алюминий и силумин	БРС	Отрезание и прорезание	40	1,0	0,75	0
		Отрезание и прорезание	50		1,0	-

Таблица 17 Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента на силу резания PZ при обработке сталей и чугуна

Параметры		Материал режущей части инструмента	Коэффициенты	
Наименование	Вели чина		Обозна чение	Величина коэффициента
Главный угол в плане φ0	30	ТС	Кφ	1,08
	45			1,0
	60			0,94
	90			0,89
	30	БРС		1,08
	45			1,0
	60			0,98
	90			1,08

Передний угол γ0	-15 0 10	ТС	К γ	1,25 1,1 1,0
	12-15 20-25	БРС		1,15 1,0
Угол наклона режущей кромки λ0	-5 0 5 15	ТС	Кλ	1,0 - - -
Радиус при вершине резца r, мм	0,5 1,0 2,0 3,0 4,0	БРС	К r	0,87 0,93 1,0 1,04 1,10

Таблица 18

Поправочный коэффициент $К_{МР}$ для медных и алюминиевых сплавов, учитывающий влияние свойства обрабатываемого материала на силу резания

КМР для медных сплавов						КМР алюминиевых сплавов		
Гетерогенные		С содерж. свинца <10%	С содерж. свинца >15%	Галогенные	Медь	Алюминий и силумин	дюралюмин	
НВ<12 0	НВ<120						σВ<35 0 МПа	σВ>350 МПа
1,0	0,75	0,65-0,70	0,25-0,45	1,8-2,2	1,7-2,1	1,0	2,0	2,75

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГОБУ ВО
Уральский государственный
горный университет

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ
ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

для студентов направления бакалавриата:
15.03.01 «Машиностроение»,
15.03.02 - «Технологические машины и оборудование» (ТМО) и среднего профессионального образования
(15.02.01) - «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования (по отраслям)»
очного, заочного и очно-заочного обучения

Екатеринбург
2023

Сборник чертежей деталей машин для выполнения домашнего задания по дисциплине «Технология конструкционных материалов»: Учебное пособие содержит чертежи типовых деталей машин: зубчатых колес, втулок, валов, рычагов и др., предназначенные для выполнения студентами домашнего задания по дисциплине «Технология конструкционных материалов» (ТКМ). Все чертежи выполнены с использованием программы твердотельного моделирования Autodesk Inventor Professional 10. Пособие может быть рекомендовано для решения технологических задач на зачетах и экзаменах по курсу ТКМ.

Содержание учебного пособия «Сборник чертежей деталей машин для выполнения домашнего задания по дисциплине ТКМ» соответствует утвержденной программе учебно-методического комплекса по дисциплине «Технология конструкционных материалов».

ПРЕДИСЛОВИЕ

Домашнее задание по дисциплине «Технология конструкционных материалов» (ТКМ) предназначено для закрепления студентами теоретических и практических знаний, полученных в курсе лекций, на семинарских занятиях, при выполнении практических работ учебно-технологического практикума; для овладения навыками самостоятельного использования методик решения типовых технологических задач и получения практического опыта работы со справочными материалами. Выполнение домашнего задания помогает также студентам получить умение находить связь между исходными данными по-

ставленной задачи и требуемым результатом, проводить анализ и на базе знаний общих подходов предложить варианты решений и составить рациональный путь решения конкретной задачи.

Настоящее учебное пособие направлено на улучшение технологической подготовки инженеров-конструкторов, технологов, а также специалистов других профессий. Оно содержит более 40 вариантов чертежей деталей машин, позволяющих решать такие задачи домашнего задания, как:

отработка на технологичность конструкции детали в зависимости от типа производства и вида выбранной заготовки;

выбор последовательности методов и видов обработки разных поверхностей детали с учетом технической оснащенности производства и возможности использования инновационных технологий; выбор средств технологического оснащения; разработка схем обработки;

выбор рациональной технологии обработки указанных на чертеже поверхностей детали по различным критериям, например, максимальной производительности, с использованием расчетных методов и др.

Чертежи деталей машин, составляющие содержание пособия, несут информацию, используемую при выполнении домашнего задания: материал детали, размеры, необходимое количество проекций, разрезы, сечения, требования по точности и шероховатости. Дополнительно каждый чертеж имеет несколько конструктивных неточностей. Ими могут быть, например, отсутствие канавок для свободного входа и выхода инструмента, размеры резьб, модулей, диаметров от-

верстий, отличные от предпочтительного ряда чисел и другие неточности, связанные с конструкцией детали. Все они направлены на овладение студентами навыков анализа рабочего чертежа детали с целью разработки наиболее технологичной конструкции.

Пособие может быть рекомендовано по направлению подготовки дипломированных специалистов «Машиностроительные технологии и оборудование» и Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов».

Работа № 1. Определение режима резания при точении

К современным машинам предъявляются высокие эксплуатационные и технико-экономические требования, для обеспечения необходимого качества обработки деталей машин. Для выполнения этих требований необходимо иметь режущий инструмент с оптимальными параметрами: геометрией, материалом режущей части и режим резания.

Задание по работе.

Необходимо подобрать по размерам детали и инструмента станок; установить тип и вид инструмента, необходимый для обработки; выбрать оптимальные режимы резания и рассчитать основное технологическое время – T_O.

Выполнение работы

1. Получив задание (вариант № **) определить по справочнику [1] вид инструмента [1,4] и его назначение [2, 3].
2. Выполнить эскиз инструмента с указанием основных размеров и углов режущей части
3. Указать из какого материала может быть изготовлена режущая часть данного инструмента,
4. Изобразить схему обработки заготовки данным инструментом с указанием всех движений и установки.
5. Выбрать станок, на котором можно производить обработку данным инструментом, по выбранной схеме.

6. Рассчитать режим резания и основное технологическое время при обработке данным инструментом заданной поверхности [4], стр. 609 - 619.

Отчет выполняется на бланке, эскиз и схема обработки выполняется карандашом по линейке.

Литература.

1. Справочник инструментальщика, М. Машиностроение, 1987. 846 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя, т.2. М: Машиностроение. 1986. 496 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение –1. 2001. – 944 с.
4. Обработка металлов резанием: Справочник технолога./А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А. А. Панова.– М.: Машиностроение . 1988. – 736 с.: ил.

Работа №2 Выбор режущего инструмента

Цель работы

Научиться правильно выбирать инструмент, металлорежущий станок, режимы резания для обработки заданной поверхности детали.

Задание по работе.

Необходимо подобрать по размерам детали и инструмента станок; установить тип и вид инструмента, необходимый для обработки; выбрать оптимальные режимы резания и рассчитать основное технологическое время – T_O.

Ход работы

1. Получив эскиз детали, с указанием поверхности (таблица), подлежащей обработке по размерам, конфигурации и виду обрабатываемой поверхности, пользуясь предложенной литературой, подобрать тип, вид и размеры режущего инструмента.
2. Исходя из материала обрабатываемой детали, вида и условий обработки установить оптимальную геометрию режущей части инструмента [2], [3].
3. Начертить эскиз режущего инструмента, используя типовые примеры, приведенные в альбоме [3]. На эскизе указать основные размеры инструмента, геометрию режущей части и материал режущей части.
4. Руководствуясь размерами детали и режущего инструмента, используя справочник технолога – машиностроителя [2], подобрать конкретный металлорежущий станок. Дать полную расшифровку мо-

дели станка. Ознакомиться с устройством данного станка [4] или, станка такого типа, с его технологическими возможностями.

5. Начертить схему обработки детали выбранным инструментом (показать взаимное их положение при обработке, стрелками показать движения резания и подачи, вспомогательные движения).

6. **Выбрать** режим обработки [2]; выбранные значения **сверить** с данными станка. Рассчитать основное технологическое время на обработку заданной поверхности (или поверхностей) [1]. Полученные данные свести в таблицу (см. отчет). Допускается скорость резания **не рассчитывать, а принимать** рекомендуемую по таблицам [1].

Оформление отчета

Эскиз инструмента и схема обработки вычерчиваются на специальном бланке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка металлов резанием: Справочник технолога./А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А. А. Панова.– М.: Машиностроение . 1988. – 736 с.: ил.

2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 1986, 496 с., ил.

3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Суслова. - М.:Машиностроение-1, 2001. - 944 с., ил..

4. Альбом «Металлорежущие инструменты». – М.: 1979. Кучер А. М., Киватицкий М. М., Покровский А. А. Металлорежущие станки. – М.: Машиностроение, 1965.

3. Выбор шлифовального круга и режима резания

Цель работы. Научиться выбирать шлифовальные круги в зависимости от материала детали и требований, предъявляемых к ней.

Ход работы.

По полученному заданию выбрать схему шлифования. Начертить схему обработки детали на шлифовальном станке, указав стрелками движение резания, движение подачи и вспомогательные движения.

Выбрать станок для шлифования заданной поверхности детали по техническим характеристикам станка [1].

Выбрать тип круга по области применения (табл. П3.1.1).

Основные размеры круга принимаются по техническим характеристикам станка [1].

Выбрать примерную характеристику круга в зависимости от материала детали и ее шероховатости (табл. П3.1.2).

В выбранной примерной характеристике отсутствуют ряд параметров круга, предусмотренных стандартом, поэтому ее необходимо дополнить.

Все параметры, входящие в характеристику круга необходимо расшифровать, указав:

а) абразивный материал – (табл. П3.1.3), получение абразивного материала, микротвердость, теплоустойчивость (табл. П3.1.4); б) зернистость инструмента (табл.П3.1.5), обозначается по ГОСТ 3647 –

80. Уточняется размер зерна основной фракции и выбирается индекс обозначения содержания зерна в основной фракции (процент).

в) твердость инструмента – параметр, характеризующий способность инструмента сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой при сохранении характеристик инструмента в пределах установленных норм (табл. П3.1.6);г) структура абразивного по таблице П3.1.7

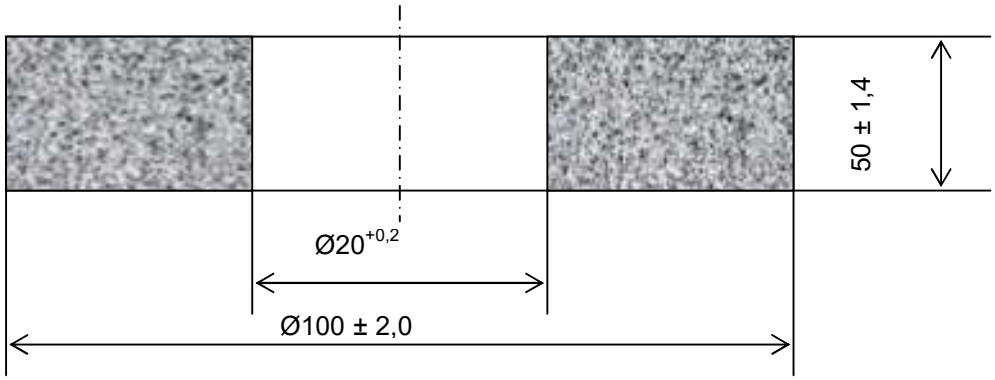
д) связка абразивного круга выбрать по табл.П3.1.8

е) в полной характеристике абразивного круга указывается окружная скорость круга. Скорость ограничивается прочностью инструмента, принимается по табл.П3.1.8; ж) класс точности инструмента.

з) класс неуравновешенности инструмента.

и) все выбранные параметры составляют полную характеристику абразивного круга.к) По таблицам [1] или П3.1.9 определяются режимы резания.л) По полученным данным изображают эскиз круга с предельными отклонениями (табл. П3.1.9)

Пример: *ПП 100 × 50 × 20 24А 10П С2 7 К5 35 м/с А 1кл. ГОСТ 2424 - 83*



Круг шлифовальный: тип ПП, D = 100, H =50, d = 20, белого электрокорунда марки 24А, зернистости 10П, степень твердости С2,

структура 7, связка керамическая К5, рабочая скорость 35 м/с, класс точности А, класс неуравновешенности 1.

Отчетность по работе.

Отчет выполняется на бланке. Все рисунки и подписи к ним выполняются аккуратно карандашом

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова.- М.: Машиностроение, 1986, 496 с., ил.
2. Справочник инструментальщика, М. Машиностроение, 1987. 846 с.

Таблица

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Вариант №№	Номер рисунка	Работа №						
		1			2		3	
		Состояние поверхности	Поверхность. Диаметр		Поверх-ность	Припуск, мм	Поверх-ность	Припуск, мм
			после обработки	До обработки				
1.	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	1	прокат	125	128	Паз В	-	торец	0,45
2.	2	отливка без корки	108	110	паз	-	108	0,25
3.	3	поковка	70	100	паз		70	0,25
4.	4	штамповка	73	60	отверстие		73	0,3
5.	4	отливка с коркой	212	230	паз		212	0,18
6.	5	отливка без корки	157	180	паз		торец	0,25
7.	6	штамповка	70	80	Пов. В			0,4
8.	8	отливка без корки	184	190	паз		торец	0,25
9.	8	отливка с отверст.	63	90	Пов. Б		36	0,2
10.	9	отливка без корки	Торец 215	Припуск h =1	паз 14		63	0,35

Продолжение таблицы

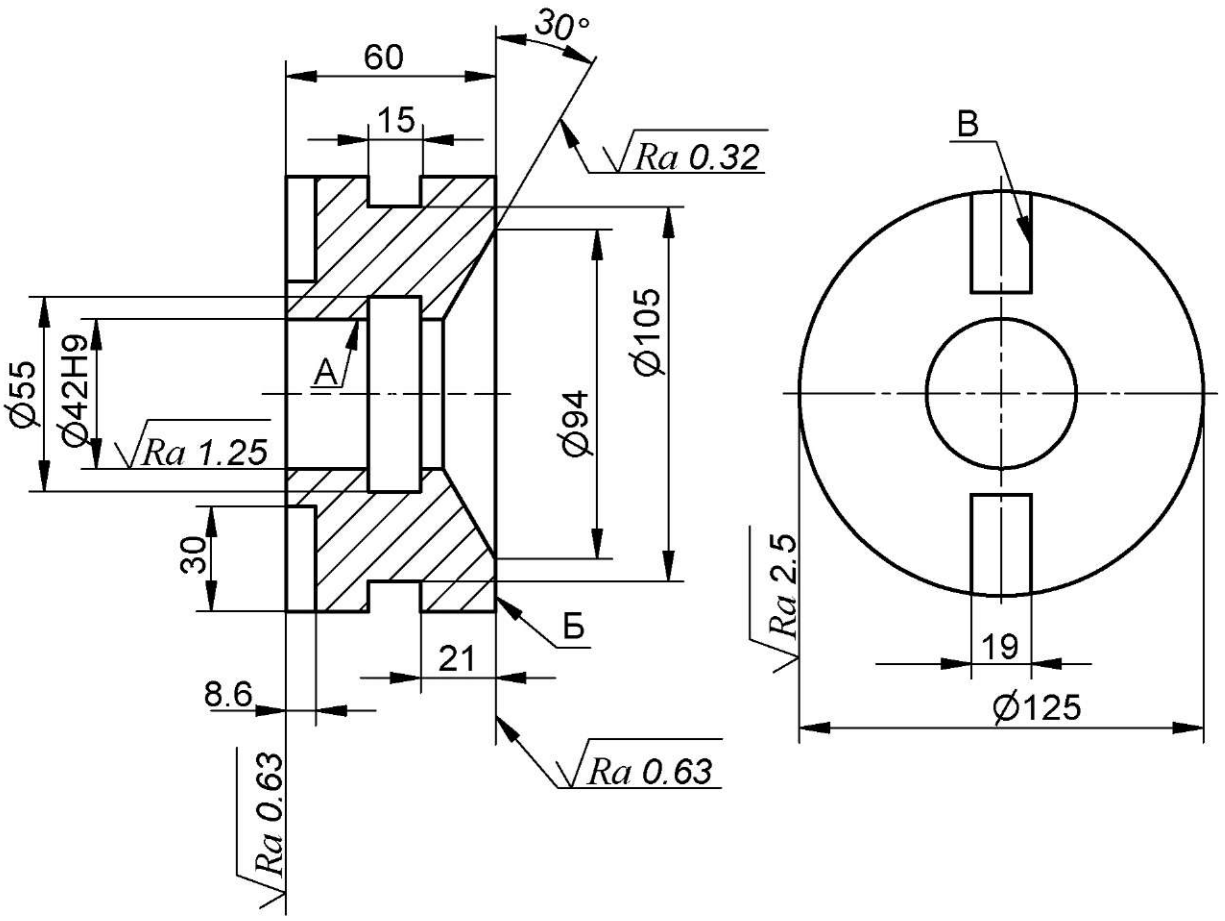
1	2	3	4	5	6	7	8	9
11.	9	отливка с коркой	63	60	Паз 10		91	0,25
12.	15	прокат с просверл. отверст.	45	80	паз		45	0,2
13.	16	штамповка	48	50	паз		торец 48	0,3
14.	18	отливка с коркой	76	90	Пов. В	-	Пов. В	0,15
15.	19	отливка без корки	45,3	60	Пов. В		60	0,2
16.	20	штамповка	51	48	Отв. 7		60	0,5
17.	20	отливка с коркой	61	70	Отв. 3		51	0,2
18.	22	штамповка	200	210	160		70	0,25
19.	23	прокат	40	Квадрат 75	Паз 20		40	0,2
20.	24	отливка с коркой	56	70	Пов. В		47	0,25
21.	26	поковка, об-работанная	40	31	Пов. В		52	0,2
22.	27	прокат	180	200	паз		90	0,3
23.	29	прокат	37	42	Паз 8,2		37	0,2

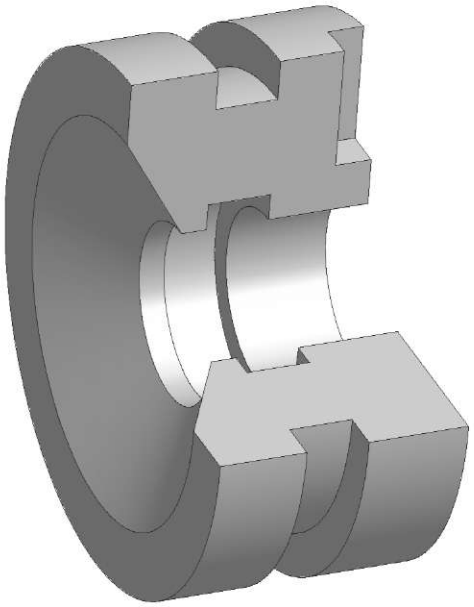
Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24.	29	прокат, обработан-ная	40	45	Отв. 8,2		38	0,25
25.	50	прокат	16	30	паз		Пов. Б	0,25
26.	49	отливка с коркой	30	40	Паз А-А		20	0,25
27.	49	после сверления	20	30	Паз Б-Б		30	0,3
28.	48	поковка с коркой	60	67	паз		56	0,2
29.	45	прокат	90	95	Пов .В		Пов. А	0,3
30.	44	поковка	50	60	40		30	0,3

Стопор

$\sqrt{Rz\ 40(\sqrt{})}$

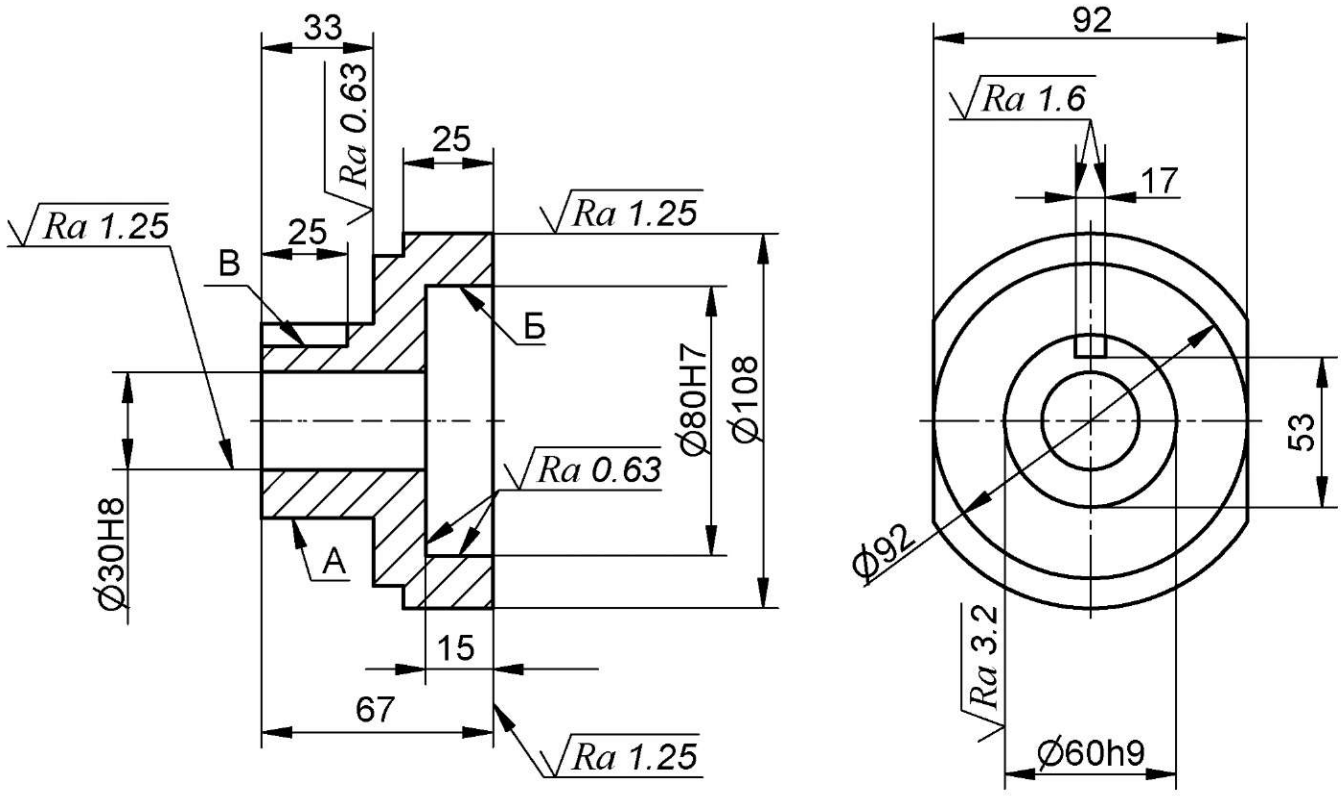


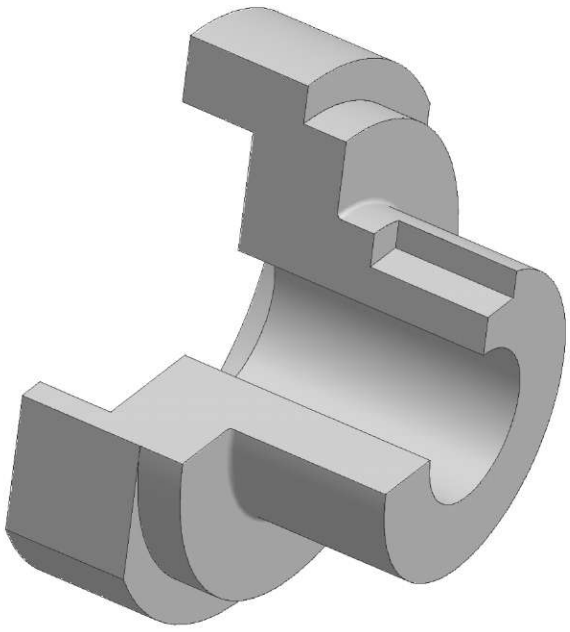


Материал: *Чугун СЧ 18 (Сталь 40ХФА)*
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Вал ведущий

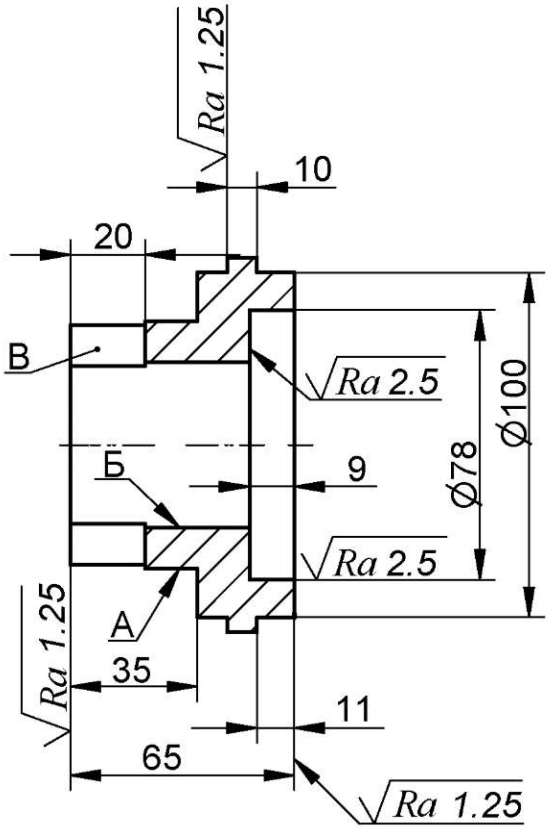
$\sqrt{Rz\ 40(\sqrt{})}$

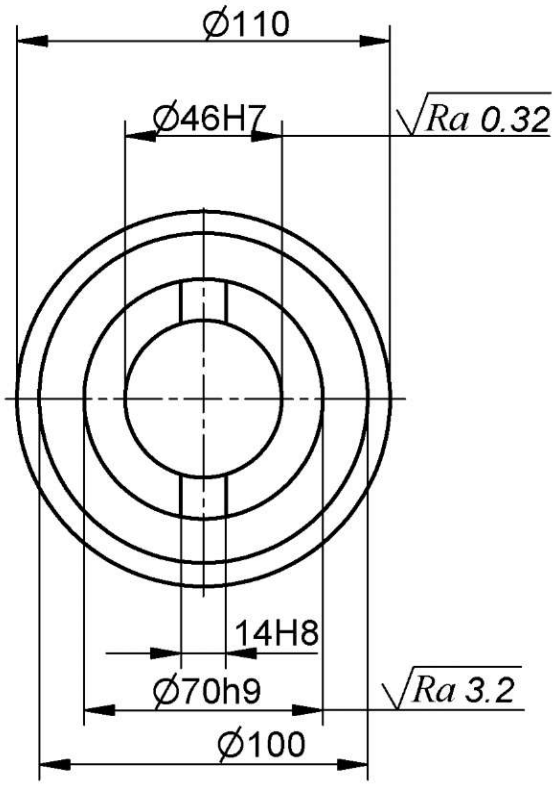


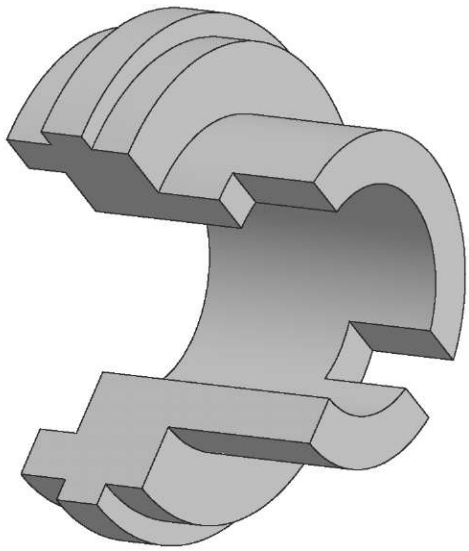


Материал: Чугун СЧ 25 (Сталь 40Х)
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Фрикцион

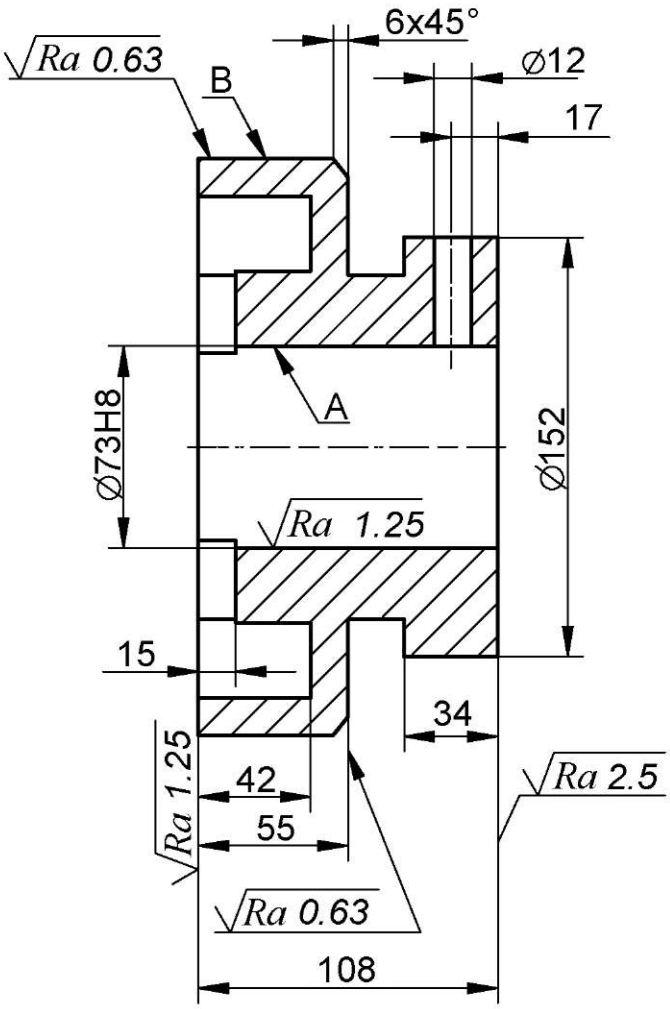


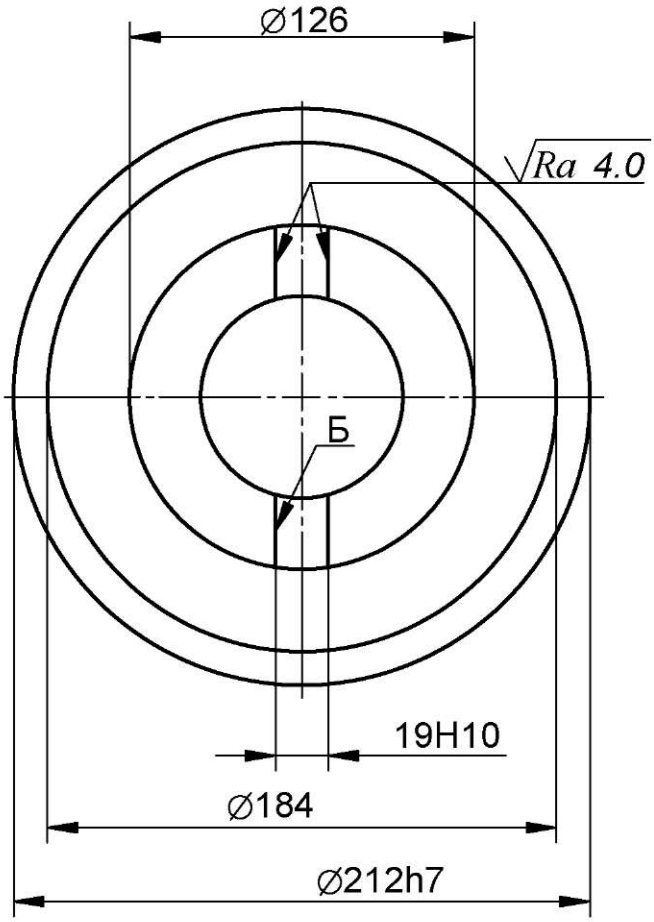


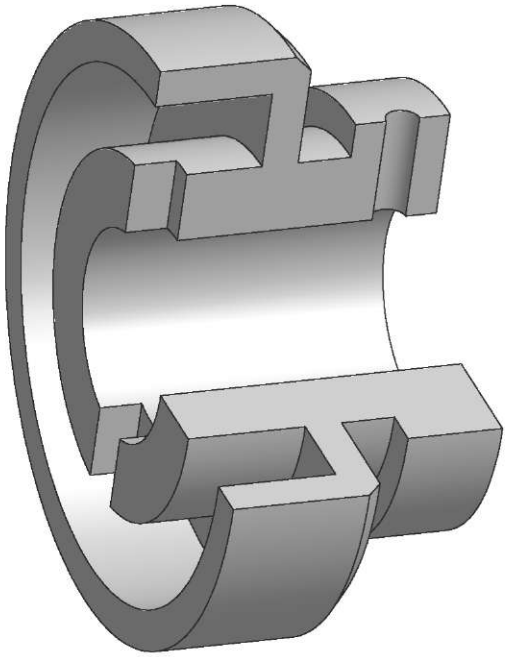


Материал: *Чугун СЧ 25 (Сталь 25)*
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Лимб

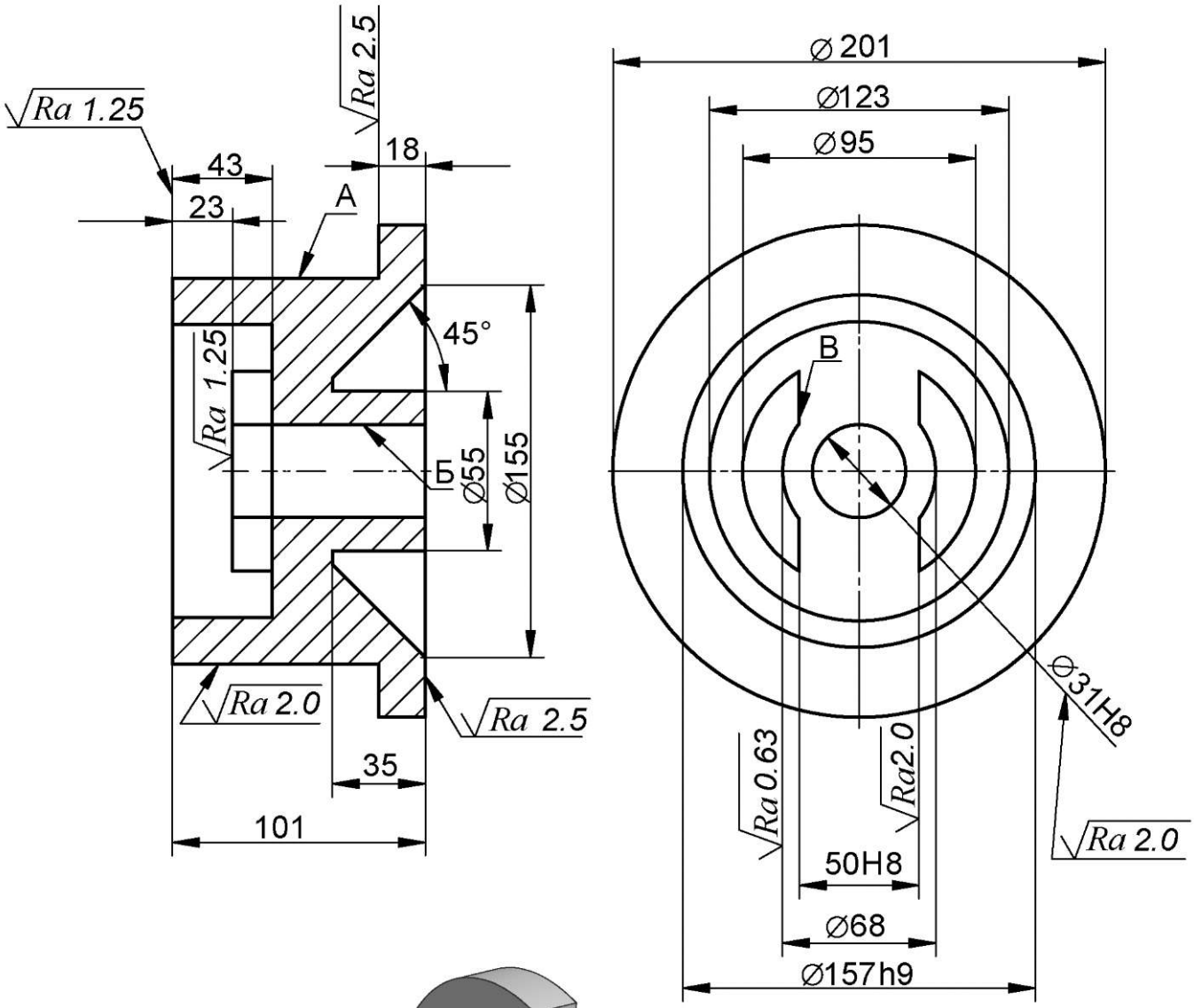


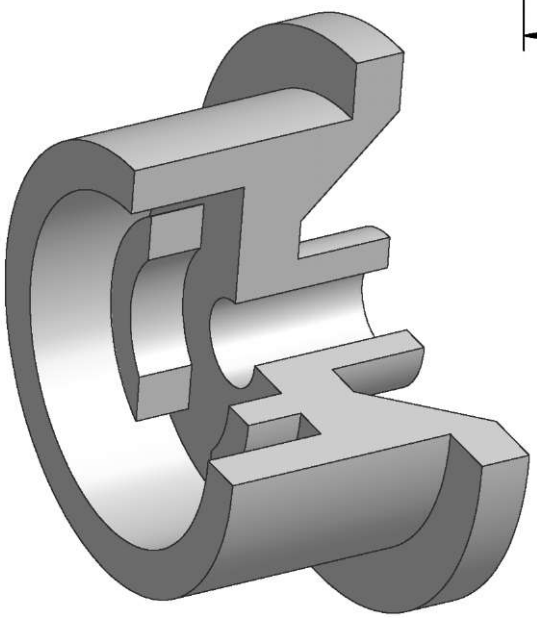




Материал: Чугун ВЧ 45 (Сталь 40ХФА)
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Насадка

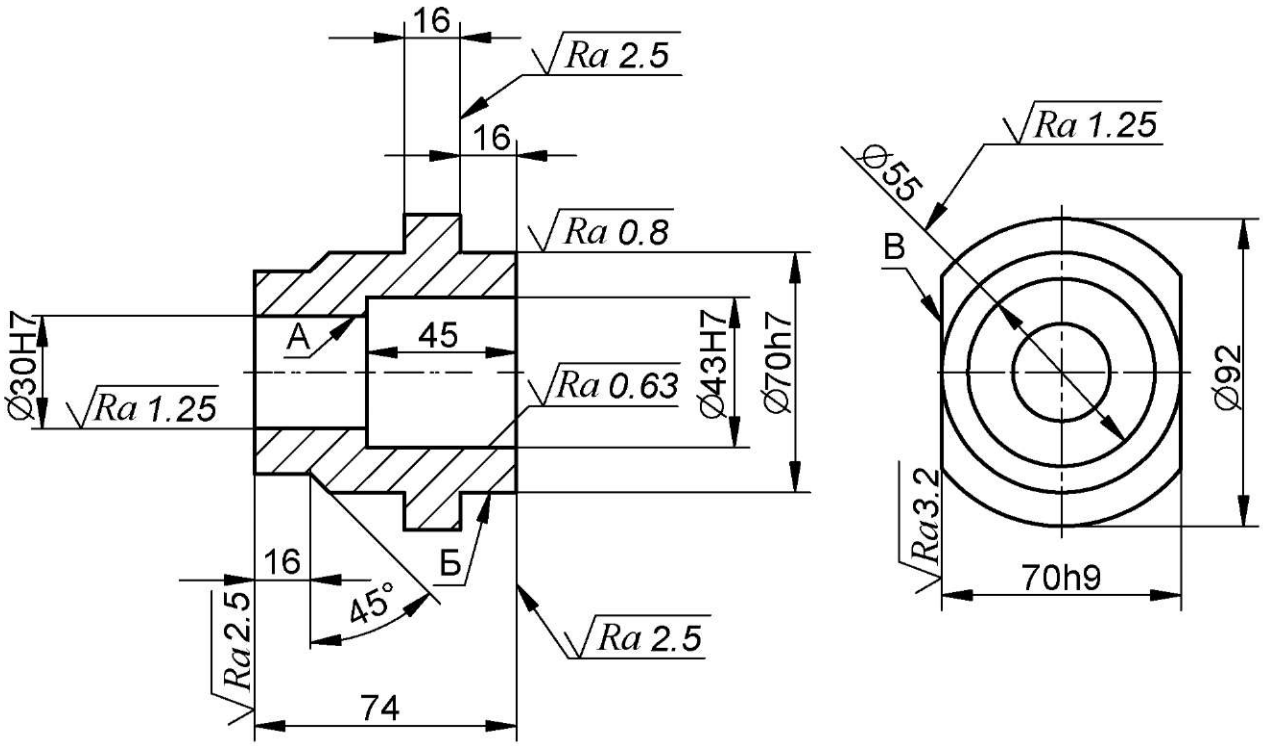


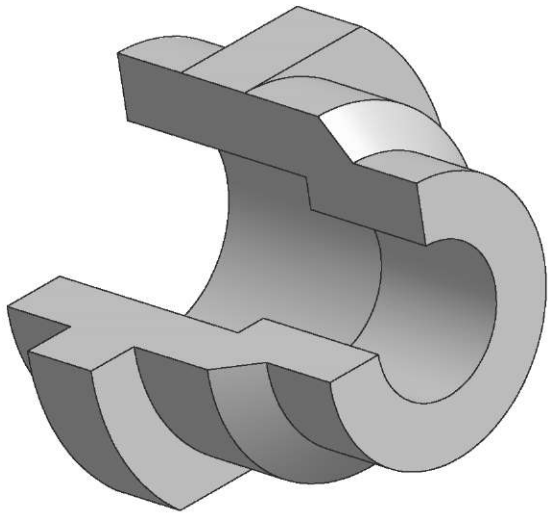


Материал: Чугун СЧ 35 (Сталь 40ХФА)
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Втулка опорная

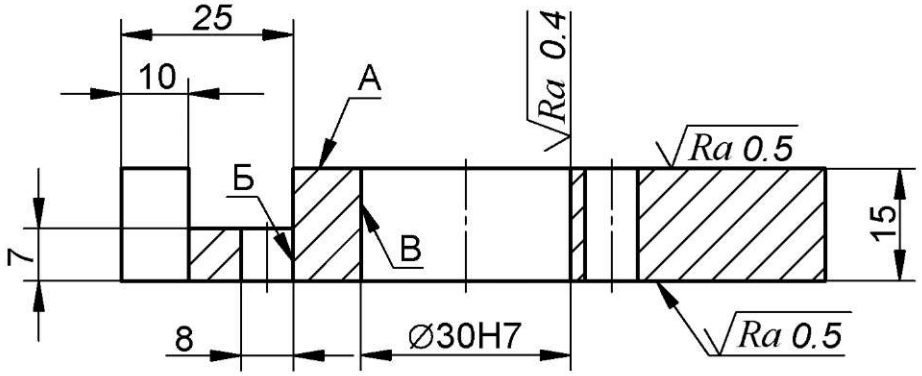
$\sqrt{Rz\ 80(\sqrt{})}$

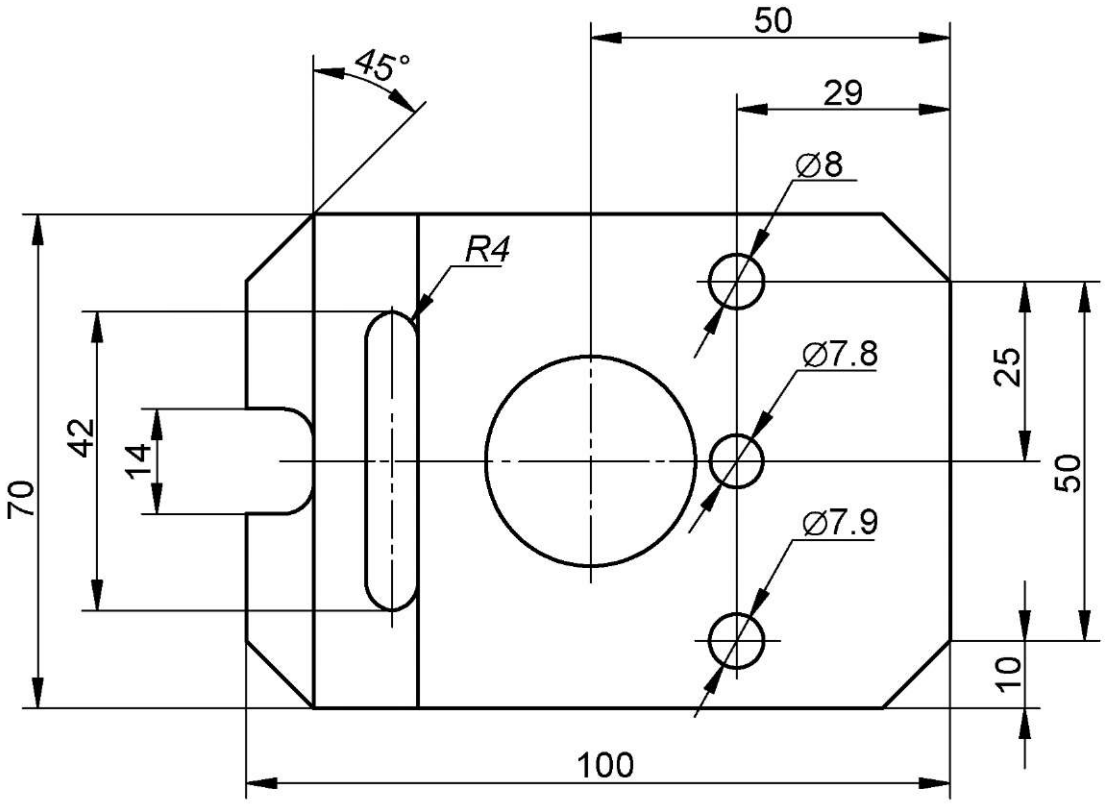


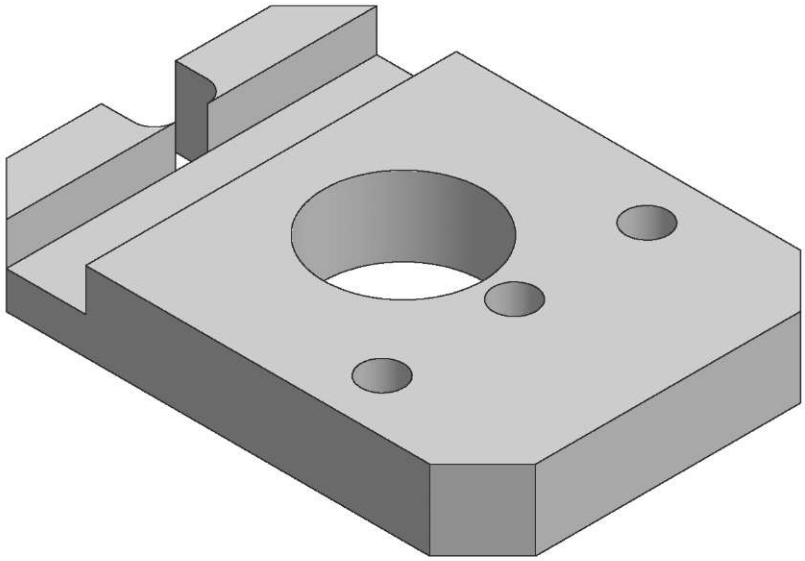


Материал: Чугун СЧ 18 (Сталь 20Х)
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Плита кондукторная $\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$





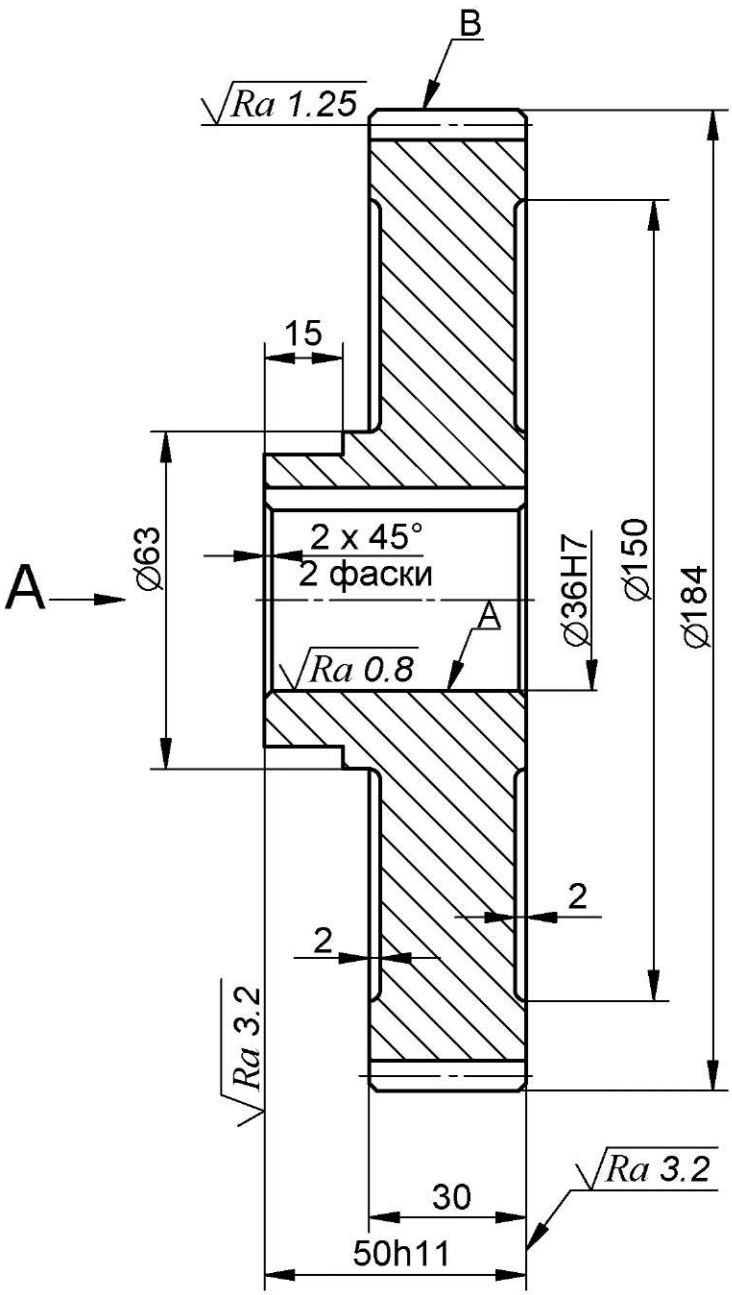


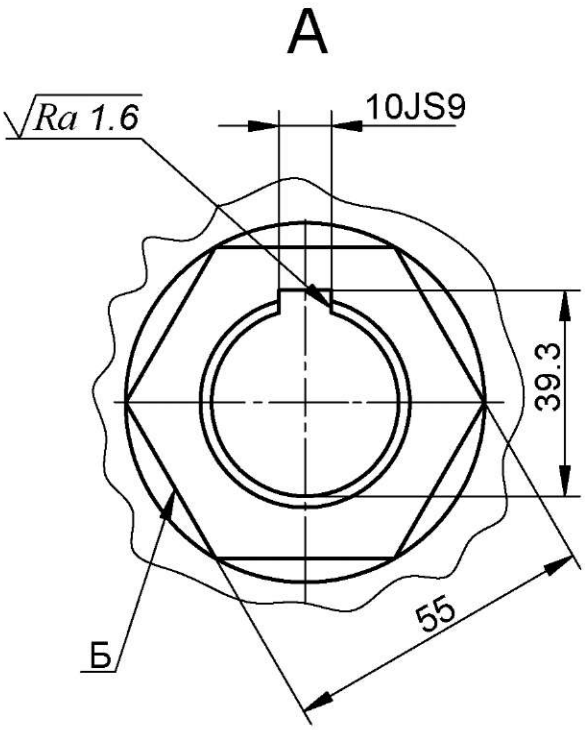
Материал: Сталь 20
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

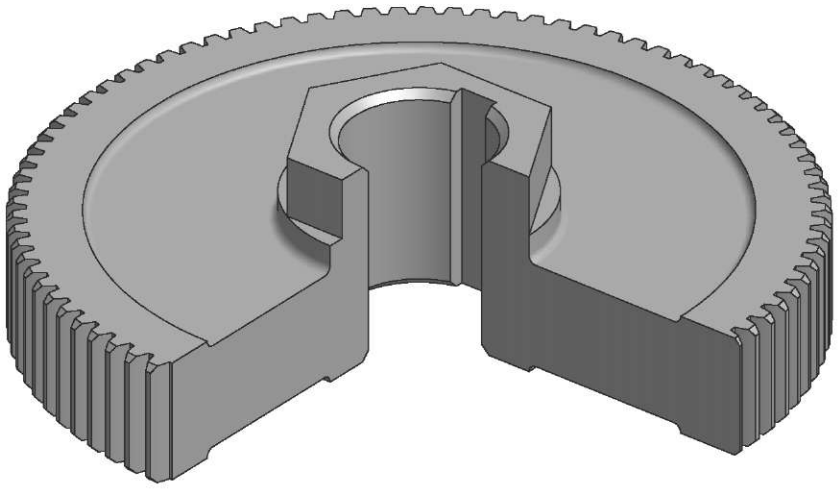
Колесо зубчатое

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

Модуль	m	2
Число зубьев	z	90
Степень точности		8-С
Делительный диаметр	d	180







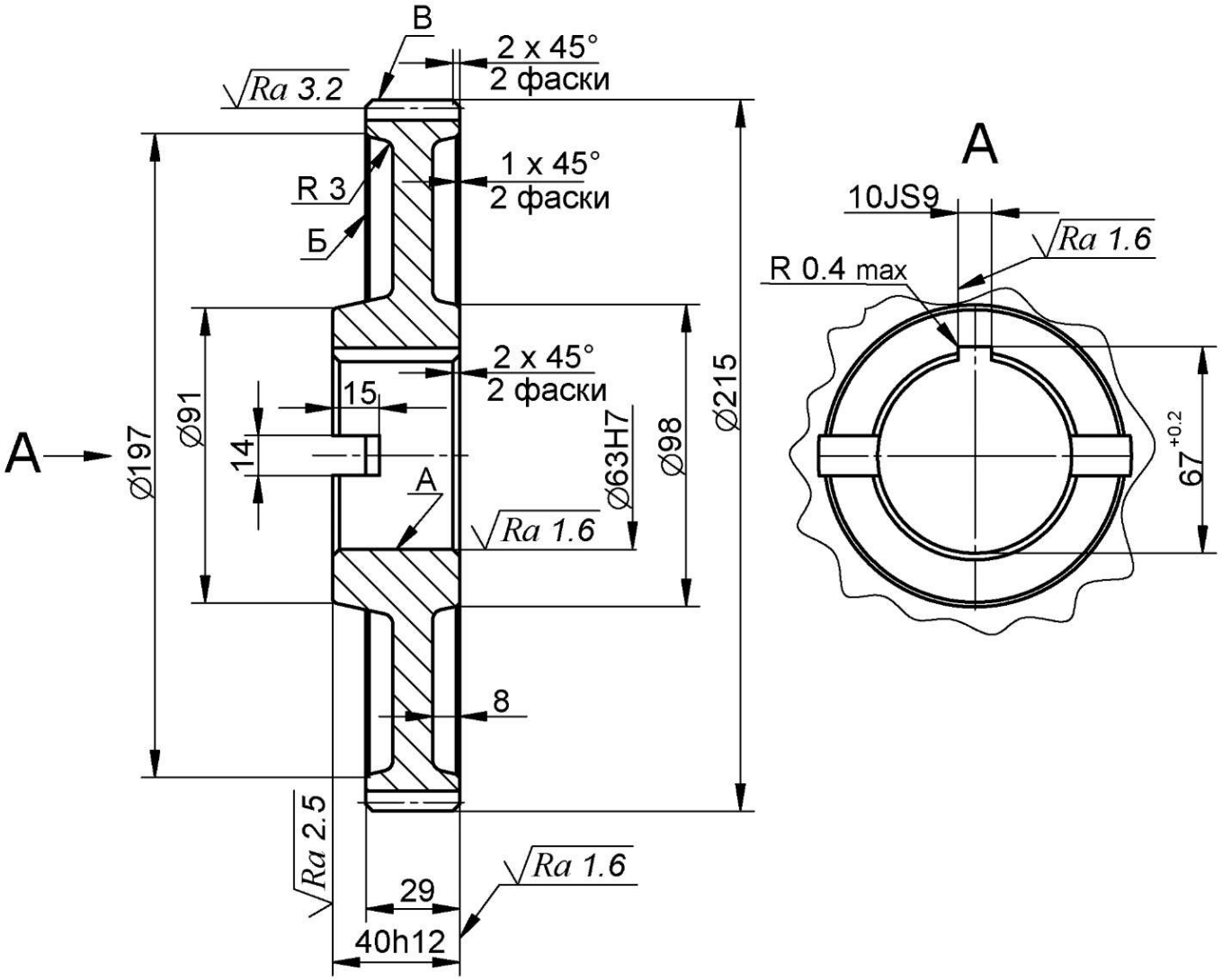
Материал: Сталь 40Х

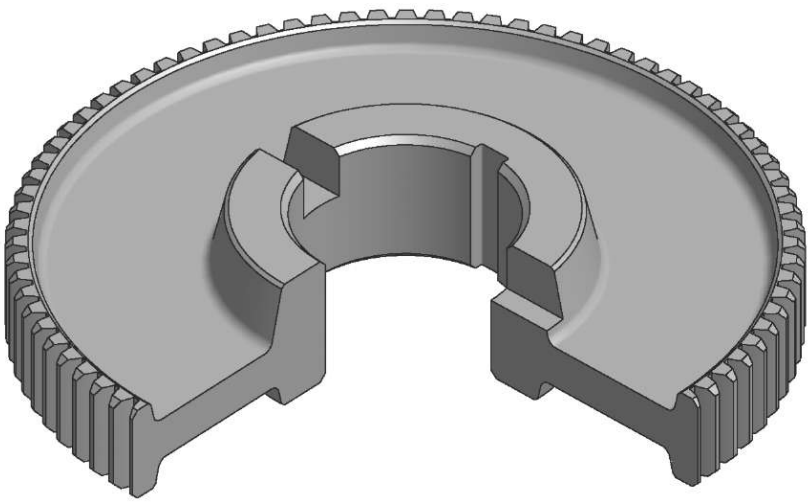
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

Колесо зубчатое

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

Модуль	m	2.5
Число зубьев	z	84
Степень точности		8-В
Делительный диаметр	d	210





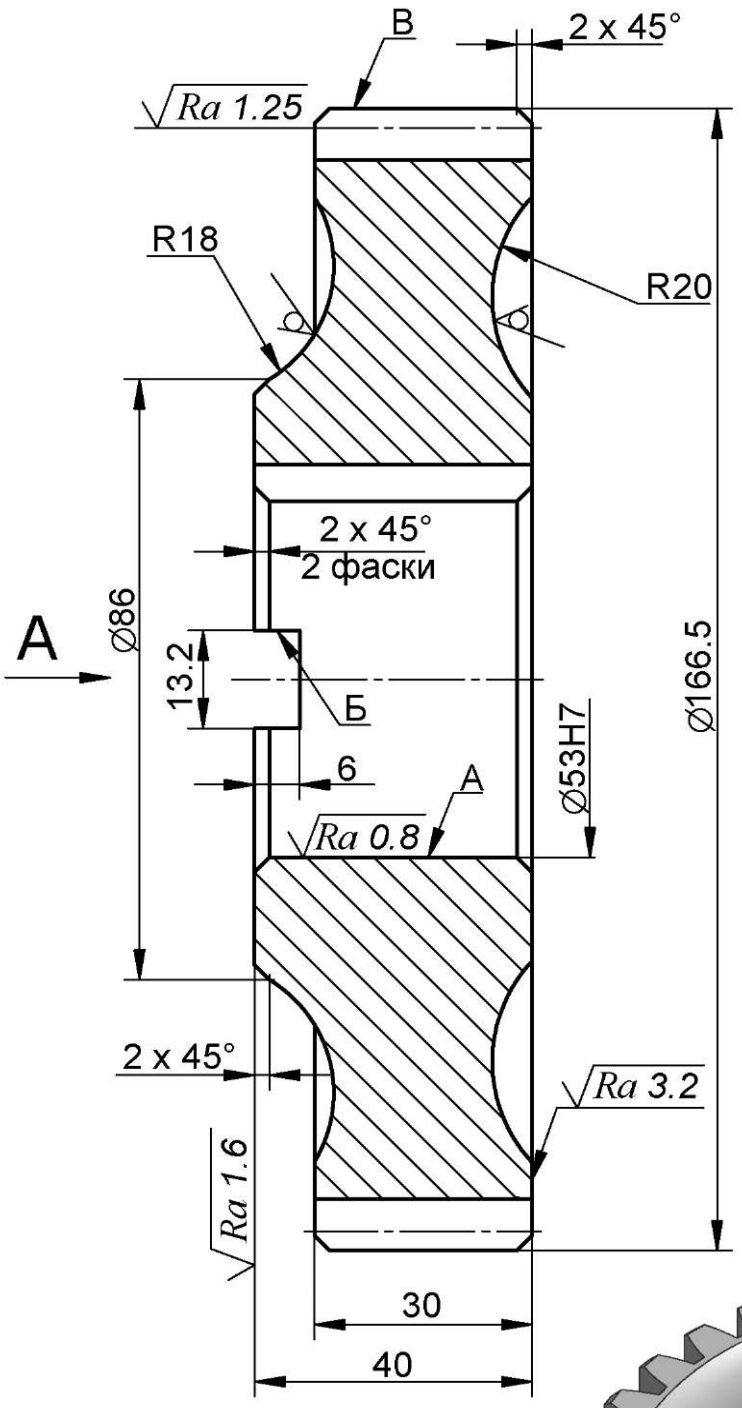
Материал: Сталь 40Х

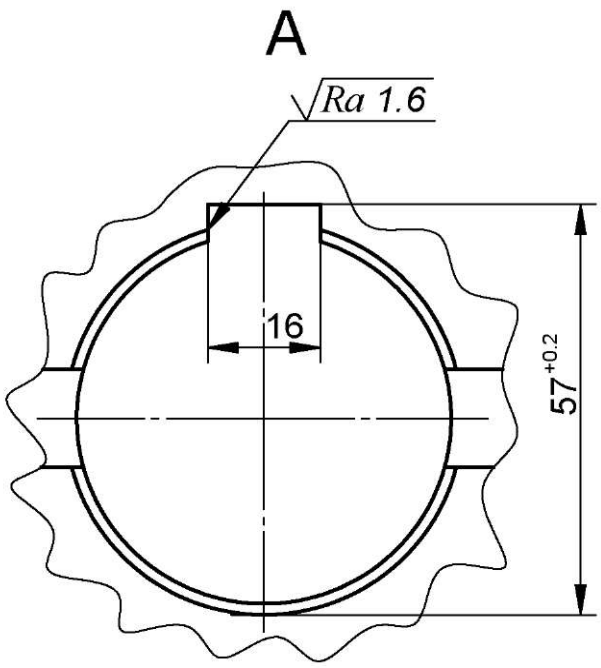
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

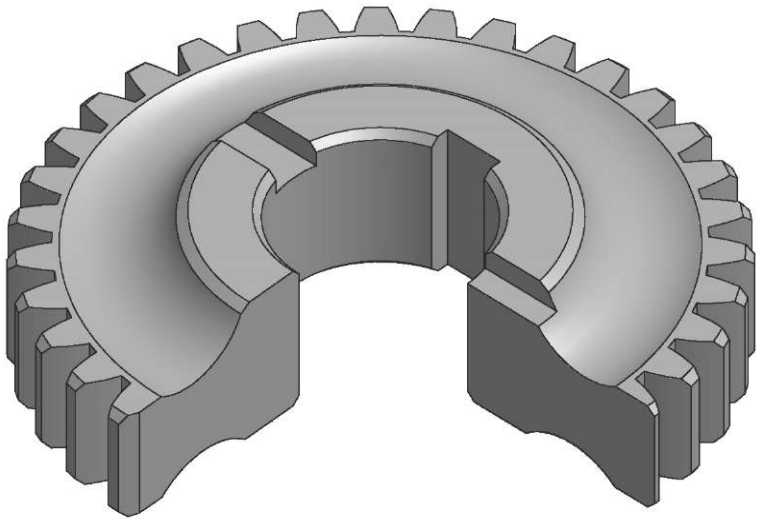
Колесо зубчатое

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

Модуль	m	4.5
Число зубьев	z	35
Степень точности		7-C
Делительный диаметр	d	157.5







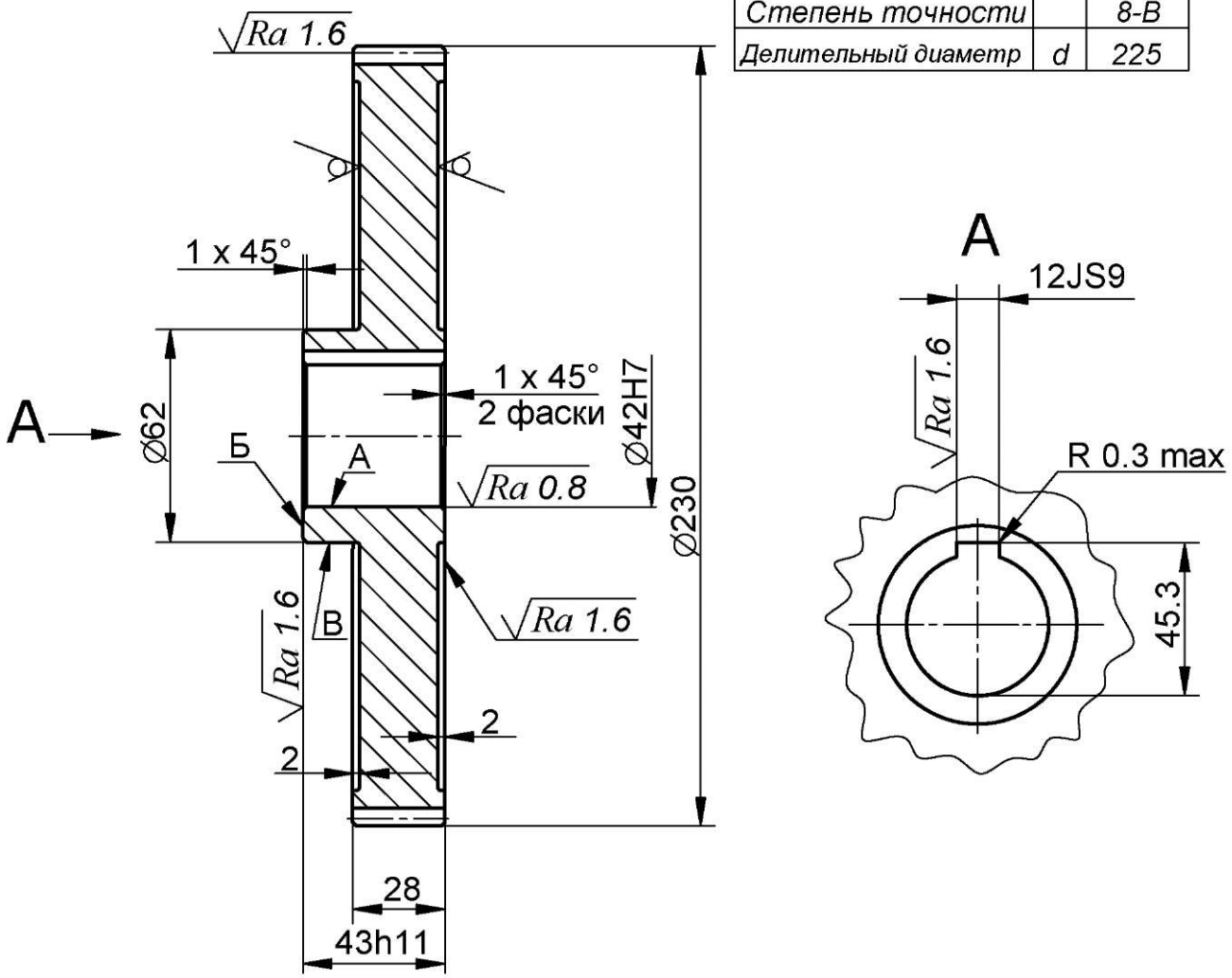
Материал: Сталь 40Х

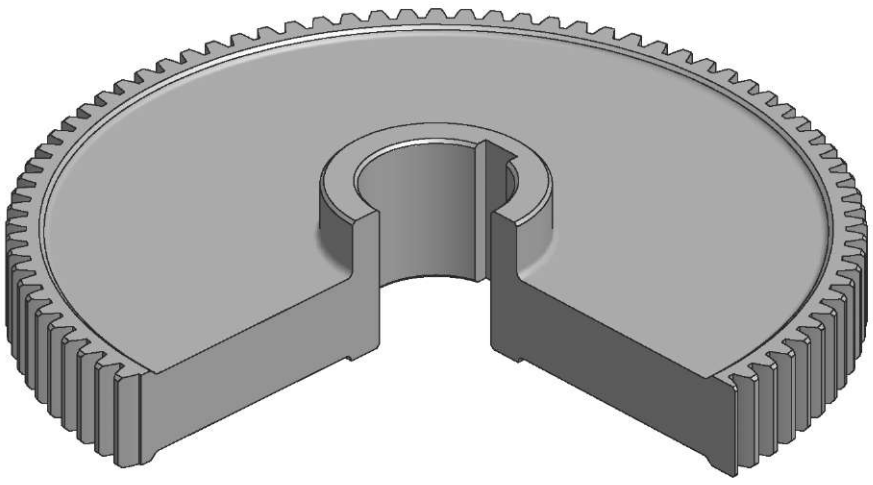
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

Колесо зубчатое

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

Модуль	m	2.5
Число зубьев	z	90
Степень точности		8-В
Делительный диаметр	d	225





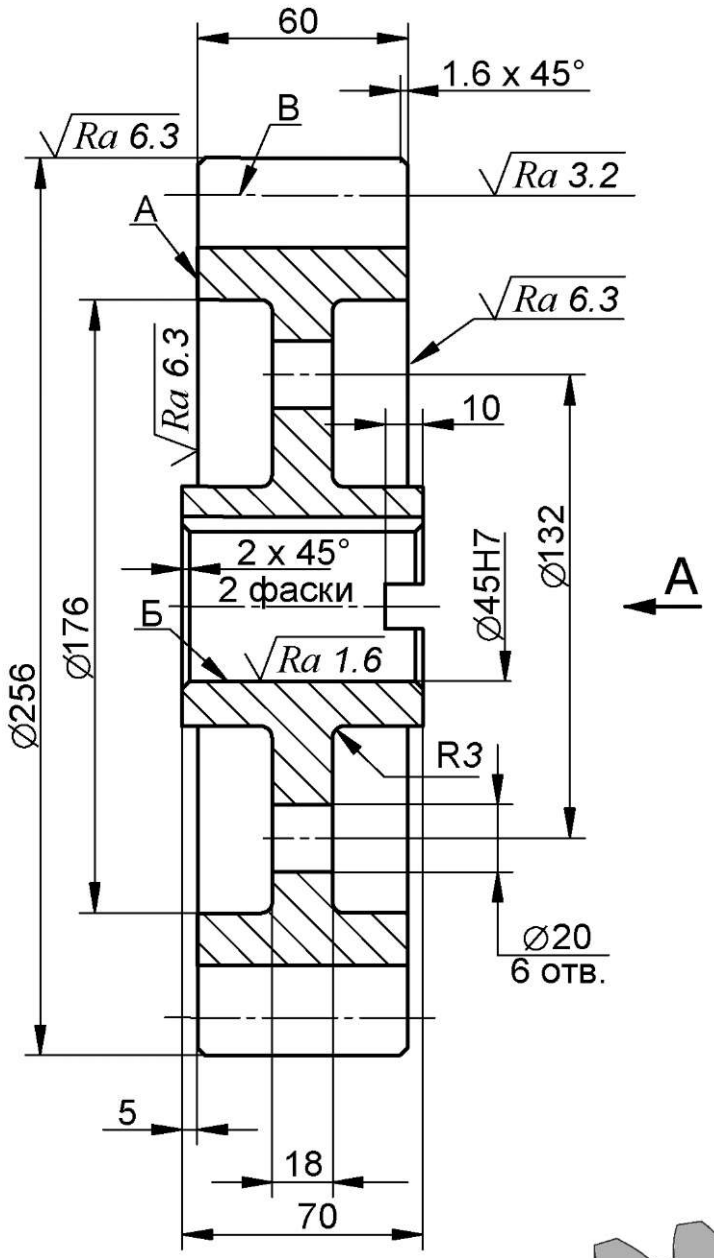
Материал: Сталь 20Х

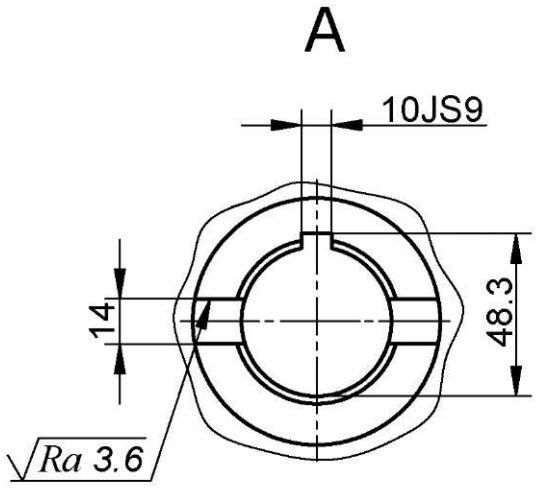
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

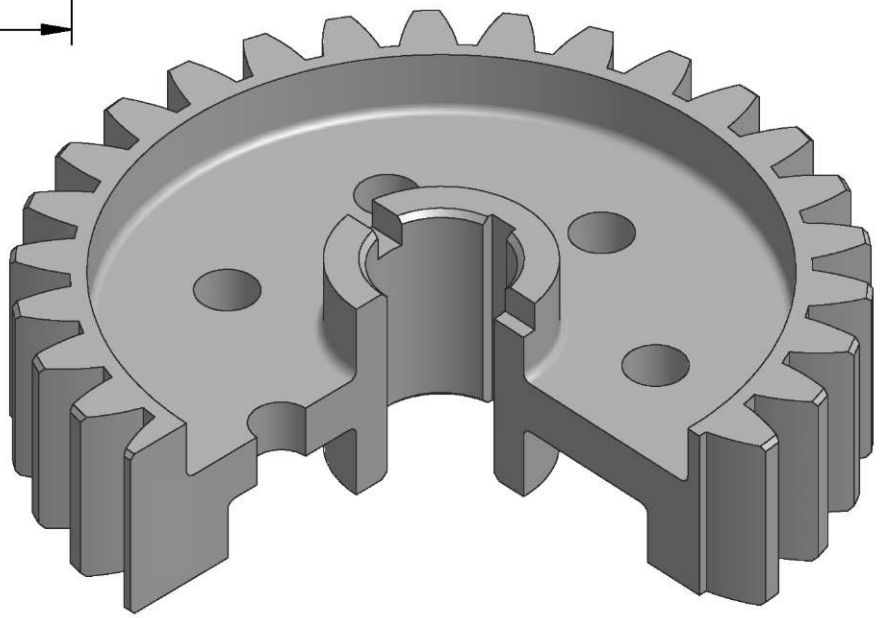
Колесо зубчатое

$\sqrt{Ra\ 12,5(\sqrt{})}$

Модуль	m	8
Число зубьев	z	30
Степень точности		8-В
Делительный диаметр	d	240





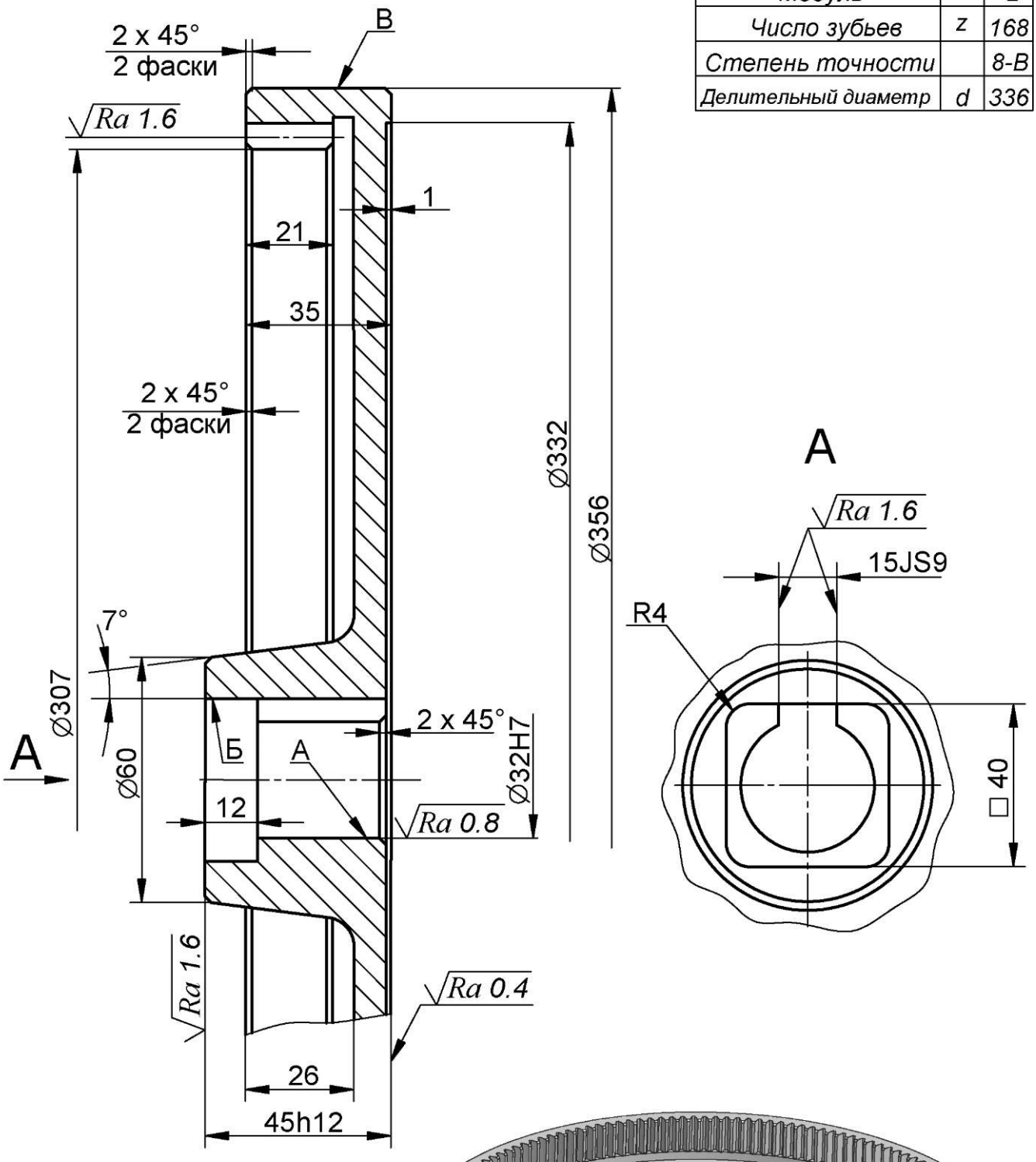


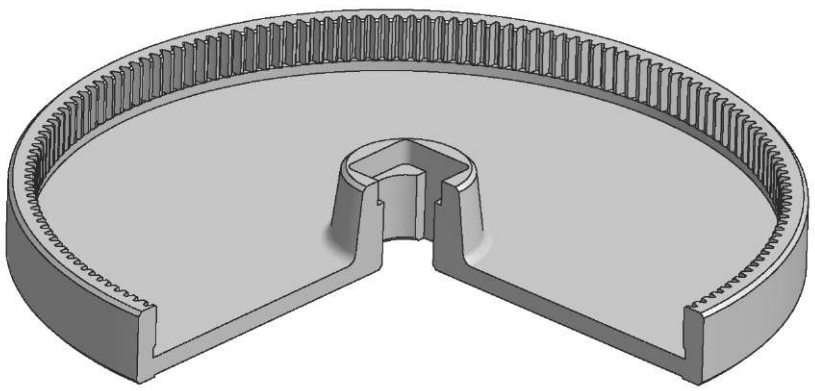
Материал: Сталь 45

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

Колесо с внутренним зацеплением $\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

Модуль	m	2
Число зубьев	z	168
Степень точности		8-B
Делительный диаметр	d	336



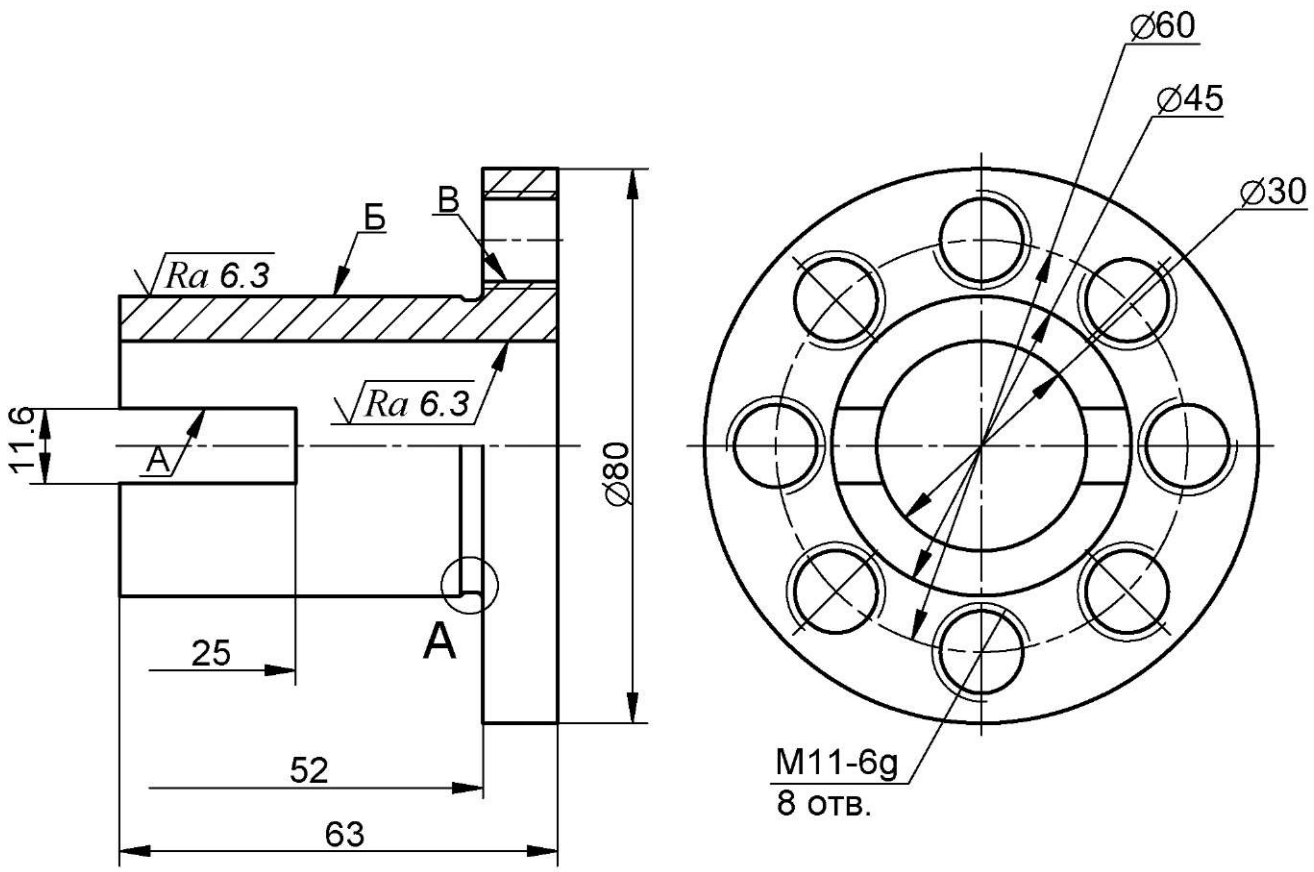


Материал: Сталь 40Х

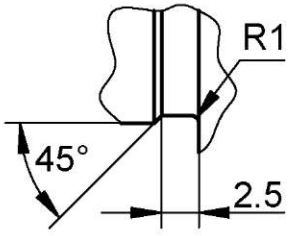
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

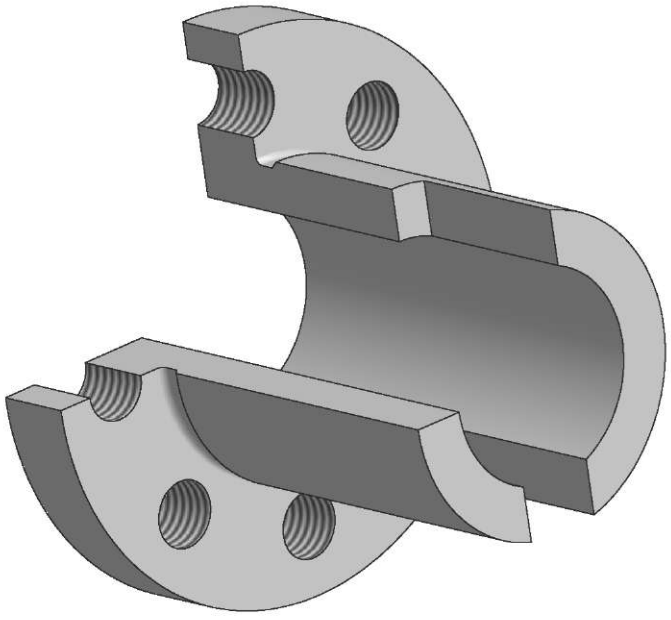
Втулка

$\sqrt{Ra\ 12,5(\sqrt{})}$



A (2:1)

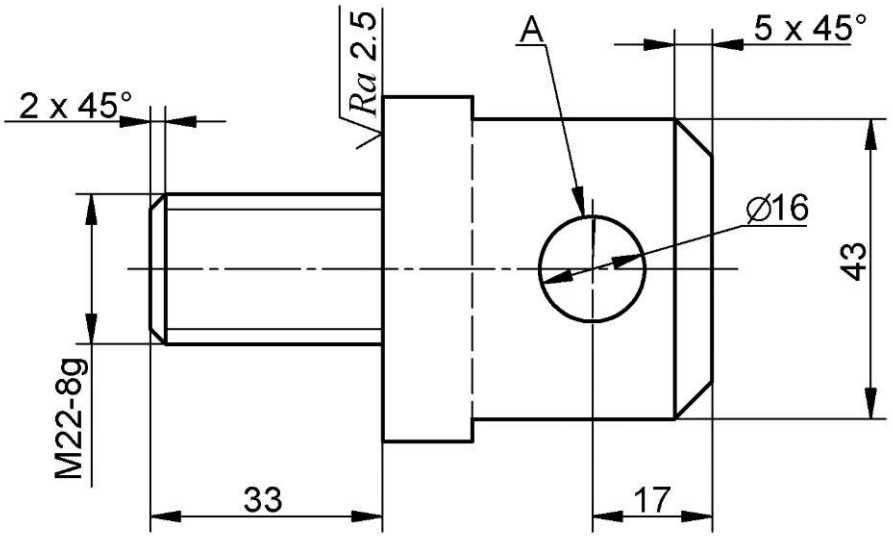


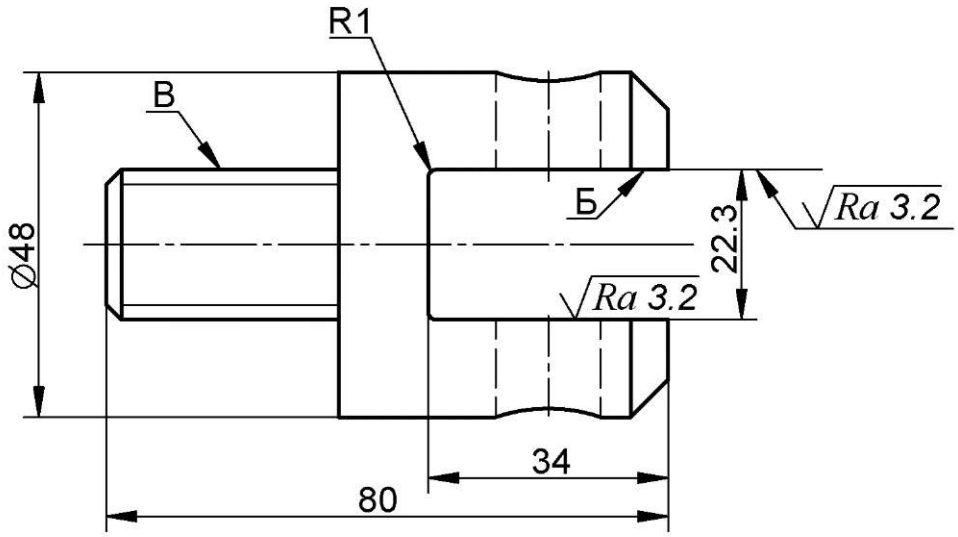


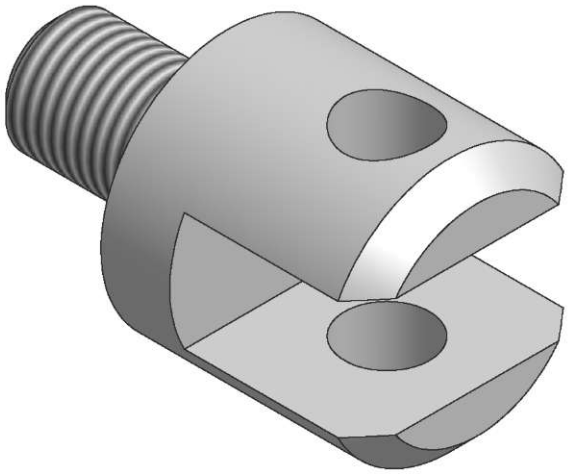
Материал: ЛЦ40Мц3А
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Вилка шарнирная

$\sqrt{Rz\ 20(\sqrt{})}$



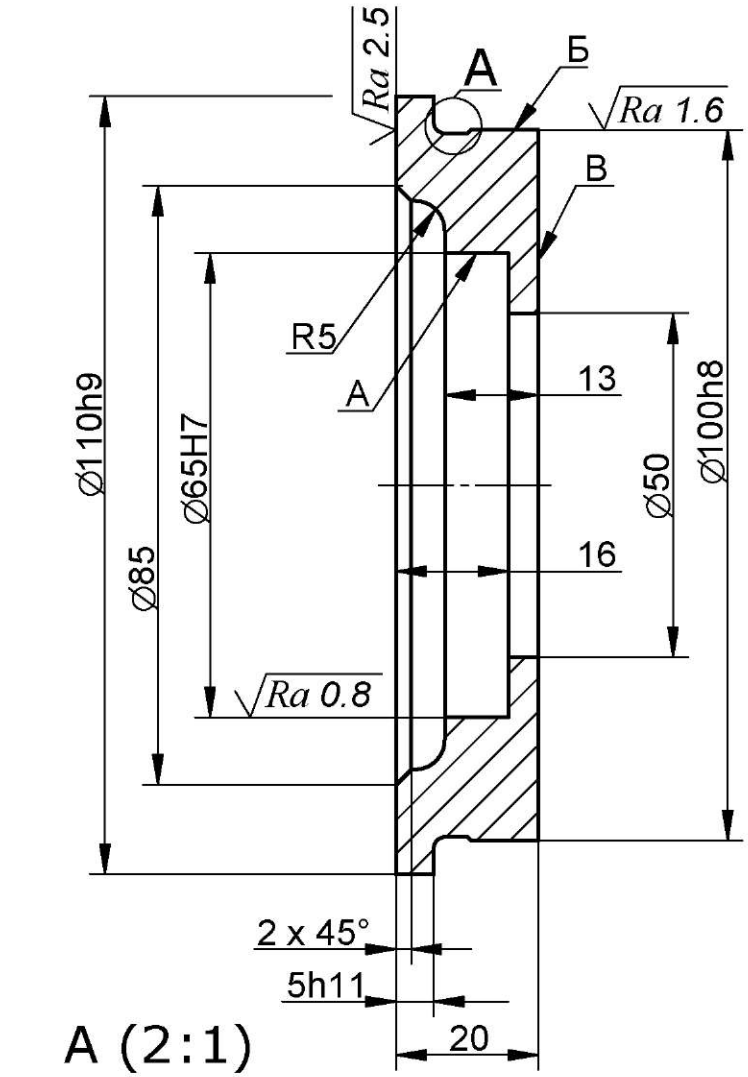




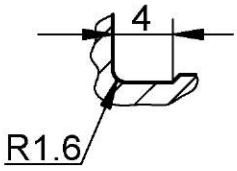
Материал: Сталь 40Х
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

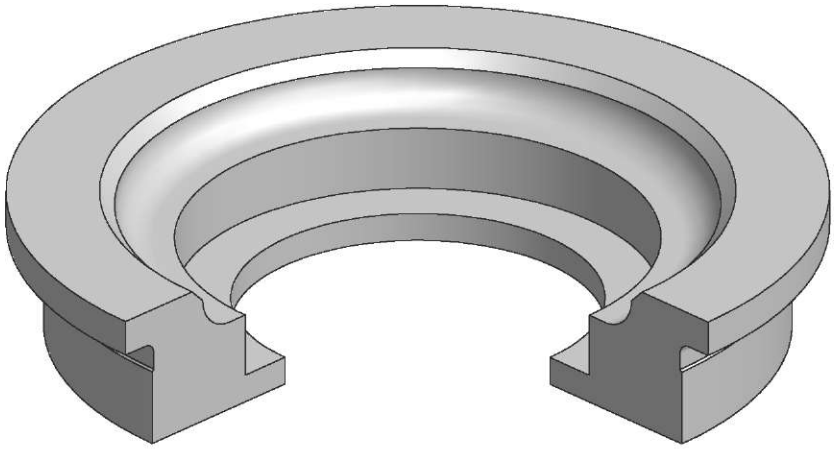
Крышка подшипника

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$



A (2:1)

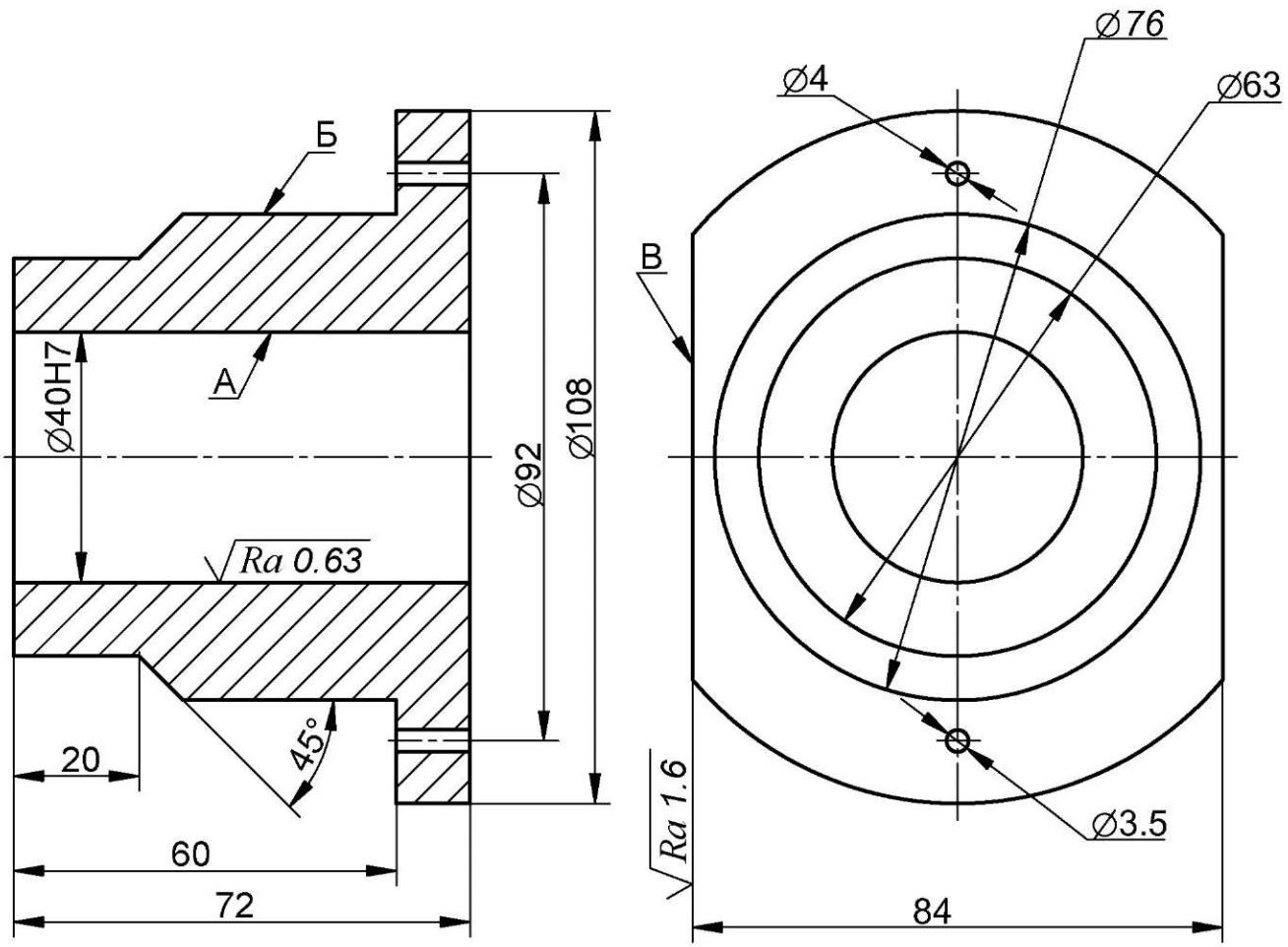


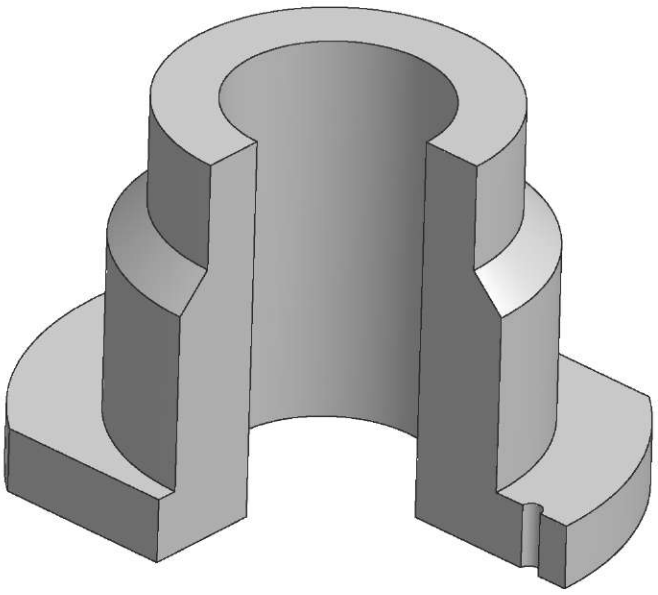


Материал: Сталь 15
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Втулка

$\sqrt{Ra\ 12,5(\sqrt{})}$

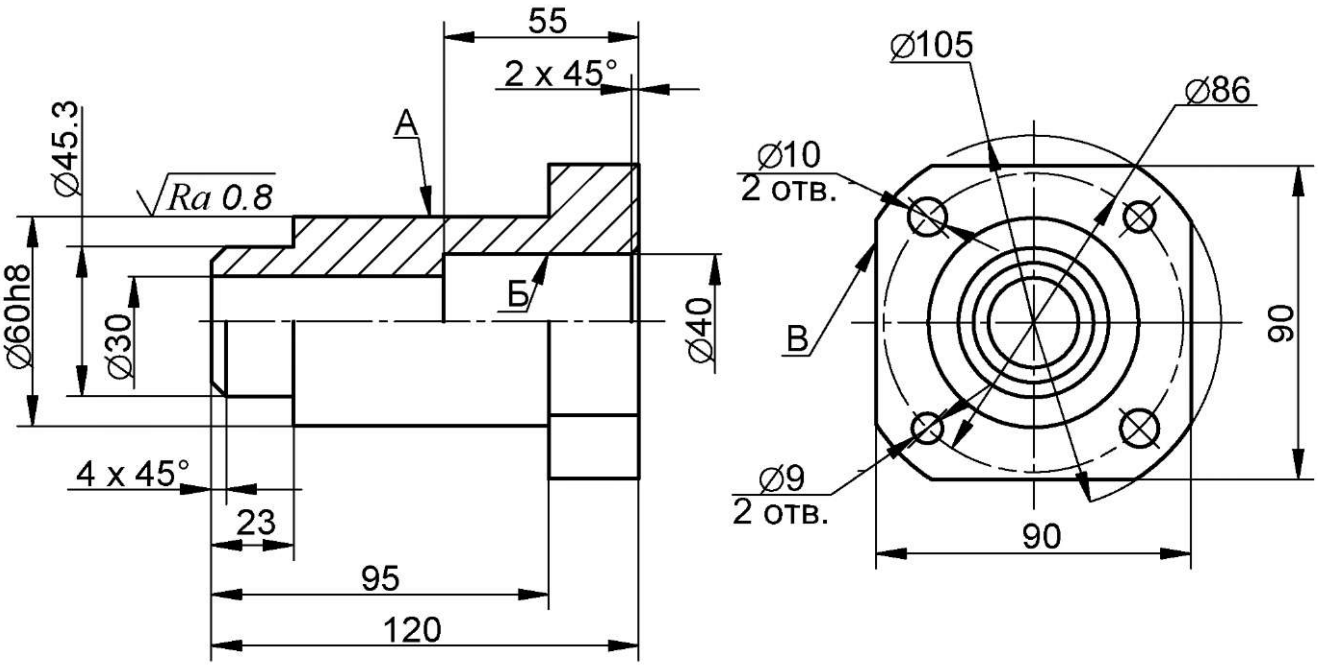


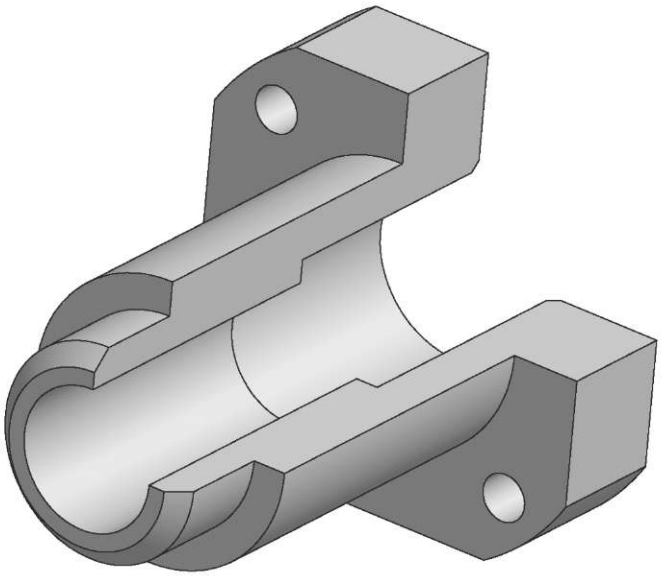


Материал: Сталь 35
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Переходник

$\sqrt{Ra\ 12,5(\sqrt{})}$



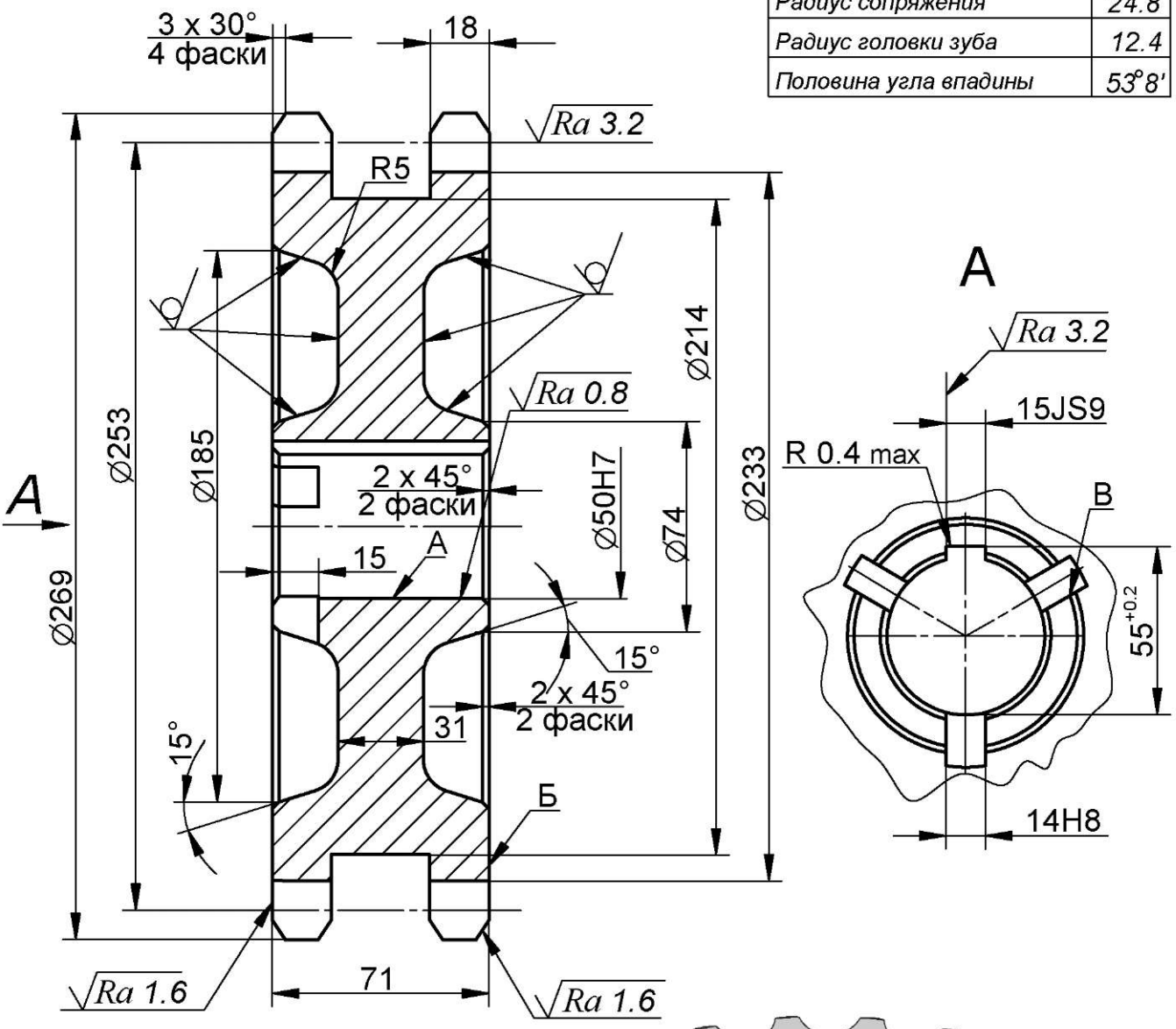


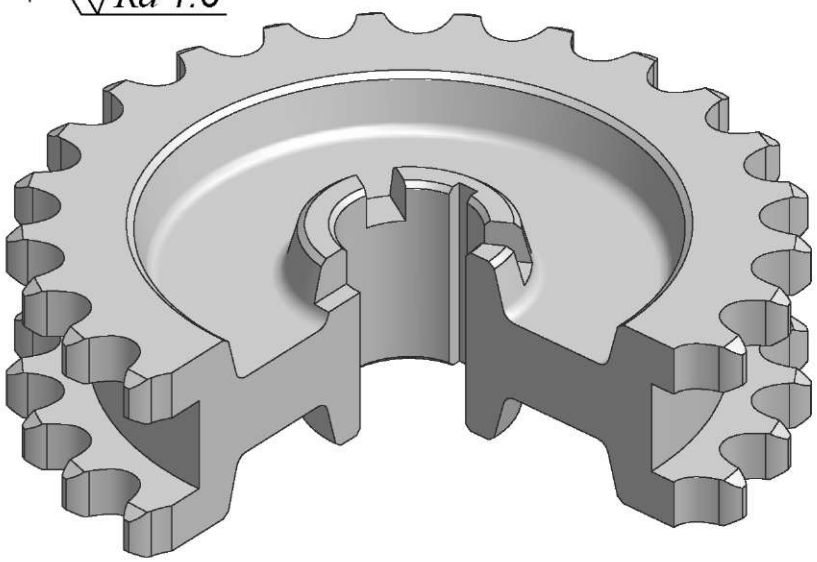
Материал: Сталь 20
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Звездочка двухрядная

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

Число зубьев	25
Класс точности	2
Радиус впадины	9.6
Радиус сопряжения	24.8
Радиус головки зуба	12.4
Половина угла впадины	53°8'



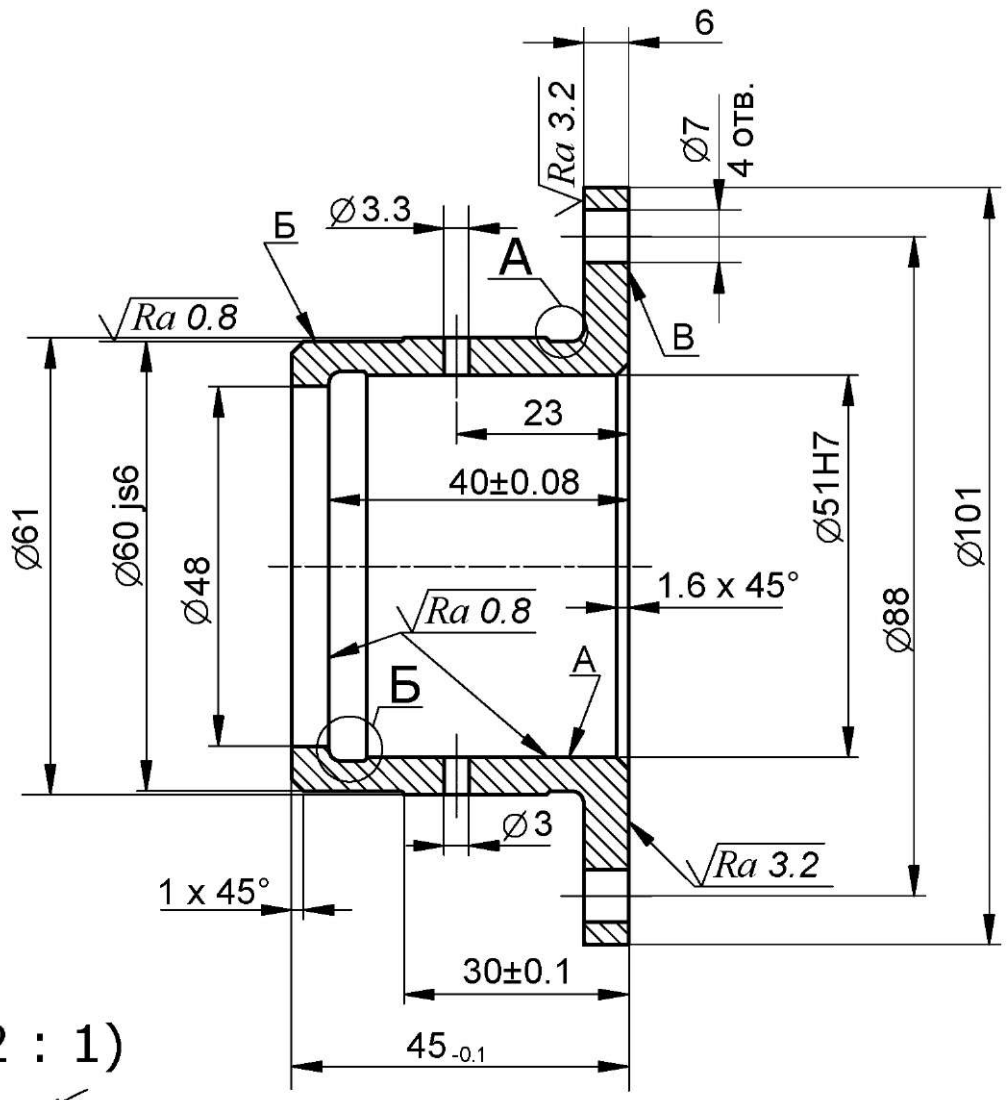


Материал: Сталь 45

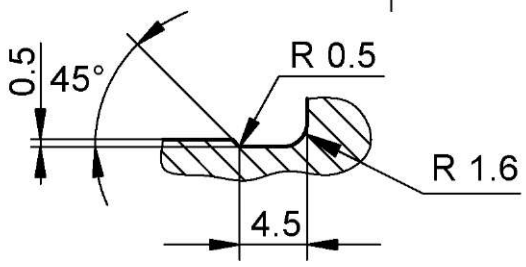
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

Стакан

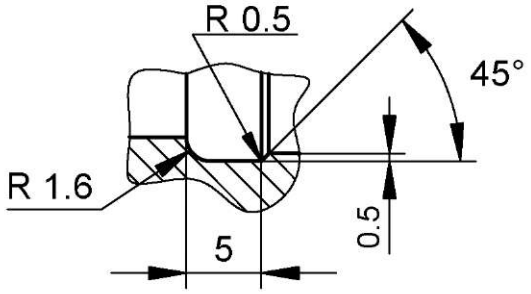
$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

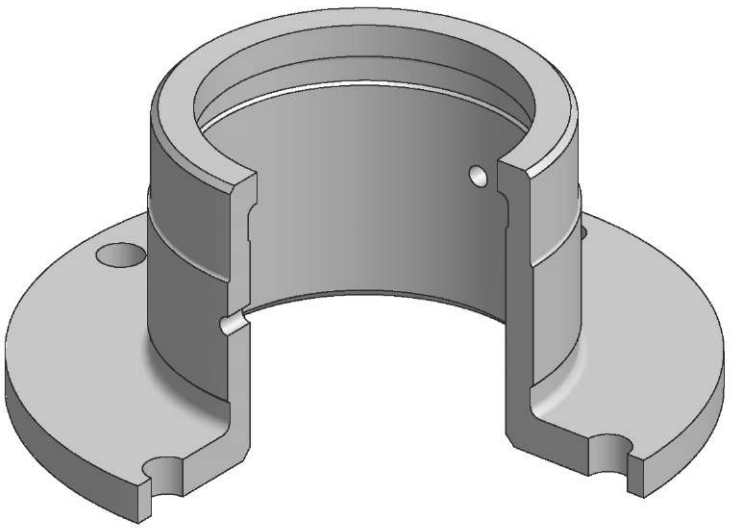


А (2 : 1)



Б (2 : 1)



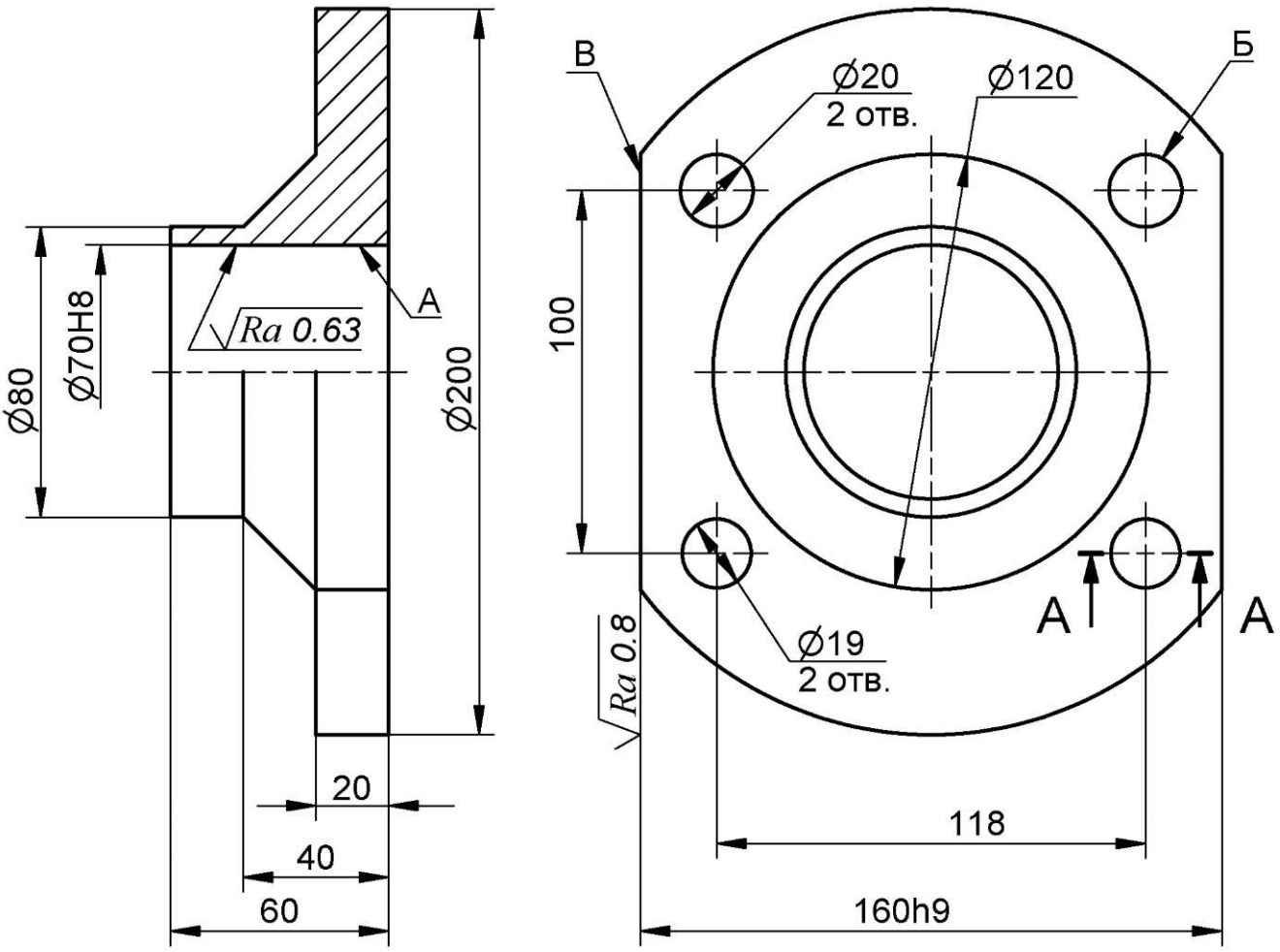


Материал: Сталь 35

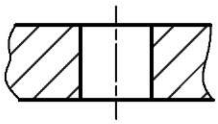
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

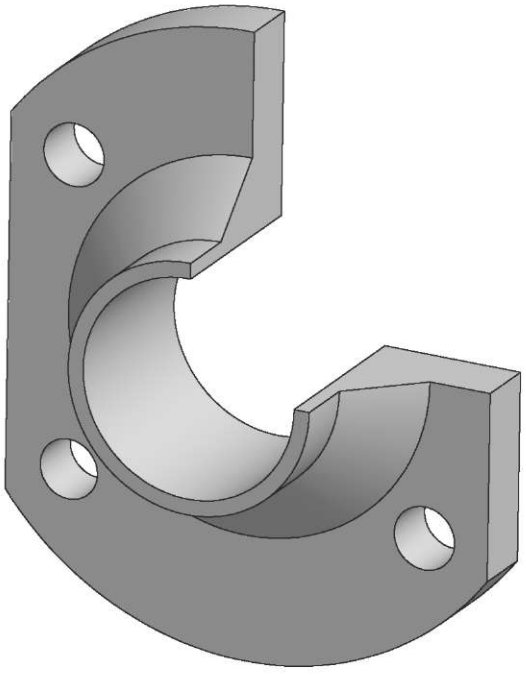
Фланец

$\sqrt{Ra\ 12.5(\sqrt{})}$



A-A

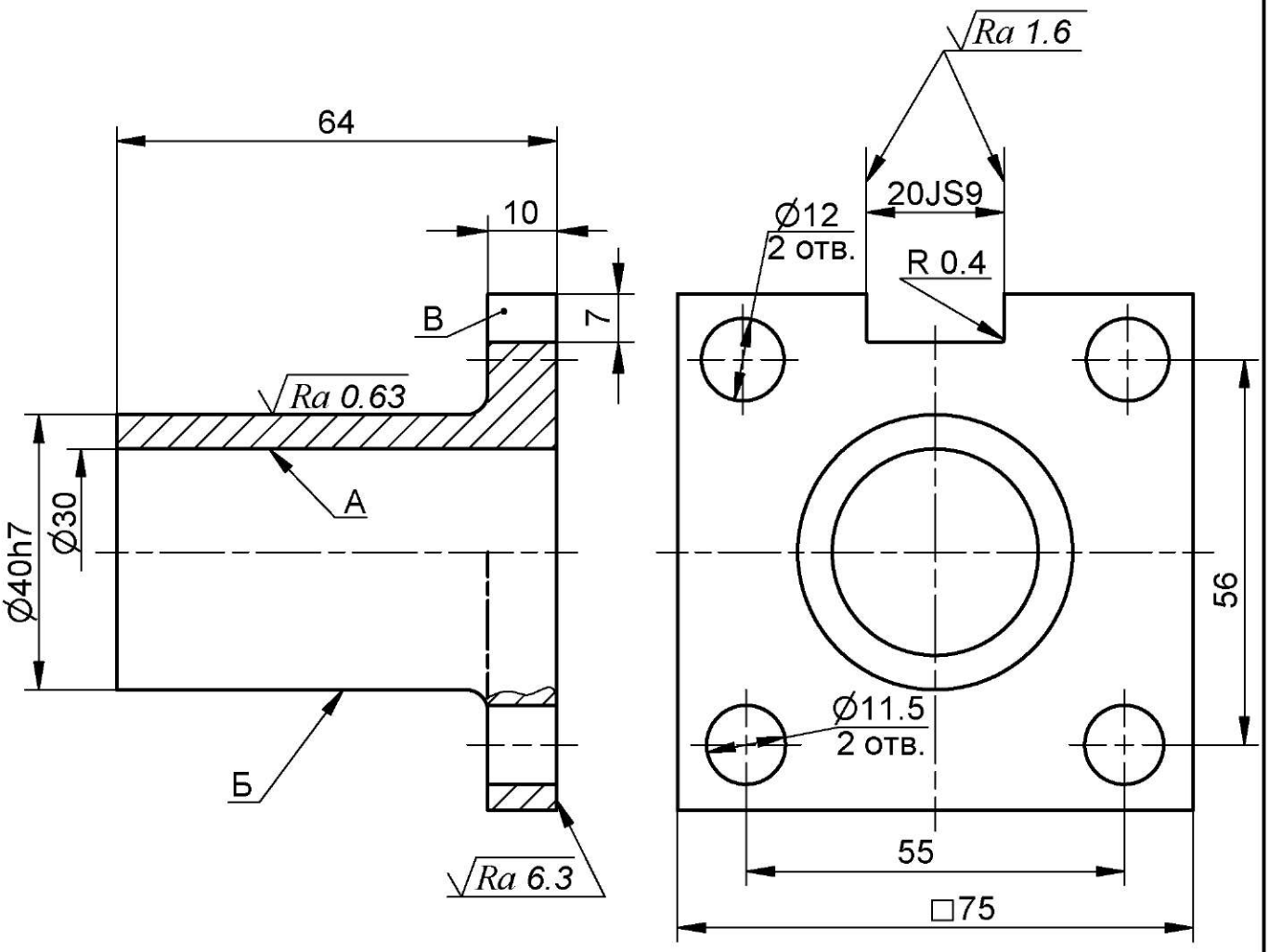


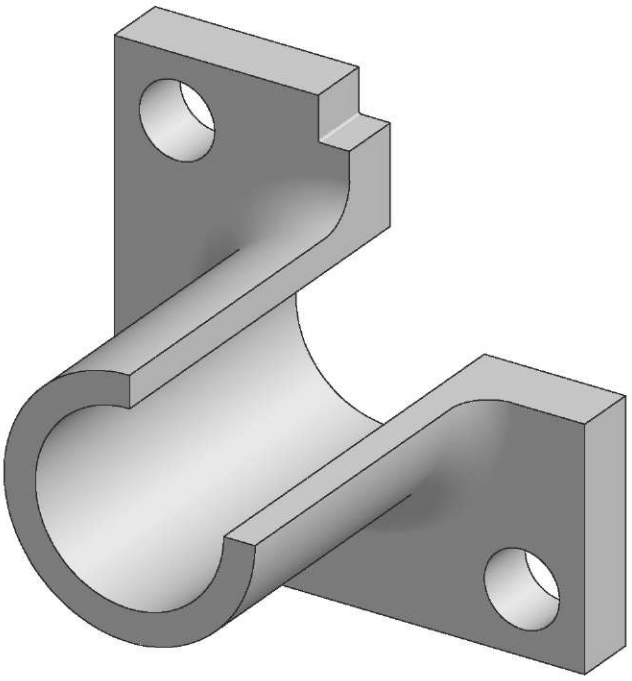


Материал: Сталь 12Х18Н10Т
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Втулка

$\sqrt{Ra\ 12.5(\sqrt{})}$



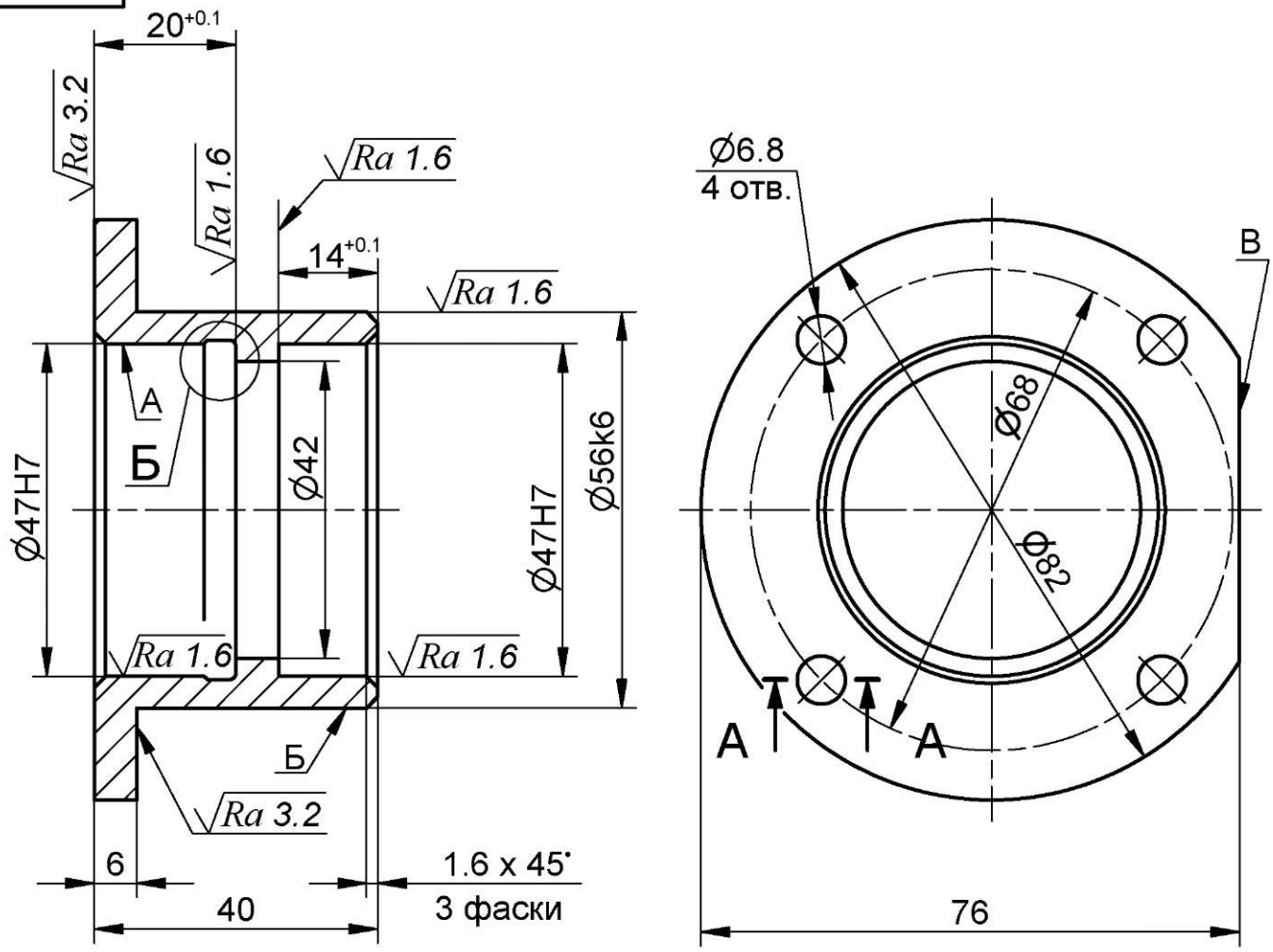


Материал: Сталь 45

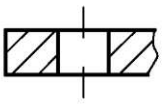
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Стакан

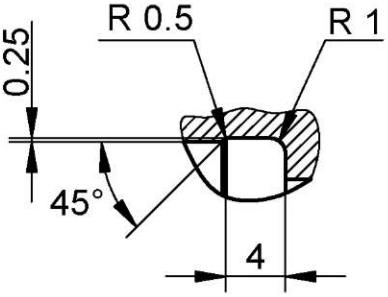
$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

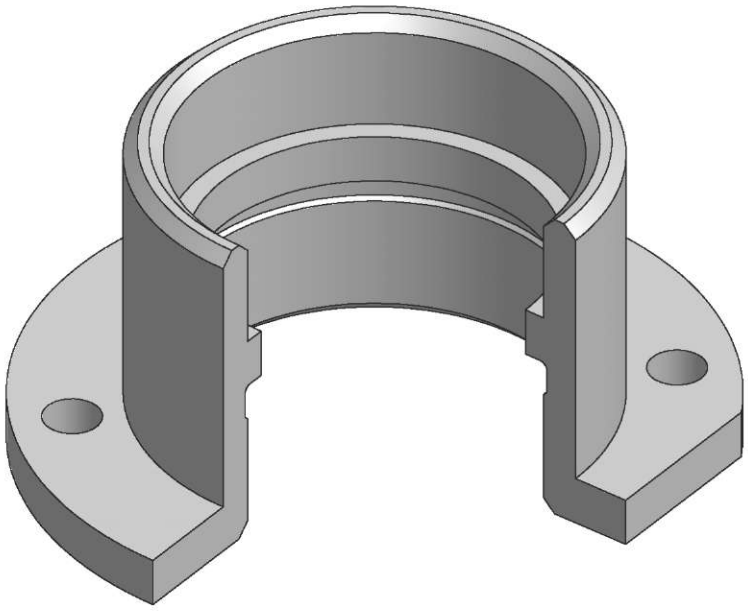


А-А



Б (2:1)

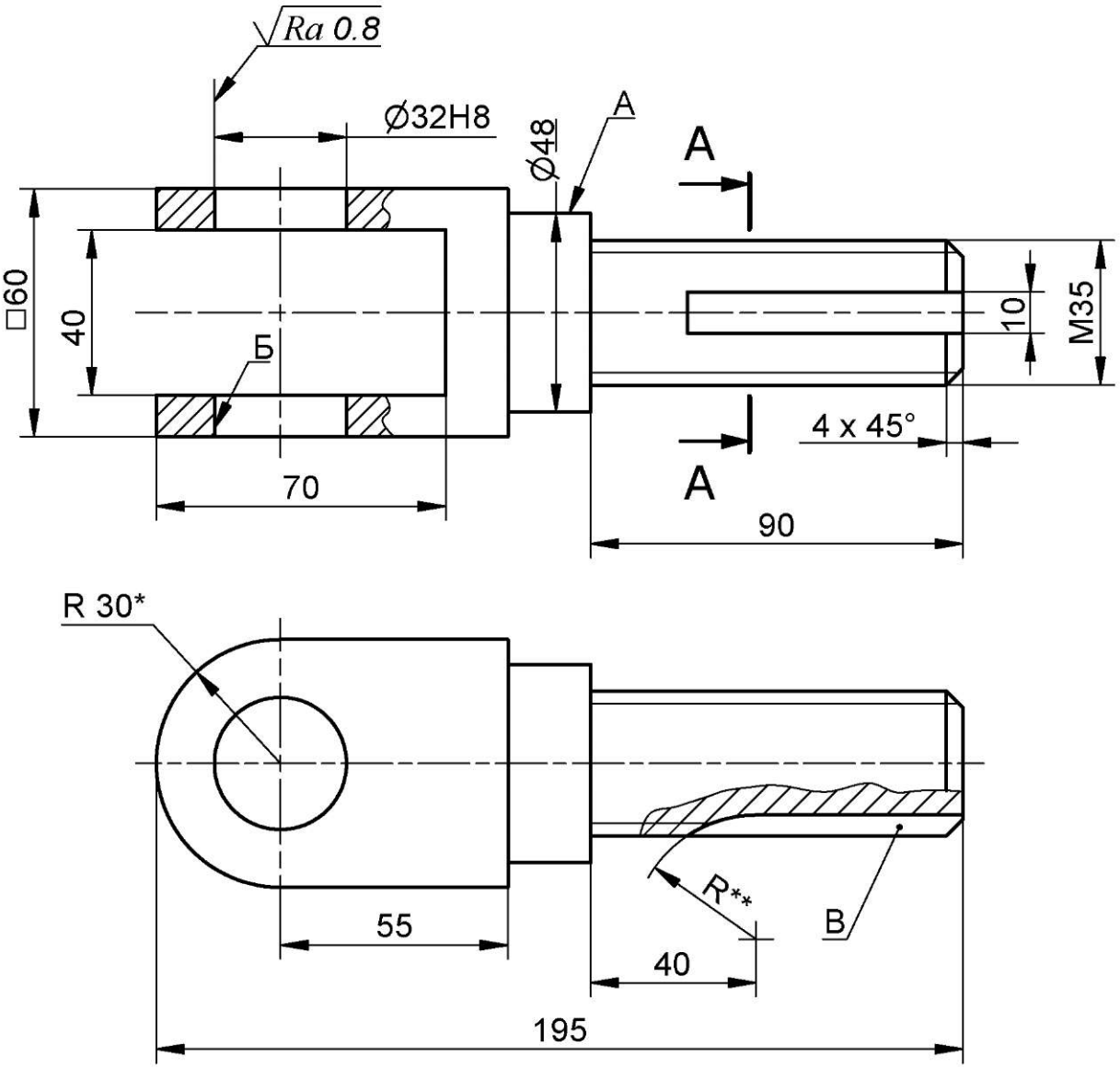


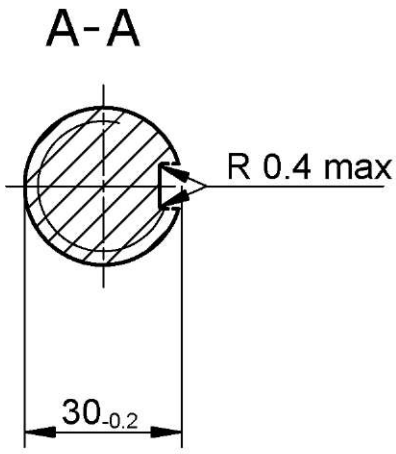


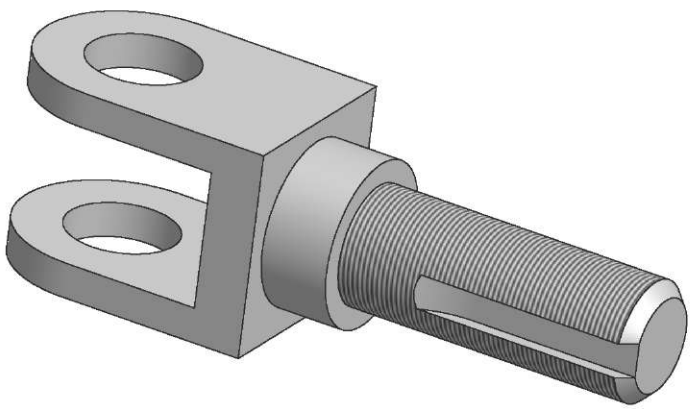
Материал: СЧ 15 (Сталь 40)
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Вилка

$\sqrt{Ra\ 12.5(\sqrt{})}$







Материал: Сталь 45

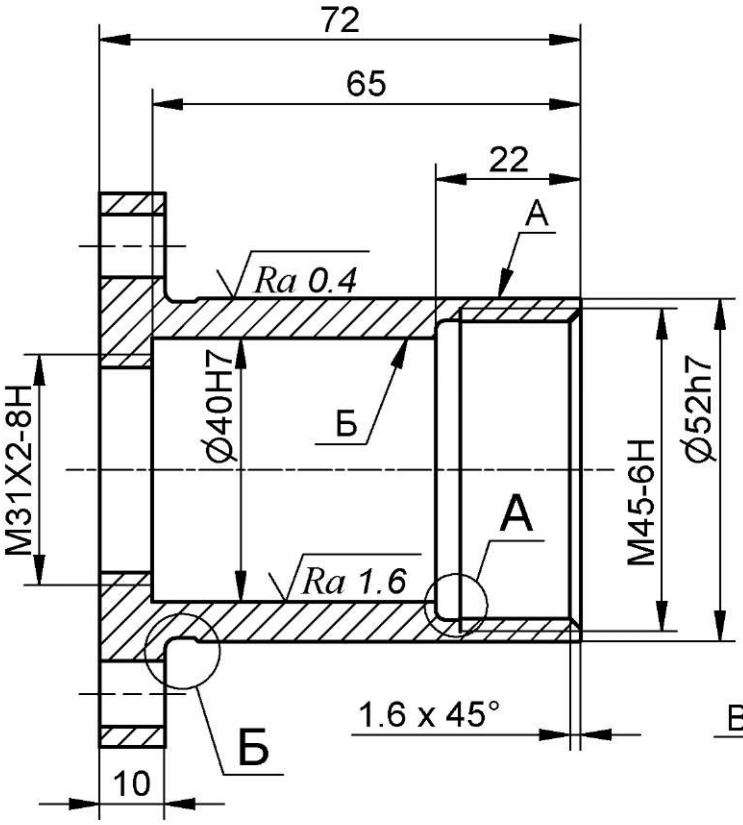
** Размер для справок*

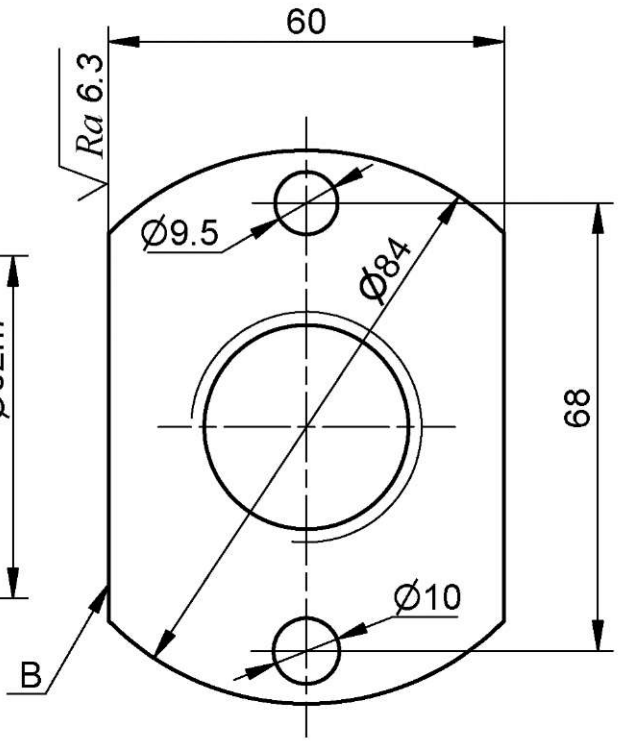
*** Размер обеспечить инструментом*

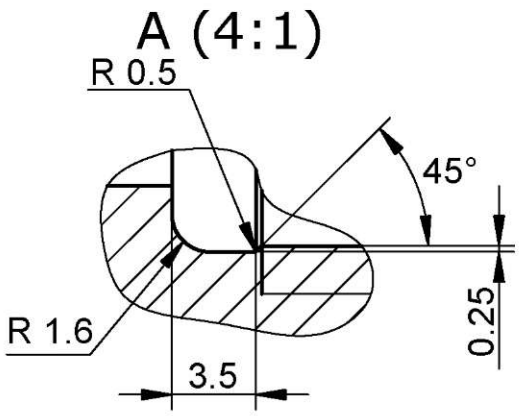
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

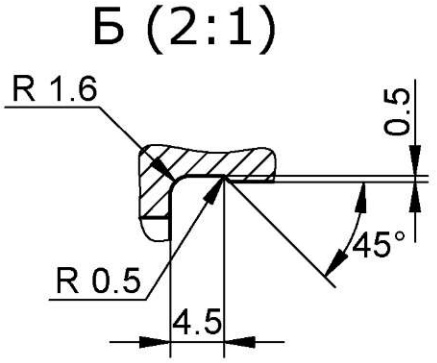
Корпус

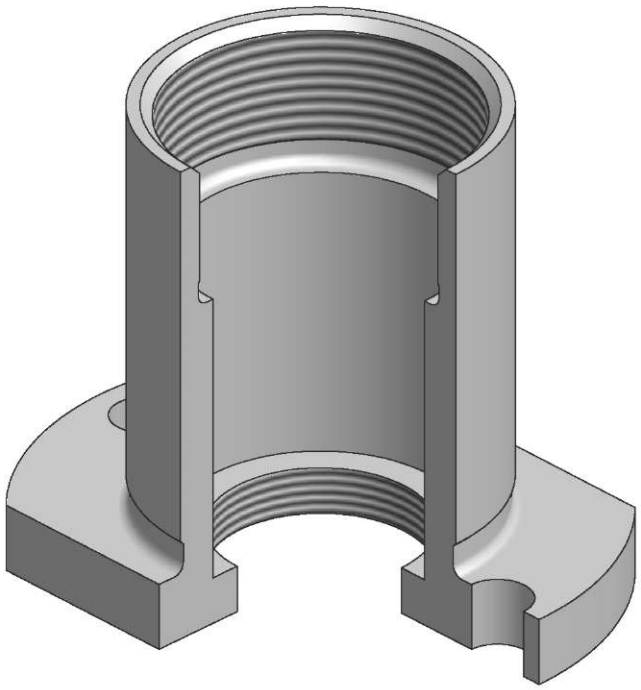
$\sqrt{Ra\ 12.5(\sqrt{})}$







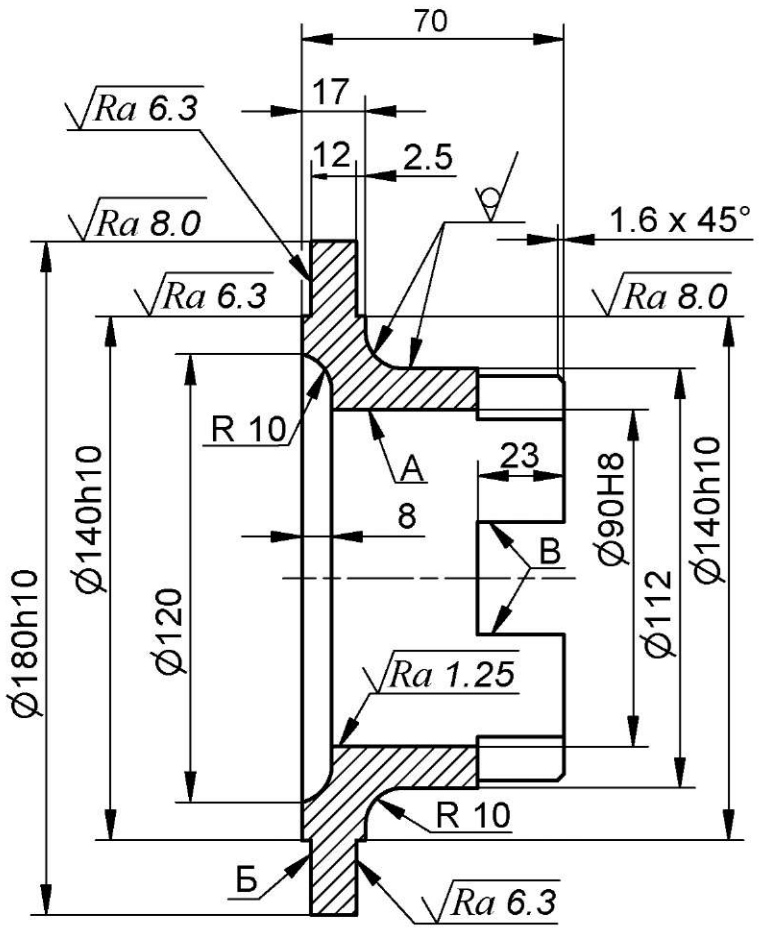


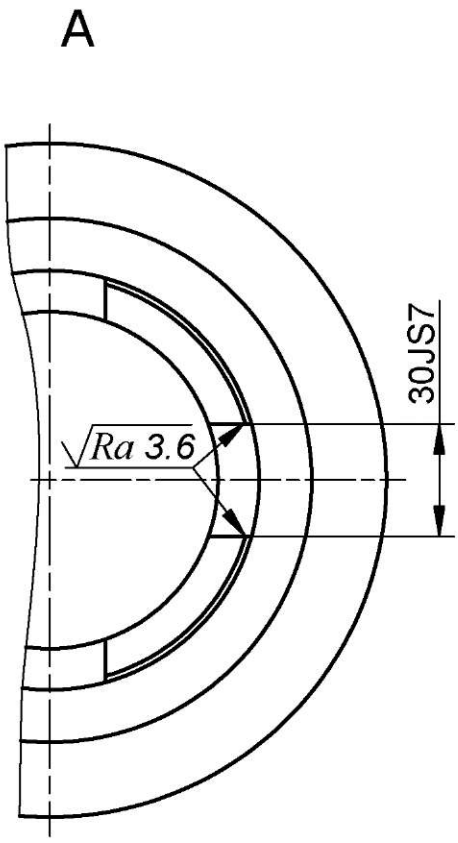


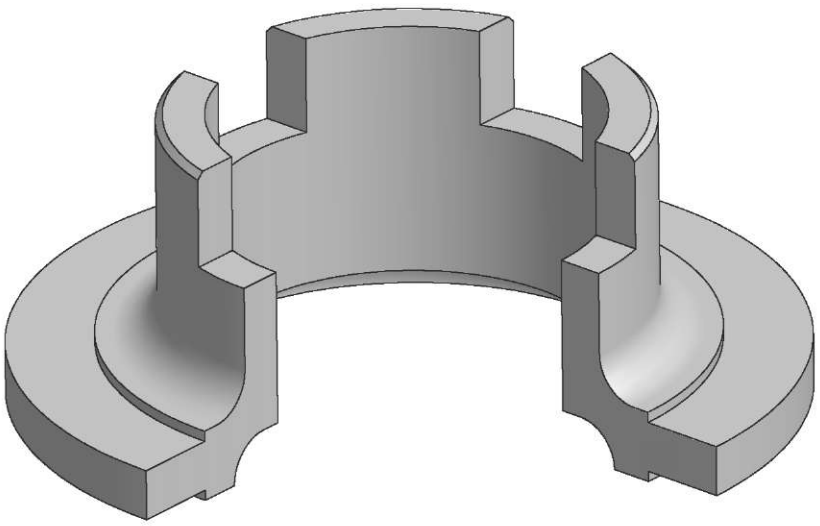
Материал: Сталь 09Х16Н4Б
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ±IT12/2

Муфта

$\sqrt{Ra\ 12.5(\sqrt{})}$

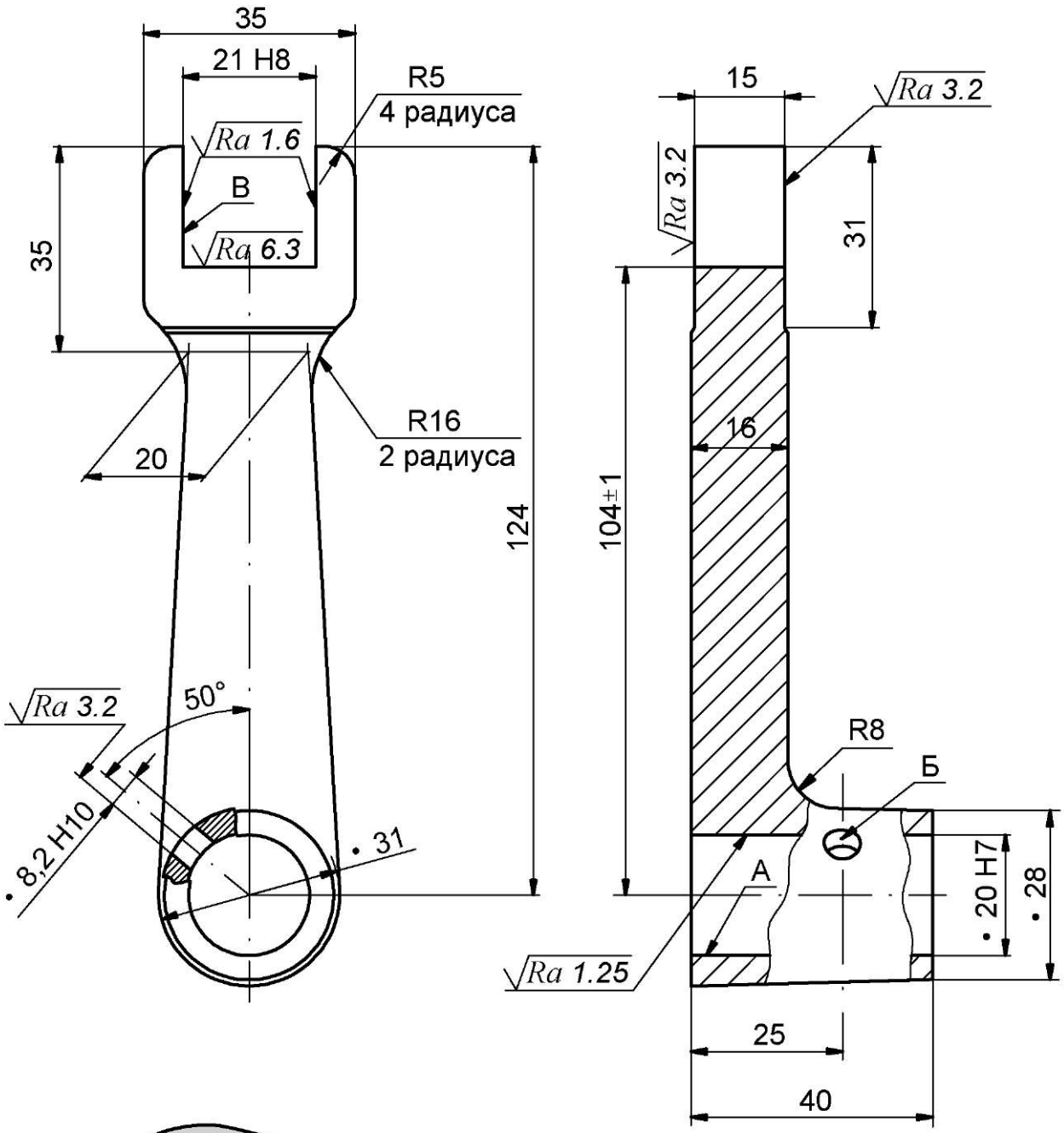


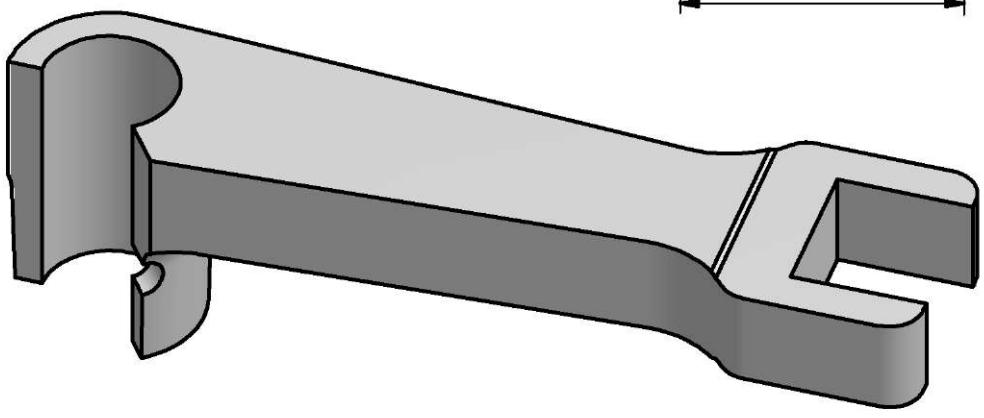




Материал: Сталь 40Х (Чугун ВЧ 45)
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H14, h14, ±IT14/2

Вилка

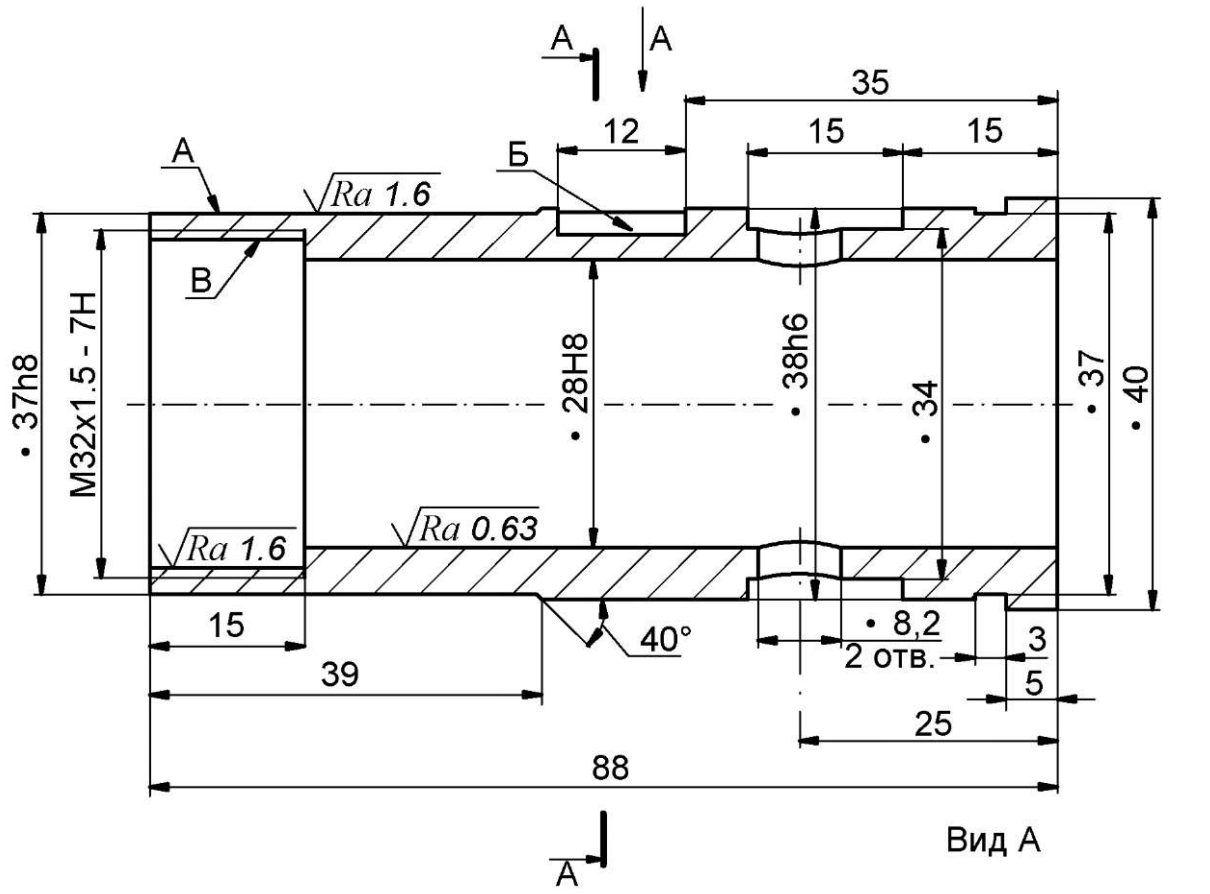


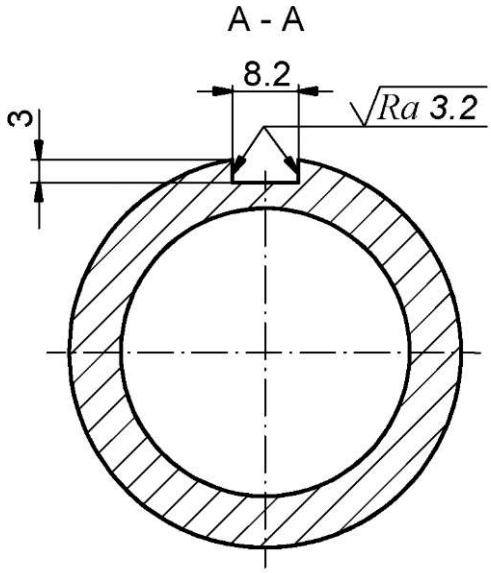


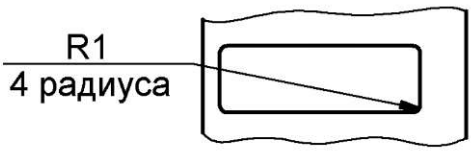
Материал: *Сталь 45*
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

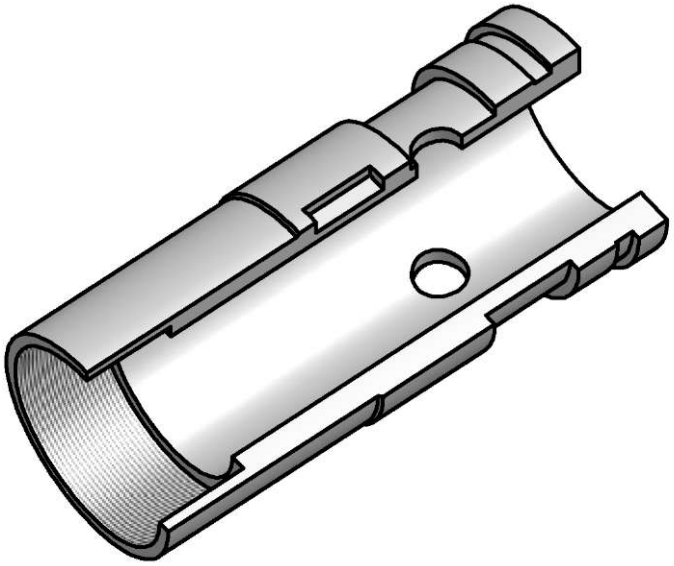
Втулка

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$





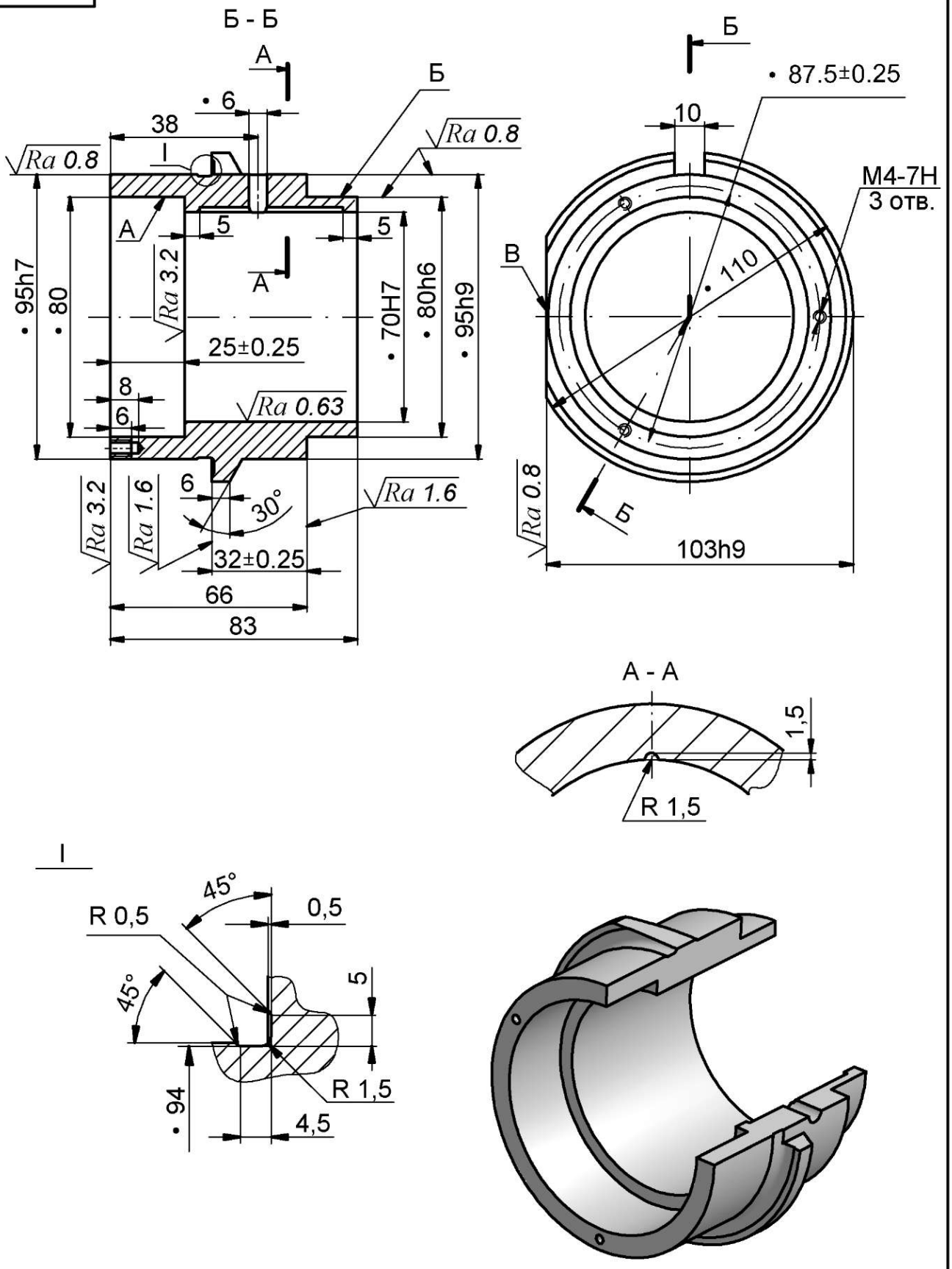




Материал: *Сталь 40Х*
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

Втулка опорная

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

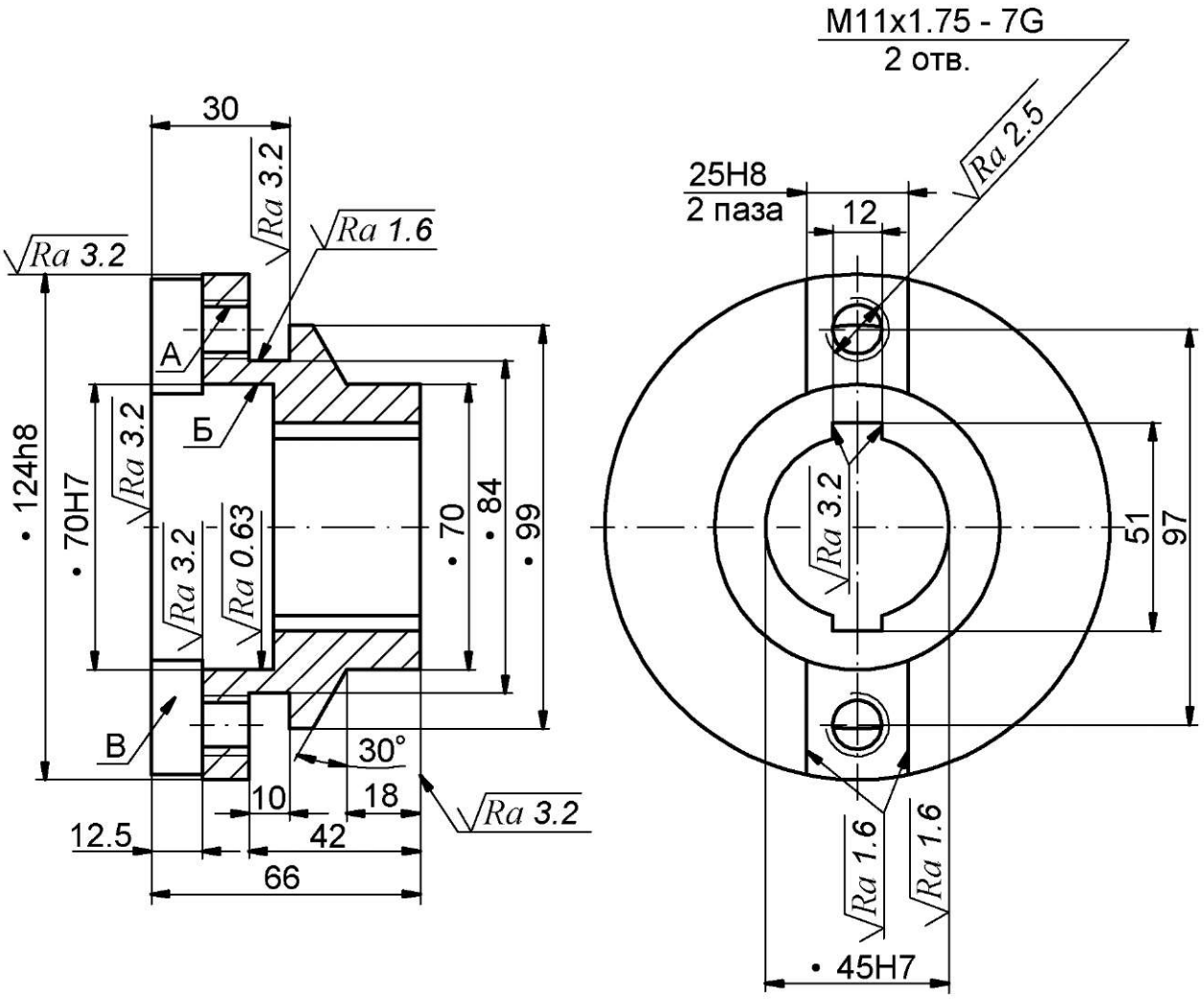


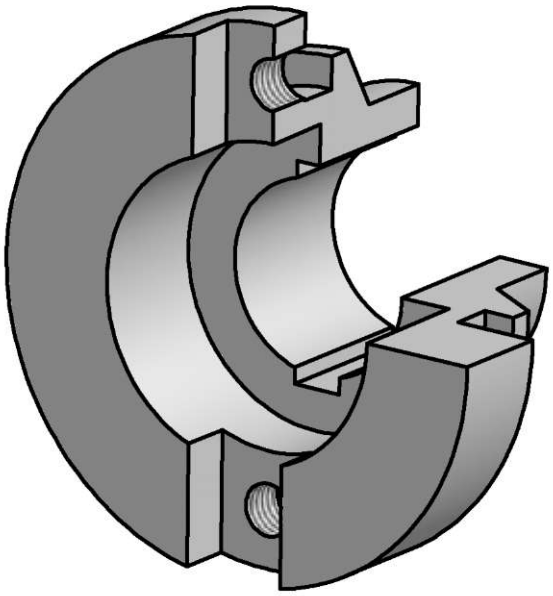
Материал: *Сталь 45*

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

Муфта

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

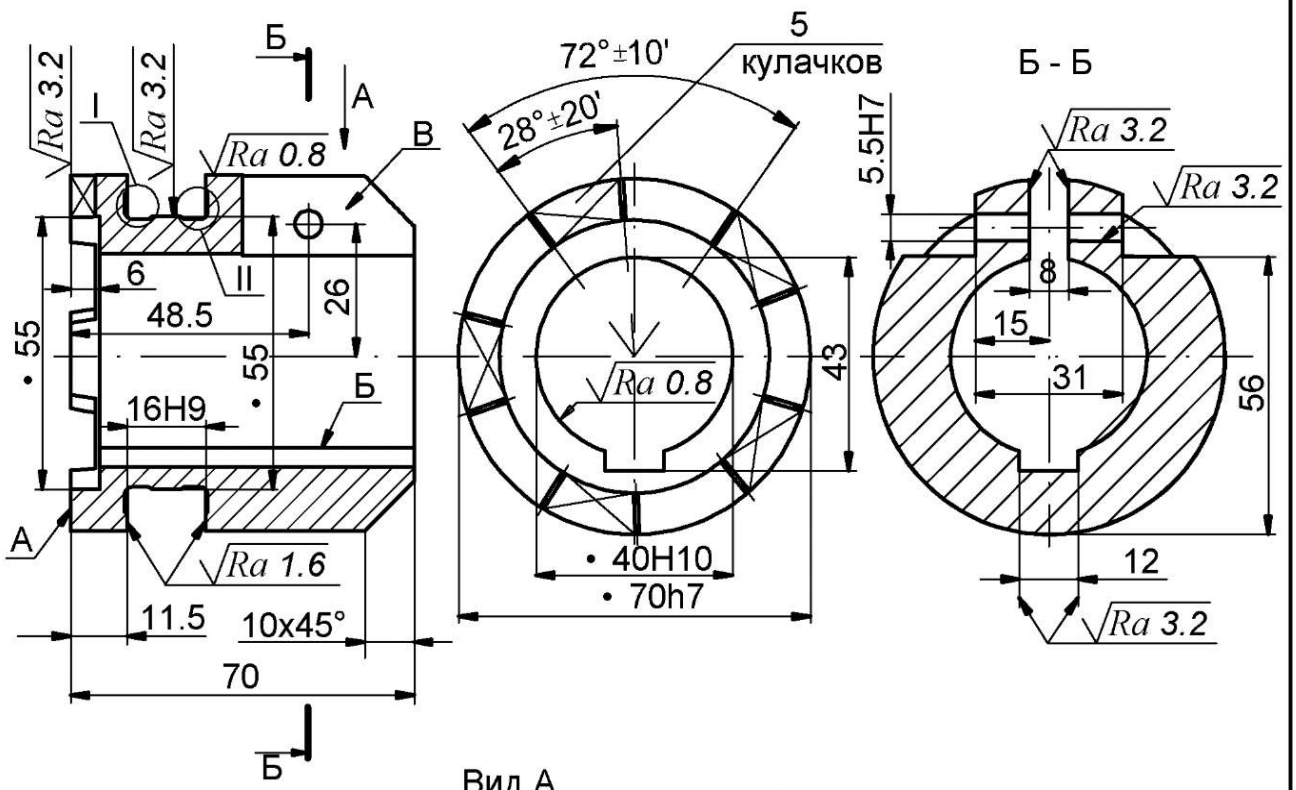


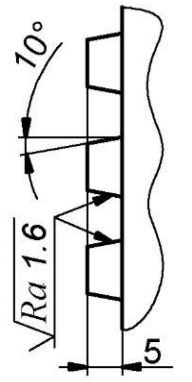


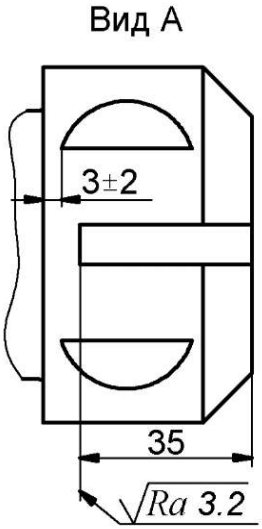
Материал: *Сталь 45*
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

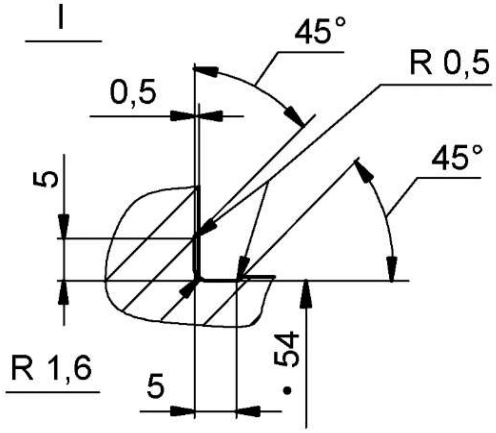
Муфта кулачковая

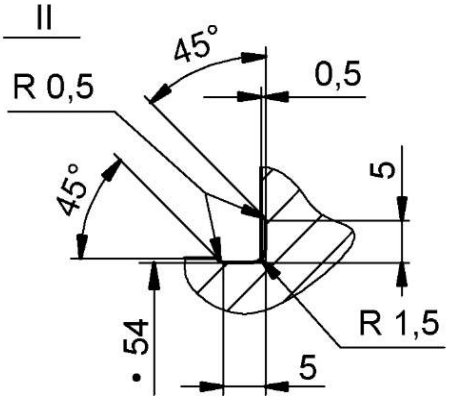
$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

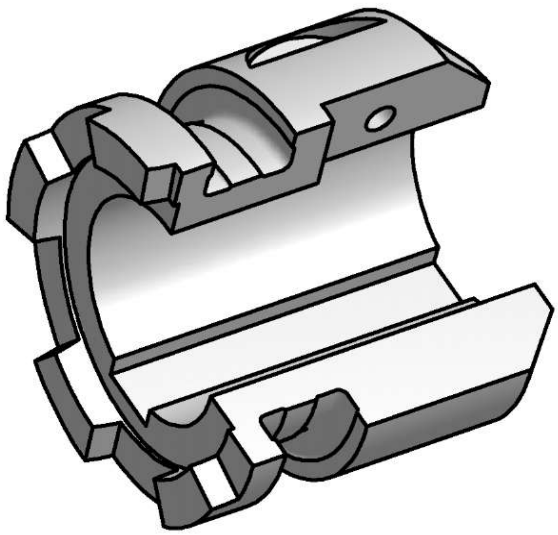










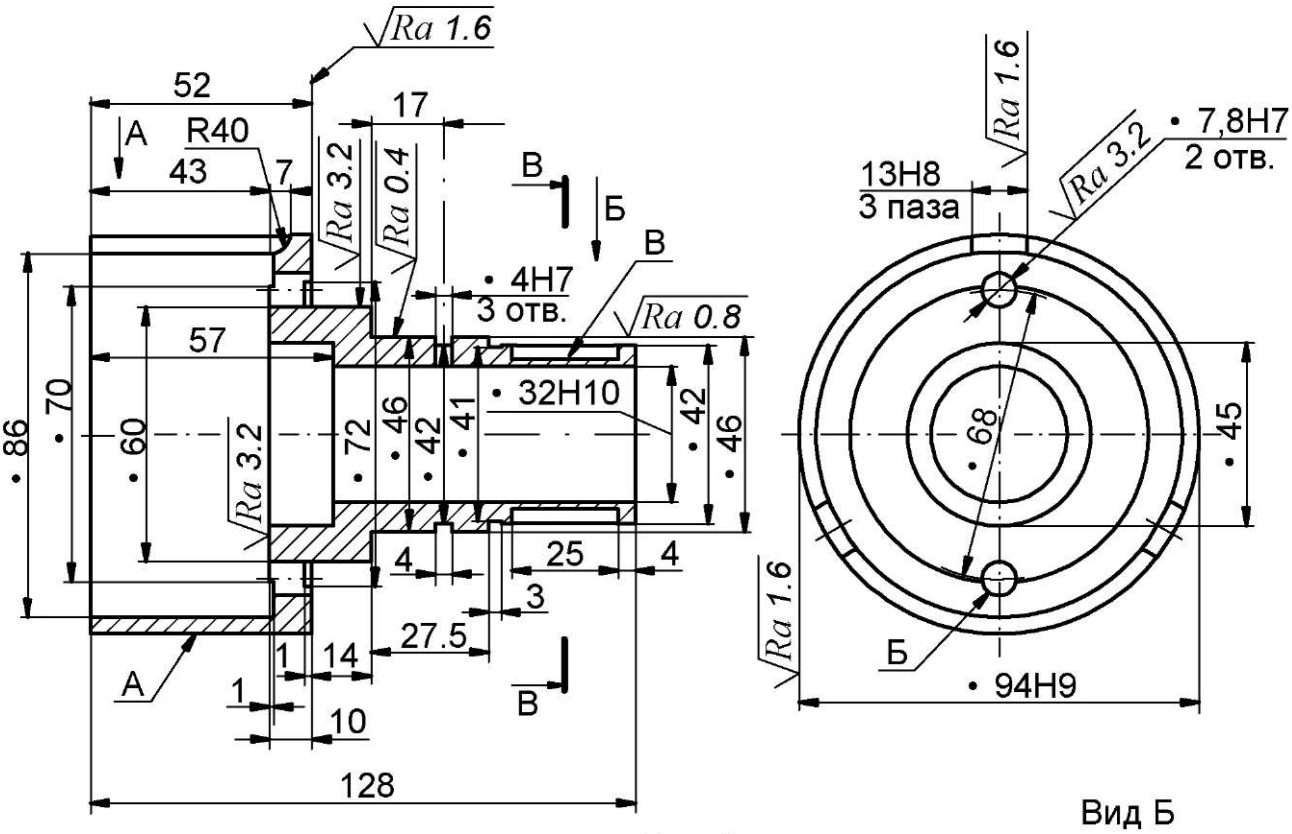


Материал: *Сталь 20Х*

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

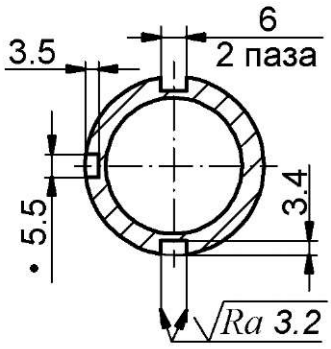
Муфта фрикционная

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$

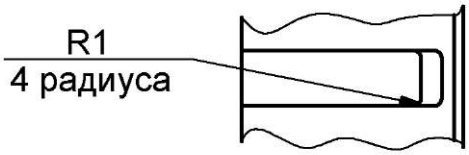


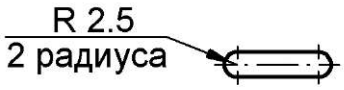
Вид Б

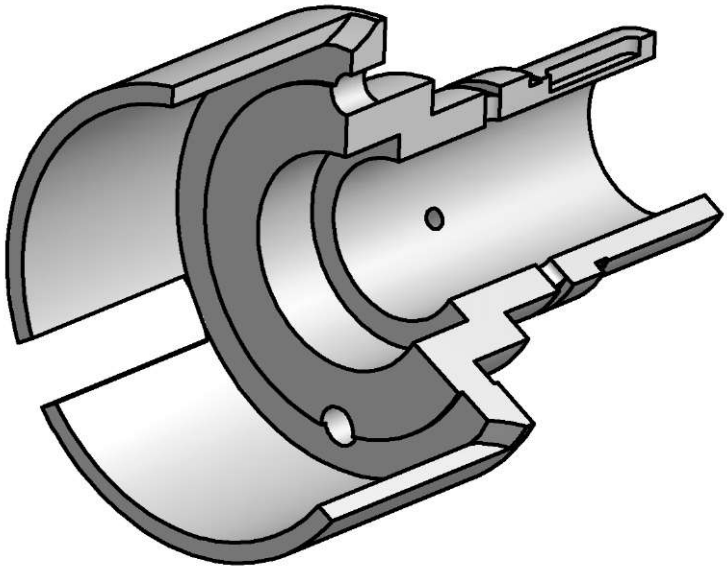
В - В



Вид А





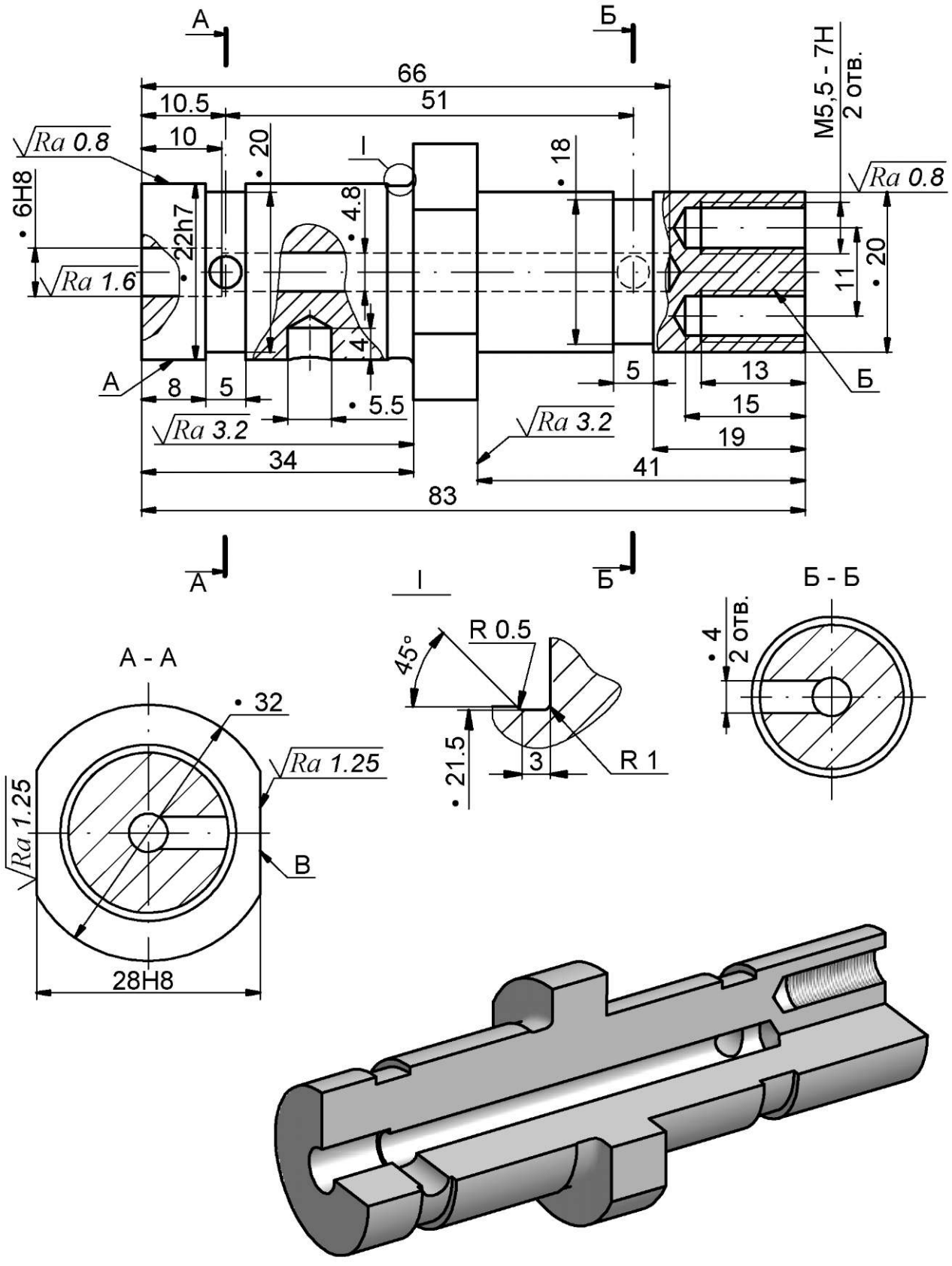


Материал: *Сталь 20Х*

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

Палец

$\sqrt{Ra\ 6.3(\sqrt{})}$



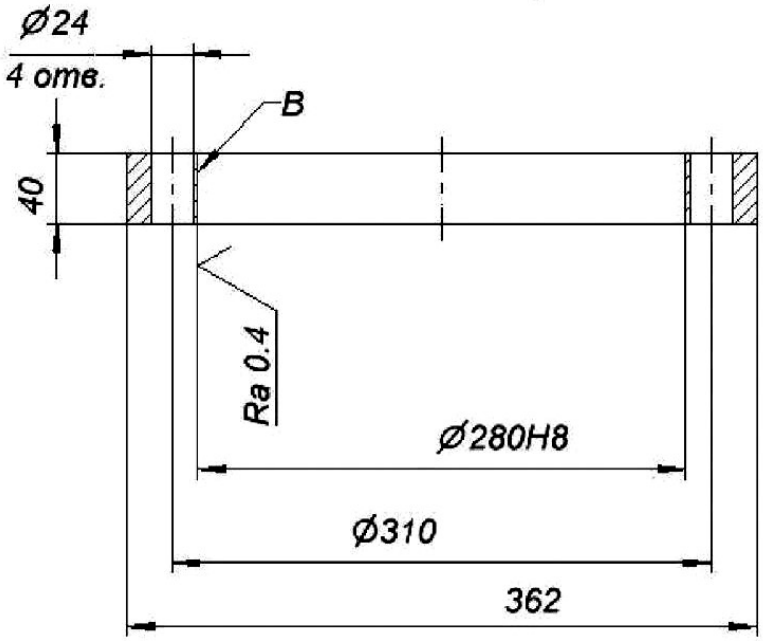
Материал: *Сталь 20Х*

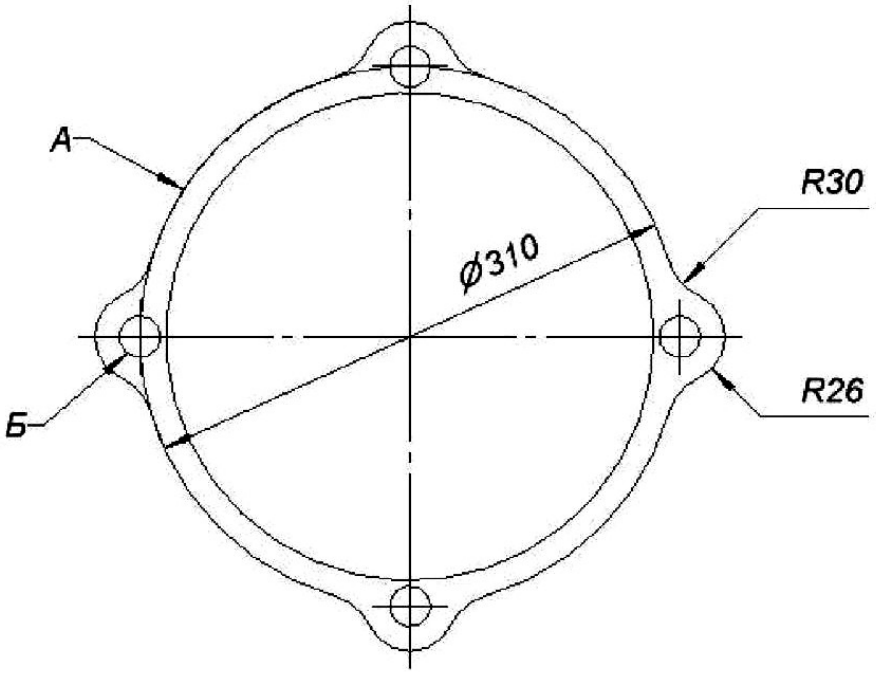
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: *H12, h12, ± IT12/2*

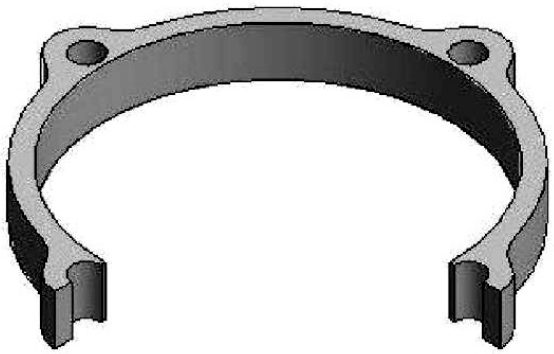
35

Фланец

√Ra12.5(√)





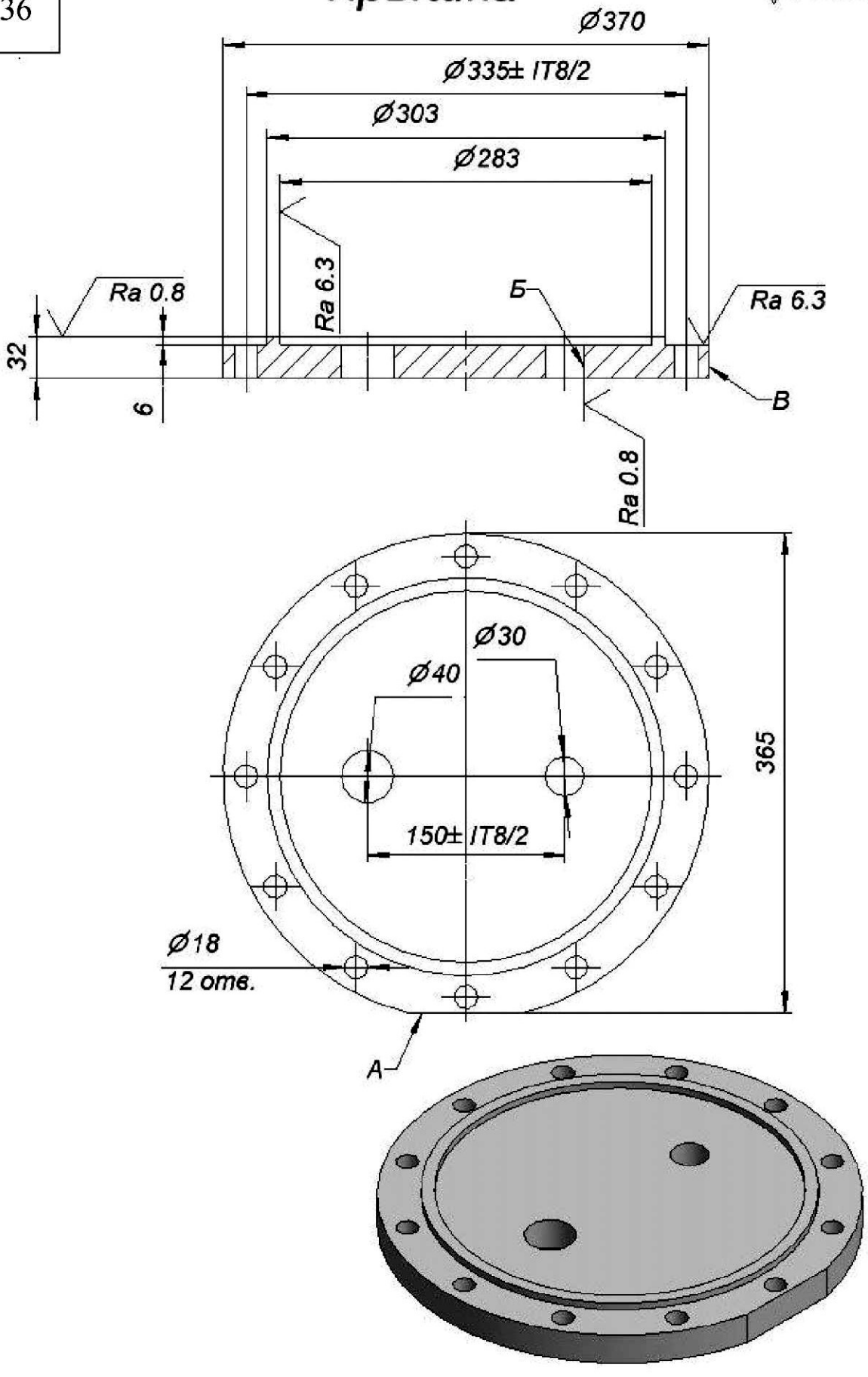


Материал: Сталь 12Х18Н10Т

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Крышка

√Ra12.5(√)



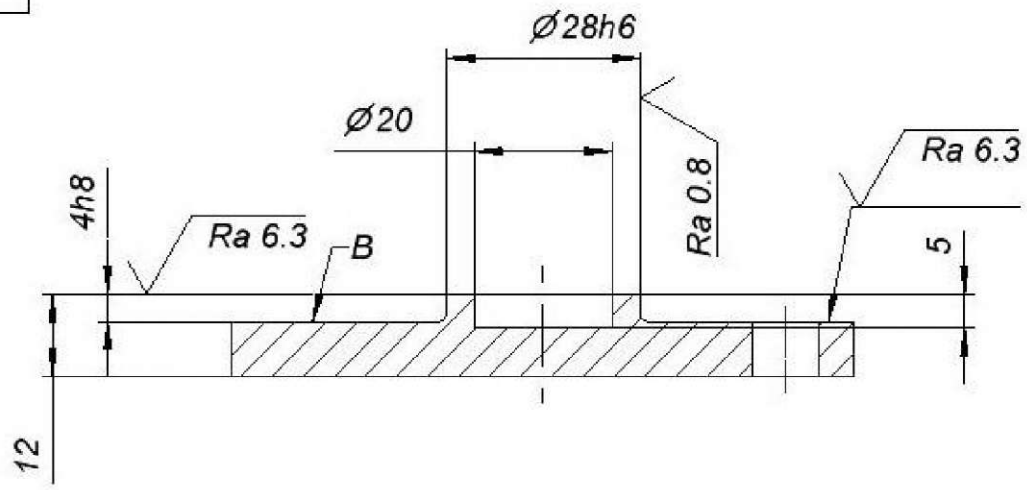
Материал: Д16Т

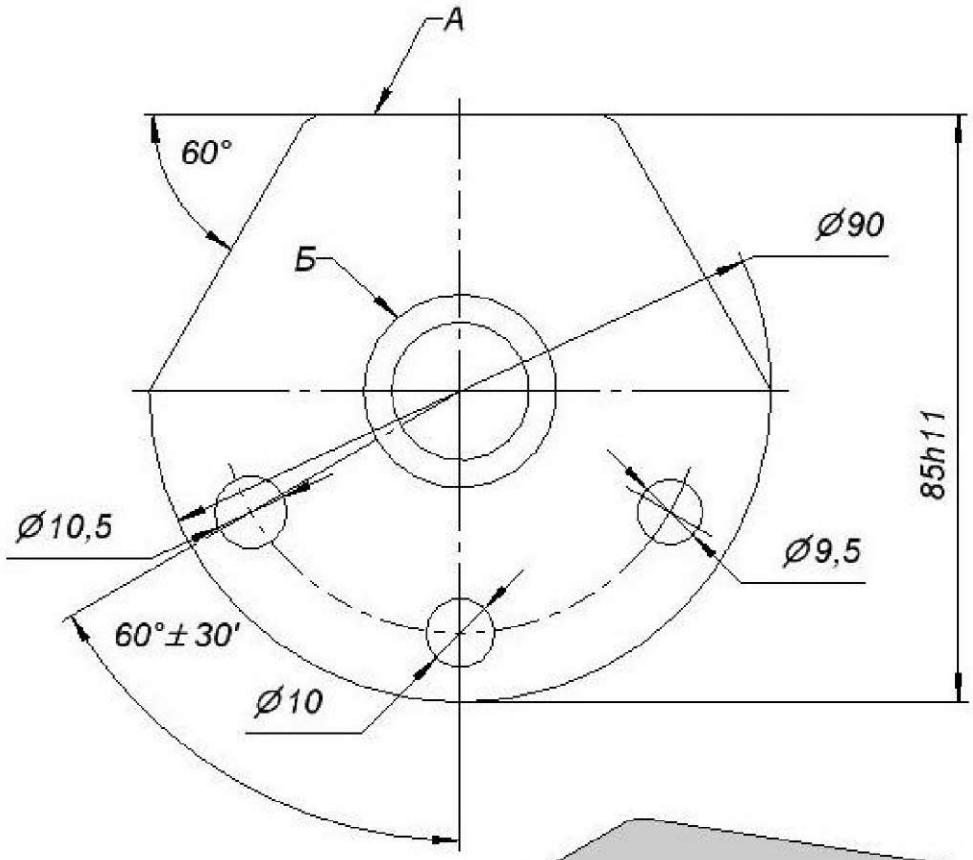
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

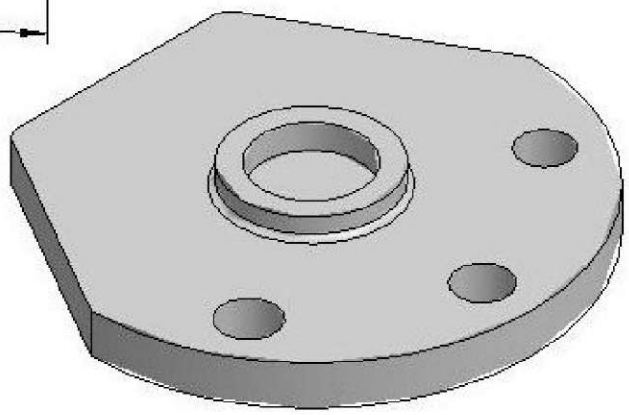
37

Крышка

√Ra12.5(√)







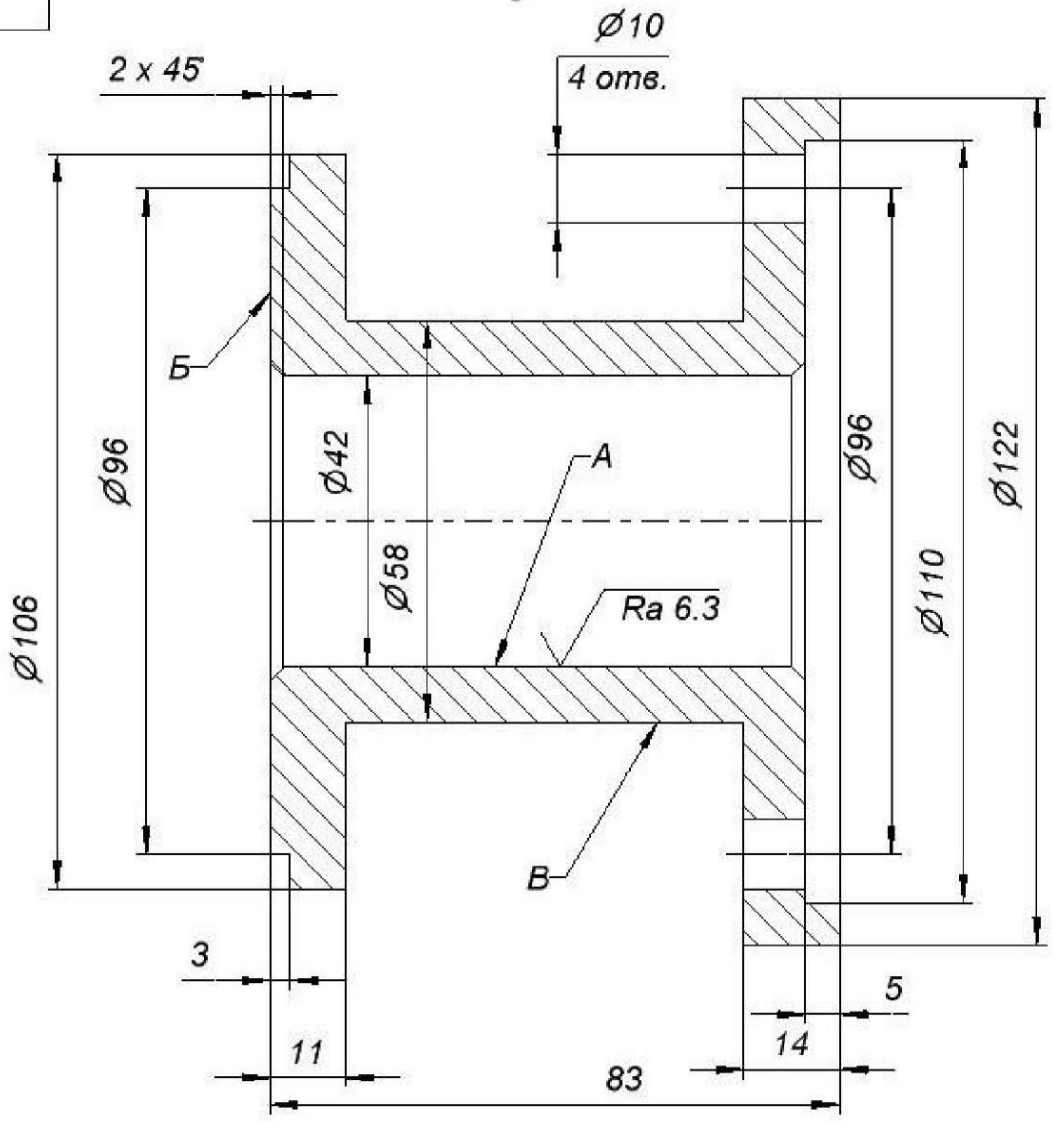
Материал: Сталь 12Х18Н10Т

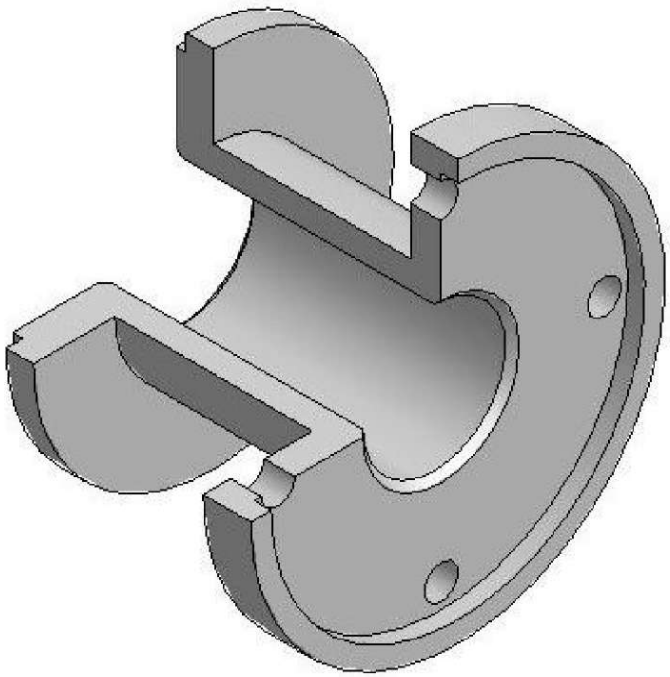
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

38

Втулка

√Ra12.5(√)





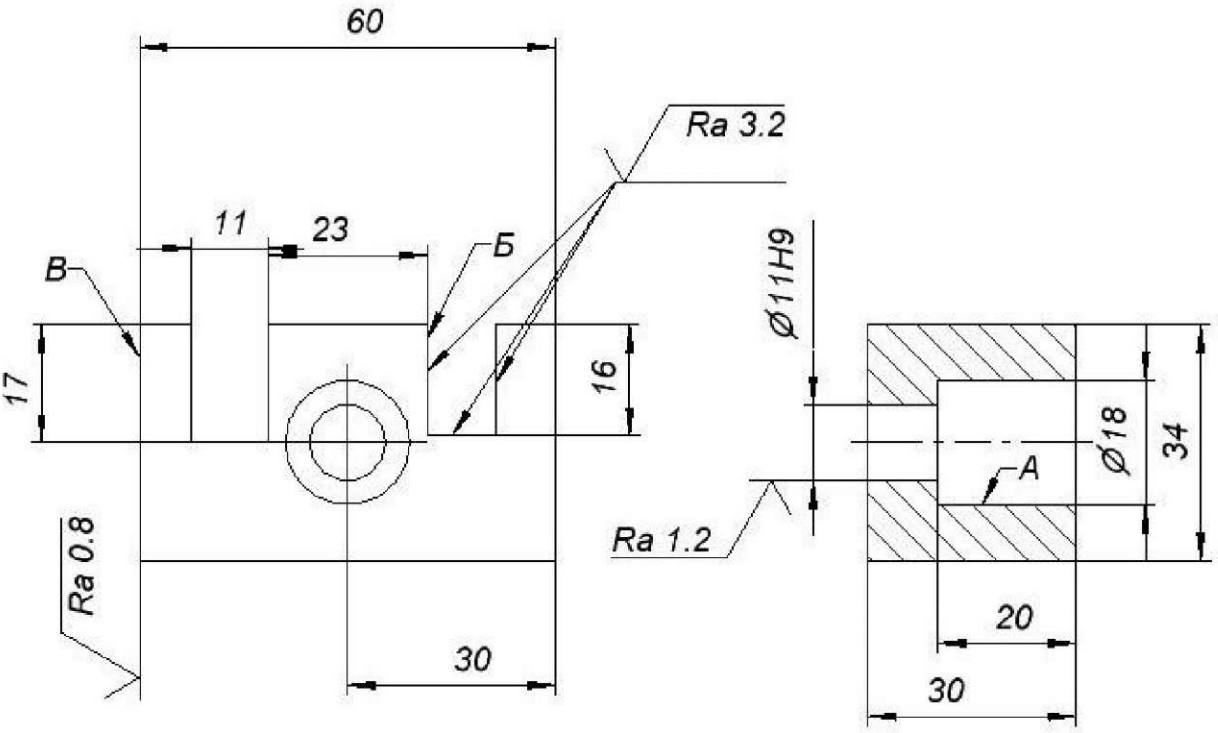
Материал: Сталь 20

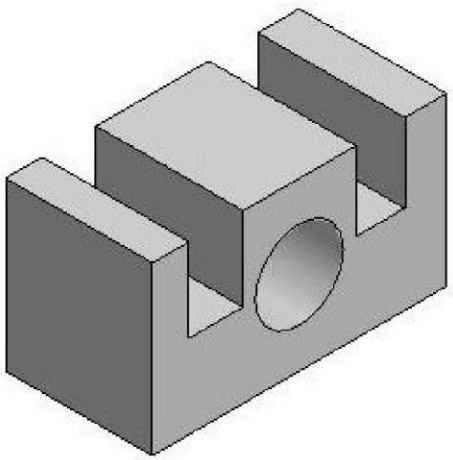
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

39

Ползун

√Ra12.5(√)





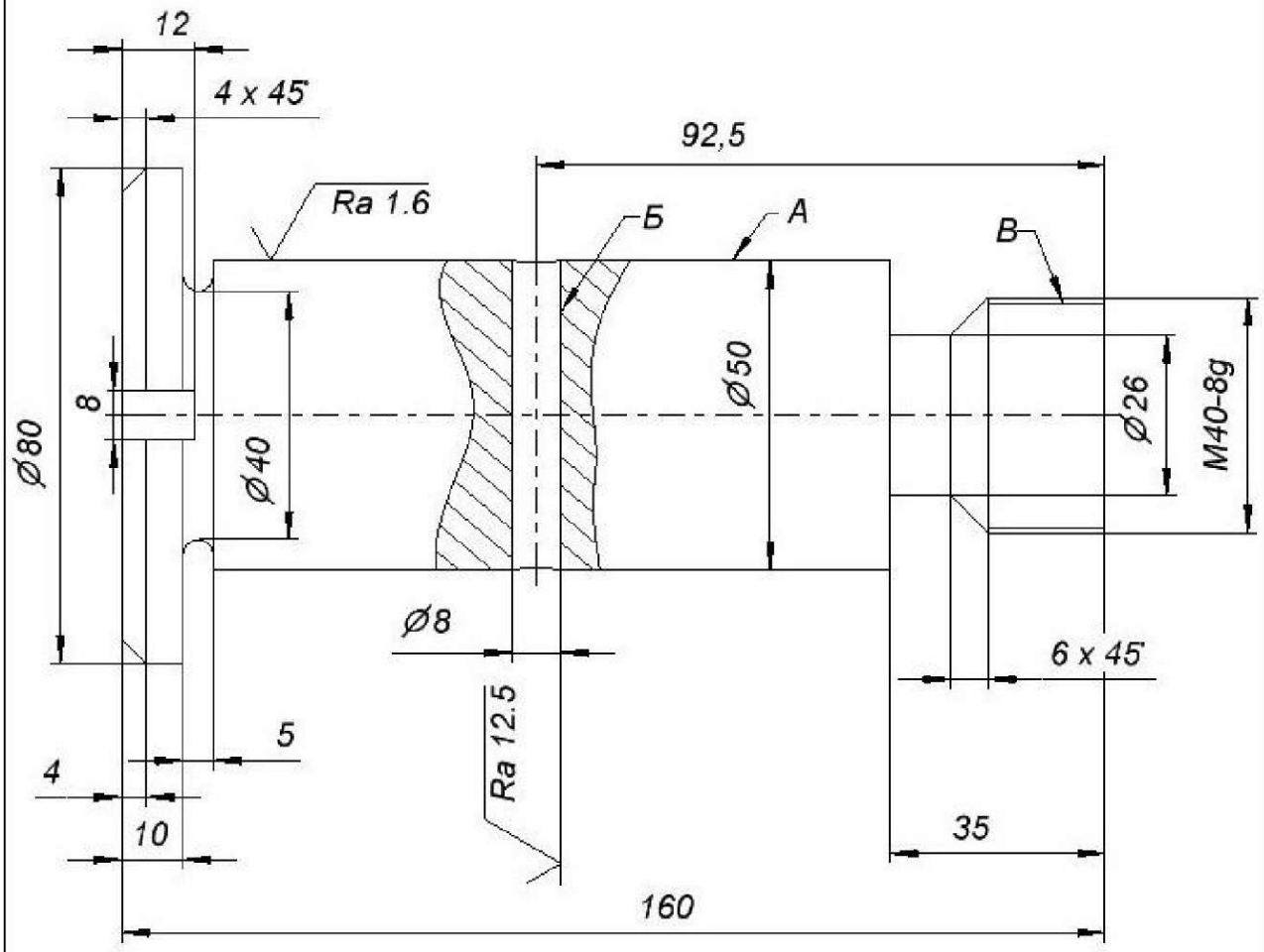
Материал: Сталь 20

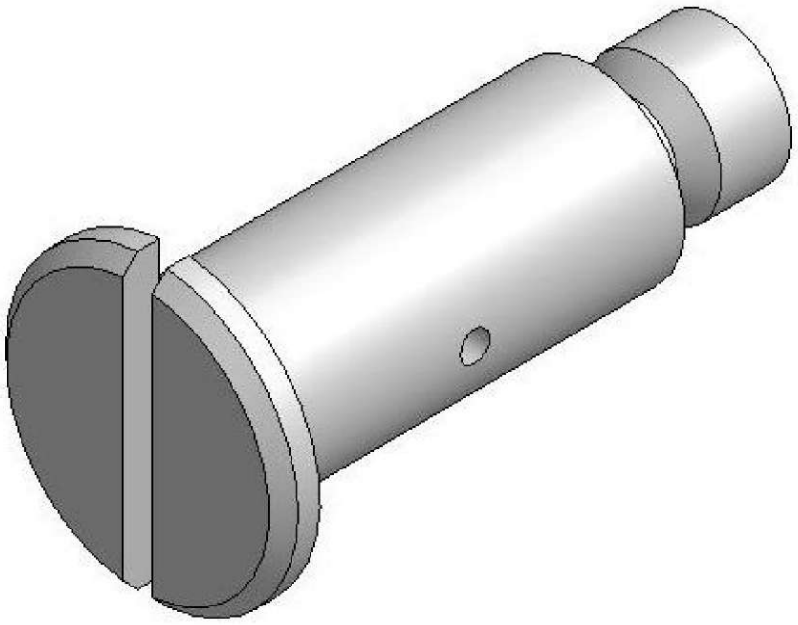
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

40

Винт-ось

√Ra6.3(√)





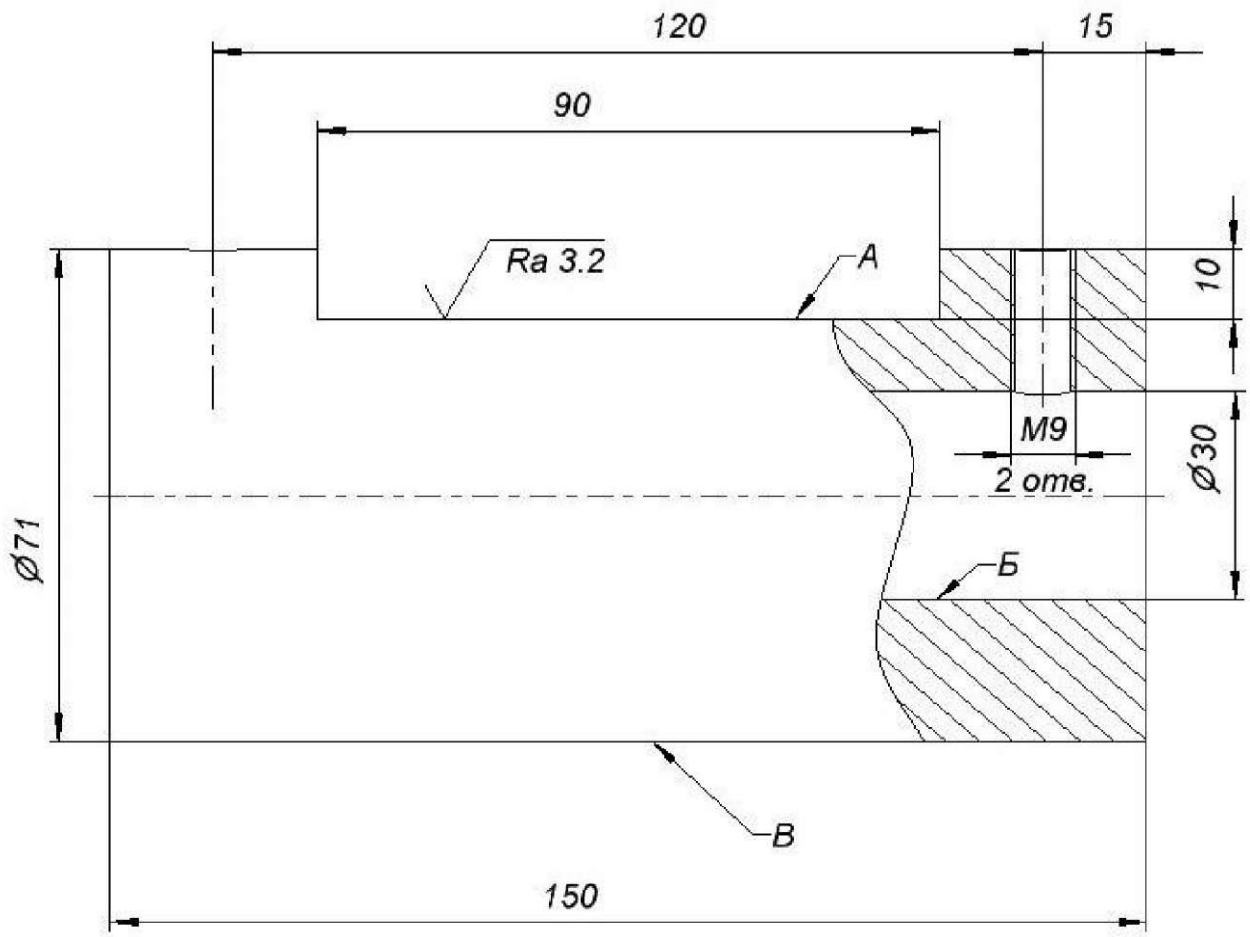
Материал: Сталь 20

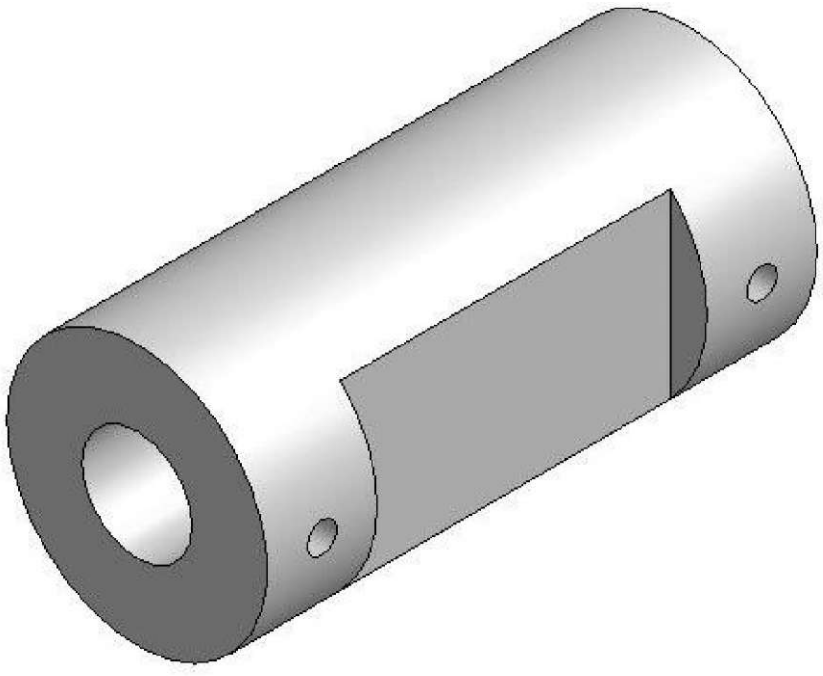
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

41

Втулка

√Ra12.5(√)





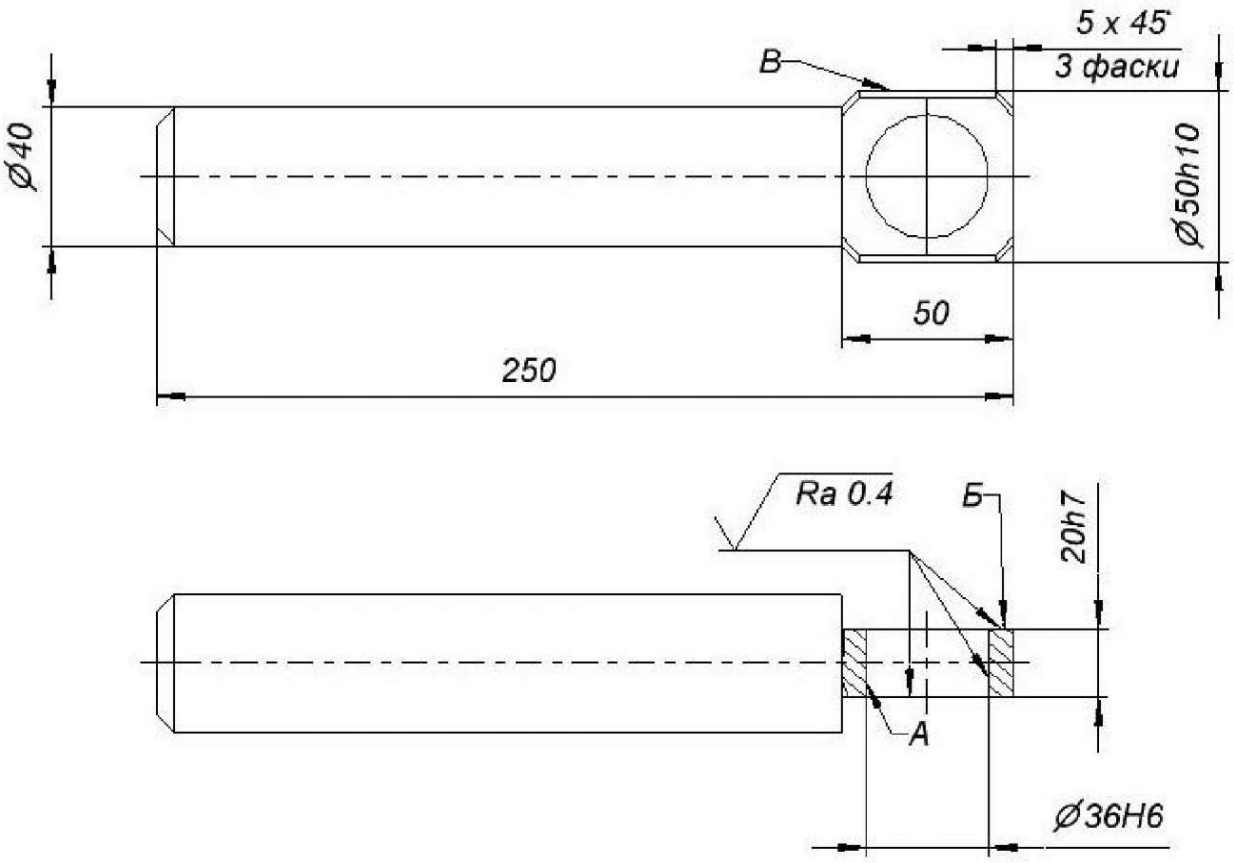
Материал: Сталь 20

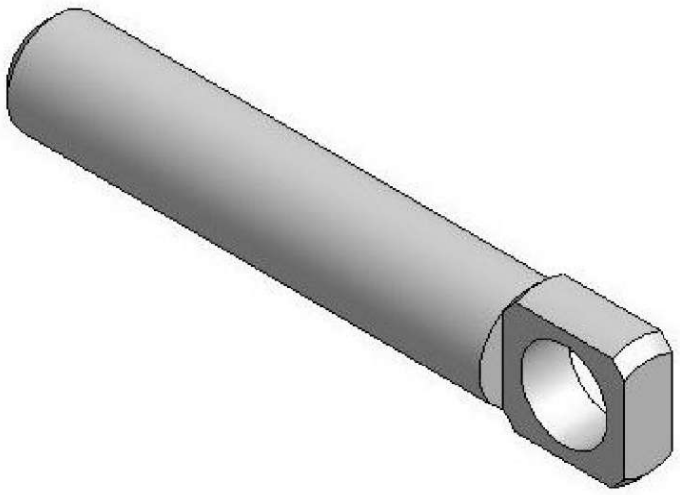
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

42

Люнет

$\sqrt{Ra12.5(\surd)}$





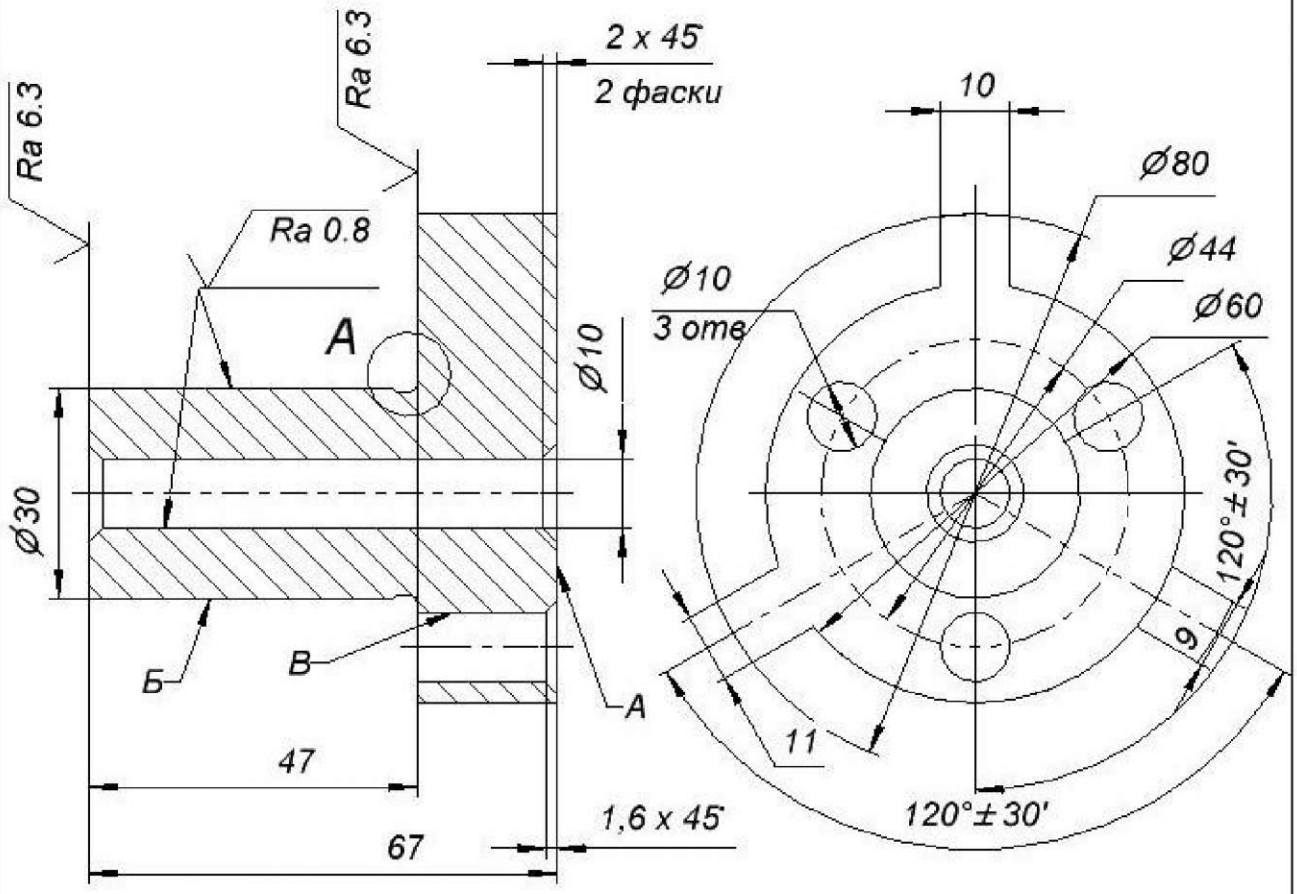
Материал: Сталь 45

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

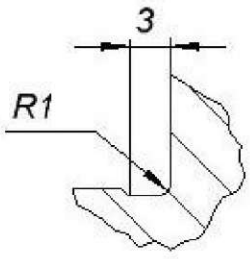
43

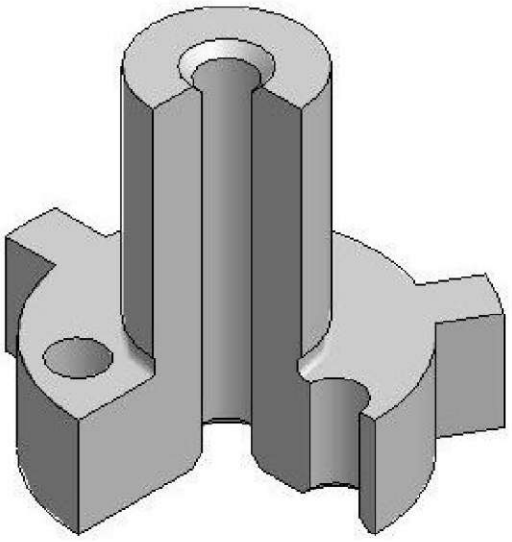
Поршень

√Ra12.5(√)



А (2 : 1)





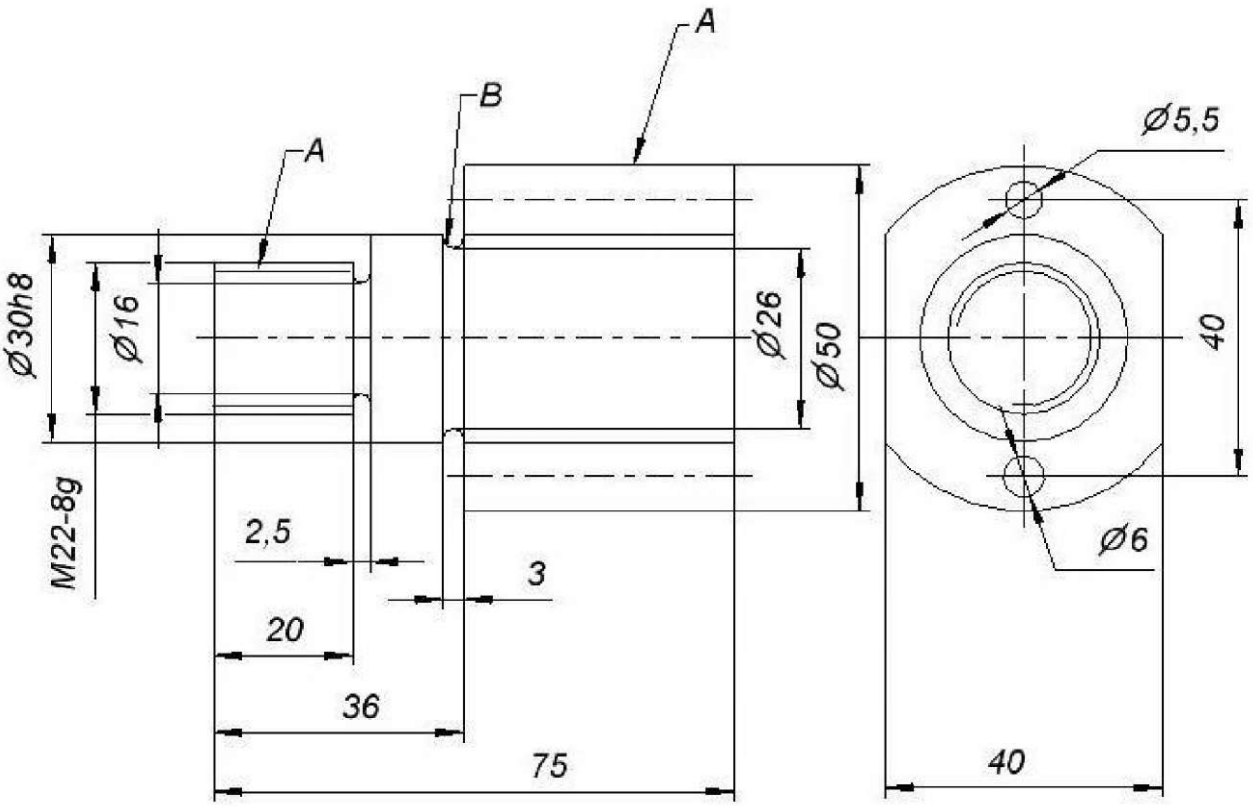
Материал: Сталь 30ХГСА

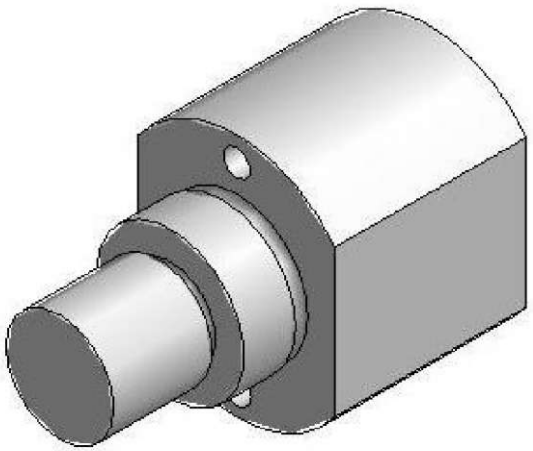
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

44

Заглушка

$\sqrt{Ra12.5(\surd)}$





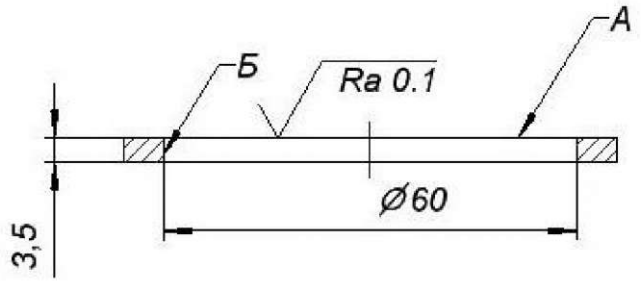
Материал: Сталь 45

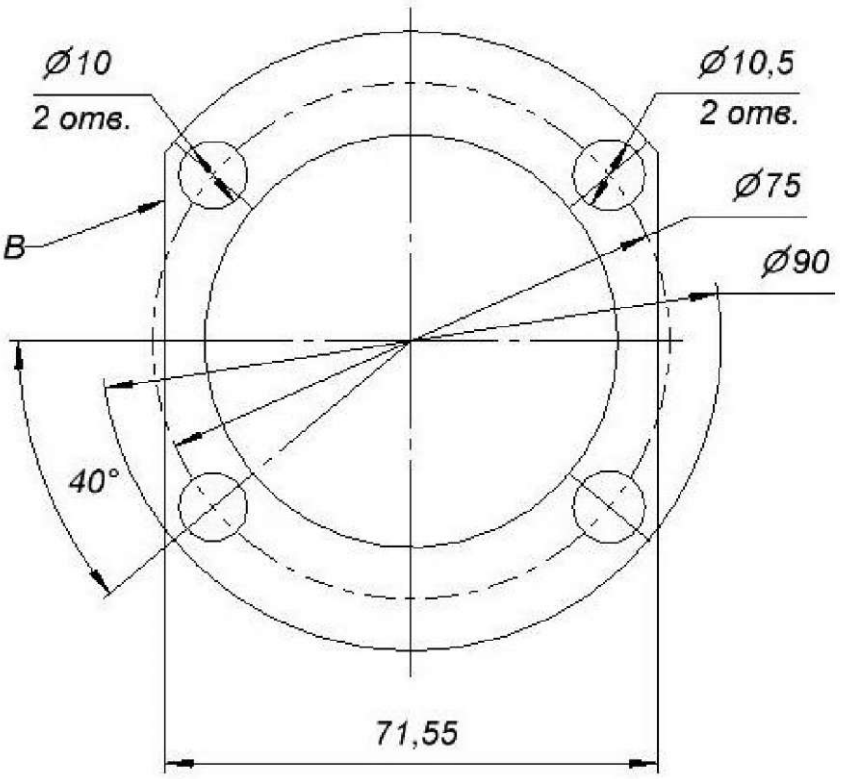
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

45

Кольцо

√Ra12.5(✓)





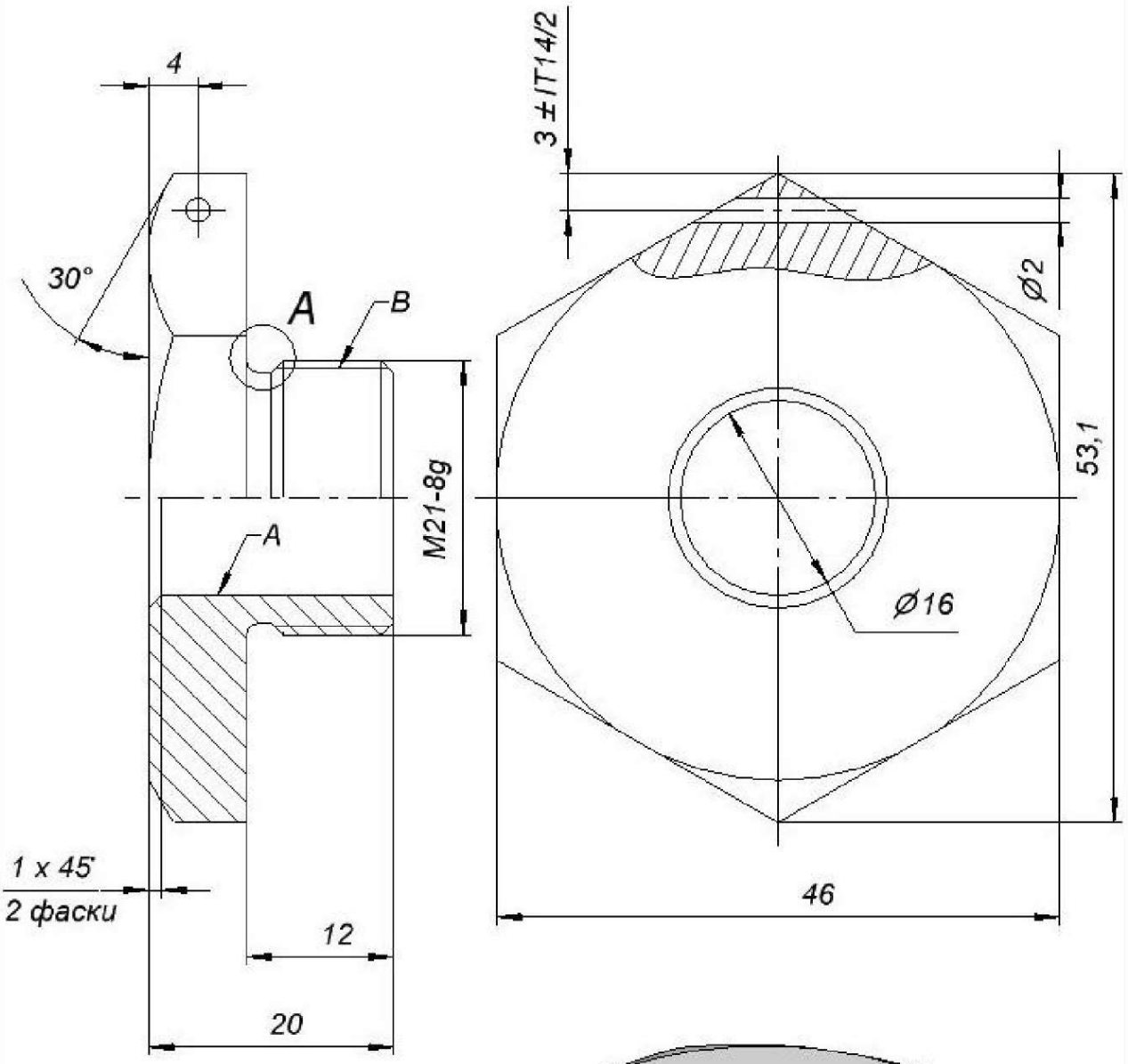
Материал: Сталь 10

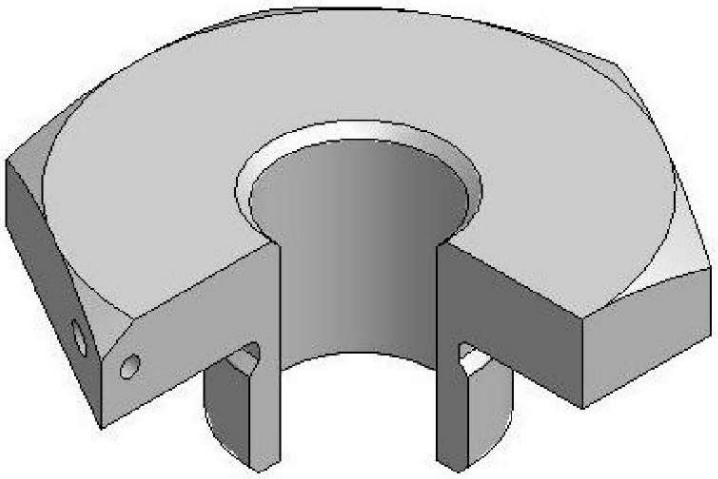
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

46

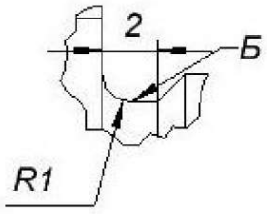
Штуцер

√Ra12.5(√)





A (4 : 1)



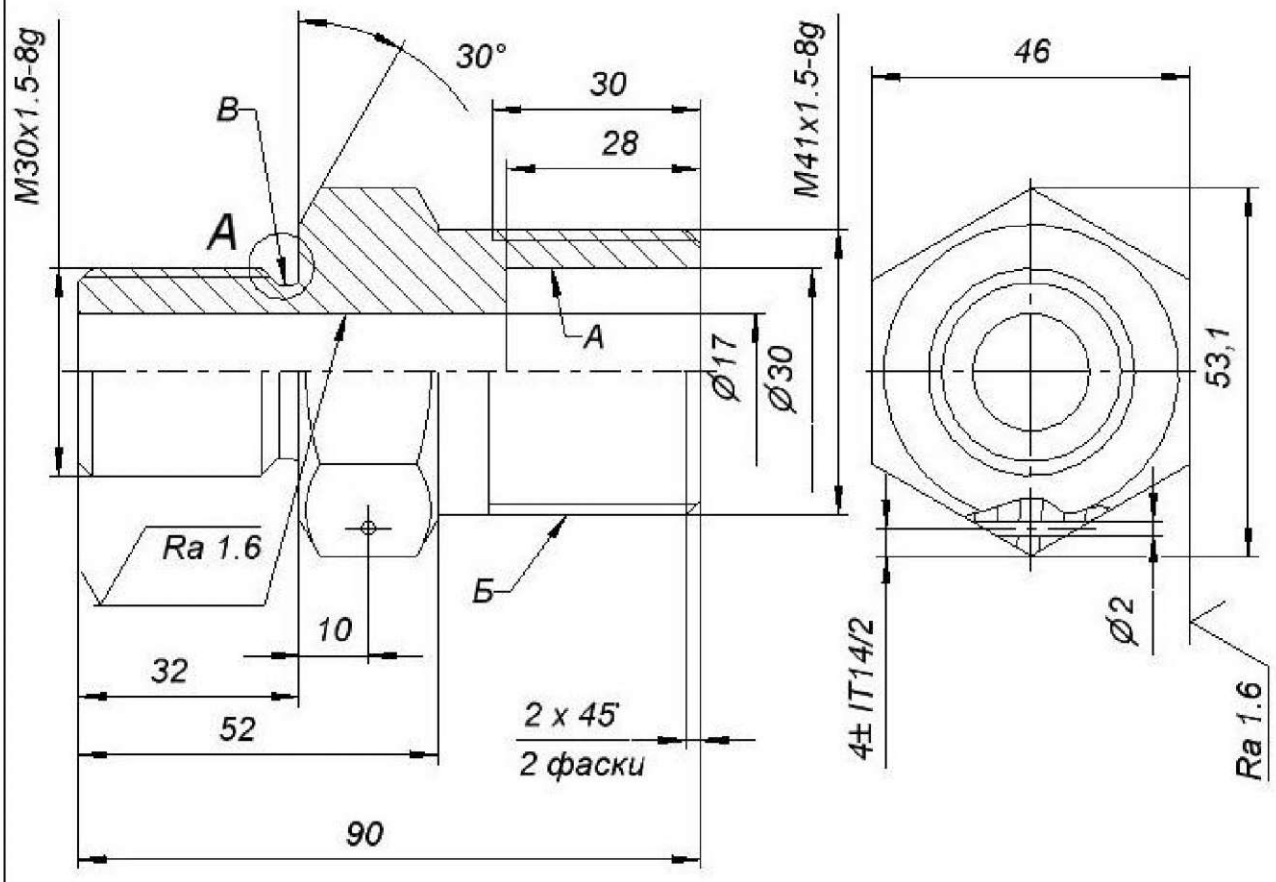
Материал: Д16Т

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

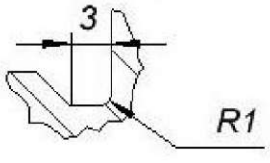
47

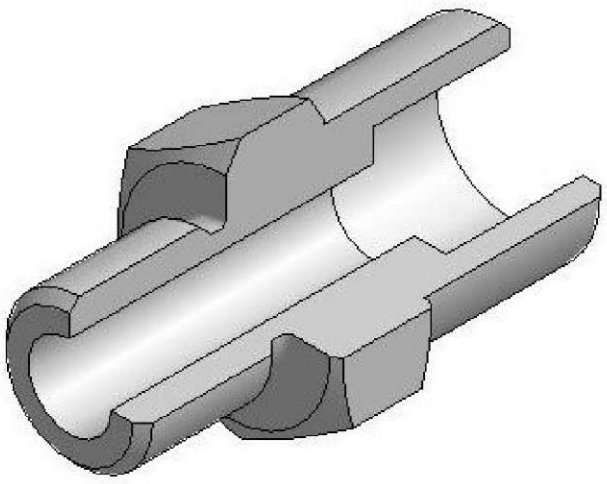
Штуцер

√Ra12.5(√)



A (2 : 1)



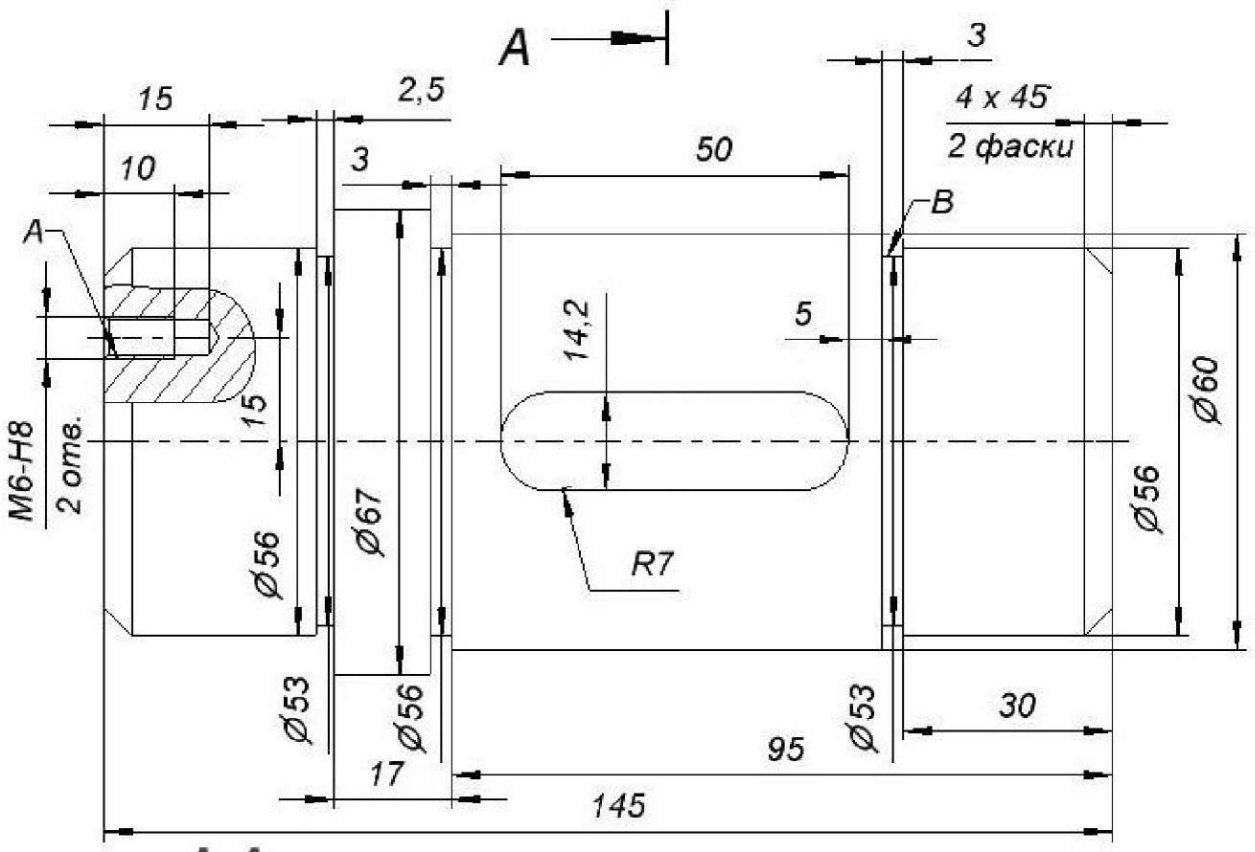


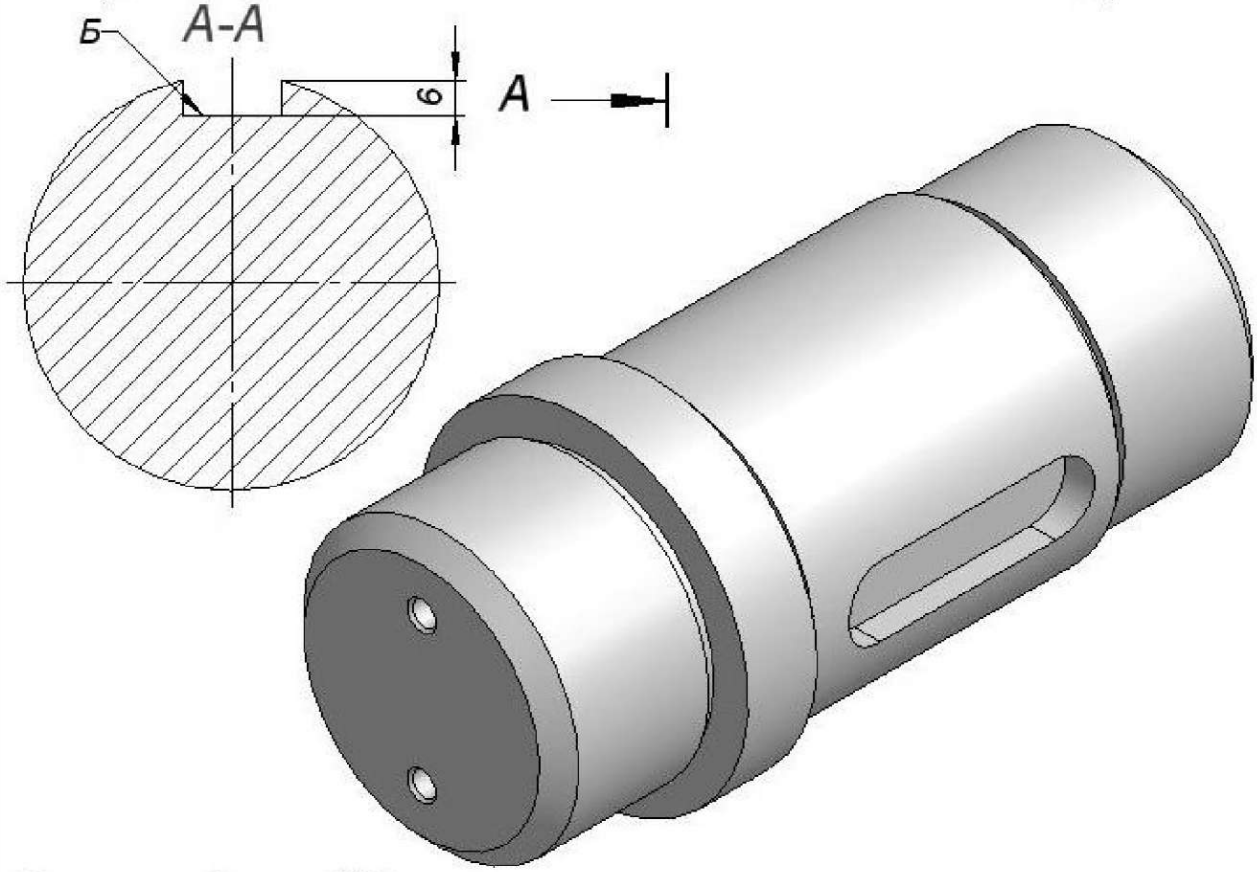
Материал: Сталь 45

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Вал

√Ra6.3(√)



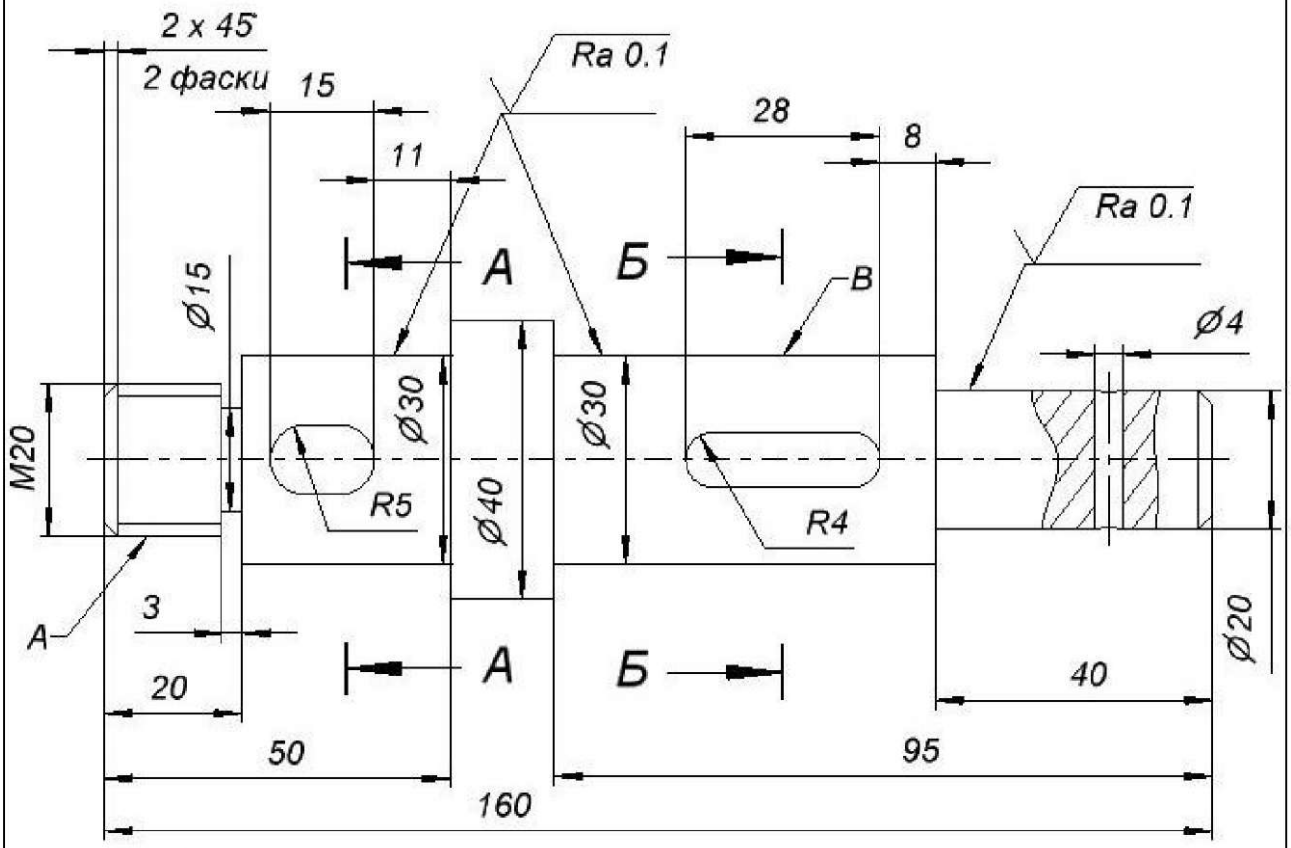


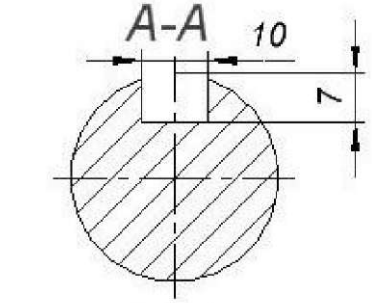
Материал: Сталь 40Х

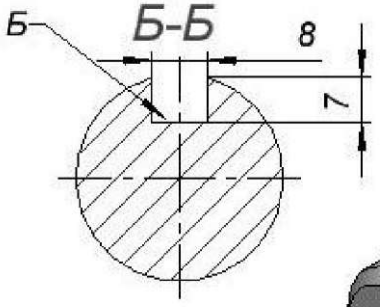
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

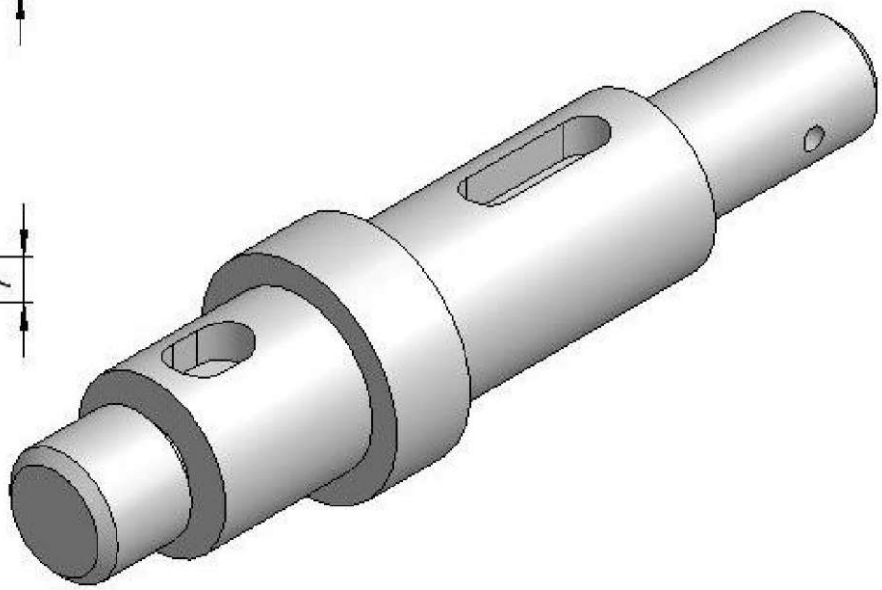
Вал ротора

√Ra12.5(√)









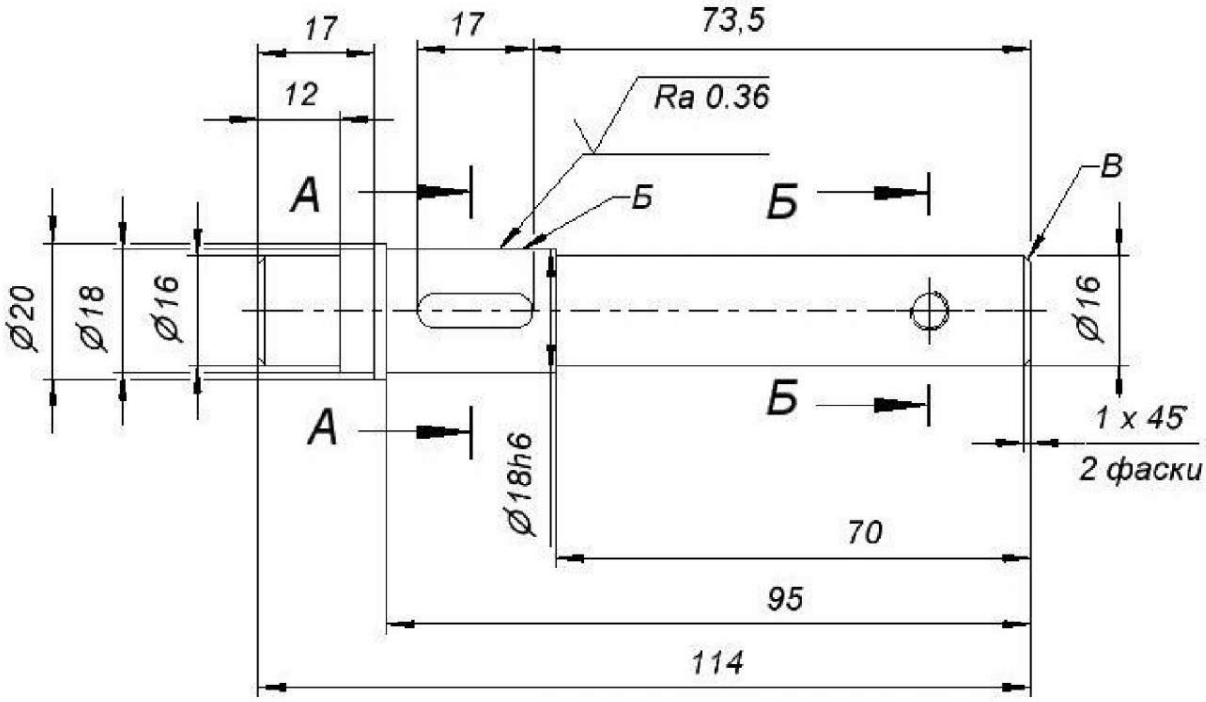
Материал: Сталь 45

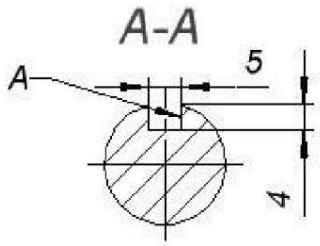
Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

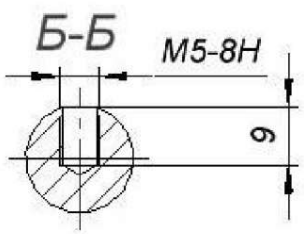
50

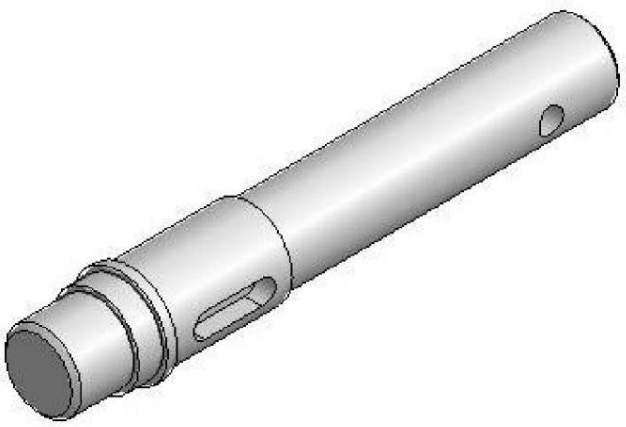
Вал

√Ra12.5(√)









Материал: Сталь 45

Общие допуски по ГОСТ 30893.1: H12, h12, ± IT12/2

Уральский горный университет
Курс «Технология конструкционных материалов»
Самостоятельная работа №1

Определение режима резания при точении

Вариант № _____ Студент_____ Группа_____

Вид точения	заготовка							
	Материал, МПа	Состояние обрабатываемой поверхности	*D*	*d*	L_1	*L*	*h*	*Ra, Rz*

Схема обработки
(заготовка, инструмент, главные движения)

Станок:_____

Основные параметры:

Наиб. диаметр обрабатываемой заготовки:
над станиной_____мм
над суппортом_____мм
наиб. длина обрабатываемого изделия _____мм
Высота резца, устанавливаемого в резцедержателе _____мм
Мощность двигателя_____кВт

Эскиз инструмента

Резец

Название_____
Материал режущей части_____
Основные углы:
γ = **α =** **φ =** φ_1 =
r* =** ***h × ***b*** × ***l*** =_____

Режим резания

1. **Глубина резания** ***t* =**
   количество ходов ***i* =**
2. **Подача *S*** (мм/об)
   черновое точение ***S*** = (мм/об) по таблице
   чистовое точение ***S*** = (мм/об) по таблице

$S_{факт}$ = (мм/об) по паспортным данным станка

3. **Скорость резания V** (м/мин) расчетная

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} \cdot K_{\varphi v} \cdot K_{\varphi 1 v} =$$

где $K_v = K_{мv} \cdot K_{п\,v} \cdot K_{мv}$.....=
C_v= , T = , m = , x = , y = ,
$K_{мv}$ = , $K_{пv}$ = , $K_{иv}$ = , K = , K = ,

***V*=**

4. **Частота вращения шпинделя** - расчетная:$n = 1000V/\pi D$ = (об/мин)
- фактическая: $n_ф$ = (по паспортным данным)

5. **Скорость резания** (фактическая) $V_ф$ = (м/мин)

6. **Проверка режима резания:**

1.Сила резания $P_z = 10\, C_p\, t^x\, S^y\, V_ф^n\, K_{φp}\, K_{γp}\, K_{мp}$

C_p = , x = , y = , n = , $K_{φp}$= ,$K_{γp}$= ,$K_{мp}$=

7. Мощность, затрачиваемая на резание $N_р$ (кВт)

8.**Основное технологическое время** T_0

Режим резания

L	***t***	***i***	***S***	$n_ф$	$V_ф$	P_z	$N_р$	T_0

Уральский горный университет
Курс «Технология конструкционных материалов»
Самостоятельная работа №2

Выбор режущего инструмента

Вариант № _____ Студент_____ Группа_____

заготовка		Требуемая шероховатость
Материал	Состояние поверхности	

Эскиз детали (поверхность)

Инструмент

Эскиз инструмента с основными параметрами (размеры, углы, геометрия режущей части)

Название _____

Материал режущей части_____

Основные углы:

γ = **α =** **φ =**

z* =** ***D =

Станок

Название_____
Марка (расшифровать)_____
Основные параметры, определяющие выполнение задания
Рабочее пространство:_____
_____
_____
_____
Мощность_____кВт

Схема обработки

Режим резания

B	***D***	***L***	***t*** / ***i***	***S***	***n***	***V***	T_O

Уральский горный университет
Курс «Технология конструкционных материалов»
Самостоятельная работа №3

Выбор шлифовального круга и режима резания

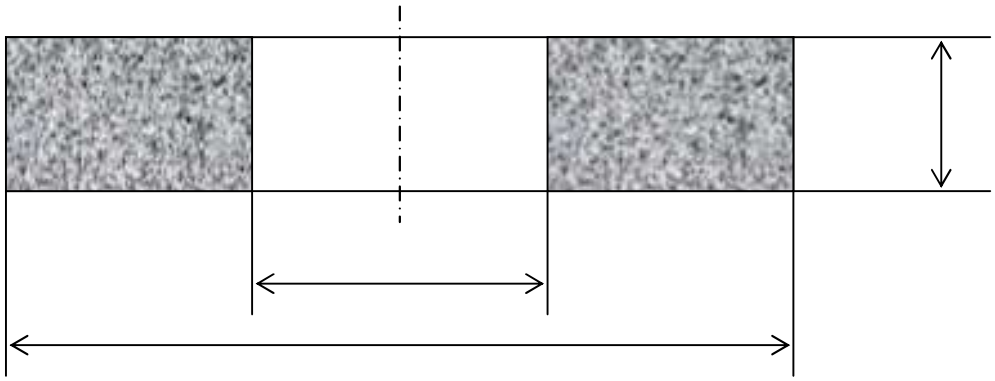
Вариант № _____ Студент_____ Группа_____

Деталь	$d_з$	***l***	l_1	***B***	***Ra,*** (шероховатость)	***H*** (припуск)	Материал заготовки	

Схема обработки (заготовка, инструмент, главные движения)

Станок:_____
Модель_____
Рекомендуемые размеры обрабатываемой детали:
Длина_____
Ширина_____
Диаметр_____
Наибольшие размеры круга:
Наружный диаметр_____мм
Высота_____мм

Эскиз круга (с отклонениями)



Примерная характеристика круга_____

Условное обозначение параметра	Расшифровка условного обозначения и определение
	Тип круга_____ Применение_____
	Размеры круга: диаметр_____мм, высота_____мм, отверстие_____мм.
	Марка абразивного материала_____ Область применения_____ Микротвердость_____.Теплоустойчивость_____ Получение_____
	Зернистость. Размер зерен основной фракции_____ _____-индекс обозначения содержания зерна основной фракции _____%
	Твердость круга_____ Определение_____
	Структура круга (номер)_____.Содержание зерна_____%
	Марка связки_____ Состав_____ Предназначение_____
	Окружная скорость круга_____м/с
	Класс неуравновешенности_____ Определение_____

Полная характеристика круга:

_____

Режим резания

t		***S***			***V***	***i***	T_o

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

к контрольным и лабораторным работам для обучающихся по дисциплине

Б1.В.04 ГИДРАВЛИКА И ГИДРОПНЕВМОПРИВОД

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Автор: Лагунова Ю. А., д-р техн. наук, профессор

Одобрено на заседании кафедры	Рассмотрено методической комиссией факультета
Горных машин и комплексов	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Лагунова Ю. А.	Осипов П. А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Самостоятельное выполнение расчетов является одним из важнейших этапов успешного усвоения дисциплины «Гидравлика и гидропневмопривод», на котором приобретаются навыки пользования соответствующими расчетными зависимостями и, что особенно важно, достигается отчетливое понимание их физического смысла.

Для изучения теоретических положений гидропривода и анализа типовых задач могут быть использованы следующие учебники и задачники:

1. Н. С. Гудилин и др. Гидравлика и гидропривод (под общей редакцией И.Л.Постоева). - М.: Изд. МГГУ, 2001.- 519 с.

2. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин: учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы» – М.: Машиностроение, 1979. – 319 с.

3. Гейер В.Г., Дулин В.С. Гидравлика и гидропривод. – М.: Недра, 1990;

4. Бутаев Д.А. Сборник задач по машиностроительной гидравлике. Под. ред. И.И. Куколевского и Л.Г. Подвидза. – М.: Энергия, 1982;

После этого студент может приступать к выполнению контрольной работы.

Приступая к решению задачи, необходимо добиться четкого понимания исходных условий и полной ясности в том, что требуется получить в результате решения поставленной задачи.

При выполнении контрольной работы студент может использовать учебники и пособия. В этом случае должна быть ссылка на используемую литературу. Номера задач выбираются в соответствии с вариантом, заданным преподавателем.

При решении задач следует принять Международную систему единиц измерения – СИ. Для облегчения перевода различных единиц давления в систему СИ в приложении приводится таблица соотношения. Кроме того, приведены некоторые справочные данные, необходимые для решения задач.

Объемным гидроприводом называется привод, в состав которого входит гидравлический механизм, в котором рабочая среда (жидкость) находится под давлением, с одним или более объемными гидродвигателями. Простейший объемный гидропривод, как правило, включает в себя насос, гидродвигатель, соединенные гидролиниями, и вспомогательные устройства – фильтры, гидробаки, теплообменники и т. д.

Гидравлическая машина – это машина, предназначенная для создания или использования потока жидкой среды как носителя энергии.

Гидромашины делятся на насосы и гидродвигатели, которые по принципу действия могут быть динамическими и объемными.

Насос представляет собой машину для создания потока жидкой среды. В динамическом насосе жидкость перемещается под силовым воздействием на нее в камере, постоянно сообщающейся со входом и выходом насоса. В

объемном насосе жидкость перемещается путем периодического изменения объема занимаемой ею камеры, попеременно сообщающейся со входом и выходом насоса.

Гидродвигатель служит для преобразования энергии потока жидкости в энергию выходного звена. К динамическим гидродвигателям относятся различного рода гидротурбины с неограниченным вращательным движением выходного звена (вала). Объемными гидродвигателями являются гидроцилиндры с возвратно-поступательным движением выходного звена (штока или плунжера), поворотные гидродвигатели с ограниченным движением выходного звена (вала) и гидромоторы с вращательным движением вала.

Рассмотрим основные технические показатели объемных гидромашин.

Объемная подача насоса Q – это отношение объема подаваемой жидкости ко времени.

Идеальная подача насоса $Q_{и}$ - это сумма подачи и объемных потерь насоса. Идеальная подача жидкой среды определяется геометрическими размерами и частотой вращения рабочих органов, а также конструктивными факторами гидромашин.

Для объемных насосов

$$Q_{и} = q_{о} \cdot n,$$

где $q_{о}$ - рабочий объем насоса; n - частота вращения вала насоса.

Рабочий объем насоса – это разность наибольшего и наименьшего значений замкнутого объема за оборот или двойной ход рабочего органа насоса.

Полезная мощность насоса $N_{п}$ – это мощность, сообщаемая насосом подаваемой жидкости.

Потребляемая насосом мощность вычисляется по формуле

$$N_{н} = M \cdot \omega / \eta,$$

где M – крутящий момент на валу насоса; ω - угловая скорость вращения вала; η - КПД насоса.

Мощность, потребляемая насосом, больше полезной мощности $N_{п}$ из-за неизбежных потерь внутри насоса.

Полезная мощность гидромотора

$$N_{п} = M_{гм} \cdot \omega,$$

где $M_{гм}$ – момент на выходном звене гидромотора.

Потребляемая мощность гидромотора и гидроцилиндра определяется по зависимости

$$N_{гм} = \Delta p_{гм} \cdot Q,$$

где $\Delta p_{гм}$ - перепад давления в гидромоторе, который зависит от разности давлений на входе p_1 и выходе p_2 гидромотора, т.е. $\Delta p_{гм} = p_1 - p_2$; Q – расход жидкости гидромотора.

Для гидроцилиндров полезную мощность вычисляют по следующей зависимости

$$N_{гц} = R \cdot v,$$

где R – усилие на штоке гидроцилиндра; v – скорость штока.

Теоретический крутящий момент на валу гидромотора определяется по формуле

$$M = (\Delta p_{гм} \cdot q_о)/2\pi.$$

С учетом механических потерь определяется действительное значение крутящего момента

$$M = (\Delta p_{гм} \cdot q_о \cdot \eta_{мех})/2\pi,$$

где $\eta_{мех}$ – механический КПД гидромотора.

Эффективность конструкции определяется КПД насоса, т.е. отношением полезной мощности к мощности, потребляемой гидромашиной

$$\eta = N_п/N.$$

Потери мощности в гидромашинах принято подразделять на три вида и оценивать соответствующим КПД.

Различают:

- гидравлический КПД ($\eta_г$), являющийся отношением полезной мощности насоса к сумме полезной мощности и мощности, затраченной на преодоление гидравлических сопротивлений;

- механический КПД ($\eta_{мех}$) – это величина, выражающая относительную долю механических потерь в насосе;

- объемный КПД ($\eta_о$) – это отношение полезной мощности насоса к сумме полезной мощности и мощности, потерянной с утечками.

Общий КПД гидромашины представляет собой произведение трех вышеуказанных КПД:

$$\eta = \eta_{мех} \cdot \eta_г \cdot \eta.$$

Частота вращения вала гидромотора во многом зависит от объемных потерь в гидромашине и поэтому определяется

$$n = Q \cdot \eta_о / q_о.$$

1. ШЕСТЕРЕННЫЕ МАШИНЫ

Насосы, в которых перемещение рабочей жидкости из всасывающей полости в напорную осуществляется вращающимися и находящимися в зацеплении шестернями, называются *шестеренными*. Эти насосы получили большое распространение благодаря своей простоте и надежности. Шестеренные машины чаще используются в качестве насосов и реже в качестве гидродвигателей. Они могут выполняться с шестернями внешнего и внутреннего зацепления, но последние применяются редко. Шестеренные машины по количеству шестерен бывают с двумя и с тремя шестернями. Насос с тремя шестернями имеет производительность в два раза больше, чем насос с двумя шестернями, но момент, необходимый для его привода, в два раза выше. Насосы с тремя шестернями могут применяться для подачи жидкости в две независимые магистрали.

Шестеренные машины способны работать в гидроприводах при давлениях до 10-20 МПа; созданы насосы, пригодные для работы при давлении 30 МПа. Подача шестеренных насосов низкого давления доходит до 1000 л/мин. Машины обладают компактностью и высокой долговечностью. Шестеренные машины допускают относительно высокие числа оборотов, обычным является 210...420 рад/с.

В простейшем случае конструкция шестеренной машины (рис. 1.1) представляет собой пару шестерен, находящихся в зацеплении, установленная в плотно охватывающем корпусе (с малыми зазорами). При вращении шестерен жидкость, заполняющая их впадины, переносится из полости всасывания в полость нагнетания, где при вступлении очередной пары зубьев в зацепление происходит вытеснение жидкости, перенесенной во впадине одной шестерни зубом другой шестерни. Таким образом, рабочие камеры насоса ограничены впадинами зубьев и расточкой корпуса насоса. Жидкость выталкивается в напорную магистраль зубьями шестерен, вступающими в зацепление. В отдающую полость насоса выталкивается не вся жидкость, заполняющая впадины между зубьями, а часть ее попадает обратно в полость всасывания между расточкой корпуса и выступами зубьев (радиальные утечки) и через торцевые зазоры между шестернями и крышками насоса (торцевые утечки). Утечки через торцевые зазоры составляют 70...80 % суммарных утечек жидкости в шестеренной машине. Стыковые полости корпуса насоса и крышек обработаны шлифованием. Однако это не гарантирует отсутствие утечек масла через эти стыки. Для исключения этих утечек стыковые поверхности корпуса и крышек уплотняются специальными прокладками.

В процессе работы шестеренных насосов при некоторых положениях точки зацепления жидкость запирается во впадинах шестерен и при повороте шестерен давление запертой жидкости значительно возрастает, что приводит к излишним потерям энергии, перегрузке осей, подшипников насоса и перегреву рабочей жидкости. Для устранения такой компрессии жидкости во впадинах шестерен при переходе зубьев через линию центра, в насосе предусмотрены дренажные каналы, по которым жидкость отводится в камеры отдающей полости насоса.

Изменение подачи насосов достигается за счет изменения ширины шестерен, у которых все остальные размеры остаются идентичными.

Рабочий объем шестеренной гидромашины определяется по зависимости

$$q_o = 2 \cdot \pi \cdot m^2 \cdot z \cdot b = 2 \cdot \pi \cdot D_н \cdot m \cdot b$$

где m – модуль зацепления; z – число зубьев; b – ширина шестерни; $D_н$ – диаметр начальной окружности.

Подача объемного насоса

$$Q = q_o \cdot n \cdot \eta_o,$$

где n – частота вращения вала; η_o – объемный КПД гидромашины.

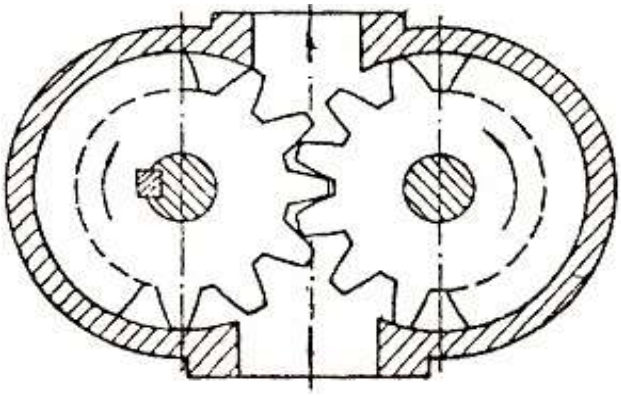


Рис. 1.1. Конструкция шестеренной машины

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите принцип действия шестеренного насоса.
2. Как отводятся торцевые утечки в полость всасывания?
3. Как устраняется запирание жидкости во впадинах шестерен?
4. Какие существуют уплотнения в шестеренных насосах?
5. Почему не все шестеренные насосы реверсивны?
6. Как регулируется подача шестеренного насоса?

2. ПЛАСТИНЧАТЫЕ МАШИНЫ

Насосы, в которых перемещение рабочей жидкости осуществляется вращающимися и одновременно движущимися возвратно-поступательно в пазах ротора пластинами (шиберами), называются *пластинчатыми* (шиберными). В практике эти насосы часто называют лопастными, что не соответствует их принципу действия. Эти насосы выпускаются постоянной и переменной подачи, однократного и многократного действия. Серийные пластинчатые машины предназначены для работы в гидроприводах при давлениях 6,3 МПа и 12,5 МПа. В горном машиностроении широкое применение имеют нерегулируемые пластинчатые насосы двукратного действия подачей от 5 до 200 л/мин.

Из всего многообразия пластинчатых насосов в гидроприводах горных машин наиболее часто применяются насосы двукратного действия. Для них рекомендуются масла индустриальное 20 и 30.

Устройство простейшего пластинчатого насоса однократного действия схематично показано на рис. 2.1. В цилиндрической расточке корпуса насоса – статоре эксцентрично вращается цилиндрический ротор, имеющий радиальные пазы (наклоненные по отношению к радиусу ротора в сторону вращения), в которых установлены пластины-вытеснители. Наличие угла наклона предотвращает заклинивание пластин в пазах в зоне нагнетания насоса, когда пластины своими концами скользят по переходной кривой профиля

статора от его большего радиуса к меньшему. У насосов, выпускаемых нашей промышленностью, пазы ротора имеют следующий наклон к радиусу: при диаметре ротора 56...85 мм – 13...15°, при диаметре 140 мм – 7...8°. Наклонное положение пластин допускает вращение ротора только в одну сторону - по часовой стрелке со стороны приводного вала. В случае необходимости изменения направления вращения приводного вала насоса ротор с пластинами, статор и диски поворачивают на 180° относительно оси, перпендикулярной оси ротора, с одновременным поворотом статора и дисков на 90° относительно оси ротора.

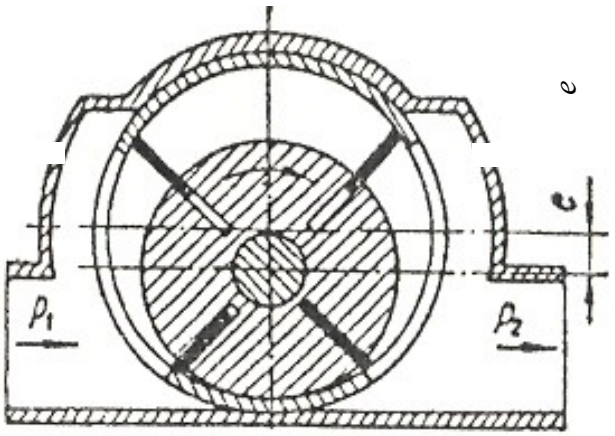


Рис. 2.1. Устройство простейшего пластинчатого насоса однократного действия

Во время перемещения пластин от дуги малого радиуса к дуге большого радиуса они выдвигаются из пазов, и объем пространства между ротором, статором и двумя соседними пластинами увеличивается, возникает разрежение и происходит всасывание. Затем жидкость, поступившая в насос, переносится пластинами ближе к отдающей камере. Здесь объем, заключенный между ротором, статором и двумя соседними пластинами, уменьшается и происходит нагнетание. Всасывание и нагнетание происходит через окна в бронзовых дисках, которые соединяют соответствующие полости насоса со всасывающим и нагнетательным отверстиями в корпусе насоса. Каждый диск насоса двукратного действия имеет четыре окна: два для всасывания и два для нагнетания жидкости (рис. 2.2), расположенных крестообразно и соединенных каналами попарно со всасывающим и нагнетательным отверстиями в корпусе насоса.

Для предотвращения наружных утечек по валу насоса применяют уплотнения из фетра. Внутренние утечки, проникающие через различные зазоры, попадают в полость вала насоса, а затем отводятся в маслобак через отверстие в штуцере и отводную трубку.

Итак, объем, заключенный между соседними пластинами, по мере вращения ротора изменяется по величине. Рабочий объем пластинчатого насоса однократного действия определяется по зависимости

$$q_o = 2 \cdot e \cdot (2 \cdot \pi \cdot R - z \cdot \delta) \cdot b,$$

где e – эксцентриситет; R – радиус статора; z – число пластин; δ – толщина пластин; b – ширина пластин.

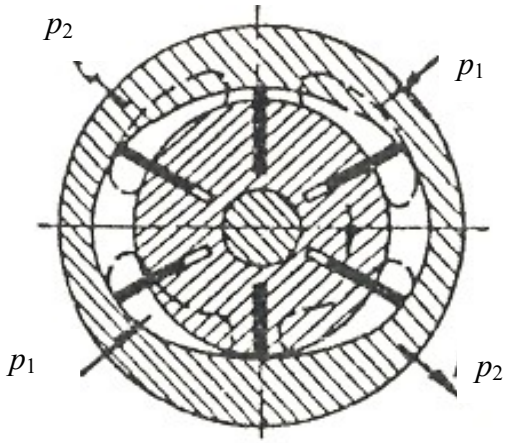


Рис. 2.2. Устройство простейшего пластинчатого насоса двукратного действия

В пластинчатом насосе двукратного действия (см. рис. 2.2) подача жидкости из каждой рабочей камеры за один оборот ротора производится дважды. Ротор в таком насосе установлен концентрично статору ($e = 0$), внутренняя поверхность которого имеет специальный профиль, близкий к эллиптическому. Рабочий объем насоса двукратного действия определяется

$$q_o = 2 \cdot b \cdot [\pi \cdot (R_1^2 - R_2^2) - (R_1 - R_2) \cdot z \cdot \delta],$$

где R_1 и R_2 – соответственно большая и малая полуоси профиля поверхности статора.

Подача пластинчатого насоса вычисляется по вышеприведенной зависимости с учетом объемного КПД.

Рабочий объем и подачу пластинчатого насоса однократного действия можно регулировать путем изменения эксцентриситета.

Пластинчатые гидромоторы предназначены для применения в реверсивных регулируемых и нерегулируемых гидроприводах, в гидроприводах, требующих частых включений или автоматического и дистанционного управления, к которым не предъявляются высокие требования к жесткости механической характеристики.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите принцип действия пластинчатого насоса.
2. Что такое кратность действия объемной машины?
3. Можно ли допустить вращение приводного вала в любом направлении?

4. Для чего сделан наклон пластин к радиусу ротора?

5. Типы утечек и методы их устранения.

6. Каково назначение пластинчатого гидромотора?

7. Чем формируется давление жидкости на выходе из насоса при подаче ее потребителю?

3. РАДИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫЕ МАШИНЫ

Объемные машины, вытеснителями которых являются поршни, называются *поршневыми*. Отличительной особенностью радиально-поршневых машин является радиальное расположение их цилиндров по отношению к оси вращения ротора или приводного вала. Эти машины могут выполняться с вращающимся или неподвижным блоком цилиндров. Цилиндры могут располагаться в один или несколько рядов или звездообразно. Поскольку существуют способы точной обработки тел вращения, пару цилиндр-поршень можно изготовить с минимальным зазором. Это обеспечивает получение высоких объемных КПД при значительных давлениях. Российская промышленность серийно изготавливает насосы такого типа на давления 20...32 МПа.

Радиально-поршневые гидромашины могут быть роторными и безроторными. Схема роторного радиально-поршневого насоса дана на рис. 3.1.

В теле ротора *1* предусмотрено несколько радиальных цилиндров, в которых установлены поршни *2*. Ось вращения ротора смещена на величину *e* относительно оси обоймы *3* статора. Поршни *2*, вращаясь вместе с ротором, участвуют одновременно в возвратно-поступательном направлении и тем самым осуществляют изменение объемов рабочих камер. Цилиндры, в которых поршни перемещаются от центра к перифирии, заполняются жидкостью, а противоположные – вытесняют жидкость. Распределение жидкости между цилиндрами осуществляется через цапфу. Такие машины являются регулируемыми. Поршни всегда прижимаются к обойме центробежными силами.

В безроторных радиально-поршневых гидромашинах цилиндры размещены в неподвижном корпусе. Возвратно-поступательное движение поршни получают от экцентрикового вала. Распределение жидкости осуществляется клапанами.

Для увеличения долговечности диаметры поршней и эксцентриситет у этих насосов принимаются небольшими. Диаметры поршней обычно 16...25 мм, а эксцентриситет - 5...10 мм. Поэтому подача у этих насосов при небольшом числе цилиндров невелика. Расположение более пяти поршней в ряд увеличивает длину и снижает жесткость эксцентрикового вала. Поэтому, как правило, в одном ряду делается три поршня. Для повышения подачи применяется компоновка насосов с расположением поршней в два ряда, друг против друга. Эта конструкция также не лишена недостатков. Для объединения потоков масла от двух групп цилиндров необходимы дополнительные трубопроводы и коллектор. Сходящиеся в коллекторе потоки масла пересекают

друг друга, что приводит к дополнительным потерям энергии и снижению КПД.

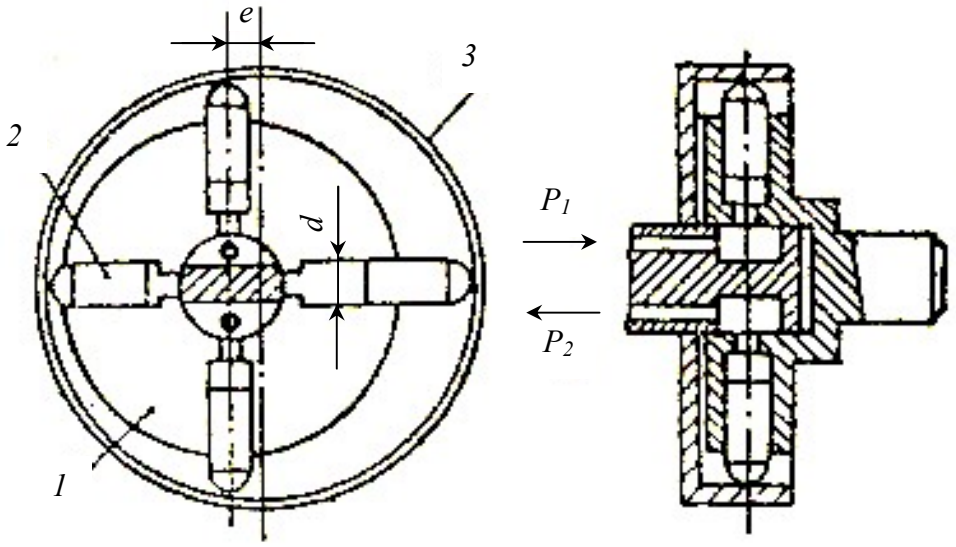


Рис. 3.1. Схема роторного радиально-поршневого насоса

Рабочий объем радиально-поршневого насоса определяется по зависимости

$$q_o = (2 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot e \cdot z)/4,$$

где d - диаметр цилиндра; e - эксцентриситет; z - количество цилиндров.

Подача насоса определяется по формуле, приведенной выше, с учетом объемного КПД.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите общее устройство и назначение радиально-поршневого насоса.
2. Принцип действия радиально-поршневого насоса.
3. Чем обеспечивается ход поршня при всасывании?
4. Какой путь проходит жидкость при нагнетании?
5. Что такое кратность действия насоса?

4. АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫЕ МАШИНЫ

Насосы, у которых вытеснителями являются поршни, расположенные в цилиндрах, оси которых параллельны оси блока цилиндров, называют *аксиально-поршневыми*. Такие насосы широко применяются в горных машинах, особенно в тех приводах, где требуется плавное регулирование скорости. Расположение осей поршней параллельно друг другу значительно снижает

момент инерции ротора машины и позволяет увеличить скорость вращения. Скорость вращения приводного вала этих машин 180...418 рад/с. Максимальное давление достигает 50...70 МПа. Достоинства аксиально-поршневых машин: высокая подача, малый вес на единицу мощности, высокий КПД, распределение рабочей жидкости происходит без клапанов через торцевые распределители.

Аксиально-поршневые насосы по конструкции могут быть выполнены с наклонным диском или с наклонным блоком цилиндров. Они могут быть регулируемые и нерегулируемые, могут иметь плоский или сферический распределитель.

Устройство аксиально-поршневого насоса показано на рис. 4.1.

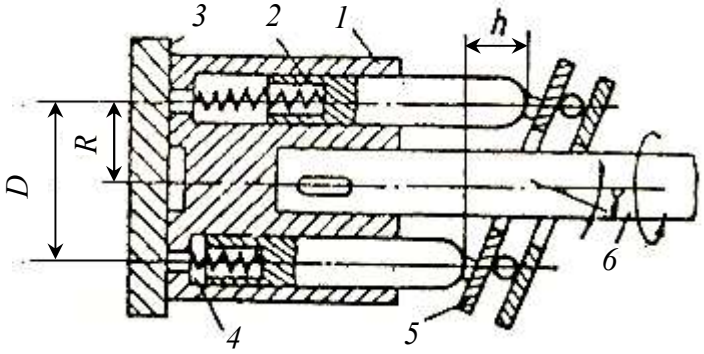


Рис. 4.1. Устройство аксиально-поршневого насоса

В роторе *1* параллельно оси его вращения равномерно по окружности диаметра *D* выполнено несколько сквозных цилиндрических отверстий, которые с одной стороны закрыты подвижными поршнями *2*, а с другой - диском *3*, который выполняет функции распределительного золотника. Поршни *2* своими выступающими сферическими торцами с помощью пружин *4* постоянно прижаты к наклонному диску *5*, установленному в корпусе насоса на упорном подшипнике под углом γ к оси ротора, который приводится во вращение валом *6*. При вращении вала поршни *2* совершают возвратно-поступательное движение относительно ротора, причем за один оборот ротора каждый поршень совершает один всасывающий и один нагнетательный ход. Распределительный диск *3* при этом не вращается. Имеющиеся в нем два дугообразных окна соединены: одно со всасывающим, другое с нагнетательным каналами насоса.

Рабочий объем насоса определяется следующим образом:

$$q_o = \pi \cdot d^2 \cdot D \cdot \mathrm{tg}\gamma \cdot z/4,$$

где d - диаметр поршня; z - количество поршней; D – диаметр окружности размещения осей цилиндров.

В технике широко применяют аксиально-поршневые насосы с наклонным блоком (рис. 4.2). Некоторые типы аксиально-поршневых насосов допускают регулирование рабочего объема и подачи насоса изменением угла γ.

Аксиально-поршневые насосы переменной подачи имеют небольшие непринципиальные различия в конструктивном оформлении отдельных узлов.

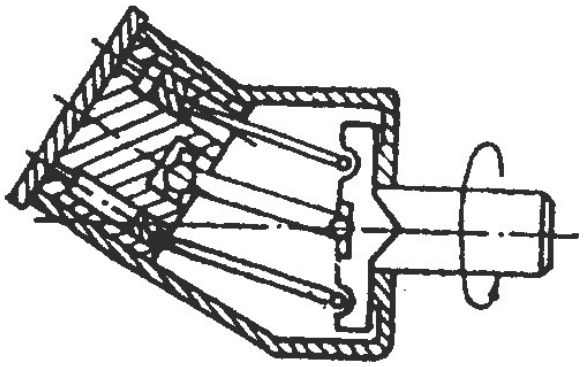


Рис. 4.2. Схема аксиально-поршневого насоса с наклонным блоком

Синхронное вращение блока цилиндров и вала насоса осуществляется при помощи несилового кардана.

Для поворота блока цилиндров при изменении подачи насоса используют гидроцилиндры, установленные в корпусе насоса.

Аксиально-поршневые машины, как правило, имеют встраиваемый дополнительный насос. Он предназначен для восполнения утечек рабочей жидкости в замкнутой системе "насос-гидродвигатель", питания сервопривода управления насосом, предотвращения кавитации и увеличения объемного КПД основного насоса за счет увеличения давления во всасывающей магистрали.

Работает насос следующим образом. При вращении приводного вала через кардан приводится во вращение блок цилиндров. При этом, если блок цилиндров отклонен на некоторый угол от нейтрального положения, поршни начинают двигаться в цилиндрах. При выдвижении поршня из цилиндра под поршнем создается разряжение и происходит всасывание жидкости через соответствующее окно распределителя. При обратном ходе поршня происходит нагнетание жидкости в напорную магистраль.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие машины называются аксиально-поршневыми?
2. Назовите достоинства аксиально-поршневых машин.

3. Опишите принцип действия аксиально-поршневого насоса.
4. Как регулируется подача насоса?
5. Чем поворачивается блок цилиндров насоса?
6. Перечислить функции вспомогательного насоса.
7. Чем обеспечивается синхронное вращение приводного вала и блока цилиндров насоса?

5. ГИДРОАППАРАТУРА

Гидродроссель. Гидродроссель – это гидроаппарат управления расходом, предназначенный для создания сопротивления потоку рабочей жидкости. Он представляет собой местное сопротивление с наперед заданными характеристиками, что обеспечивает поддержание желаемого перепада давления при определенном расходе рабочей жидкости.

Различают *линейные дроссели* (вязкостного сопротивления) и *нелинейные*. В первых потери давления определяются, в основном, трением в канале, имеющем достаточно большую длину. При этом устанавливается ламинарный режим течения и перепад прямо пропорционален скорости течения в первой степени. Расход через дроссель в этом случае определяют по формуле

$$Q=\frac{\pi d^4}{128\nu l\rho}\Delta p_{др},$$

где t и d – длина и диаметр канала дросселя;

ν – кинематическая вязкость;

ρ – плотность жидкости;

$\Delta p_{др} = p_1 - p_2$ – перепад давления в дросселе;

p_1 и p_2 – давление до и после дросселя.

В нелинейных дросселях потери давления обусловлены отрывом потока от стенок и вихреобразованием. Наиболее распространенными из них являются квадратичные дроссели, потери давления в которых прямо пропорциональны квадрату расхода:

$$Q = \mu S_{др}\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p_{др}} = \mu S_{др}\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)},$$

где μ – коэффициент расхода, равный для щелевых дросселей 0,64...0,70, для игольчатых 0,75...0,80; $S_{др}$ – площадь проходного сечения дросселя. Простейший квадратичный дроссель представляет собой весьма малое отверстие с острой кромкой, длина которого составляет 0,2...0,5 мм.

Гидроклапан. Гидроклапан – это гидроаппарат, в котором размеры рабочего проходного сечения изменяются от воздействия потока рабочей жидкости. Гидроклапаны бывают регулирующие или направляющие. Гидроклапан давления – это регулирующий гидроаппарат, предназначенный для управления давлением рабочей жидкости.

Напорный гидроклапан – это гидроклапан давления, предназначенный для ограничения давления в подводимом к нему потоке жидкости. Запорно-регулирующий элемент напорных гидроклапанов бывает шариковый, конический, золотниковый.

Расход жидкости, проходящий через щель напорного гидроклапана, определится

$$Q = \mu S_{кл}\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p_{к}} = \mu S_{кл}\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)},$$

где μ - 0,62...0,70 - коэффициент расхода, для игольчатых 0,75...0,80;

$S_{кл}$ – площадь щели клапана;

$\Delta p_к$ – перепад давления в клапане;

p_1 и p_2 – давление на входе и выходе из клапана.

Для кромовочных клапанов

$$S_{кл} = \pi dz \sin\beta,$$

где d – диаметр входного канала;

z – высота подъема запорно-регулирующего элемента;

β – половина угла конуса, причем

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\upsilon}},$$

где υ – скорость во входном канале (обычно не превышает 15 м/с, и лишь при давлении свыше 20 МПа ее допускаемое значение 30 м/с).

Равновесие запорно-регулирующего элемента клапана в момент начала открытия характеризуется равенством

$$F_0 = p_{ко} S_{окл} = cz_0,$$

где F_0 – усилие пружины в момент открытия клапана;

c – жесткость пружины;

z_0 – предварительная деформация пружины.

При установившемся движении жидкости через щель открытого клапана равновесие его запорно-регулирующего элемента выражается уравнением

$$F_п = c\,(z_0 + z) - p_к S_{кл} - F_\upsilon - F_с,$$

где F_υ - уменьшение силы из-за движения потока в зоне щели, приближенно определяемое по формуле

$$F_\upsilon = \rho Q \upsilon_щ \cos\beta,$$

где $\upsilon_щ$ – скорость жидкости в щели; Q – расход; $F_с$ – увеличение силы в результате натекания потока со стороны седла

$$F_с = \rho Q \upsilon,$$

где υ – скорость жидкости во входном канале клапана.

Золотниковый распределитель. Гидрораспределитель – это направляющий гидроаппарат, предназначенный для управления пуском и направлением потока жидкости в двух или более гидролиниях в зависимости от внешнего управляющего воздействия. Наибольшее распространение в технике получили золотниковые распределители.

При установившемся режиме расход жидкости через золотник

$$Q = \mu S_з \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p_з} = \mu S_з \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)},$$

где μ = 0,60...0,75 – коэффициент расхода; $S_з = \pi D_х$ – площадь перекрываемого проходного сечения золотника (D – диаметр золотника, х – ширина рабочей щели перекрываемого канала, $\Delta p_з$ – перепад давления в золотнике, p_1 – давление на входе, p_2 – давление на выходе из золотника).

Осевая сила, необходимая для перестановки золотника (в отсутствие пружинного возврата), определяется выражением

$$F_з = F_и + F_{гд} + F_{тр},$$

где $F_и$ – сила инерции; $F_{гд}$ – осевая гидродинамическая сила; $F_{тр}$ – сила трения, равная сумме сил трения покоя и движения со смазкой $F_{тр.с.}$, причем по экспериментальным данным сила трения покоя составляет примерно $(0{,}23...0{,}34)F_з$, а сила трения в движении со смазкой

$$F_{тр.с.} = \rho \nu_з S_з \upsilon_з / \delta,$$

где $\nu_з$ – кинематическая вязкость; ρ - плотность жидкости; $\upsilon_з$ – скорость движения золотника; $S_з$ – площадь щели, перекрываемой золотником; δ - радиальный зазор между плунжером и корпусом распределителя.

При пропуске жидкости через золотниковый распределитель возникают осевые гидродинамические силы. Одна из них $F_{1гд}$ появляется вследствии снижения давления в области кромок выходной щели, а другая $F_{2гд}$ – в результате натекания потока на торец сливной кромки. Поскольку эти силы действуют в одну сторону, противоположную перестановочной силе $F_з$, их определяют суммарно.

$$F_{гд} = F_{1гд} + F_{2гд} = 2Q\cos\alpha\sqrt{\rho\Delta\rho_з},$$

где Q –расход жидкости; ρ - плотность жидкости; $\Delta p_з$ – перепад давления в золотнике; α - угол наклона потока относительно оси золотника при вытекании из выточки (согласно теоретическим исследованиям Ю.З. Захарова $\alpha \approx 69^0$).

Сила инерции зависит от ускорения a и приведенной массы m золотника и связанных с ними деталей

$$F_и = ma.$$

Контрольные вопросы и задания

Направляющая гидроаппаратура

1. Для чего предназначен направляющий гидроаппарат?
2. Как различаются направляющие аппараты по принципу действия?
3. Назовите требования к распределителям.
4. Каков принцип условного обозначения направляющих устройств?
5. Как на условном обозначении распределителя отражается число позиций?

Золотниковые гидрораспределители

1. Какие существуют виды перекрытий в золотниковом распределителе?
2. Когда используют золотники с нулевым перекрытием?
3. Чем объясняется наличие зоны нечувствительности на расходной характеристике золотникового распределителя?
4. Что такое облитерация золотника и способы ее устранения?

5. Назовите составляющие силы сопротивления перемещению золотника.

6. Какие существуют способы управления золотниками?

Крановые распределители

1. Назовите достоинства и недостатки крановых распределителей.
2. Что такое неуравновешенность крана?
3. Каким образом достигается уравновешенность крана?

Клапанные распределители

1. Какой распределитель называют клапанным?
2. В каких случаях применяют клапанные распределители?
3. Назовите достоинства и недостатки клапанных распределителей.

Регулирующая гидроаппаратура. Регулируемые дроссели

1. Что такое гидродроссель?
2. Какой дроссель называется демпфером?
3. Как обозначают дроссели на гидросхемах?
4. Какой дроссель называют линейным, нелинейным?
5. Какие факторы определяют пропускную способность дросселя?
6. Назовите типы запорно-регулирующих элементов дросселей.
7. Что такое параметр регулирования дросселя?

Дроссели с регулятором

1. Для чего предназначены регуляторы расхода?
2. Комбинацию каких элементов представляет собой дроссель с регулятором?
3. Назовите достоинства дросселя с регулятором.
4. Как обозначают на схемах дроссель с регулятором?

Редукционные клапаны

1. Назначение редукционного клапана.
2. За счет чего понижается давление на выходе редукционного клапана?
3. Как обозначается на гидросхемах редукционный клапан?
4. Зависит ли давление на выходе от давления на входе?

Предохранительные клапаны

1. Где устанавливаются в гидросхеме предохранительные клапаны?
2. Какие требования предъявляют к предохранительным клапанам?
3. Что значит клапан прямого и непрямого действия?
4. Назовите типы запорно-регулирующих элементов предохранительных клапанов.
5. В чем недостатки предохранительных клапанов без центрирования рабочего элемента?
6. Какие клапаны называют переливными?
7. Чем может быть заменена пружина в предохранительном клапане?

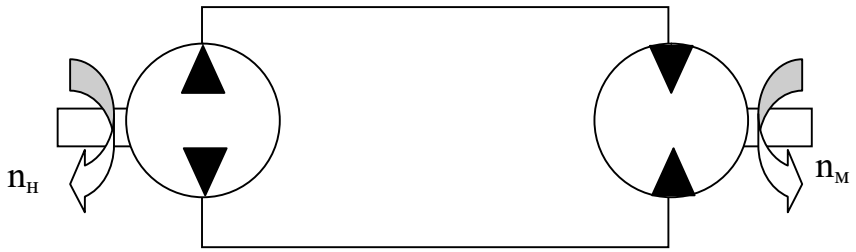
Делители потока, реле, гидрозамки

1. Для чего предназначен делитель потока?
2. Какие типы синхронизаторов существуют?
3. Как обозначается на гидросхемах делитель потока?
4. На чем основан принцип действия гидравлического реле времени?
5. Для чего применяют гидрозамки?
6. Какие типы гидрозамков существуют?

ГИДРОПРИВОД

Гидроприводом является система, обеспечивающая передачу механической энергии от источника к потребителю с помощью жидкости. Это совокупность насосов, гидродвигателей и гидроаппаратов, находящихся в определенной взаимосвязи.

По способу циркуляции рабочей жидкости *гидропривод бывает с замкнутой* (рис. 6.1), *разомкнутой и комбинированной системой циркуляции*.



6.1. Гидропривод с замкнутой схемой циркуляции жидкости

Гидропривод бывает регулируемым и нерегулируемым. Если гидропривод состоит из регулируемых насосов и гидродвигателей, или располагает регулирууще гидроаппаратурой, является регулируемым, в противном случае гидропривод является нерегулируемым, т.е. частота вращения вала гидромомтора остается неизменной при работе гидропривода.

В зависимости от типа установленного в приводе гидродвигателя гидропривод бывает с возвратно-поступательным движением, вращательным и поворотным движением выходного звена.

Для регулирования привода с нерегулируемыми гидромашинами в гидросистему устанавливаются дроссели или регуляторы потока. Они могут быть установлены в напорной гидролинии, сливной гидролинии или параллельно гимдродвигателю. При таком регулировании часто жидкости из гидросистемы отводится на слив, не совершая полезной работы.

При использовании регулируемых гидромашин степень использования энергии существенно повышается, а механические характеристики привода являются жесткими, т. е. скорость выходного звена мало зависит от нагрузки на выходном звене привода.

Работу гидропривода оценивают механической и регулировочной характеристиками.

Механическая характеристика отражает зависимость скорости движения выходного звена гидропривода от нагрузки на нем.

Регулировочная характеристика отражает зависимость скорости движения выходного звена гидропривода от параметра регулирования гидромашины.

Необходимо установить, что принцип действия объемного гидропривода основан на высоком объемном модуле упругости жидкости и на законе Паскаля. Знание основных достоинств и недостатков объемного гидропривода позволит обоснованно выбрать тип привода применительно к конкретной горной машине и механизму.

Основными элементами гидравлического привода являются гидравлические машины. Гидравлическими машинами называются машины, в которых жидкость служит носителем механической энергии. К таким машинам относятся насосы, служащие для *восприятия* от жидкости механической энергии и передачи ее ведомому звену гидропривода. При изучении насосов и гидромоторов необходимо уяснить назначение, принцип действия *р* машин, области их возможного использования. При этом необходимо уяснить, что характерной особенностью объемных гидравлических машин является наличие у них одной или нескольких рабочих камер, способных периодически изменять свой объем и соединяться со всасывающей и нагнетающей магистралями.

При изучении этого раздела следует иметь ввиду, что инженеру, не специализирующемуся по гидромашиностроению, не обязательно уметь проектировать гидравлические машины, но надо знать их настолько, чтобы в случае надобности уметь правильно выбрать насос или гидродвигатель, грамотно задавать их основные рабочие параметры, а также уметь эксплуатировать эти машины. Знание характеристик насосов и гидродвигателей позволит правильно их выбирать и эксплуатировать гидравлический привод.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое объемный гидропривод?
2. Назначение объемного гидропривода.
3. Какой гидропривод называется регулируемым?
4. Каким образом гидропривод защищается от перегрузок?
5. Что является источником потерь энергии в гидроприводе?
6. Чем формируется давление жидкости на выходе из насоса при подаче ее гидродвигателю?
7. Чем формируется скорость движения выходного звена гидродвигателя?
8. Какие виды потерь энергии существуют в гидроприводе?
9. Что такое параметр регулирования гидромашины?
10. В каких пределах изменяется параметр регулирования гидромашины?
11. Какие способы регулирования гидропривода существуют?

12. Назовите основные достоинства и недостатки дроссельного регулирования.

13. Назовите основные достоинства и недостатки машинного регулирования гидропривода.

14. В чем проявляется потеря энергии в гидроприводе?

15. Чем отличается получаемый результат при установке в схему гидропривода вместо регулируемого дросселя регулятора потока?

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Таблица для выбора номеров контрольных задач

Вариант	Номера задач по машинам					Вариант	Номера задач по машинам				
1	Ш	Пл.	РП	АП	ГА	**1**	Ш	Пл.	РП	АП	ГА
	2	**3**	**4**	**5**	**6**		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
01	1,1 а	2,1 а	3,1 а	4,1 а	5,1 а	36	1,1б	2,7а	3,6а	4,5а	5,4а
02	1,2 а	2,2 а	3,2 а	4,2 а	5,2 а	37	1,2б	2,6а	3,5а	4,4а	5,3а
03	1,3 а	2,3 а	3,3 а	4,3 а	5,3 а	38	1,3б	2,5а	3,4а	4,3а	5,2а
04	1,4 а	2,4 а	3,4 а	4,4 а	5,4 а	39	1,4б	2,4а	3,3а	4,2а	5,1а
05	1,5 а	2,5 а	3,5 а	4,5 а	5,5 а	40	1,5б	2,3а	3,2а	4,1а	5,5а
06	1,6 а	2,6 а	3,6 а	4,6 а	5,6 а	41	1,6б	2,2а	3,1а	4,6а	5,6а
07	1,7 а	2,7 а	3,7 а	4,7 а	5,7 а	42	1,7б	2,1а	3,7а	4,7а	5,7а
08	1,1б	2,1б	3,1б	4,1б	5,1б	43	1,1в	2,6б	3,5б	4,4б	5,7б
09	1,2б	2,2б	3,2б	4,2б	5,2б	44	1,2в	2,5б	3,4б	4,7б	5,6б
10	1,3б	2,3б	3,3б	4,3б	5,3б	45	1,3в	2,4б	3,7б	4,3б	5,5б
11	1,4б	2,4б	3,4б	4,4б	5,4б	46	1,4в	2,3б	3,3б	4,2б	5,4б
12	1,5б	2,5б	3,5б	4,5б	5,5б	47	1,5в	2,2б	3,2б	4,1б	5,3б
13	1,6б	2,6б	3,6б	4,6б	5,6б	48	1,6в	2,1б	3,1б	4,5б	5,2б
14	1,7б	2,7б	3,7б	4,7б	5,7б	49	1,7в	2,7б	3,6б	4,6б	5,1б
15	1,1в	2,1в	3,1в	4,1в	5,1в	50	1,1г	2,5в	3,6в	4,4в	5,3в
16	1,2в	2,2в	3,2в	4,2в	5,2в	51	1,2г	2,6в	3,7в	4,5в	5,4в
17	1,3в	2,3в	3,3в	4,3в	5,3в	52	1,3г	2,7в	3,1в	4,6в	5,5в
18	1,4в	2,4в	3,4в	4,4в	5,4в	53	1,4г	2,1в	3,2в	4,7в	5,6в
19	1,5в	2,5в	3,5в	4,5в	5,5в	54	1,5г	2,2в	3,3в	4,3в	5,7в
20	1,6в	2,6в	3,6в	4,6в	5,6в	55	1,6г	2,3в	3,4в	4,2в	5,2в
21	1,7в	2,7в	3,7в	4,7в	5,7в	56	1,7г	2,4в	3,5в	4,1в	5,1в
22	1,1г	2,1г	3,1г	4,1г	5,1г	57	1,1д	2,4г	3,3г	4,2г	5,2г
23	1,2г	2,2г	3,2г	4,2г	5,2г	58	1,2д	2,5г	3,4г	4,3г	5,3г
24	1,3г	2,3г	3,3г	4,3г	5,3г	59	1,3д	2,6г	3,5г	4,4г	5,7г
25	1,4г	2,4г	3,4г	4,4г	5,4г	60	1,4д	2,7г	3,7г	4,5г	5,4г
26	1,5г	2,5г	3,5г	4,5г	5,5г	61	1,5д	2,1г	3,7г	4,6г	5,5г
27	1,6г	2,6г	3,6г	4,6г	5,6г	62	1,6д	2,2г	3,1г	4,7г	5,6г
28	1,7г	2,7г	3,7г	4,7г	5,7г	63	1,7д	2,3г	3,2г	4,1г	5,1г
29	1,1д	2,1д	3,1д	4,1д	5,1д	64	1,1 а	2,6д	3,1д	4,2д	5,6д
30	1,2д	2,2д	3,2д	4,2д	5,2д	65	1,2 а	2,7д	3,2д	4,1д	5,7д
31	1,3д	2,3д	3,3д	4,3д	5,3д	66	1,3 а	2,5д	3,3д	4,3д	5,1д
32	1,4д	2,4д	3,4д	4,4д	5,4д	67	1,4 а	2,1д	3,4д	4,7д	5,2д
33	1,5д	2,5д	3,5д	4,5д	5,5д	68	1,5 а	2,4д	3,5д	4,4д	5,3д
34	1,6д	2,6д	3,6д	4,6д	5,6д	69	1,6 а	2,3д	3,6д	4,5д	5,4д
35	1,7д	2,7д	3,7д	4,7д	5,7д	70	1,7 а	2,2д	3,7д	4,6д	5,5д

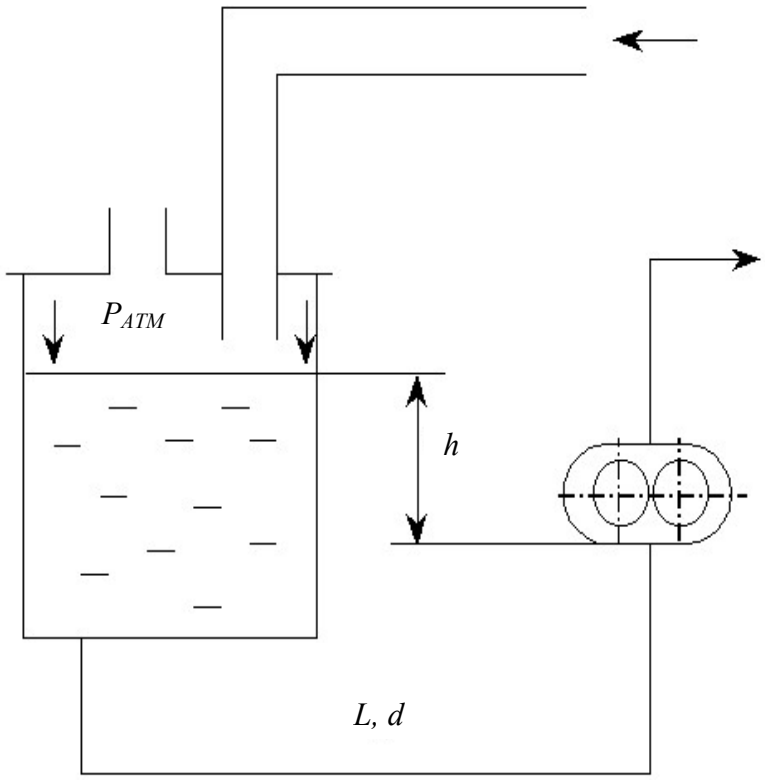
Вариант	Номера задач по машинам					Вариант	Номера задач по машинам				
1	Ш	Пл.	РП	АП	ГА	**1**	Ш	Пл.	РП	АП	ГА
	2	**3**	**4**	**5**	**6**		**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
71	1,1в	2,1б	3,7а	4,2г	5,3д	111	1,6в	2,2г	3,7в	4,2д	5,2а
72	1,2в	2,2б	3,1а	4,3г	5,2д	112	1,7в	2,3г	3,1в	4,1д	5,3а
73	1,3в	2,3б	3,6а	4,4г	5,1д	113	1,1г	2,4б	3,3г	4,5в	5,1б
74	1,4в	2,7б	3,2а	4,5г	5,7д	114	1,2г	2,5б	3,4г	4,7в	5,2б
75	1,5в	2,6б	3,5а	4,6г	5,4д	115	1,3г	2,7б	3,5г	4,1в	5,3б
76	1,6в	2,5б	3,3а	4,7г	5,6д	116	1,4г	2,1б	3,6г	4,6в	5,7б
77	1,7в	2,4б	3,4а	4,1г	5,5д	117	1,5г	2,2б	3,7г	4,2в	5,4б
78	1,1г	2,4д	3,6а	4,2б	5,3в	118	1,6г	2,3б	3,1г	4,3в	5,6б
79	1,2г	2,5д	3,7а	4,1б	5,7в	119	1,7г	2,6б	3,2г	4,4в	5,5б
80	1,3г	2,6д	3,1а	4,7б	5,4в	120	1,1д	2,3а	3,5б	4,3г	5,4в
81	1,4г	2,7д	3,2а	4,6б	5,6в	121	1,2д	2,4а	3,6б	4,2г	5,5в
82	1,5г	2,1д	3,3а	4,5б	5,5в	122	1,3д	2,5а	3,7б	4,1г	5,6в
83	1,6г	2,2д	3,4а	4,4б	5,1в	123	1,4д	2,6а	3,1б	4,4г	5,7в
84	1,7г	2,3д	3,5а	4,3б	5,2в	124	1,5д	2,7а	3,2б	4,5г	5,1в
85	1,1д	2,4а	3,4б	4,1в	5,7г	125	1,6д	2,1а	3,3б	4,6г	5,2в
86	1,2д	2,3а	3,5б	4,2в	5,6г	126	1,7д	2,2а	3,4б	4,7г	5,3в
87	1,3д	2,7а	3,6б	4,3в	5,5г	127	1,1 а	2,7в	3,3д	4,2а	5,2б
88	1,4д	2,2а	3,7б	4,4в	5,4г	128	1,2 а	2,1в	3,2д	4,3а	5,4б
89	1,5д	2,6а	3,1б	4,5в	5,3г	129	1,3 а	2,2в	3,1д	4,7а	5,7б
90	1,6д	2,1а	3,2б	4,6в	5,2г	130	1,4 а	2,3в	3,7д	4,1а	5,1б
91	1,7д	2,5а	3,3б	4,7в	5,1г	131	1,5 а	2,6в	3,4д	4,6а	5,5б
92	1,1 а	2,2д	3,1г	4,2б	5,2в	132	1,6 а	2,4в	3,5д	4,5а	5,6б
93	1,2 а	2,7д	3,2г	4,7б	5,3в	133	1,7 а	2,5в	3,6д	4,4а	5,3б
94	1,3 а	2,3д	3,3г	4,6б	5,1в	134	1,1б	2,2д	3,3а	4,5б	5,2д
95	1,4 а	2,1д	3,4г	4,3б	5,4в	135	1,2б	2,7д	3,4а	4,6б	5,3д
96	1,5 а	2,6д	3,5г	4,5б	5,7в	136	1,3б	2,6д	3,5а	4,1б	5,4д
97	1,6 а	2,5д	3,6г	4,4б	5,6в	137	1,4б	2,5д	3,6а	4,4б	5,1д
98	1,7 а	2,4д	3,7г	4,1б	5,5в	138	1,5б	2,4д	3,7а	4,7б	5,7д
99	1,1б	2,7в	3,6д	4,5а	5,5г	139	1,6б	2,3д	3,1а	4,2б	5,6д
100	1,2б	2,6в	3,7д	4,6а	5,1г	140	1,7б	2,1д	3,2а	4,3б	5,5д
101	1,3б	2,5в	3,1д	4,7а	5,2г	141	1,1в	2,2г	3,6г	4,7г	5,7а
102	1,4б	2,4в	3,2д	4,1а	5,7г	142	1,2в	2,7г	3,1г	4,6г	5,1а
103	1,5б	2,3в	3,3д	4,2а	5,6г	143	1,3в	2,1г	3,2г	4,5г	5,6а
104	1,6б	2,2в	3,4д	4,3а	5,3г	144	1,4в	2,5г	3,7г	4,4г	5,5а
105	1,7б	2,1в	3,5д	4,4а	5,4г	145	1,5в	2,4г	3,5г	4,3г	5,3а
106	1,1в	2,4г	3,2в	4,6д	5,4а	146	1,6в	2,3г	3,4г	4,2г	5,2а
107	1,2в	2,5г	3,3в	4,7д	5,5а	147	1,7в	2,6г	3,3г	4,1г	5,4а
108	1,3в	2,6г	3,4в	4,5д	5,6а	148	1,1г	2,4б	3,2б	4,5д	5,3д
109	1,4в	2,7г	3,5в	4,4д	5,7а	149	1,2г	2,5б	3,3б	4,4д	5,5д
110	1,5в	2,1г	3,6в	4,3д	5,1а	150	1,3г	2,6б	3,4б	4,2д	5,1д

7.1. Задачи по шестеренным машинам

Задача 7.1.1

Определить избыточное давление на входе в шестеренный насос системы смазки, имеющий частоту вращения вала n, число зубьев z, модуль m, ширину колеса b.

Длина стального всасывающего трубопровода L, диаметр d, шероховатость трубы Δ. Входное сечение насоса расположено ниже свободной поверхности в масляном баке на h. Местные потери в трубопроводе принять равными 10 % потерь на трение по длине.



Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
n, р/с	15	20	25	10	30
z	20	25	30	35	22
m, мм	7,5	8	9	10	12
b, мм	10	12	16	20	18
L, м	5	4	3	2	5
d, мм	30	25	20	15	32
Δ, мм	0,1	0,2	0,3	0,25	0,35
h, м	2	1	0,5	1,5	2,3
Тип масла	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.1.2

Построить графики:

1) зависимостей подач шестеренного насоса от частоты вращения его вала для трех значений давлений на выходе (P_1 - P_3);

2) зависимости подачи от давления при заданном n.

Принять утечки жидкости пропорциональными давлению, коэффициент пропорциональности k. Ширина шестерни b, диаметр окружности головок $D_г$, число зубьев z.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
P_1, МПа	0	0	0	0	0
P_2, МПа	10	2	6.3	8	12.5
P_3, МПа	20	6	10	12.5	32
n, мин$^{-1}$	1440	650	900	1000	1250
k, л/с·Па	$0{,}5\cdot10^{-8}$	$0{,}3\cdot10^{-8}$	$0{,}4\cdot10^{-8}$	$0{,}6\cdot10^{-8}$	$0{,}5\cdot10^{-8}$
b, мм	31,85	40	35	28	30
$D_г$, мм	48	50	45	40	38
z	10	16	18	20	24

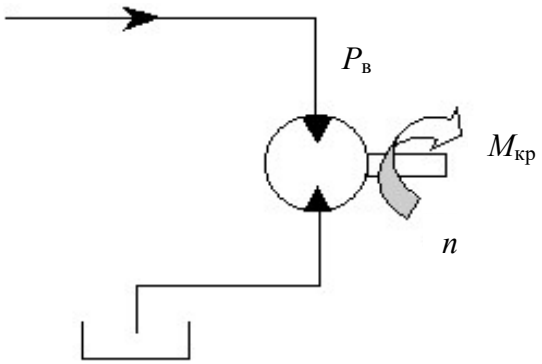
Задача 7.1.3

Определить основные геометрические размеры насоса (диаметр начальной окружности, диаметр окружности выступов, ширину шестерни), а также мощности потока жидкости на выходе из насоса и на валу насоса по следующим исходным данным: рабочий объем насоса q_0, давление на выходе $P_{вых}$, частота вращения вала n, объемный КПД насоса η_0, КПД насоса $\eta_н$, число зубьев z, модуль зацепления m.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
q_0, см^3	83	70	95	105	123
$P_{вых}$, МПа	16	10	20	32	8
n, мин$^{-1}$	1440	950	1250	1000	1300
η_0	0,9	0,88	0,92	0,93	0,91
$\eta_н$	0,85	0,82	0,87	0,86	0,83
z	16	20	25	29	34
m	4	6	7	8	9

Задача 7.1.4.

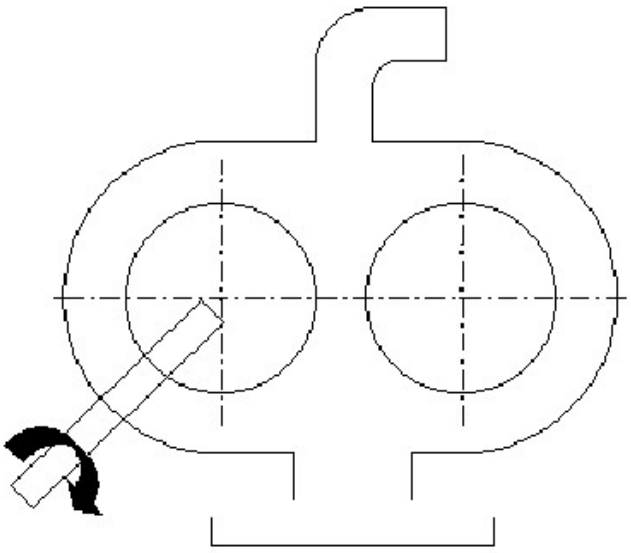
Определить крутящий момент М и частоту вращения вала n шестеренного гидромотора при расходе рабочей жидкости Q, если давление жидкости на входе в гидромотор $P_в$, на выходе из гидромотора $P_{вых}$. Ширина шестерни b, модуль зацепления m, число зубьев z, механический КПД $\eta_{мех}$, объемный КПД η_0.



Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
Q, кг/с	1,8	1,6	2,0	2,2	2,4
$P_в$, МПа	10	12,5	20	8	32
$P_{вых}$, МПа	0,5	0,5	0,8	0,9	0,6
b, мм	30	40	50	45	35
m, мм	6	8	10	7	9
z	16	20	22	30	25
$\eta_{мех}$	0,8	0,82	0,84	0,78	0,85
η_0	0,9	0,92	0,94	0,88	0,95
Жидкость	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.1.5.

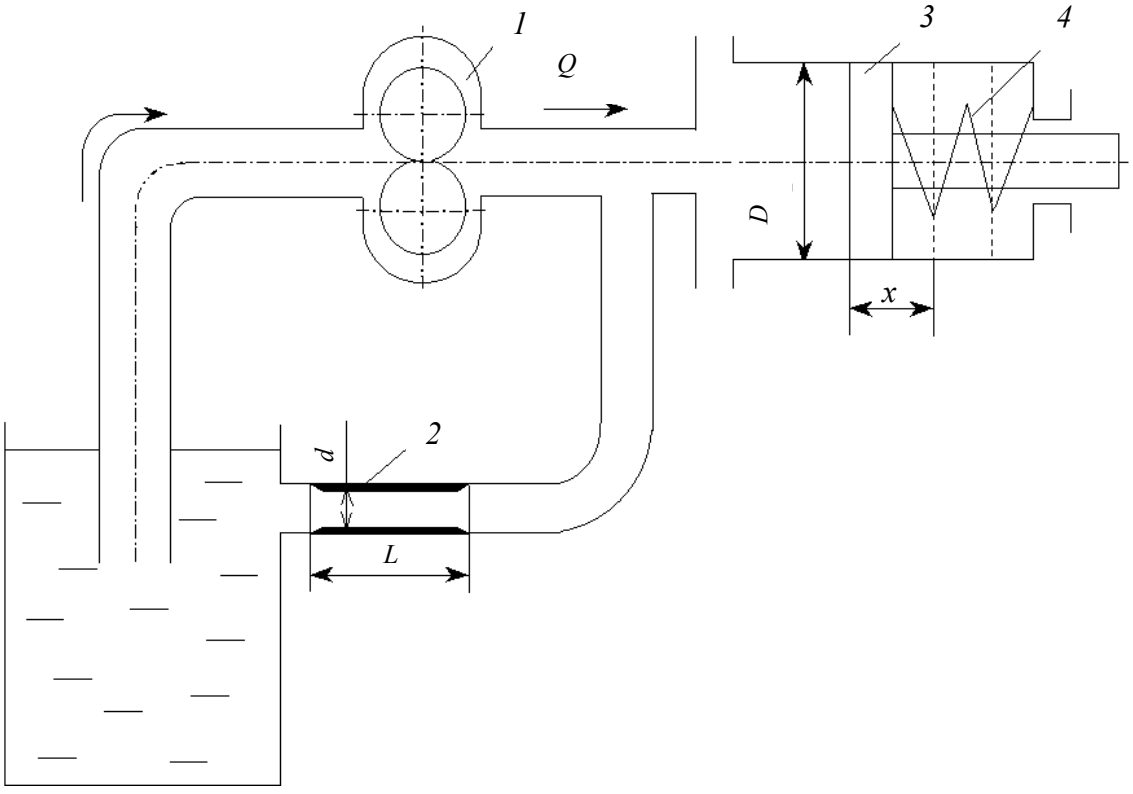
Определить основные геометрические размеры шестеренного насоса (диаметр начальной окружности шестерни Dc, ширину шестерни b, число зубьев z, рабочий объем V_0, мощность потока жидкости на выходе из насоса $N_ф$ и мощность на валу насоса $N_п$) по следующим исходным данным: подача насоса Q, давление на выходе $P_в$, частота вращения вала n, объемный КПД η_0, КПД насоса, $\eta_н$.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
Q, кг/с	1,9	1,8	2,0	2,1	2,2
$P_в$, МПа	8	6	10	12,5	20
n, мин$^{-1}$	1480	1440	1250	900	980
η_0	0,9	0,92	0,88	0,94	0,93
$\eta_н$	0,8	0,82	0,78	0,84	0,85
жидкость	И-20	И-30	И-12	И-50	турбинное-57

Задача 7.1.6

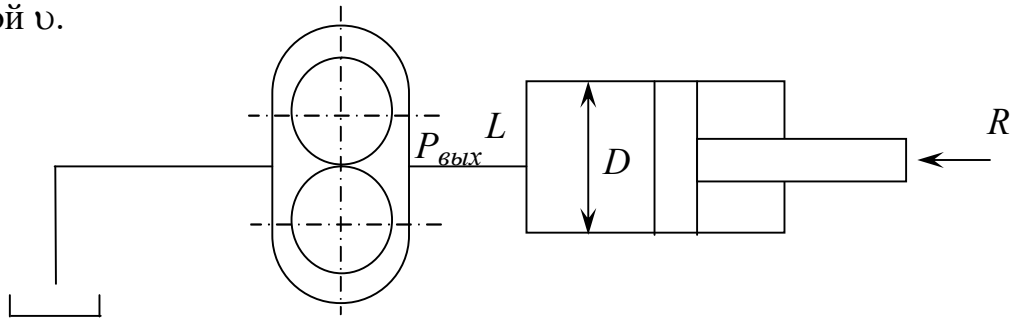
В регуляторе скорости гидротурбины применен так называемый гидравлический маятник. При изменении частоты вращения регулируемой турбины изменяется частота вращения вала насоса *1* и расход жидкости, прокачиваемой насосом *1* маятника через калиброванную трубку *2*, вследствие чего изменяется сила давления на поршень *3*, и последний, изменяя поджатие пружины *4*, оказывает воздействие на систему регулирования гидротурбины. Определить диаметр *d* калиброванной трубки, при котором при геометрических параметрах насоса (модуль *m*, число зубьев *z*, ширина шестерни *b*) и рабочей частоте вращения вала *n* обеспечивается такая подача жидкости *Q*, при которой сжатие пружины составляет *x*. Жесткость пружины *C*, длина трубки *L*, динамическая вязкость масла μ, диаметр поршня *D*. Сопротивлением подводящих труб пренебречь.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
m, мм	4	6	8	10	12
z	15	18	20	21	23
b, см	2	3	4	1,5	2,5
n, мин$^{-1}$	780	800	900	1250	1400
x, мм	60	61	62	64	66
c, Н/см	7,5	7,8	7,9	8,1	8,2
L, м	0,7	0,6	0,8	0,75	0,65
μ, Па·с	0,3	0,32	0,34	0,4	0,42
D, мм	30	35	40	45	25

Задача 7.1.7

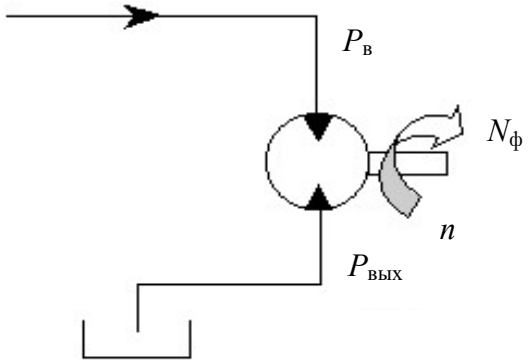
Определить давление на выходе шестеренного насоса $P_{вых}$, подающего жидкость в гидроцилиндр, если число зубьев z, модуль m, ширина колеса b, частота вращения вала насоса n, длина трубопровода, связывающего насос с гидроцилиндром, L, усилие на штоке R, внутренний диаметр цилиндра D. Потерями энергии на местных сопротивлениях, а также трением поршня и штока пренебречь. Скорость движения жидкости в трубопроводе принять равной υ.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
z	17	19	20	22	24
m, мм	7,5	7	8	10	6
b, см	1,5	1,2	2	2,2	1,8
n, с$^{-1}$	15	20	25	28	30
L, м	5	6	7	4	6,5
R, кН	10	14	18	16	20
D, мм	32	40	35	42	45
$\upsilon_ж$, м/с	4	3,5	3	4,5	3,8
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

7.2. Задачи по пластинчатым машинам

Задача 7.2.1

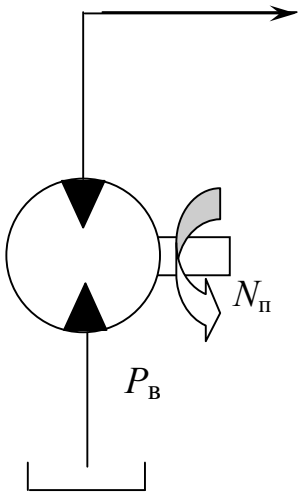


Определить мощность $N_ф$ на валу пластинчатого гидромотора двукратного действия, величину давления на входе в гидромотор и частоту вращения вала гидромотора n, если радиус статора R, ротора r, объемный КПД η_0, механический КПД $\eta_{мех}$, давление на выходе P, ширина пластин b, теоретический момент гидромотора M, толщина пластинки δ, число пластин z.

Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
R, см	4	4,5	5	5,2	3,5
r, мм	34	40	45	44	29
η_0	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79
$\eta_{мех}$	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
$P_{вых}$, МПа	0,2	0,22	0,25	0,19	0,26
b, см	4	4,3	4,5	4,8	3,6
M, Н·м	30	32	34	36	38
δ, мм	2	3	4	2,5	3,5
z	12	14	16	18	20
Q, л/с	1,333	1,666	1,82	1,98	2,0

Задача 7.2.2

Определить $N_п$ на валу пластинчатого насоса однократного действия, его фактическую подачу $Q_ф$ и диаметры подводящих $d_п$ и отводящих каналов насоса, если давление на входе $P_в$, манометрическое давление, развиваемое насосом $P_{ман}$, радиус статора R, число пластин z, толщина пластинки δ, ширина пластинки b, величина эксцентриситета e, частота вращения вала насоса n, объемный КПД η_0, полный КПД $\eta_н$.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
$P_в$, МПа	0,02	0,01	0,03	0,04	0,05
$P_{ман}$, МПа	6,3	8	10	12,5	20
R, мм	30	35	40	45	50
z	14	15	16	18	10
δ, мм	2	1,8	2,2	2,3	2,5
b, см	25	30	32	35	40
e, мм	4	5	4,5	5,5	6
n, мин$^{-1}$	960	1000	1250	1400	1440
η_0	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82
$\eta_н$	0,72	0,71	0,73	0,74	0,75

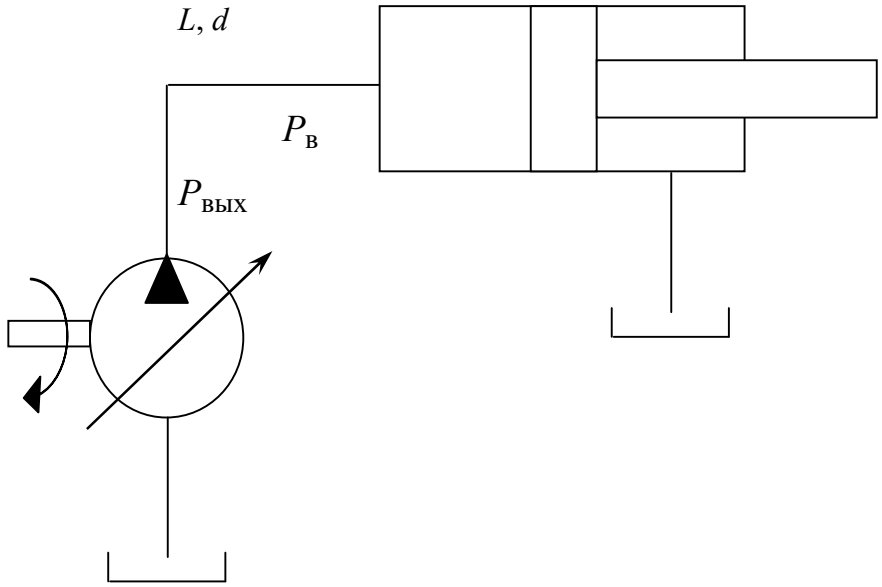
Задача 7.2.3

Определить рабочий объем V, подачу Q пластинчатого насоса двукратного действия, а также потребляемую мощность $N_п$ и момент M, подведенный к валу насоса, если частота вращения ротора n, объемный КПД η_0, полный КПД $\eta_н$, абсолютное давление на входе в насос $P_в$, на выходе из насоса $P_{вых}$, радиус ротора r, радиус статора R, ширина пластины b, число пластин z.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
n, мин$^{-1}$	1200	1000	950	1400	800
η_0	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69
$\eta_н$	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59
$P_в$, кПа	80	85	90	95	100
$P_{вых}$, МПа	8	10	12,5	20	32
r, см	50	60	65	65	50
R, мм	600	650	700	700	550
b, см	30	35	40	25	50
z	12	14	16	10	18

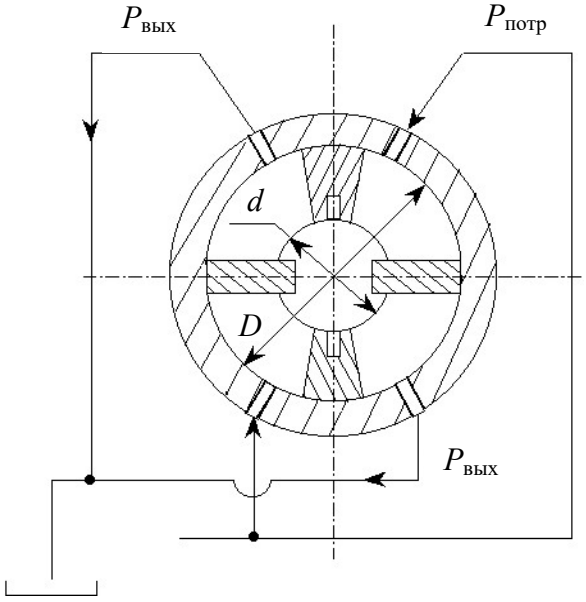
Задача 7.2.4

Определить давление на выходе пластинчатого насоса однократного действия $P_{вых}$, если давление на входе в гидроцилиндр $P_в$, радиус статора насоса R, величина эксцентриситета e, ширина пластины b, частота вращения вала насоса n, длина трубопровода L. Местными потерями энергии пренебречь.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
$P_в$, МПа	8	10	12,5	6,3	20
R, см	5	5,5	6	4,5	6,5
e, мм	6	5	8	4	7
b, мм	35	30	40	25	45
n, $с^{-1}$	15	12	16	18	21
L, м	5	4	6	4,5	7
d, мм	22	25	28	31	34
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.2.5

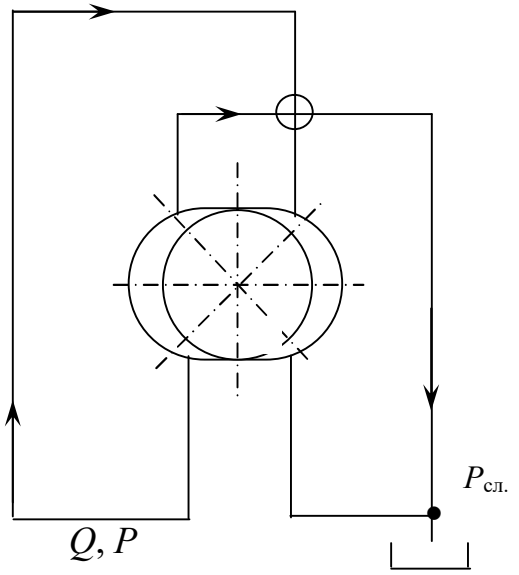


Двухкамерный гидродвигатель поворотного движения должен создавать момент на валу M при скорости поворота ω. Размеры гидродвигателя: D, d, ширина пластин b. Принять механический КПД $\eta_{мех}$, объемный - η_0. Определить потребное давление и необходимую подачу, если давление на выходе $P_{вых}$.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
M, кН·м	2	1,5	2,5	1,8	2,8
ω, рад/с	2	1,5	2,5	1,6	0,9
D, мм	200	150	100	250	250
d, мм	100	50	25	150	100
b, см	60	40	20	25	30
$\eta_{мех}$	0,9	0,89	0,88	0,87	0,86
η_0	0,75	0,74	0,73	0,72	0,74
$P_{вых}$, МПа	0,3	0,28	0,2	0,3	0,25

Задача 7.2.6

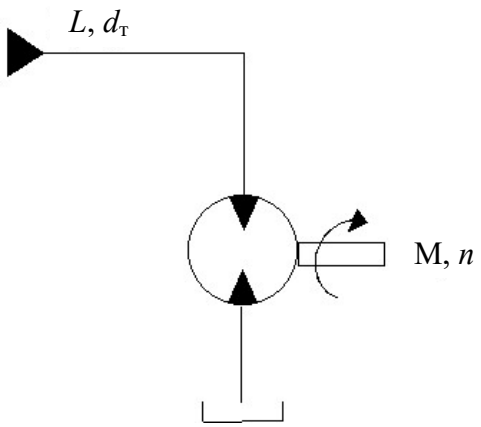
К пластинчатому гидромотору двукратного действия подводится жидкость: Q, p. Мотор имеет параметры: число пластин z, ширина пластины b, радиус статора R, ротора - r, толщина пластины δ, объемный КПД η_0, общий КПД η. Давление в сливной гидролинии $P_{сл}$. Определить частоту вращения вала гидромотора и момент на валу.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
Q, л/с	1	1,5	2	0,5	2,5
P, МПа	10	8	12,5	6,3	20
z	12	14	16	10	18
b, см	3	4	5	2	3,5
R, мм	60	50	70	40	80
r, мм	50	40	60	30	70
δ, мм	2	2,2	2,5	1,8	3
η_0	0,85	0,86	0,87	0,84	0,88
η	0,81	0,82	0,83	0,8	0,84
$P_{сл}$, МПа	0,3	0,35	0,2	0,25	0,4

Задача 7.2.7

Жидкость по трубопроводу длиной L и диаметром $d_т$ поступает в пластинчатый гидромотор двукратного действия. Параметры мотора: диаметр статора D, диаметр ротора d, ширина ротора b, механический КПД $\eta_{мех}$, КПД η. Давление в сливной гидролинии $P_{сл}$. Параметры потока в начале трубопровода: Q, P. Определить крутящий момент на валу гидромотра и частоту вращения вала.

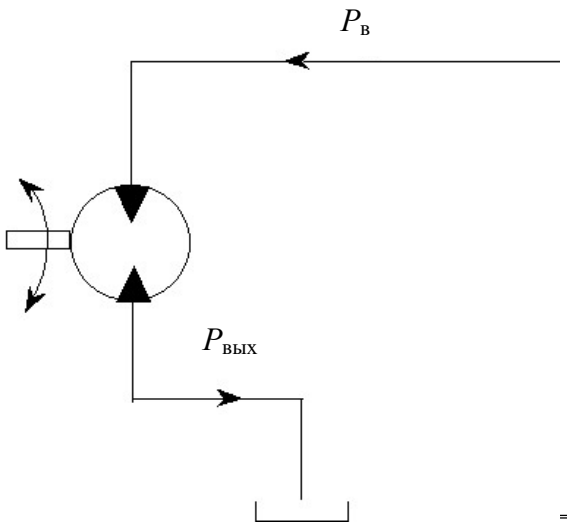


Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
L, м	10	15	20	18	5
$d_т$, мм	22	20	28	15	10
D, см	10	15	13	20	25
d, см	8	13	10	18	20
b, мм	30	25	20	35	40
$\eta_{мех}$	0,95	0,94	0,93	0,92	0,96
η	0,9	0,89	0,88	0,87	0,91
$P_{сл}$, МПа	0,3	0,35	0,2	0,25	0,4
Q, л/с	1	1,5	1,8	2	2,5
P, МПа	12,5	6,3	8	10	20
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

7.3. Задачи по радиально-поршневым машинам

Задача 7.3.1

Определить расход жидкости Q и давление $P_в$ на входе в гидромотор радиально-поршневого типа 7-и кратного действия, если крутящий момент на его валу равен M, частота вращения вала n, давление на выходе $P_{вых}$, механический КПД $\eta_{мех}$, объемный η_0, число рядов поршней m, диаметр поршня d, ход поршня h.

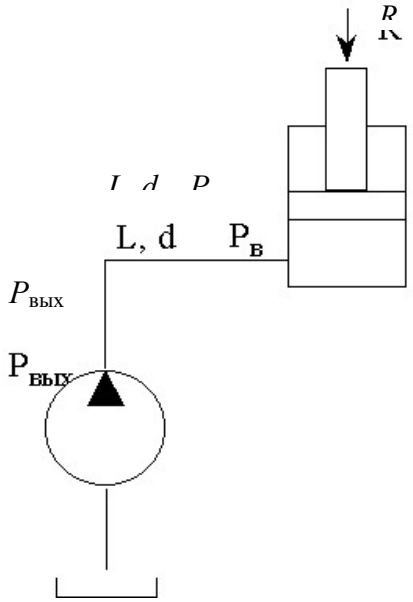


Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д

M, кН·м	1,5	1,2	2	1,8	2,5
n, мин$^{-1}$	120	150	200	100	250
$P_{вых}$, МПа	0,2	0,3	0,4	0,25	0,35
$\eta_{мех}$	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
η_0	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
m	1	2	3	1	2
d, мм	30	35	40	25	20
h, мм	30	25	30	15	10

Задача 7.3.2.

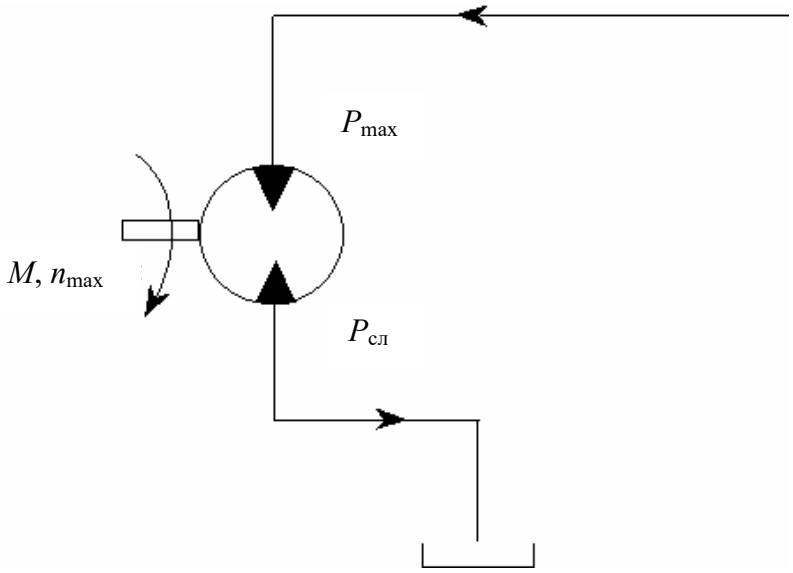
Однорядный радиально-поршневой насос однократного действия, имеющий диаметр поршня d, число поршней z, эксцентриситет e, частоту вращения вала n, подает жидкость в гидродомкрат и обеспечивает на входе в него давление $P_в$. Определить давление на выходе из насоса $P_{вых}$. Длина трубопровода L, диаметр трубы $d_т$. Объемный КПД насоса η_0. Местными потерями энергии пренебречь.



Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
d, мм	16	20	18	25	30
z	7	8	10	12	6
e, мм	16	15	14	10	12
n, мин$^{-1}$	900	800	1000	1250	1440
$P_в$, МПа	10	8	6,3	12,5	20
L, м	7	8	10	6	4
$d_т$, мм	30	25	20	35	32
η_0	0,95	0,94	0,93	0,96	0,92
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.3.3

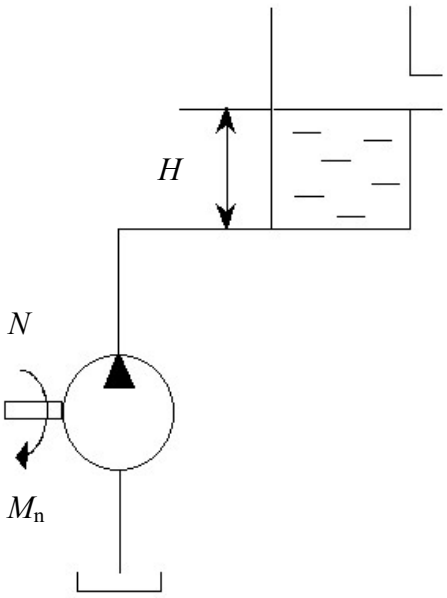
Определить максимальную частоту вращения n_{max} ротора гидромотора, нагруженного постоянным моментом M, если максимальное давление на входе P_{max}, расход жидкости Q, объемный КПД гидромотора при P_{max} η_0, механический КПД при том же давлении $\eta_{мех}$, давление на сливе $P_{сл}$.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
M, Н·м	300	250	200	150	350
P_{max}, МПа	20	12,5	10	8	6,3
Q, л/мин	15	12	8	10	18
η_0	0,9	0,89	0,91	0,88	0,87
$\eta_{мех}$	0,92	0,91	0,93	0,9	0,89
$P_{сл}$, МПа	0,2	0,3	0,25	0,35	0,4

Задача 7.3.4.

Радиально-поршневой насос подает жидкость в резервуар на высоту H по горизонтальному трубопроводу длиной L и диаметром d. Определить мощность $N_п$ и момент $M_п$, подведенные к валу насоса, если параметры насоса следующие: диаметр поршня $d_п$, эксцентриситет e, число цилиндров z, частота вращения вала n, КПД объемный η_0, механический КПД $\eta_{мех}$. Коэффициент местных сопротивлений принять равными ξ_i=1. Потерями на всасывании пренебречь.

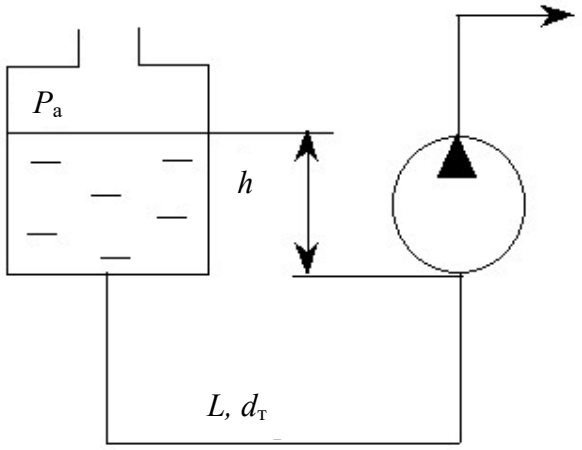


Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д

H, м	10	15	20	18	9
L, м	5	6	7	8	9
$d_т$, мм	30	25	20	35	18
$d_п$, мм	22	18	15	10	20
e, мм	20	10	12	16	18
z	9	10	8	15	20
n, $с^{-1}$	15	16	17	18	20
η_0	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87
$\eta_{мех}$	0,97	0,95	0,93	0,91	0,9
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.3.5

Определить избыточное давление на входе в радиально-поршневой насос системы управления, имеющий частоту вращения вала n, число цилиндров z, диаметр цилиндра d, эксцентриситет e, объемный КПД η_0. Входное сечение насоса расположено ниже свободной поверхности жидкости на h. Длина трубопровода L, диаметр $d_т$. Местные потери принять равными 10 % потерь на трение по длине трубопровода.



Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
n, $с^{-1}$	15	16	17	14	13
z	7	8	9	6	10
$d_ц$, мм	20	10	15	25	30
e, мм	20	12	17	22	25
η_0	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
h, м	3	3,5	2,5	2	4
L, м	7	8	9	10	6
$d_т$, мм	30	32	26	28	25
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное 57

Задача 7.3.6

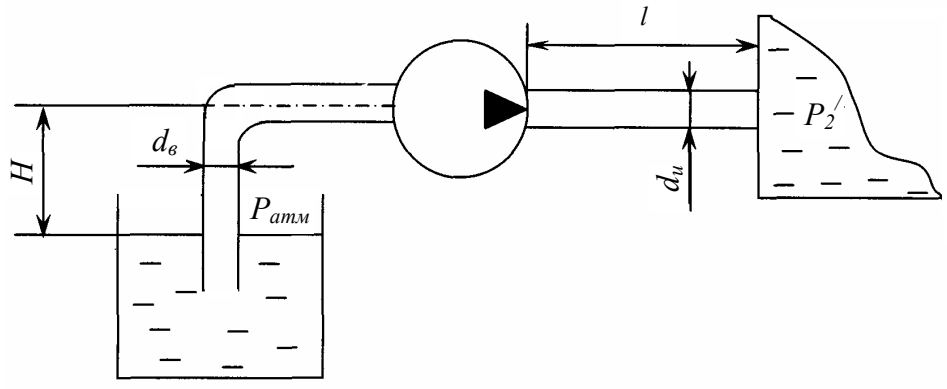
Определить основные параметры радиально-поршневого высокомоментного мотора (расход жидкости, диаметр поршня, фактический расход

жидкости, теоретический и полезный моменты на валу гидромотора, теоретическую и полезную мощности на валу гидромотора, коэффициент момента, утечки жидкости, объемный КПД), если рабочий объем гидромотора V, частота вращения вала n, механический КПД гидромотора $\eta_{мех}$, число рядов поршней m, кратность действия K, число поршней в ряду $z = 7$, ход поршня h, зазор между поршнем и цилиндром $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ м. При расчетах принимать $d = h$, затем величину d округлять до стандартного значения.

Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
$V \cdot 10^{-6}$, м/об	452	707	1126	1809	2780
n, $с^{-1}$	2,2	2,0	1,7	1,3	1,0
$\eta_{мех}$	0,89	0,90	0,90	0,92	0,90
m	2	2	2	3	3
K	7	7	7	9	9
$h \cdot 10^{-3}$, м	20	22	26	28	20
P, МПа	6,3	8,0	5,0	12,5	10,0

Задача 7.3.7

Определить напор, создаваемый радиально-поршневым насосом, имеющим рабочий объем V, частоту вращения вала n, если диаметр всасывающего трубопровода $d_в$, напорного $d_н$, секундный массовый расход $Q_с$, условная вязкость жидкости E_{20}, длина напорного трубопровода l, давление на выходе трубопровода $P_2^{/}$, высота всасывания H, плотность жидкости ρ=900 кг/м^3, температура масла $t = 20\ ^0$С. Основные параметры гидросистемы приведены в таблице.

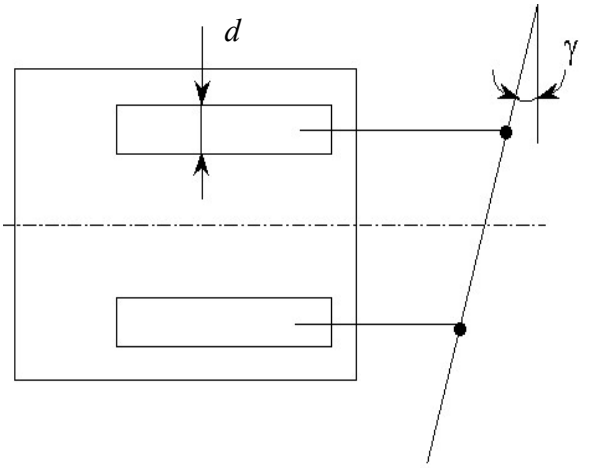


Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
$d_в \cdot 10^{-3}$, м	22	24	26	28	30
$d_н \cdot 10^{-3}$, м	12	14	16	18	20
E_{20}	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
$P_2^{/}$, МПа	6,3	8,0	12,5	10,0	12,5

l, м	8	10	12	10	16
$H \cdot 10^{-1}$, м	5	2	3	1	2
$V \cdot 10^{-6}$, м/об	6,3	10,0	16,0	25,0	48,0
n, об/с	15	15	15	15	15

7.4. Задачи по аксиально-поршневым машинам

Задача 7.4.1



Аксиально-поршневой насос обеспечивает подачу жидкости Q, давление на выходе $P_{вых}$ при частоте вращения вала n. Рассчитать основные геометрические параметры насоса – диаметр цилиндра d, ход поршня h, диаметр окружности расположения осей цилиндров D, а также мощность на валу насоса $N_в$ и крутящий момент $M_в$, если число цилиндров z, угол наклона диска γ, объемный КПД η_0, механический КПД $\eta_{мех}$. Принять $h = 2d$.

Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
Q, л/с	3,5	4,5	4	3	2,5
$P_{вых}$, МПа	22	28	12	8	6,3
n, мин$^{-1}$	1440	1250	900	800	600
z	7	4	5	8	9
γ, град	20	22	18	23	25
η_0	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
$\eta_{мех}$	0,9	0,89	0,88	0,87	0,86

Задача 7.4.2

Определить крутящий момент M на валу и угол наклона γ диска аксиально-поршневого гидромотора, при котором частота вращения его вала, n, расход рабочей жидкости Q, перепад давлений $P_{ГМ}$, количество цилиндров z, диаметр цилиндра d, диаметр окружности D, на которой расположены оси цилиндров, объемный КПД η_0, механический КПД $\eta_{мех}$.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
n, мин$^{-1}$	1200	1440	900	800	650
Q, л/с	3	2	3,5	4	5
$P_{ГМ}$, МПа	12	6	8	10	20
z	7	5	8	9	10
d, мм	30	35	20	15	10
D, см	16	12	17	18	19
η_0	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
$\eta_{мех}$	0,9	0,89	0,88	0,87	0,86

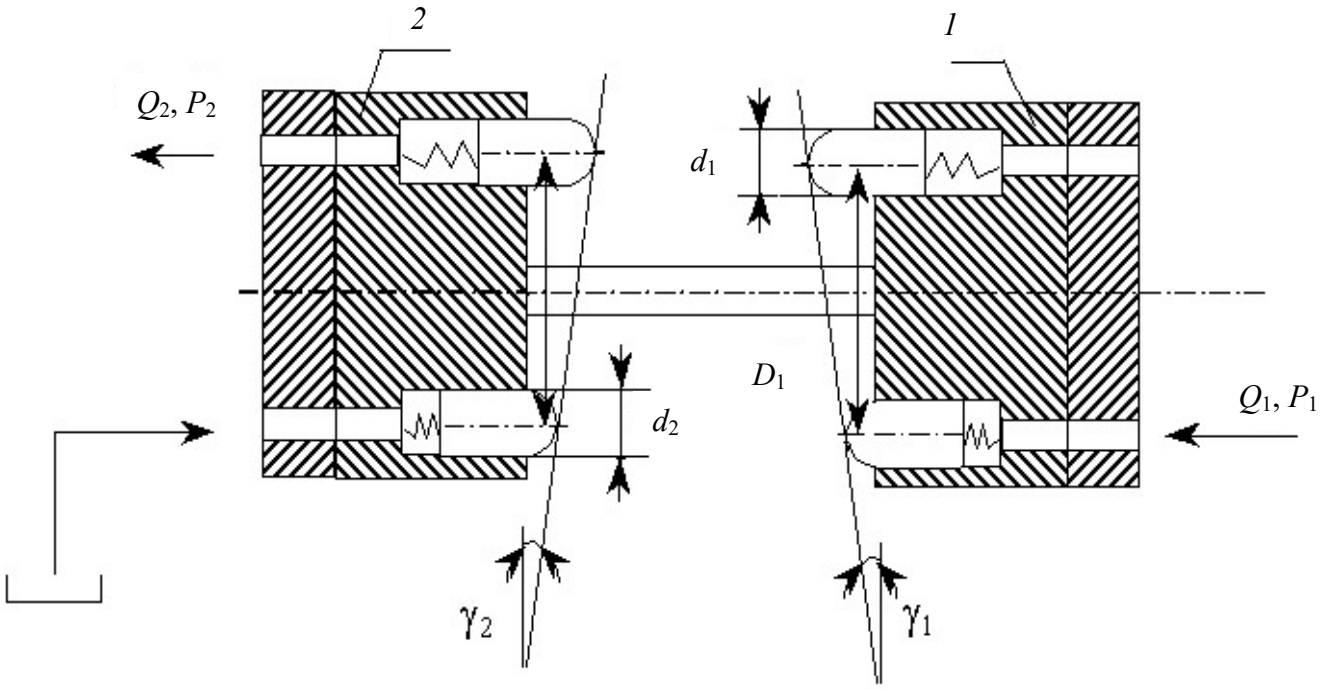
Задача 7.4.3

Определить частоту вращения вала аксиально-поршневого насоса с наклонным диском и фактическую мощность на валу, если подача насоса Q, диаметр поршня d, диаметр окружности D, на которой расположены гидроцилиндры, угол наклона диска γ, количество поршней z, объемный КПД η_0, общий КПД насоса η, давление на выходе из насоса P.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
Q, л/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
d, мм	60	50	40	70	80
D, см	27	26	24	28	30
γ, град	25	22	18	20	16
z	11	10	9	6	7
P, МПа	20	16	12,5	10	8
η_0	0,95	0,96	0,94	0,93	0,92
η	0,86	0,87	0,85	0,84	0,83

Задача 7.4.4

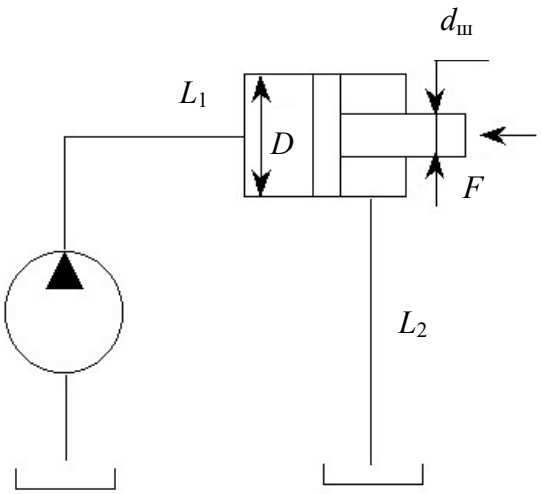
Гидропреобразователь составлен из двух аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском: насоса *2* и гидромотора *1* с основными размерами D_1, d_1, D_2, d_2 и $\gamma_1=\gamma_2$. Каким должен быть расход жидкости Q_1, подводимой к гидромотору 1 и давление P_1 на входе в гидромотор для получения на выходе из насоса подачи Q_2 при давлении P_2. КПД механический и объемный $\eta_{М1}=\eta_{М2}$, $\eta_{01}=\eta_{02}$.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
D_1, см	9	10	11	12	14
D_2, см	6	7	8	9	11
d_1, мм	15	18	21	25	30
d_2, мм	10	13	18	21	25
Q_2, л/с	1,8	1,6	1,4	2,0	2,2
P_2, МПа	15	18	20	22	25
η_{01}	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
$\eta_{мех1}$	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88

Задача 7.4.5

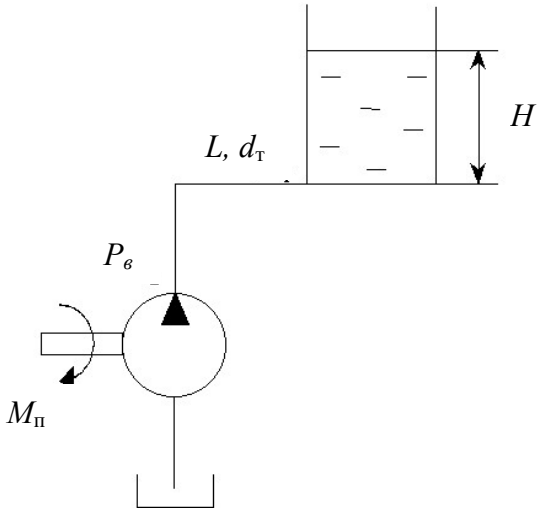
Определить давление на выходе аксиально-поршневого насоса, если длины напорного и сливного трубопроводов одинаковы L_1=L_2, их диаметры $d_т$, диаметр поршня D, диаметр штока $d_ш$, сила на штоке F. Параметры насоса; число цилиндров



z, диаметры цилиндров d, диаметр окружности размещения осей цилиндров D_0, угол наклона шайбы γ, частота вращения вала n.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
L_1, м	5	6	7	8	10
$d_т$, мм	15	20	25	10	18
D, мм	60	70	80	50	65
$d_ш$, мм	20	30	40	25	20
F, кН	1	2	3	4	4,5
z	7	8	9	10	11
d, мм	32	20	25	30	28
D_0, см	16	14	15	18	17
γ, град	10	12	15	22	20
n, мин$^{-1}$	1440	1250	1000	900	800
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.4.6

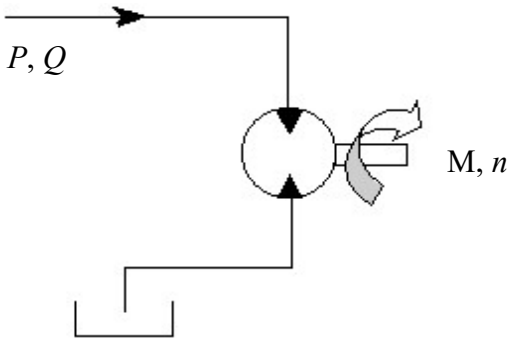


Аксиально-поршневой насос подает воду в бак высотой H по горизонтальному трубопроводу длиной L, диаметром $d_т$. Параметры насоса: диаметр поршня D, число поршней z, угол наклона блока γ, частота вращения вала n, объемный КПД η_0, механический - $\eta_{мех}$. Определить давление жидкости на выходе из насоса $P_в$ и подведенный к валу момент $M_п$. Потерями на всасывании пренебречь. Коэффициенты местных сопротивлений принять равными ξ_i=0,5, а $D_{окр}$=4D.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д

H, м	20	25	15	30	35
L, м	10	15	12	20	23
$d_т$, мм	26	20	22	30	34
D, мм	20	25	30	35	40
z	7	8	9	10	11
γ, град	20	18	15	22	25
n, мин$^{-1}$	15	16	17	18	14
η_0	0,95	0,96	0,94	0,93	0,92
$\eta_{мех}$	0,95	0,95	0,92	0,89	0,9

Задача 7.4.7

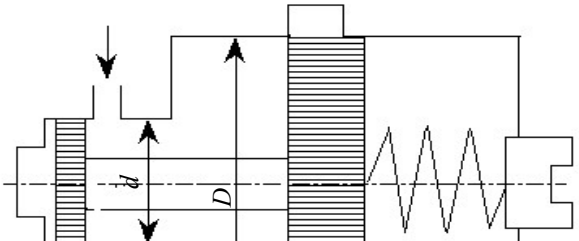


По гидромагистрали к аксиально-поршневому мотору подводится жидкость: Q, P. Мотор имеет параметры: диаметр цилиндра d, диаметр расположения центров цилиндров D, угол наклона шайбы γ, число цилиндров z, объемный КПД η_0, общий КПД мотора η. Определить частоту вращения вала гидромотора и момент на валу. Давление в сливной магистрали $P_{сл}$.

Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
Q, л/с	1	2	1,5	2,5	3
P, МПа	12,5	10	8	6,3	20
d, мм	20	25	30	35	40
D, мм	80	85	90	95	120
γ, град	20	18	22	25	15
z	7	8	9	11	10
η_0	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
η	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
$P_{сл}$, МПа	0,5	0,5	0,4	0,6	0,7
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

7.5. Задачи по гидроаппаратуре

Задача 7.5.1

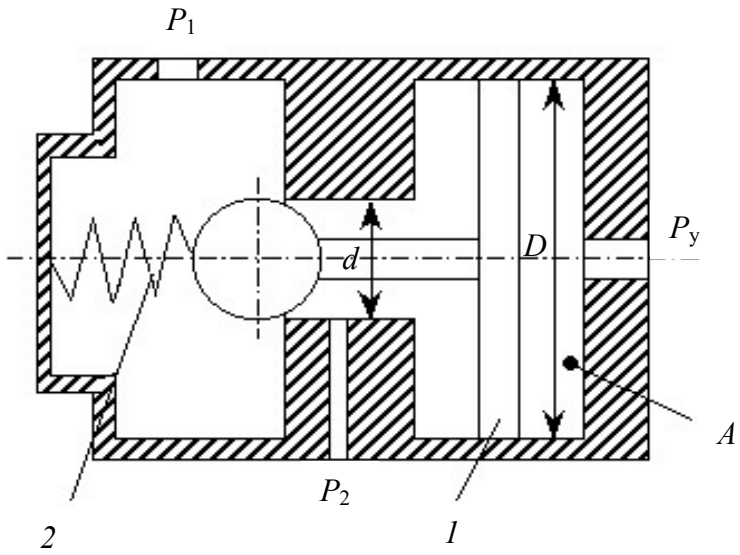


Определить величину предва-

рительного поджатия пружины дифференциального предохранительного клапана, обеспечивающую начало открытия клапана при $P_н$. Диаметры клапана: D, d, жесткость пружины C. Давление справа от большого и слева от малого поршней – атмосферное.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
$P_н$, МПа	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
D, мм	24	26	28	30	32
d, мм	18	20	22	24	26
C, Н/мм	6	5	7	8	4

Задача 7.5.2



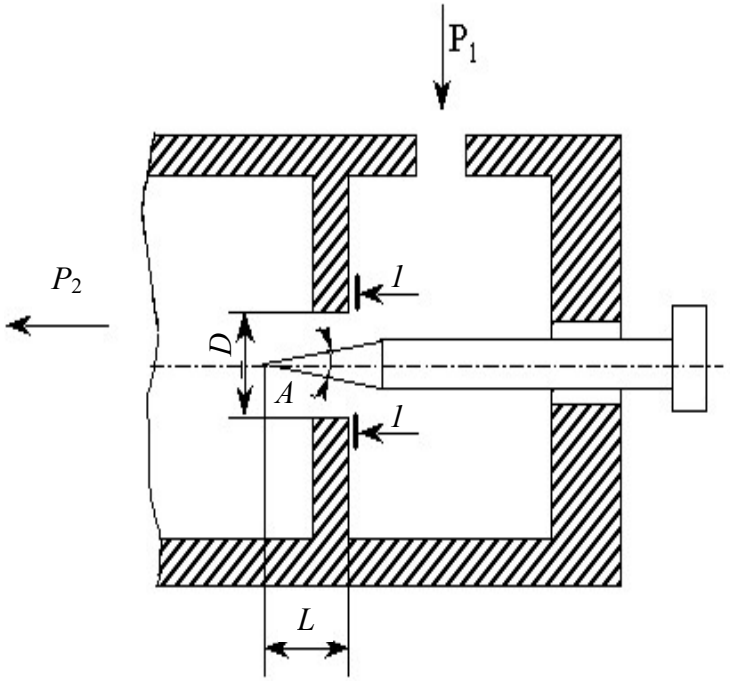
На рисунке представлена конструктивная схема гидрозамка, проходное сечение которого открывается при подаче в полость A управляющего потока жидкости с давлением $P_у$. Определить при каком минимальном значении $P_у$ толкатель поршня *1* сможет открыть шариковый клапан, если известно: предварительное усилие пружины F, диаметры D, d и давления P_1, P_2. Силами трения пренебречь.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
F, Н	50	60	70	80	40
D, мм	25	28	30	32	35
d, мм	15	18	20	22	26
P_1, Мпа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4

P_2, Мпа	0,2	0,2	0,1	0,15	0,1

Задача 7.5.3

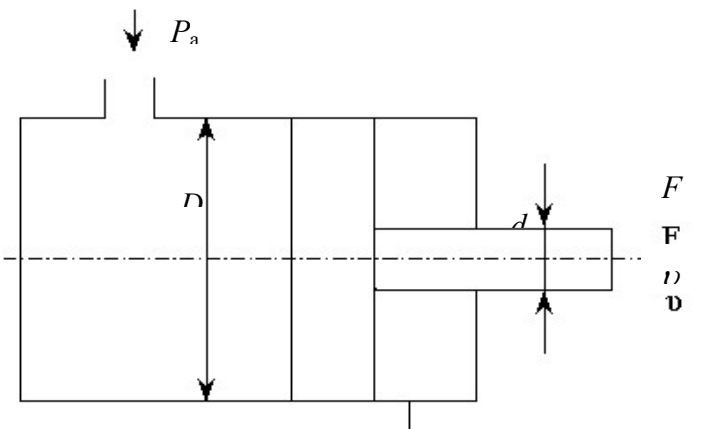
На рисунке изображена схема регулируемого игольчатого дросселя. Определить, на какое расстояние L необходимо втянуть иглу в дросселирующее отверстие для обеспечения перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2$, если угол иглы A, диаметр дросселирующего отверстия D, его коэффициент расхода μ, расход жидкости Q, плотность жидкости ρ. Площадь дросселирующего кольца определить по приближенной формуле: $S = S_0 - S_и$, где S_0 – площадь отверстия, $S_и$ – площадь иглы в сечении *1–1*.



Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
Δp, Мпа	3	4	5	6	2
A, град	30	28	25	32	20
D, см	6	4	5	7	8
μ	0,8	0,85	0,7	0,75	0,9
Q, л/с	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7
ρ, кг/м^3	900	920	960	980	930

Задача 7.5.4

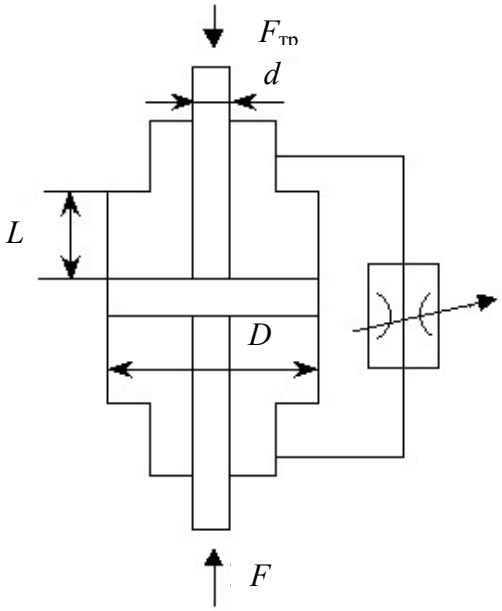
Определить диаметр отверстия дросселя, установленного на сливе из гидроцилиндра, при условии движения штока под



действием внешней нагрузки F со скоростью V. Диаметры: штока – d, цилиндра – D. Коэффициент расхода дросселя μ, плотность жидкости ρ, давление на сливе $P_{сл}$.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
F, кН	60	50	40	30	70
υ, мм/с	200	150	140	170	190
d, мм	40	30	35	45	50
D, мм	80	70	75	85	90
μ	0,65	0,55	0,5	0,7	0,75
ρ, кг/м^3	850	900	920	930	950
$P_{сл}$, МПа	0,3	0,2	0,4	0,3	0,25

Задача 7.5.5

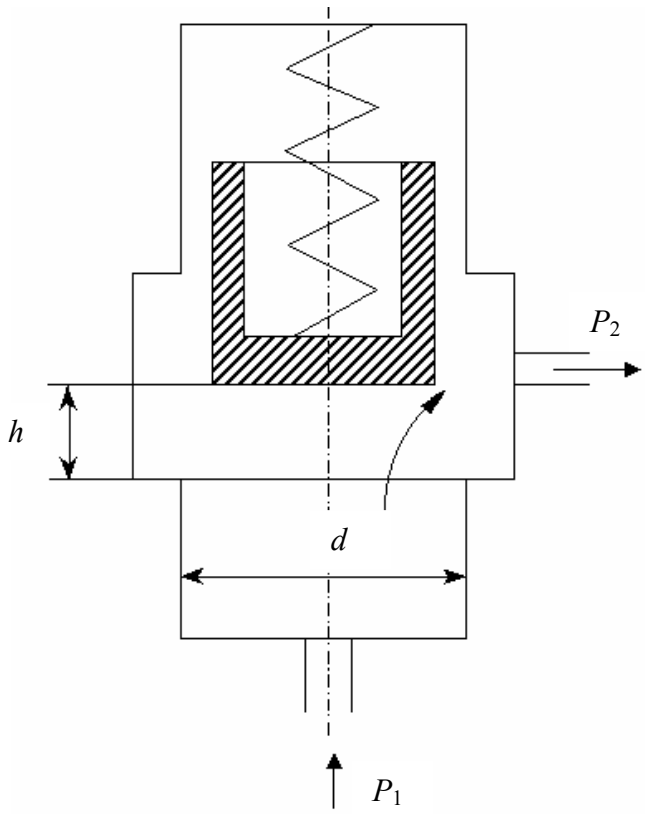


Правая и левая полости цилиндра гидравлического регулируемого тормоза, имеющего диаметр поршня D, диаметр штока d, сообщаются между собой через регулируемый дроссель, площадь проходного сечения которого установлена $S_{др}$. Коэффициент расхода дросселя μ. Определить время, за которое поршень переместиться на величину L под действием силы F, приняв плотность жидкости ρ и пренебрегая потерями энергии при ее движении по гидролиниям. Принять $F_{тр}$.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
D, мм	160	150	170	180	140
d, мм	80	75	85	90	70
$S_{др}$, мм^2	20	22	15	18	25
μ	0,65	0,6	0,7	0,75	0,8
L, см	36	40	30	32	42
F, кН	15	14	16	17	18
ρ, кг/м^3	900	920	950	980	930

$F_{тр}$, кН	1	2	3	1,5	2,5

Задача 7.5.6

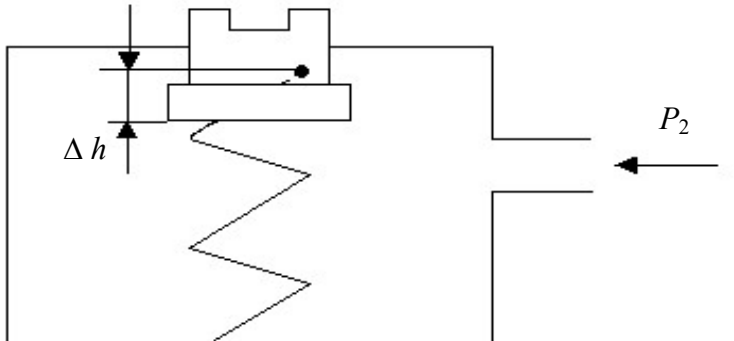


Переливной клапан плунжерного типа поддерживает заданное давление жидкости на входе P_1 путем непрерывного ее слива. Найти расход жидкости клапаном Q, если давление на входе P_1, давление на выходе клапана P_2, усилие пружины при закрытом клапане $F_{пр}$, жесткость пружины C, коэффициент расхода рабочего окна клапана μ.

Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
P_1, МПа	12,5	10	8	6	20
P_2, МПа	0,5	0,3	0,4	0,5	0,3
$F_{пр}$, кН	12	14	16	13	15
C, Н/мм	225	200	220	215	210
μ	0,6	0,65	0,7	0,75	0,55
D, м	0,2	0,15	0,1	0,05	0,3
Жидкость	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное 57

Задача 7.5.7

Определить величину предварительной деформации пружины Δh, прижимающей шарик к седлу предохранительного клапана диаметром d, если он открылся при давлении P_1, а давление после клапана P_2, жесткость пружины C. Весом шарика, пружины и шайбы пренебречь.



d

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
d, мм	25	20	30	35	40
P_1, МПа	2,5	5	6	10	12,5
P_2, МПа	0,35	0,4	0,5	0,3	0,25
С, Н/м	$15 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^4$	$18 \cdot 10^4$	$19 \cdot 10^4$

7.6. Задачи по гидроприводу

Задача 7.6.1

В гидравлическом приводе горной машины имеется три гидродвигателя (два гидроцилиндра и гидромотор), работающие поочередно. Составить принципиальную гидравлическую схему привода и определить его параметры (полезные регулируемые нагрузки на штоках гидроцилиндров R_1 и R_2, действующие в прямом и обратном направлениях, фактический реализуемый момент на валу гидромотора $M_{ф,}$ давление жидкости на входе в гидродвигатели), если теоретический момент на валу гидромотора $M_м$, рабочий объем гидромотора V_0, площади поршней гидроцилиндров S_1 и S_2 соответственно, площади поршней со стороны штоков S_3 и S_4 соответственно, скорости движения штоков гидроцилиндров в прямом и обратном направлении одинаковы и постоянны, частота вращения вала гидромотора постоянна, механический КПД гидромотора $\eta_{мех}$. При расчетах диаметры поршней гидроцилиндров округлить до стандартных значений, уплотнения поршней манжетами. Противодавлениями пренебречь.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д

$M_м$, Н·м	2000	3000	3500	2500	2800
$V_0 \cdot 10^{-4}$, м^3/об	5,00	8,00	9,00	1,15	1,40
S_1, м^2	0,26	0,40	0,60	0,70	0,80
S_2, м^2	0,40	0,50	0,70	0,76	0,88
S_3, м^2	0,13	0,20	0,30	0,35	0,40
S_4, м^2	0,20	0,25	0,35	0,38	0,44
$\eta_{мех}$	0,95	0,97	0,98	0,94	0,95

Задача 7.6.2.

Составить принципиальную гидравличекую схему привода, где преобразователями гидравлической энергии являются два гидромотора, имеющие рабочие объемы V_1 и V_2, частота вращения их валов n_1 и n_2 соответственно изменяются от 0 до n_{max}. Давление жидкости на входе в каждый гидромотор Р механический КПД $\eta_{м1}$ и $\eta_{м2}$ соответственно. Определить крутящие моменты полезные и теоретические каждого гидромотора и полезные мощности на валах гидромоторов. Противодавлением пренебречь.

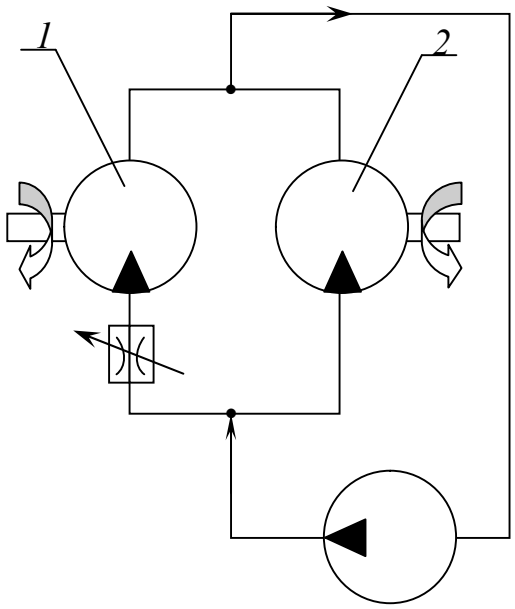
Параметры	**Вариант**				
	а	**б**	**в**	**г**	**д**
$V_1 \cdot 10^{-6}$, м^3/об	100	112	125	160	200
$V_2 \cdot 10^{-6}$, м^3/об	112	125	140	180	224
P, МПа	10,0	12,5	16,0	6,3	8,0
η_{max}, с$^{-1}$	25	25	25	18	18
$\eta_{м1}$	0,84	0,96	0,90	0,91	0,89
$\eta_{м2}$	0,86	0,88	0,96	0,94	0,87

Задача 7.6.3

Составить принципиальную гидравлическую схему привода, в которой в качестве гидродвигателей используются гидроцилиндр с двусторонним подводом жидкости и гидромотор, работающие поочередно. Скорости движения штока гидроцилиндра в прямом и обратном направлениях одинаковы и регулируются от 0 до максимального значения υ_{max}, частота вращения вала гидромотора n постоянная. Определить полезный момент на валу гидромотора и теоретический момент, полезную нагрузку на штоке гидроцилиндра, расход жидкости гидроцилиндром, если рабочий объем гидромотора V, давление на входе в гидродвигатели P, величина противодавления ΔP , диаметр поршня цилиндра d, механический КПД гидромотора $\eta_{мех}$, объемный КПД гидроцилиндра η_0. При расчете параметров гидроцилиндра потерями энергии на трение пренебречь.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
υ_{max}, м/с	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
P, МПа	8,0	6,3	12,5	20	32
ΔP, МПа	0,10	0,15	0,20	0,32	0,15
$V \cdot 10^{-6}$, м^3/об	100	112	125	140	160
d, м	0,20	0,22	0,25	0,28	0,32
$\eta_{мех}$	0,92	0,91	0,95	0,94	0,89
η_0	0,95	0,97	0,99	0,98	0,97

Задача 7.6.4



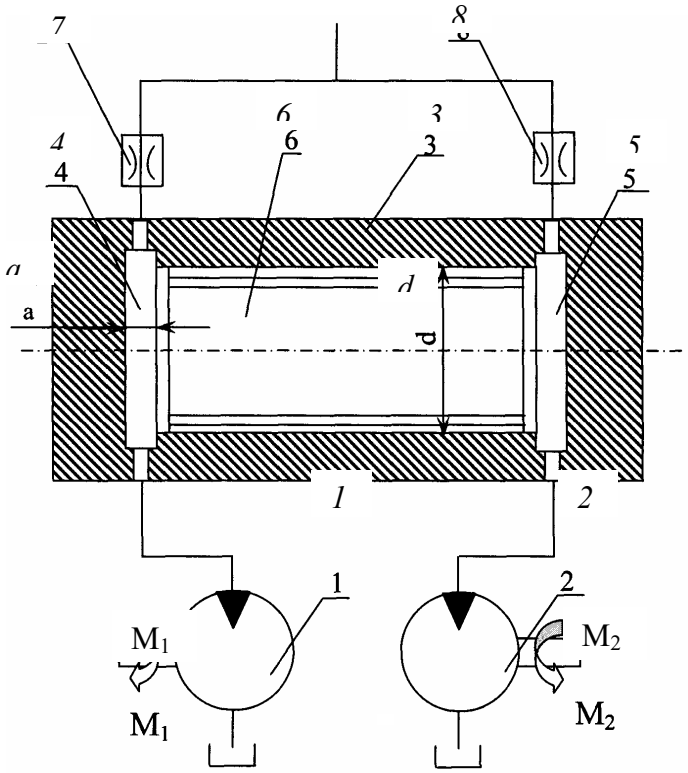
Гусеничный ход горной машины приводится в действие двумя гидромоторами *1* и *2*. Известно, что рабочие объемы гидромоторов V_1 и V_2; моменты на валах M_1 и M_2, рабочий объем насоса $V_н$, частота вращения вала насоса n об/мин. Механические и объемные КПД гидромашин $\eta_0 = \eta_м$, плотность рабочей жидкости ρ, коэффициент расхода дросселя μ. Пренебрегая потерями энергии в трубопроводах определить при каком проходном сечении дросселя угловые скорости гидромоторов будут одинаковы.

Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
1	2	3	4	5	6
$V_1 \cdot 10^{-6}$, м^3/об	12	10	14	16	18
$V_2 \cdot 10^{-6}$, м^3/об	28	24	30	32	36
M_1, Н·м	20	18	22	24	26
M_2, Н·м	40	36	40	46	50
1	2	3	4	5	6
$V_н \cdot 10^{-6}$, м^3/об	63	40	71	90	80
η_0	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
$\eta_м$	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
ρ, кг/м^3	850	860	810	870	840
μ	0,62	0,65	0,67	0,7	0,72
n, об/мин	1000	1200	1300	1400	1500

Задача 7.6.5.

Гидромоторы *1* и *2*, имеющие одинаковые рабочие объемы V, приводят в движение гусеницы ходового оборудования горной машины. Выходные

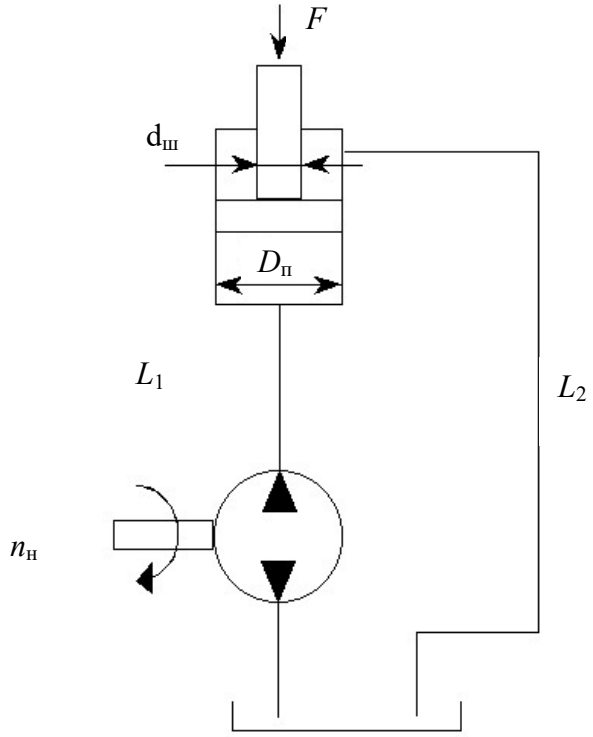
звенья гидромоторов вращаются с одинаковыми угловыми скоростями, что обеспечивается делителем потока *3*, и имеют нагрузки M_1, M_2. Деление потока жидкости в равных количествах гидродвигателями *1* и *2* обеспечивается перекрытием кольцевых проточек *4* и *5* при перемещении плунжера *6*, изменяя сопротивление гидролиний. Определить величину максимального смещения плунжера от нейтрального положения, если ширина проточек *a*, коэффициент расхода проточек μ, плотность рабочей жидкости ρ, расход жидкости *Q*, диаметр плунжера *d*. Сопротивления обоих трубопроводов и дросселей *7* и *8* одинаковы.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
$V \cdot 10^{-6}$, м^3/об	90	107	125	142	160
M_1, Н·м	110	140	170	210	240
M_2, Н·м	80	110	140	180	210
μ	0,62	0,65	0,7	0,75	0,77
ρ, кг/м^3	880	885	890	910	920
Q, л/с	1,2	1,8	2,2	2,4	2,6
d, мм	10	12	14	16	18

Задача 7.6.6.

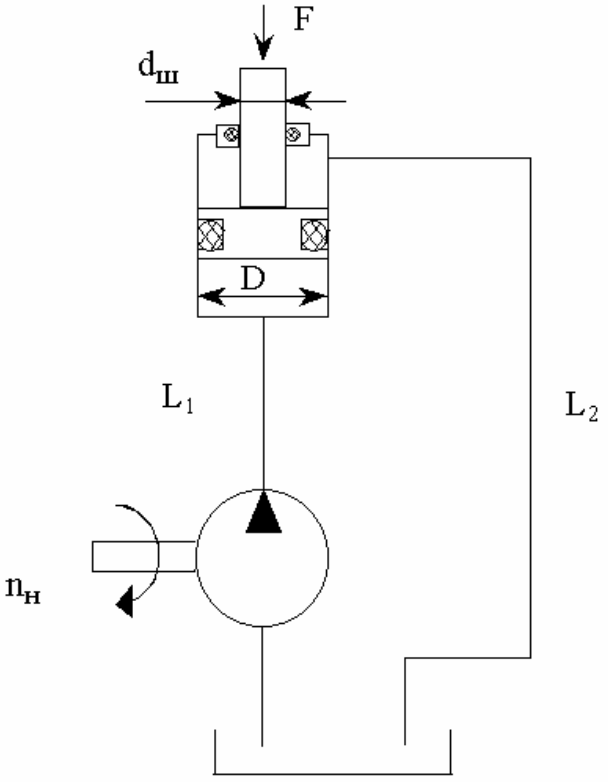
Определить давление, создаваемое радиально-поршневым насосом, если длины трубопроводов L_1, L_2, их диаметры $d_т$, частота вращения вала насоса $n_н$. Сила на штоке F, диаметры: $D_п$, $d_ш$. Параметры насоса: число цилиндров z, диаметр поршня цилиндра $d_{п.ц}$, величина эксцентриситета e, объемный КПД η_0. Коэффициент местных сопротивлений принять ξ_i=0,5. Потерями на трение пренебречь.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
1	2	3	4	5	6
L_1, м	6	7	8	5	6,5
L_2, м	8	9	10	6	8,5
$d_т$, м	22	20	18	18,5	16
F, кН	2	3	4	5	6
$D_п$, мм	80	85	70	75	65
$d_ш$, мм	40	45	30	35	25
z	7	8	9	10	12
$d_{п.ц}$, мм	20	18	16	14	22
1	2	3	4	5	6
e, мм	18	16	10	12	20
η_0	0,9	0,91	0,92	0,89	0,93
n, $с^{-1}$	15	16	17	14	12
Тип жидкости	И-20	И-30	И-12	И-50	Турбинное-57

Задача 7.6.7

Определить создаваемое давление насосом радиально-поршневого типа однократного действия, если длины труб L_1, L_2, диаметры труб $d_т$, частота вращения вала $n_н$. Сила на штоке F. Параметры насоса: число цилиндров z, диаметр поршня d, величина эксцентриситета e, объемный КПД η_0. Поршень и шток уплотнены манжетами высотой h. Диаметр поршня гидроцилиндра D, диаметр штока $d_ш$. Потерями энергии на местных сопротивлениях пренебречь.



Параметры	Вариант				
	а	б	в	г	д
L_1, м	5	6	7	8	9
L_2, м	7	8	9	10	12
$d_т$, м	30	20	25	35	15
F, кН	3	2	2,5	3,5	4
z	9	8	7	6	10
d, мм	22	20	18	16	24
e, мм	40	30	35	20	25
η_0	0,95	0,96	0,94	0,93	0,92
h, мм	7	7	10	10	12
n, $с^{-1}$	15	16	14	13	15
D, м	0,3	0,2	0,25	0,35	0,15
$d_ш$, м	0,1	0,15	0,12	0,13	0,08
Тип жидкости	И-20	И-20	И-12	И-50	Турбинное-57

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Плотность, коэффициенты вязкости, температурного расширения и объемного сжатия некоторых жидкостей

Наименование жидкости	Плотность ρ, кг/м^3	Динамический коэффициент вязкости $\mu\cdot10^3$, Па·с	Кинематический коэффициент вязкости $\nu\cdot10^6$, м^2/с	Коэффициент температурного расширения $\beta_t\cdot10^3$, 1/град	Коэффициент объемного сжатия $\beta_p\cdot10^3$, 1/МПа
Вода	998.2	1.00	1.008	0.02	0.49
Этиловый спирт	790.0	1.20	1.520	1.10	0.78
Ртуть	13546	1.54	0.114	0.18	0.039
Толуол	867.0	0.584	0.660	1.10	-
Глицерин	1260.0	1490	660	0.49	0.25
Бензин	700.0	0.455	0.83	1.24	0.94
Керосин	820.0	2.05	2.50	0.96	0.77
Воздух	1.2	0.0179	14.9	-	-
Нефть Баку:					
легкая	884	-	25	0.6	0.78
тяжелая	924	-	140	0.6	0.78
Масла:					
индустриальные					
И-12	880	-	12	-	-
И-20	885	-	20	0.73	0.72
И-30	890	-	30	-	-
И-50	910	-	50	-	0.68
турбинное-57	920	-	57	0.65	0.56

Таблица 2

Соотношение между единицами давления

Единица	Па (Н/м^2)	кгс/см^2 (ат)	кгс/м^2	мм вод.ст.	м вод.ст.	мм рт.ст.	бар
1 Па (Н/м^2)	1	$10{,}2\cdot10^{-6}$	0,102	0,102	$102\cdot10^{-6}$	$750\cdot10^{-5}$	10^{-5}
1 кгс/см^2 (ат)	$9{,}81\cdot10^4$	1	10^4	10^4	10	735,6	0,981
1 кгс/м^2	9,81	10^{-4}	1	1	10^{-3}	$73{,}56\cdot10^{-3}$	$98{,}1\cdot10^{-6}$
1 мм вод.ст.	9,81	10^{-4}	1	1	10^{-3}	$73{,}56\cdot10^{-3}$	$98{,}1\cdot10^{-6}$
1 м вод.ст.	$9{,}81\cdot10^3$	0,1	10^3	10^3	1	73,56	$98{,}1\cdot10^{-3}$
1 мм рт.ст.	133,3	$1{,}36\cdot10^{-3}$	13,6	13,6	$13{,}6\cdot10^{-3}$	1	$1{,}33\cdot10^{-3}$
1 бар	10^5	1,02	$10{,}2\cdot10^3$	$10{,}2\cdot10^3$	10,2	750	1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие методические указания 4

1. Шестеренные машины 7
2. Пластинчатые машины 9
3. Радиально-поршневые машины 12
4. Аксиально-поршневые машины 13
5. Гидроаппаратура 16
6. Гидропривод 21
7. Контрольные задания 23

7.1. **Задачи по шестеренным машинам** 25
7.2. **Задачи по пластинчатым машинам** 30
7.3. **Задачи по радиально-поршневым машинам** 34
7.4. **Задачи по аксиально-поршневым машинам** 39
7.5. **Задачи по гидроаппаратуре** 44
7.6. **Задачи по гидроприводу** 49

Приложение 1 55

Оглавление 56

Учебное издание

Николай Максимович Суслов
Юлия Андреевна Лагунова

«ГИДРАВЛИКА, ГИДРО- И ПНЕВМОПРИВОД»

Методическое пособие
и контрольные задания
по дисциплинам «Гидравлика и гидропривод»,
«Гидро- и пневмопривод автомобилей»
для студентов специальностей
15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов»
и 23.05.01 – «Наземные транспортно-технологические средства»

Редактор В. В. Баклаева
Компьютерная верстка М. Н. Поповой

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16
Печ. л. 3,4 Уч.изд.л. 3,0 Тираж 100 экз. Заказ №
Печать на ризографе

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

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
по выполнению курсовой работы для обучающихся

Б1.В.04 ГИДРАВЛИКА И ГИДРОПНЕВМОПРИВОД

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

год набора: 2025

Одобрено на заседании кафедры	Рассмотрено методической комиссией факультета
Горных машин и комплексов	горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав.кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Лагунова Ю. А.	Осипов П. А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

ВВЕДЕНИЕ

Темпы развития горнодобывающей и нефтегазовой отраслей промышленности определяются уровнем механизации основных технологических прогрессов и степенью совершенства конструкций машин и механизмов, реализующих эти процессы.

Гидравлический привод является одним из видов приводов, применяемых в современной технике. По сравнению с другими приводами, например, электрическим, механическим и др., он обладает важными свойствами, позволяющими получать при его применении значительный технический, социальный и экономический эффект.

Гидропривод позволяет создавать прогрессивные конструкции машин, уменьшить их габариты, повысить долговечность, обеспечить возможность автоматизации управления и регулирования.

Именно приобретению навыков проектирования объемных гидроприводов и посвящается курсовая работа.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В работе ставится цель закрепить и углубить знания, полученные студентом в результате изучения дисциплины, выработать навыки самостоятельного творческого решения технических задач на основе комплексного использования полученных знаний.

В процессе выполнения работы студенты приобретают навыки проектирования, включая технику выполнения расчетов, оформления чертежей и пояснительной записки, применения стандартов и нормалей, пользования справочной литературой и средствами вычислительной техники.

Выполненная курсовая работа защищается каждым студентом на кафедре, для чего создается комиссия. К защите допускаются только те курсовые работы, которые выполнены в соответствии с заданием, в требуемом объеме, и в соответствии с действующими стандартами, проверенные руководителем работы и имеющие ответы на все замечания руководителя работы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Курсовая работа является результатом самостоятельной и творческой работы студента. Она включает расчетно-пояснительную записку и графический материал.

Расчетно-пояснительная записка должна быть выполнена в соответствии с требованиями стандартов к такого рода документам. Она должна отличаться ясностью изложения материала и включать задание на курсовую работу, титульный лист, содержание, основную часть. Текст записки должен сопровождаться ссылками на использованную литературу, перечень которой приводится в конце записки, а также поясняющими текст эскизами, схемами, графиками и ссылками на них. Объем записки 30-40 страниц рукописного текста.

3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит из трех разделов. В первом разделе рассматривается состав и принцип действия гидравлической или пневматической систем горной машины: экскаватора, добычного или проходческого комбайнов, дробилки, бурового станка или другой конкретной машины, указанной в задании. Во втором разделе разрабатывается гидравлическая схема привода механизма горной машины с машинным или дроссельным регулированием параметров выходного звена привода и приводится ее расчет. В третьем разделе рассчитываются механическая и регулировочная характеристики гидропривода.

3.1. Содержание пояснительной записки

В пояснительной записке по первому разделу курсовой работы приводится:

краткое описание назначения и области применения заданной горной машины, ее конструктивного исполнения и основных рабочих параметров;

описание работы гидросхемы заданной машины, ее функциональных возможностей с указанием типа и характеристик входящего гидрооборудования.

По второму разделу курсовой работы в пояснительной записке приводится:

описание гидравлической схемы, подлежащей расчету;

расчет основных параметров гидросистемы и выбор стандартной гидроаппаратуры;

обоснование и выбор рабочей жидкости;

гидравлический расчет гидросистемы;

расчет гидроцилиндра;

тепловой расчет гидросистемы.

В третьем разделе производится расчет регулировочной и механической характеристик.

3.2. Содержание графического материала курсовой работы

Графический материал включает эскиз горной машины с описанием конструкции, гидравлическую и пневматическую схемы данной горной машины с их описанием. Приводится тип и параметры оборудования, составляющего схему. В отдельных случаях принципиальная гидравлическая схема может быть заменена структурной, функциональной или монтажной схемами. Такая замена согласовывается с руководителем курсовой работы.

На отдельном листе пояснительной записки должна быть представлена принципиальная гидравлическая схема привода, подлежащего расчету, с описанием входящих в нее элементов.

Пояснительная записка должна содержать эскизы и схемы элементов привода, требуемых пояснений.

Весь графический материал входит в состав пояснительной записки к курсовой работе, а также может быть выполнен отдельно.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Выполнение работы следует начинать с подбора литературы по рассматриваемым вопросам. Целесообразно также повторить теоретический материал, касающийся проектирования и расчета объемных гидравлических

приводов, и ответить на предлагаемые вопросы для самоконтроля, выполнить задания.

1. Сформулируйте закон Паскаля.

2. Напишите основное уравнение гидростатики.

3. Каков физический смысл входящих в уравнение Бернулли величин?

4. Назовите причины возникновения местных потерь энергии. Как они рассчитываются?

5. Каковы общие правила расчета простых и сложных трубопроводов?

6. Чем ограничивается допустимая высота всасывания объемной гидромашины?

7. Что понимается под рабочим объемом гидравлической машины?

8. Каково назначение редукционного клапана, дросселя, регулятора потока?

9. Каковы достоинства дросселя-регулятора в получаемом результате?

10. Поясните различие схем включения предохранительного и редукционного клапанов.

11. Какие существуют способы регулирования объемного гидропривода?

12. Дайте сравнительную оценку существующим способам регулирования объемного гидропривода.

Выполнение первого раздела курсовой работы не требует особых пояснений.

Во втором разделе работы разрабатывается гидравлическая схема с машинным или дроссельным регулированием скорости выходного звена гидропривода.

Проектировщик гидросистем должен владеть своей профессией, т. е. в данном случае - гидромеханикой, теорией управления, теорией проектирования, чтобы проектируемые системы оптимальным образом удовлетворяли требуемым параметрам и сами технические решения носили прогрессивный характер.

Принципиальная схема любого гидропривода горной машины включает, как правило, основные функциональные элементы: насосы, гидродвигатели, гидролинии, гидроаппараты управления и регулирования, емкости рабочей жидкости.

При составлении гидравлической схемы в первую очередь выбирается система циркуляции рабочей жидкости: замкнутая, разомкнутая, комбинированная. При этом определяющим является поддержание рабочей температуры жидкости, удобство размещения гидроаппаратов на горной машине, обеспечение требуемого уровня очистки рабочей жидкости, сглаживание пульсаций давления жидкости. Количество насосов гидравлической схемы зависит от числа одновременно работающих механизмов горной машины. Необходимо помнить, что при параллельной работе двух гидродвигателей от одного насоса необходимо устанавливать делитель потока.

Выбор элементов гидравлической схемы рекомендуется начинать с гидродвигателя. При этом последовательность расчета следующая:

1. По заданной мощности и давлению жидкости с учетом запаса на предполагаемые потери подбирается гидродвигатель. В случае, когда гидродвигателем является гидроцилиндр, расчет его параметров производится в два этапа. На первом этапе определяются предварительно диаметры поршней и штоков гидроцилиндров при заданных полезных нагрузках и заданных давлениях, т.е. выбираются рабочие параметры гидроцилиндра, обеспечивающие выполнение им заданных функций. На втором этапе проверяется прочность гидроцилиндра.

В случае, когда гидродвигателем является гидромотор, выбор его производится по требуемой мощности при заданном давлении жидкости в гидросистеме.

2. Определяется расход жидкости, необходимый для обеспечения заданной скорости выходного звена гидропривода.

3. Выбирается тип насоса и рабочая жидкость, рекомендуемая для данного насоса.

4. Выбираются гидроаппараты и другие элементы гидропривода.

5. Производится расчет потерь давления по данным чертежей разводки гидравлической сети (гидравлическая схема разбивается на участки, отличающиеся друг от друга характером или величиной сопротивлений).

6. Производится уточненный расчет:

усилий на выходных звеньях гидропривода;

давления на выходе из насоса, давления настройки предохранительного или переливного клапанов;

скоростей движения выходных звеньев гидропривода;

КПД гидропривода:

стенок гидроцилиндров;

болтов, шпилек, сварных швов крепления крышек гидроцилиндров;

штока при резьбовом креплении к нему поршня;

штока на устойчивость.

7. Производится тепловой расчет гидропривода.

8. Рассчитывается регулировочная и механическая характеристики привода.

4.1. Исходные данные для расчета

Индивидуальные задания к курсовой работе выдаются руководителем работы.

Исходными данными для выполнения курсовой работы являются:

тип горной машины, механизма или агрегата и число исполнительных механизмов, работающих последовательно или совместно;

действующая на исполнительный механизм внешняя нагрузка R или

момент М;

скорости движения выходных звеньев $V_1(V_2)$ или n;

рекомендуемое давление жидкости в гидросистеме.

Кроме перечисленных основных данных для расчета гидросистемы задаются режим работы гидродвигателя (показатель $К_р$) и характеристика внешних условий, в которых работает привод (температура окружающей среды t_c). Численные значения исходных параметров приведены в таблице 1. Выбор численных значений осуществляется по таблице шифров 2.

При определении численных значений крутящего момента необходимо величины крутящего момента М и коэффициента k_M перемножить. Нахождение остальных параметров однозначно.

Таблица 1

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Параметры	Шифр									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Усилие на штоке гидроцилиндра, R, кН	6	8	12	16	20	50	80	100	130	150
Давление жидкости в гидросистеме, p, МПа	4	4	6,3	6,3	8	10	10	12,5	16	20
Макс. скорость перемещения нагрузки, V_1, м/с	0,013	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035	0,045	0,05	0,065	0,07
Макс. скорость перемещения нагрузки, V_2, м/с	0,09	0,1	0,15	0,2	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
Крутящий момент нагрузки, M, Нм	12	30	45	65	120	250	350	550	900	5000
Коэфф. момента, $К_м$	0,4	1,0	1,3	1,4	1,6	2,0	3,5	-	-	-
Частота вращ. выход. звена привода, n, об/мин	35	45	50	160	280	430	630	850	1000	1400
Место установки дросселя	в напор магист.	в слив н магист.	паралл. гидродв.	-	-	-	-	-	-	-
Показат. режима работы гидродвигателя, $К_р$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1,0
Темпер. окр. среды, t_c^0C	35	30	25	20	10	-5	-10	-20	-30	-35
Схема распределителя	1	2	3	4	5	6	-	-	-	-

Таблица 2

ШИФРЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Вариант	Шифр параметра										
	R	M	V_1	V_2	n	p	дроссель	распределит	$К_м$	$К_р$	$t_с$
1	1	-	-	0	-	1	1	1	-	0	3
2	1	-	-	8	-	2	2	2	-	9	5
3	1	-	-	7	-	3	3	3	-	8	7
4	1	-	-	4	-	4	1	4	-	7	9
5	1	-	-	8	-	5	2	5	-	6	2
6	1	-	-	7	-	6	1	6	-	5	0
7	1	-	-	3	-	7	2	5	-	4	2
8	1	-	-	8	-	8	3	4	-	3	4
9	1	-	-	8	-	9	1	3	-	2	6
10	1	-	-	6	-	0	3	2	-	1	8
11	2	-	8	-	-	1	2	1	-	0	0
12	2	-	8	-	-	2	3	1	-	9	1
13	2	-	-	5	-	3	1	2	-	8	2
14	2	-	-	4	-	4	3	3	-	7	3
15	2	-	-	3	-	5	1	4	-	6	4
16	2	-	-	3	-	6	2	5	-	5	5
17	2	-	-	4	-	7	2	6	-	4	6
18	2	-	-	5	-	8	3	6	-	3	8
19	2	-	4	-	-	9	3	5	-	2	7
20	2	-	-	3	-	0	2	4	-	1	9
21	3	-	7	-	-	1	1	3	-	0	0
22	3	-	--	7	-	2	3	2	-	9	1
23	3	-	3	-	-	3	1	1	-	8	9
24	3	-	-	7	-	4	1	2	-	7	8
25	3	-	9	-	-	5	1	3	-	6	7
26	3	-	5	-	-	6	2	4	-	5	6
27	3	-	9	-	-	7	3	5	-	4	4
28	3	-	0	-	-	8	2	6	-	3	5
29	3	-	-	1	-	9	3	3	-	2	2
30	3	-	-	8	-	0	1	1	-	1	3
31	4	-	8	-	-	1	2	5	-	1	1
32	4	-	-	5	-	2	3	4	-	2	1
33	4	-	7	-	-	3	1	2	-	3	2
34	4	-	-	7	-	4	2	6	-	4	3
35	4	-	-	3	-	5	1	1	-	5	4
36	4	-	-	4	-	6	2	2	-	6	5
37	4	-	-	4	-	7	1	3	-	7	6

Продолжение таблицы 2

38	4	-	6	-	-	8	2	4	-	8	7
39	4	-	6	-	-	9	2	5	-	9	8
40	4	-	-	1	-	0	1	6	-	0	9
41	5	-	-	5	-	1	3	6	-	1	0
42	5	-	0	-	-	2	1	5	-	2	1
43	5	-	-	9	-	3	3	4	-	3	2
44	5	-	-	3	-	4	2	3	-	4	3
45	5	-	-	2	-	5	3	2	-	5	4
46	5	-	4	-	-	6	1	1	-	6	5
47	5	-	-	4	-	7	2	1	-	7	6
48	5	-	-	2	-	8	1	2	-	8	7
49	5	-	6	-	-	9	1	3	-	9	8
50	5	-	0	-	-	10	2	4	-	0	9
51	6	-	3	-	-	1	2	5	-	1	0
52	6	-	-	1	-	2	3	6	-	2	1
53	6	-	6	-	-	3	1	1	-	3	2
54	6	-	9	-	-	4	2	1	-	4	3
55	6	-	-	6	-	5	3	2	-	5	4
56	6	-	-	8	-	6	3	2	-	6	5
57	6	-	-	5	-	7	2	3	-	7	6
58	6	-	-	1	-	8	1	3	-	8	7
59	6	-	-	3	-	9	3	4	-	9	8
60	6	-	1	-	-	0	3	4	-	0	9
61	7	-	-	3	-	1	1	5	-	1	0
62	7	-	6	-	-	2	2	5	-	2	1
63	7	-	0	-	-	3	3	6	-	3	2
64	7	-	9	-	-	4	1	6	-	4	3
65	7	-	4	-	-	5	3	1	-	5	4
66	7	-	1	-	-	6	2	2	-	6	5
67	7	-	2	-	-	7	1	3	-	7	6
68	7	-	-	9	-	8	2	4	-	8	7
69	7	-	-	6	-	9	3	5	-	9	8
70	7	-	-	1	-	0	3	6	-	0	9
71	8	-	9	-	-	1	2	1	-	1	0
72	8	-	-	3	-	2	1	2	-	2	1
73	8	-	2	-	-	3	1	3	-	3	3
74	8	-	4	-	-	4	2	4	-	4	5
75	8	-	6	-	-	5	3	5	-	5	7
76	8	-	9	-	-	6	1	6	-	0	9
77	8	-	4	-	-	7	2	1	-	9	2
78	8	-	7	-	-	8	3	2	-	8	4

Продолжение таблицы 2

79	8	-	-	9	-	9	1	3	-	7	6
80	8	-	-	1	-	0	2	4	-	6	8
81	9	-	6	-	-	1	3	5	-	0	0
82	9	-	4	-	-	2	1	6	-	1	1
83	9	-	6	-	-	3	1	1	-	9	2
84	9	-	-	2	-	4	2	2	-	2	3
85	9	-	-	4	-	5	3	3	-	3	4
86	9	-	-	8	-	6	3	4	-	8	5
87	9	-	-	2	-	7	2	5	-	7	6
88	9	-	-	7	-	8	1	6	-	5	7
89	9	-	4	-	-	9	1	1	-	1	8
90	9	-	1	-	-	0	2	2	-	2	9
91	0	-	5	-	-	1	1	3	-	3	0
92	0	-	5	-	-	1	1	3	-	3	0
93	0	-	4	-	-	2	2	4	-	4	1
94	0	-	-	6	-	3	3	5	-	5	2
95	0	-	-	1	-	4	3	6	-	6	3
96	0	-	-	4	-	5	1	1	-	7	4
97	0	-	-	1	-	6	2	2	-	8	5
98	0	-	9	2	-	7	3	3	-	9	6
99	0	-	6	-	-	8	1	4	-	0	7
100	0	-		-	-	9	2	5	-	3	8
101	0	-	-	4	-	0	3	6	-	5	9
102	-	1	-	-	5	0	1	1	1	1	0
103	-	1	-	-	6	5	2	2	1	2	9
104	-	1	-	-	8	6	3	3	1	3	8
105	-	1	-	-	5	7	3	4	2	4	7
106	-	1	-	-	6	6	2	5	2	5	6
107	-	1	-	-	7	7	1	6	2	6	5
108	-	1	-	-	9	5	1	5	2	7	4
109	-	1	-	-	7	4	2	4	3	8	3
110	-	2	-	-	5	0	3	3	1	9	2
111	-	2	-	-	7	3	3	2	1	0	1
112	-	2	-	-	8	4	2	1	1	1	3
113	-	2	-	-	9	5	1	2	1	2	5
114	-	2	-	-	0	6	1	3	1	3	7
115	-	2	-	-	9	7	2	4	2	4	9
116	-	2	-	-	0	8	3	5	2	5	0
117	-	2	-	-	5	9	3	6	6	6	2
118	-	2	-	-	7	0	2	1	6	7	4
119	-	2	-	-	8	9	1	2	6	8	6

Продолжение таблицы 2

120	-	2	-	-	0	8	1	3	6	9	8
121	-	3	-	-	4	7	2	4	1	0	1
122	-	3	-	-	0	5	3	6	1	9	3
123	-	3	-	-	6	4	2	4	2	8	4
124	-	3	-	-	8	3	1	2	2	7	5
125	-	3	-	-	9	0	1	1	2	6	6
126	-	3	-	-	0	9	2	3	2	5	7
127	-	3	-	-	4	8	3	5	5	4	8
128	-	3	-	-	8	7	3	1	5	3	9
129	-	3	-	-	0	6	2	2	5	2	0
130	-	4	-	-	0	5	1	3	1	1	9
131	-	4	-	-	7	0	1	4	2	1	8
132	-	4	-	-	9	7	2	5	2	2	7
133	-	4	-	-	3	7	3	6	5	3	6
134	-	4	-	-	4	3	2	1	5	4	5
135	-	4	-	-	7	4	1	2	5	5	4
136	-	4	-	-	8	5	3	3	5	6	3
137	-	4	-	-	9	4	2	6	5	7	2
138	-	4	-	-	0	3	1	5	5	8	1
139	-	5	-	-	1	5	3	4	1	9	0
140	-	5	-	-	3	6	2	3	1	0	0
141	-	5	-	-	4	7	3	5	1	1	3
142	-	5	-	-	7	5	1	1	2	2	2
143	-	5	-	-	8	6	2	2	2	3	7
144	-	5	-	-	9	6	1	4	2	4	8
145	-	5	-	-	7	5	3	6	4	5	1
146	-	6	-	-	9	7	2	1	4	6	9
147	-	6	-	-	4	5	1	2	1	7	4
148	-	6	-	-	6	4	3	3	1	8	3
149	-	6	-	-	8	6	2	4	1	9	2
150	-	6	-	-	9	5	3	5	1	0	1
151	-	6	-	-	1	5	3	6	6	1	1
152	-	6	-	-	3	4	3	1	6	2	2
153	-	6	-	-	4	6	1	2	6	3	3
154	-	6	-	-	6	5	2	3	6	4	6
155	-	7	-	-	1	6	1	4	7	5	8
156	-	7	-	-	3	7	2	5	7	6	9
157	-	7	-	-	4	6	3	6	7	7	7
158	-	7	-	-	5	7	1	1	7	8	4
159	-	7	-	-	6	6	2	2	7	9	5
160	-	7	-	-	7	7	3	3	7	0	0

4.2. Разработка принципиальной гидравлической схемы

Принципиальная схема любого гидропривода состоит из одинаковых функциональных элементов: насосов, гидродвигателей, рабочей емкости, трубопроводов, управляющей, защитной и контрольно-измерительной аппаратуры.

Первоочередная задача состоит в подборе гидродвигателей поступательного или вращательного действия с учетом конструкции исполнительного органа. В современных горных машинах привод механизмов, как правило, автономный, т.е. каждый механизм имеет собственный двигатель.

Исходя из особенностей работы машины и ее назначения устанавливается способ регулирования скорости исполнительного механизма. Управление скоростью гидродвигателя принципиально можно осуществить с помощью управляемых гидравлических сопротивлений - дроссельное управление и с помощью гидравлических машин с изменяемым рабочим объемом - машинное управление. Схемы с дроссельным управлением выбирают в тех случаях, когда потери энергии и связанный с этим нагрев привода компенсируются удобством управления. Это, как правило, привода малой мощности с кратковременным режимом работы и поступательным движением выходного звена ($N < 5$ кВт).

На основе выбранного способа регулирования скорости исполнительного механизма и графика его нагрузки выбираются гидравлические машины (насосы и гидродвигатели), разрабатывается простейшая гидравлическая схема, включающая наряду с насосами и гидродвигателями фильтры, бак, предохранительные клапаны, устройства управления, устройства регулирования, гидравлические замки, гидропневмо-аккумуляторы и т.п. При этом нужно стремиться к тому, чтобы схема содержала минимальное число рабочих элементов, местных сопротивлений, предусматривала защиту оборудования от перегрузок.

4.3. Выбор гидродвигателей

Выбор гидроцилиндра осуществляется по его внутреннему диаметру, исходя из требуемой рабочей площади $F_т$ в $м^2$

$$F_т = \frac{R \cdot k}{p \cdot 10^3}, \qquad (1)$$

где R - усилие на штоке, кН;

p - заданное давление жидкости в гидросистеме, МПа;

k - коэффициент запаса по усилию, k=l,15-1,3 (k=l, когда дроссель).

Исходя из $F_т$ внутренний требуемый диаметр цилиндра $d_п$ определится:

для цилиндра с односторонним штоком при подводе жидкости со стороны поршня

$$d_п = \sqrt{\frac{4F_т}{\pi}}, \quad (2)$$

для гидроцилиндра с двухсторонним штоком, когда диаметр штока принят равным половине диаметра поршня ($d_ш = 0{,}5d_п$) или при подводе жидкости в штоковую полость

$$d_п = \sqrt{\frac{4F_т}{0{,}75\pi}}, \quad (3)$$

при дифференциальной схеме подключения гидроцилиндра, когда $d_ш = \frac{d_п}{\sqrt{2}}$

$$d_п = \sqrt{\frac{8F_т}{\pi}}, \quad (4)$$

Диаметр поршня округляется до ближайшего стандартного размера (табл 3).

Затем по принятому значению диаметра поршня $d_п$ из того же нормального ряда диаметров выбирается диаметр штока. Для гидроцилиндра с односторонним штоком берется ближайшее значение диаметра штока, удовлетворяющее условию

$$d_ш = 0{,}5d_п \quad (5)$$

При использовании гидроцилиндра с двусторонним штоком или при дифференциальной схеме подключения гидроцилиндра необходимо добиться такого результата, чтобы рассчитанная по выбранным диаметрам рабочая площадь поршня мало отличалась от требуемой (расхождение не более 5%).

Некоторые стандартные размеры цилиндров приведены в таблице 3.

Таблица 3

Нормальные диаметры

Диаметр поршня, $d_п$, мм	10	12	16	20	25	32	36	40	45	50	56	68	70	80
	90	100	110	125	140	160	180	200	220	2500	280	320	360	400
	450	500	560	680	710	800	900							
Диаметр штока, $d_ш$, мм	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32
	36	40	45	50	56	68	70	80	90	100	110	125	140	160
	180	200	220	250	280	320	360	400	450	500	560	630	710	800

В соответствии с разработанной гидравлической схемой привода и предъявляемыми к приводу требованиями выбирается принципиальная конструктивная схема силового гидроцилиндра. При этом должны быть учтены способ крепления корпуса цилиндра и штока, способ подвода жидкости к цилиндру, уплотнения подвижных и неподвижных соединений гидроцилиндра и т.п. Чертеж гидроцилиндра с нанесением соответствующих размеров приводится в пояснительной записке.

Выбор необходимого гидромотора осуществляется по требуемой мощности с учетом запаса по моменту. Исходными параметрами являются кру-

тящий момент М и частота вращения вала п. У выбранного гидромотора момент и частота вращения вала должны быть близкими к заданным.

Заданная мощность гидромотора $N_з$, кВт определится через исходные параметры по формуле

$$N_з = M \cdot \omega \ , \qquad (6)$$

где ω - угловая скорость вала гидромотора, рад/с.

По справочной литературе [3, 5] подбирается необходимый гидромотор. При этом необходимо учесть, что мощность гидромотора должна быть не менее 1,05…1,10 от заданной, а угловая скорость вала гидромотора и рабочее давление гидромотора должны быть не менее заданных.

Если не удается по справочной литературе подобрать гидромотор необходимых параметров, необходимо подобрать стандартный редуктор для установки его между гидромотором и исполнительным механизмом машины.

Передаточное отношение редуктора U определяется по формуле

$$U = \frac{M \cdot k}{M_м} \ , \qquad (7)$$

где $M_м$ - номинальный крутящий момент на валу гидромотора, кН·м;

k - коэффициент запаса, k = 1,15…1,25.

Значения номинальных передаточных чисел цилиндрических редукторов приведены в [6]. При этом необходимо учесть, что номинальный момент на быстроходном валу редуктора не должен быть меньше номинального крутящего момента на залу выбранного гидромотора.

4.4. Выбор насоса

Основными параметрами для выбора насоса являются требуемая подача $Q_т$ и заданное давление Р. При этом учитывается принятый способ регулирования скорости выходного звена гидропривода. Этим определяется тип насоса - с регулируемой подачей или нерегулируемый.

В случае, когда в качестве гидродвигателя используется гидроцилиндр, расход жидкости $Q_т$ в $м^3/с$ определится

$$Q_т = \frac{V \cdot F_{пр} \cdot m}{\eta_{об}} , \qquad (8)$$

где V - заданная скорость перемещения выходного звена гидродвигателя (штока гидроцилиндра), м/с;

$F_{пр}$ - рабочая площадь со стороны подвода жидкости в гидроцилиндр, $м^2$. При подводе жидкости в поршневую полость гидроцилиндра рабочая площадь $F_{пр}$ будет равна площади поршня, при подводе жидкости в штоковую полость $F_{пр}$ будет равна площади поршня за вычетом площади штока и при дифференциальной схеме подключения гидроцилиндра $F_{пр}$ будет равна половине площади поршня ($F_{пр} = F_{пр/2} = F_ш$). Рабочая площадь определяется исходя из стандартных значений диаметров поршня и штока;

m - число одновременно работающих гидроцилиндров;

$\eta_{об}$ - объемный КПД гидроцилиндра.

При использовании в качестве уплотнений резиновых манжет можно предварительно принимать $\eta_{об} = 1$, при применении металлических колец $\eta_{об} = 0{,}95…0{,}98$.

По полученному значению требуемой подачи выбирается насос [3], [5]. Подача его должна быть на 5% больше требуемой для компенсации потерь ($Q_н = 1{,}05Q_т$). Рабочее давление насоса может превышать заданное, но не меньше заданного.

При использовании гидромотора в качестве гидродвигателя его расход жидкости $Q_т$ в $м^3/с$ определится

$$Q_т = q_м \cdot n, \qquad (9)$$

где $q_м$ - рабочий объем принятого гидромотора, $м^3/об$;

n - частота вращения вала гидромотора, об/с.

Порядок выбора насоса в дальнейшем аналогичен предыдущему. При выборе насоса необходимо стремиться использовать наиболее простые и дешевые шестеренные насосы или пластинчатые, особенно при дроссельном регулировании гидроцилиндра. При машинном регулировании гидропривода чаще используют регулируемые радиально- и аксиально-поршневые насосы.

Для принятого типа насоса рекомендуется рабочая жидкость и ее заменители [5]. В качестве рабочей жидкости в большинстве гидросистем используют минеральные масла различных марок. Устанавливаются основные параметры, характеризующие жидкость, как рабочую среду гидросистемы: динамическая и кинематическая вязкости, плотность.

4.5. Выбор направляющей аппаратуры

Для управления работой гидродвигателей устанавливаются распределители потоков жидкости. Схема распределителя определяется условиями работы гидродвигателей. Расход жидкости распределителя должен быть близким к подаче насоса, а рабочее давление распределителя должно превышать давление жидкости в гидросистеме привода.

Потери энергии в распределителе при его работе в большинстве случаев приводятся в справочной литературе [5, 7]. Их можно также определить по формулам расчета потерь энергии на местных гидравлических сопротивлениях.

4.6. Выбор регулирующей аппаратуры

С целью предохранения гидравлической системы от недопустимых давлений и всей конструкции машины от перегрузок параллельно напорной гидролинии устанавливают предохранительный клапан.

Клапан предохранительный выбирается по расходу жидкости и рабочему давлению [5, 7]. Эти параметры клапана должны быть не меньше заданных.

В реверсивных гидросистемах необходимо устанавливать два одинаковых предохранительных клапана встречно между напорной и сливной гидролиниями в случае замкнутой системы. Если в напорной магистрали установлен фильтр, то предохранительный клапан устанавливается на ответвлении гидролинии между насосом и фильтром с целью исключения перегрузки насоса в случае засорения фильтра. Предпочтительно использование двухступенчатых клапанов, обеспечивающих стабильность давления при изменении расхода жидкости в широком диапазоне.

Требуемую скорость выходного звена в приводах с нерегулируемыми гидромашинами можно получить установкой в схему дросселя или регулятора потока.

Дроссель во всех случаях должен быть регулируемым.

Наилучшими характеристиками обладают дроссели с меньшим отношением периметра сечения канала для прохода жидкости к площади этого сечения и с наиболее короткими каналами. Такие дроссели менее подвержены засорению и явлению облитерации.

Правила выбора дросселя обусловлены схемой его установки в гидросистеме. Требуемый расход жидкости дросселем $Q_д$ определится при установке дросселя в напорной гидролинии, а также в сливной гидролинии, когда гидродвигатель-цилиндр с двухсторонним штоком или гидромотор

$$Q_д = Q_т, \tag{10}$$

при установке дросселя в сливной гидролинии, когда гидроцилиндр с односторонним штоком и слив из штоковой полости

$$Q_{др} = Q_т \cdot \left(1 - \frac{F_ш}{F_{пр}}\right), \tag{11}$$

при установке дросселя параллельно гидродвигателю

$$Q_{др} = Q_н, \tag{12}$$

при установке дросселя в сливной гидролинии, когда слив происходит из поршневой полости

$$Q_{др} = F_п \cdot \upsilon. \tag{13}$$

По известному расходу жидкости через дроссель определяем площадь расходного окна дросселя $f_{др}$ в $м^2$

$$f_{др} = \frac{Q_{др}}{\mu \cdot U_{др} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p_{др}}{\rho}}}, \tag{14}$$

где μ - коэффициент расхода дросселя, $\mu = 0, 62$;

$U_{др}$ - параметр регулирования дросселя, $U_{др} = 1$;

ρ - плотность рабочей жидкости, $кг/м^3$;

$\Delta p_{др}$ - перепад давления в дросселе, Па.

Перепад давления в дросселе принимается при последовательной установке дросселя

$$\Delta p_{др} = \frac{R}{F_{пр}} = p_р,$$

когда дроссель на сливе

$$\Delta p_{др} = p_р \frac{F_{пр}}{F_{пд}}$$

при параллельной установке дросселя $\Delta p_{др} = p_р$.

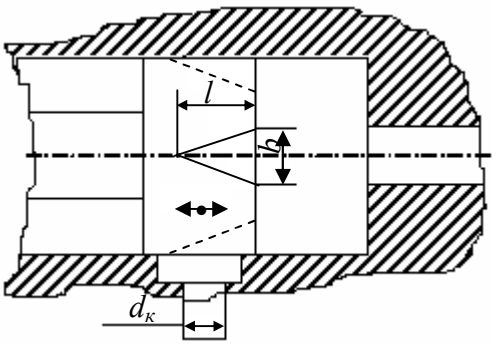
По полученным значениям площади расходного окна $f_{др}$ и номинальному давлению жидкости насоса $p_н$ по таблице 4 выбирается дроссель.

Не всегда удается выбрать дроссель с требуемым значением величины расходного окна.

Получить достаточно близкое значение площади расходного окна дросселя требуемому можно путем установки нескольких дросселей параллельно, когда расходное окно будет состоять из суммы площадей расходных окон отдельных дросселей ($f_{тр} = \Sigma f_{др}$).

В случае, когда требуемая площадь расходного окна оказывается очень маленькой и не удается подобрать дроссель, на заданные параметры проектируют новый дроссель. Для этой цели используют канавочный дроссель (см. рис. 1).

Для обеспечения равномерной скорости движения выходного звена гидропривода независимо от внешней нагрузки и для регулирования величины этой скорости используются дроссели с регулятором.



Число канавок z = 1…4
b ≥ 2мм
l=2$d_к$
$d_к$ - диаметр подводящего канала

Рис. 1. Схема дросселя

4.7. Выбор фильтра

Выбор фильтра осуществляется в зависимости от необходимой тонкости фильтрации, которая указывается в характеристиках гидравлических ма-

шин. Обязательно устанавливается фильтр тонкой очистки на входе в аксиально-поршневой насос с торцевым распределением жидкости.

В гидроприводах с замкнутой циркуляцией жидкости фильтр устанавливают в напорной магистрали подпиточного насоса. Такой насос ставится в схему для компенсации утечек жидкости.

В отдельных случаях паспортные данные насосов не содержат указаний о качестве фильтрации жидкости (о максимально допустимом размере частиц примесей в жидкости). Размеры частиц можно принимать следующими: для шестеренных гидромашин - 0,1 мм; для пластинчатых - 0,04 мм; для поршневых - 0,02 мм. Технические характеристики и параметры фильтров приведены в [5, 8].

Таблица 4

Характеристика регулируемых дросселей

Тип дросселя	Параметры			
	Номин. давление $p_{др}$, МПа	Номин. расход $Q_{др}$, л/мин	Площадь расходного окна $f_{др}$, мм^2 · 10^2	Потери давления $\Delta P_{др}$, МПа
До-16/20	20	40	0,390	0,2
Др-16	32	40	0,390	0,2
До-20/20	20	63	0,458	0,2
Др-20	32	63	0,458	0,2
До-25/20	20	100	0,739	0,2
Др-25	32	100	0,730	0,3
До-32/20	20	160	1,166	0,2
Др-32	32	160	1,166	0,3
До-40/20	20	250	1,821	0,4
До-50/20	20	400	2,910	0,4
Г77-34	12,5	70	0,511	0,2
Г77-33	12,5	35	0,302	0,2
ДР-12	32	25	0,244	0,2
Г77-32	12,5	18	0,176	0,2
ДР-10	32	16	0,156	0,2
Г77-32А	12,5	12	0,128	0,2
Г77-31	12,5	8	0,085	0,2
Г77-11	5	8	0,078	0,2
Г77-31А	12,5	5	0,063	0,2
Г77-31Б	12,5	3	0,038	0,2
Г77-31В	12,5	1,5	0,0147	0,2
Г77-14	5	70	0,579	0,3

5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

Гидравлический расчет трубопроводов сводится к определению их геометрических параметров (длины трубопровода, внутреннего диаметра), потерь энергии на трение при движении жидкости по трубопроводам и потерь на местных гидравлических сопротивлениях.

Соединение гидроаппаратов производится стальными бесшовными трубами. При наличии взаимных перемещений гидроаппаратов для этих целей используются резиново-металлические рукава высокого давления. В зависимости от величины давления и расхода жидкости выбираются размеры трубопровода. Максимальное значение величины давления в гидросистеме равно давлению жидкости на выходе из насоса $P_н$. Максимально возможный расход жидкости в любой напорной гидромагистрали системы равен подаче насоса. В сливной гидролинии он может быть больше подачи насоса в случае объединения нескольких потоков или когда жидкость сливается из поршневой полости гидроцилиндра с односторонним штоком. В последнем случае максимальный расход определится:

$$Q_{max} = Q_н \cdot \frac{F_п}{F_п - F_ш}, \qquad (15)$$

где $F_п$ - площадь поршня, $м^2$;

$F_ш$ - площадь штока, $м^2$;

$Q_н$ - подача насоса, $м^3/с$.

Расход жидкости трубопроводом взаимосвязан с внутренним его диаметром и скоростью движения жидкости. Рекомендуемые средние скорости течения жидкости приведены в таблице 5.

Таблица 5

Скорости потока в трубопроводах горных машин

Тип трубопровода	Скорость, м/с
Нагнетательные трубопроводы (сливные замкнутых систем)	3-5
Сливные трубопроводы разомкнутых систем	2-3
Всасывающие трубопроводы	0,5-1,5

Для предварительных расчетов можно воспользоваться аналитическими зависимостями скорости от давления в гидролинии. Для напорных и сливных трубопроводов

$$V = 2 + 0{,}3 \cdot p, \text{ м/с} \qquad (16)$$

где p - давление жидкости в трубопроводе, МПа.

При выборе скорости нужно помнить, что повышение скорости приводит к увеличению потерь энергии в системе, а снижение - к возрастанию раз-

меров и массы трубопроводов и гидроаппаратов. Ограничение скорости во всасывающих гидролиниях преследует цель обеспечить безкавитационный режим течения жидкости.

Внутренний диаметр трубопровода определится

$$d_в = 1{,}13 \cdot \sqrt{\frac{Q_{max}}{V_ж}}, \text{ м} \qquad (17)$$

Полученные значения диаметров трубопроводов округляются до ближайшего большего стандартного значения [5, 6].

Длины участков трубопроводов, связывающих отдельные гидроаппараты схемы, зависят от размеров горной машины и взаимного расположения аппаратов. Они задаются студентом самостоятельно с учетом ориентировочного размещения гидромашин и гидроаппаратов на горной машине.

Для рекомендованных в табл. 5 скоростей течения жидкости можно принимать следующие максимальные значения длин трубопроводов;

всасывающего $L_{вс} = 10d_{вс}$ (но не более 0,5 м);

напорного (от насоса до распределителя) $L_и = 50d_н$;

напорного (от распределителя да гидродвигателя) $Lн = 100d_н$;

напорного (для системы с замкнутой циркуляцией) $L_н = l50d_н$;

сливного $L_{сл} = 50d_{сл}$.

Потери давления (гидравлические потери) складываются из потерь давления на преодоление сопротивления трубопроводов $\Delta P_{тр}$ и местных сопротивлений $p_{м.с}$ (гидроаппаратов, присоединений, изгибов трубопроводов)

$$\Delta p = \Sigma \Delta p_{тр} + \Sigma \Delta p_{м.с} \ . \qquad (18)$$

Для расчета потерь энергии расчетную гидросхему привода разбивают на участки, отличающиеся друг от друга расходом жидкости, диаметром трубопровода, наличием местных сопротивлений. Расчет потерь энергии производится отдельно для всасывающей, нагнетательной и сливной гидролиний.

Потери давления по длине трубопровода на каждом участке определяются по формуле

$$\Delta p_{тр} = \lambda \cdot \rho \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2}, \text{ Па} \qquad (19)$$

где L - длина участка трубопровода со скоростью жидкости $V_ж$,.м/с;

d - внутренний диаметр трубопровода, м;

ρ - плотность жидкости, кг/м^3;

λ - коэффициент сопротивления рассматриваемого участка трубопровода.

Коэффициент сопротивления λ определяется либо по графику [5], либо по формулам.

При использовании металлических труб, подвергающихся вибрациям и сотрясениям при ламинарном режиме (R_e<316) применяется следующая формула

$$\lambda = \frac{75}{R_e}. \quad (20)$$

При тех же условиях, но при R_e=316…3000. применяется формула:

$$\lambda = \frac{10}{R_e^{0,65}}, \quad (21)$$

где R_e - число Рейнольдса

$$R_c = \frac{V_ж \cdot d}{V} = 1,27\frac{Q}{dV}, \quad (22)$$

где V - кинематическая вязкость жидкости, м^2/с.

При других значениях чисел Рейнольдса необходимо использовать другие формулы [5]. Для достижения, меньших потерь давления необходимо добиваться ламинарного режима течения жидкости.

Для оценки режима течения жидкости пользуются критическим значением числа Рейнольдса, выше которого режим течения можно считать турбулентным, а ниже - ламинарным.

Ориентировочные критические числа $R_{e\cdot кр}$ для разных местных сопротивлений:

круглая гладкая труба	2100-2300
резиновый рукав	1600
металлический рукав	1800-2000
концентрическая гладкая щель	1100
концентрическая щель с выточками	700
неконцентрическая щель с выточками	400
кран, вентиль	550-750
сетчатый фильтр	400
окна цилиндрических золотников	260
плоский и выпуклый клапаны	20-100

Потери давления на местном сопротивлении $\Delta p_{м.с}$ в Па определяются по формуле

$$\Delta p_{м.с} = \xi \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho. \quad (23)$$

где ξ - коэффициент местного сопротивления;

V - средняя скорость жидкости на местном сопротивлении, м/с.

Коэффициенты ξ определяются по таблицам [5].

Кроме того, значение ξ можно принимать: для штуцеров, присоединяющих трубы к агрегатам, и переходников, соединяющих отрезки труб ξ = 0,10…0,15; для вентилей, ось прохода которых меняет свое направление под прямым углом ξ = 2…3; если ось прохода не меняет направления ξ = 0,5...1,0; для распределительных золотников в зависимости от количества поворотов жидкости ξ =2...4; для клапанов различного назначения ξ = 2,5…10; для кранов ξ = 5,0.

Средние значения коэффициентов наиболее распространенных местных сопротивлений приведены в таблице 6.

Для стандартной гидроаппаратуры потери давления приводятся в ее технической характеристике. При отклонении действительного расхода от приведенного в технической характеристике можно принимать квадратичный закон изменения сопротивления. Тогда потеря давления в гидроаппарате $\Delta p_а$ определится по уравнению

$$\Delta p_а = \Delta p_{ном} \cdot \left(\frac{Q_ф}{Q_{ном}} \right)^2, \text{ МПа.} \qquad (24)$$

где $\Delta p_{ном}$ - потеря давления в гидроаппарате при номинальном расходе $Q_{ном}$ (паспортные данные);

$Q_ф$ - фактический расход жидкости гидроаппарата.

Далее следует произвести суммирование всех потерь давления отдельно для всасывающей напорной и сливной гидромагистралей. В случае, когда число сопротивлений велико, можно свести все потери давления в таблицу. В таблице указать характеристику сопротивления и величину потерь давления в нем.

После определения потерь давления в напорной $\Delta P_{нап}$ и сливной $\Delta P_{сл}$ гидромагистралях производится уточнение параметров гидропривода. Для гидропривода с поступательным движением выходного звена усилие R в кН, создаваемое гилроцилиндром при рабочем ходе поршня, определится

$$R_ф = R + R_{пд} + R_п + R_ш + R_{ин}, \qquad (25)$$

где R - заданная полезная нагрузка. кН;

$R_{пд}$ - сила противодавления. кН;

$R_п$ - сопротивление уплотнения поршня. кН;

$R_ш$ - сопротивление уплотнения штока. кН;

$R_{ин}$ - сила инерции движущихся частей, кН.

Сила противодавления определится

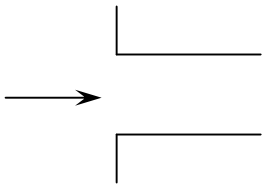
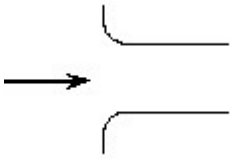
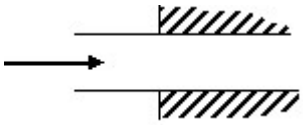
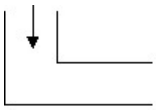
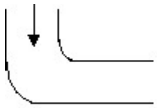
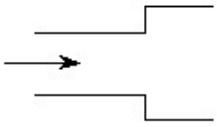
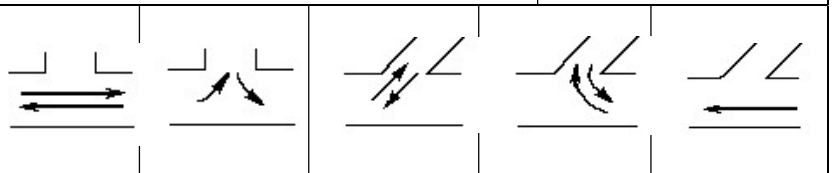
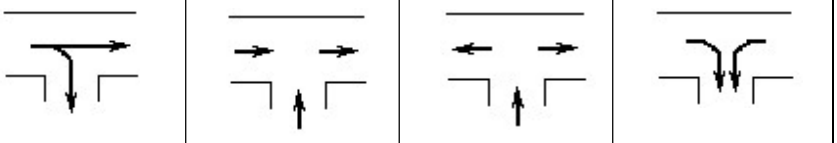
$$R_{пд} = p_{пд} \cdot F_{пд} \cdot 10^3, \text{ кН,} \qquad (26)$$

где $p_{пд}$ - противодавление, равное величине потерь давления в сливной гидролинии, МПа;

$F_{пд}$ - площадь со стороны противодавления в силовом цилиндре, $м^2$.

Таблица 6

Коэффициенты местных сопротивлений

Наименование местного сопротивления	Схема местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления, ξ
Вход из резервуара в трубу:		
кромки острые		0,5
кромки закруглены		0,2…0,75
Труба вдвинута внутрь резервуара		0,75…1,0
Поворот при прямом колене		1,0…2,0
Плавный поворот под углом 90^0		0,5
Вход в большую емкость		1,0
Ответвление потоков		ξ = 0,1 | ξ = 1,3 | ξ = 0,5 | ξ = 3 | ξ = 0,05
Соединение и разъединение потоков		ξ = 0,9…1,2 | ξ = 0,5…0,6 | ξ = 1,0…1,5 | ξ = 2,0…2,5

Усилия трения в уплотнениях определяются по следующим формулам $R_{п(ш)}$ в кН:

для манжетных уплотнений

$$R_{п(ш)} = \mu \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot p \cdot 10^3, \quad (27)$$

где d - уплотняемый диаметр, м;

h - высота активной части манжеты, м;

μ - коэффициент трения (для резины 0,01);

p - давление жидкости, МПа

для шевронных резино-тканевых уплотнений

$$R_{п(ш)} = \pi \cdot d \cdot l \cdot k, \quad (28)$$

где l - ширина уплотнений, м;

k - удельное давление (216 кН/м^2)

для металлических поршневых колец

$$R_{п(ш)} = \mu_1 \cdot \pi \cdot b \cdot d(zk + p) \cdot 10^3, \quad (29)$$

где b - ширина кольца, м;

μ_1 - коэффициент трения колец (0,07 - при больших скоростях движения; 0,15 - при малых скоростях);

z - число колец;

k - удельное давление кольца на стенки цилиндра, МПа (обычно 80-90 кН/м^2).

Для гидропривода с вращательным движением выходного звена момент гидромотора фактический $M_ф$ в Нм определится:

$$M_ф = \frac{M}{U} + M_{пд} + M_р, \quad (30)$$

где $M_{пд}$ - момент противодавления, Нм;

$M_р$ - момент трения редуктора, приведенный к валу гидромотора, Нм;

U - передаточное отношение редуктора.

Момент противодавления $M_{пд}$ в Нм определится:

$$M_{пд} = \frac{1}{2\pi} \cdot q \cdot p_{пд}, \quad (31)$$

где q - рабочий объем гадромотора, м^3/об.

Момент трения редуктора $M_р$ в Н · м, приведенный на валу гидромотора, определится

$$M_р = \frac{M_с}{U} \cdot (1 - \eta_р), \quad (32)$$

где $\eta_Р$ - КПД редуктора.

По уточненной величине нагрузки определяются действительное давление жидкости на выходе из насоса, давление настройки предохранительного или переливного (при дроссельном регулировании) клапанов.

Давление жидкости на выходе из насоса в гидросхеме с поступательным движением выходного звена определится

$$p_н = \frac{R_ф \cdot 10^{-3}}{F_{пр}} + \Delta p_{нап}, \qquad (33)$$

где $\Delta p_{нап}$ - потери давления в напорной магистрали, МПа;

$R_ф$, кН.

Давление жидкости на выходе из насоса в гидросхеме с вращательным движением выходного звена определится

$$p_н = \frac{2\pi \cdot M_ф}{q_н} + \Delta p_{нап}. \qquad (34)$$

Давление настройки предохранительного или переливного клапанов определится:

для гидросистемы с дросселем, установленным последовательно с гидромотором

$$p_к = p_р + \Delta p_{н.м} + \Delta p_м \left(или \Delta p_ц\right) + \Delta p_{др} + \Delta p_{сл}, \qquad (35)$$

$\Delta p_{нап}$ берется из технической характеристики дросселя.

Для гидросистем с дросселем, установленные параллельно гидромотору и при машинном регулировании скорости гидромотора

$$p_{кл} = p_р + \Delta p_{н.м} + \Delta p_м + \Delta p_{сл}, \qquad (36)$$

Для гидросистемы с гидроцилиндром и дросселем, установленным в напорной гидролинии

$$p_к = p_р + \Delta p_{н.м} + \Delta p_м \left(или \Delta p_ц\right) + \Delta p_{др} + \Delta p_{сл}. \qquad (37)$$

Для гидросистемы с гидроцилиндром и дросселем в сливной гидролинии

$$p_{кл} = p_р + \Delta p_{н.м} + \Delta p_ц + \left(\Delta p_{др} + \Delta p_{сл}\right) \cdot \frac{F_{пд}}{F_{пр}}. \qquad (38)$$

Для гидросистемы с гидроцилиндром при параллельной установке дросселя и при машинном регулировании гидроцилиндра

$$p_{кл} = p_р + \Delta p_{н.м} + \Delta p_ц + \Delta p_{сл} \cdot \frac{F_{пд}}{F_{пр}}. \qquad (39)$$

В соответствии с подачей насоса уточняются скорости рабочего и холостого хода выходного звена гидропривода.

Для гидропривода с возвратно-поступательным движением выходного звена скорость рабочего V в м/с определится по формуле

$$V = \frac{Q_ц \cdot \eta_{об.ц}}{F_{пр}}, \qquad (40)$$

где $\eta_{об \cdot ц}$ - объемный КПД гидроцилиндра;

$F_{пр}$ - фактическая площадь гидроцилиндра со стороны подвода жидкости, $м^2$.

В случае значительных расхождений полученных и заданных параметров гидропривода производится корректировка размеров гидроцилиндра.

Для гидропривода с вращательным движением выходного звена скорость вращения исполнительного органа n в об/с определится

$$n = \frac{Q \cdot \eta_{об.ц}}{q_м \cdot U}, \quad (41)$$

где $\eta_{об.м}$ - объемный КПД гидромотора.

В случае расхождения полученных и заданных параметров системы более чем на 10% следует принять насос или гидромотор других типоразмеров.

6. РАСЧЕТ КПД ГИДРОСИСТЕМЫ

Расчет КПД производится в следующей последовательности.

Определяется мощность, реализуемая на выходном звене гидропривода $N_{вых}$.

Для гидропривода с поступательным движением выходного звена $N_{вых}$ в кВт определится

$$N_{вых} = R \cdot V_р,$$

где R - полезное усилие (заданная нагрузка), кН;

$V_р$ - максимальная расчетная скорость выходного звена, м/с.

Для гидропривода с вращательным движением выходного звена $N_{вых}$ в кВт определится

$$N_{вых} = M \cdot \frac{\pi \cdot n_м}{30}, \quad (42)$$

где M - момент на валу гидрсмотора, кН·м;

$n_м$ - частота вращения вала гидромотора, об/мин.

Определяется мощность, затрачиваемая на подачу жидкости насосом $N_{вх}$.

$$N_{вх} = \frac{Q_н \cdot p_{кл} \cdot 10^3}{\eta_н}, \text{ кВт} \quad (43)$$

где $\eta_н$ - общий КПД насоса.

$Q_н$ - подача насоса (паспортная),$м^3$/с.

Общий КПД системы определится

$$\eta = \frac{N_{вых}}{N_{вх}} \cdot К_р. \quad (44)$$

7. РАСЧЕТ ГИДРОЦИЛИНДРА

7.1. Толщина стенки цилиндра

В расчетной практике используется несколько различных формул для определения толщины стенки цилиндра, находящегося под действием внутреннего давления. Условно цилиндры делят на тонкостенные и толстостенные. Тонкостенные (S/D<0,l) цилиндры и трубопроводы рассчитывают по формулам, мм;

$$S = \frac{pD}{2\sigma_д}; \tag{45}$$

$$\Delta D = \frac{pD^2}{4ES}(1 - 0{,}5\mu), \tag{46}$$

где S - толщина стенки цилиндра, мм;

p - разрушающее давление, МН/м^2;

D - внутренний диаметр, мм;

$\sigma_д$ - допускаемое напряжение, МН/м^2.

$$\sigma_д = \frac{\sigma_т}{n}, \tag{47}$$

где $\sigma_т$ - предел текучести материала;

n - запас прочности по пределу текучести (обычно в расчетах гидроцилиндров принимается n>2);

ΔD - диаметральная деформация, мм;

E - модуль упругости, МН/м^2;

μ - коэффициент Пуассона.

Толстостенные (S/D>0,l) цилиндры рассчитывают по формулам, вытекающим из четырех теорий прочности, в зависимости от применяемых материалов.

Толщину стены толстостенного однослойного цилиндра определяют по второй теории прочности (для малопластичных материалов) по формуле

$$S = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{\sigma_д + 0{,}4p}{\sigma_д - 1{,}3p}} - 1\right), \tag{48}$$

и по третьей теории прочности (для пластичных материалов)

$$S = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{\sigma_д}{\sigma_д - 2p}} - 1\right). \tag{49}$$

Диаметральная деформация внутренней поверхности

$$\Delta D = \frac{pD}{E\left(D_н^2 - D^2\right)}\left[D_н^2 + \mu\left(D_н^2 - D^2\right)\right], \tag{50}$$

где $D_н$ - наружный диаметр цилиндра.

7.2. Толщина задней крышки цилиндра

При расчетах толщины h задней крышки цилиндра используют формулы расчета круглых пластин, нагруженных равномерно распределенным давлением (рис. 2):

$$\sigma_т = \frac{3p}{4h^2} R^2, \tag{51}$$

откуда толщина крышки:

$$h = 0{,}433D\sqrt{\frac{p}{\sigma_д}}, \tag{52}$$

где p - расчетное давление, МН/м^2 ,

R - радиус крепления крышки.

По мере уменьшения податливости опор (увеличение толщины стенок цилиндра) напряжения в центре крышки уменьшаются, а на контуре - увеличиваются.

Напряжения в центре крышки могут быть определены из выражения

$$\sigma = kp\frac{R^2}{h_1^2}, \tag{53}$$

где k - коэффициент, зависящий от отношения S/h;

S - толщина стенки цилиндра,

h_1 - толщина стенки в центре крышки.

S/h	0,5	1	1,5	2
k	0,8	0,6	0,6	0,6

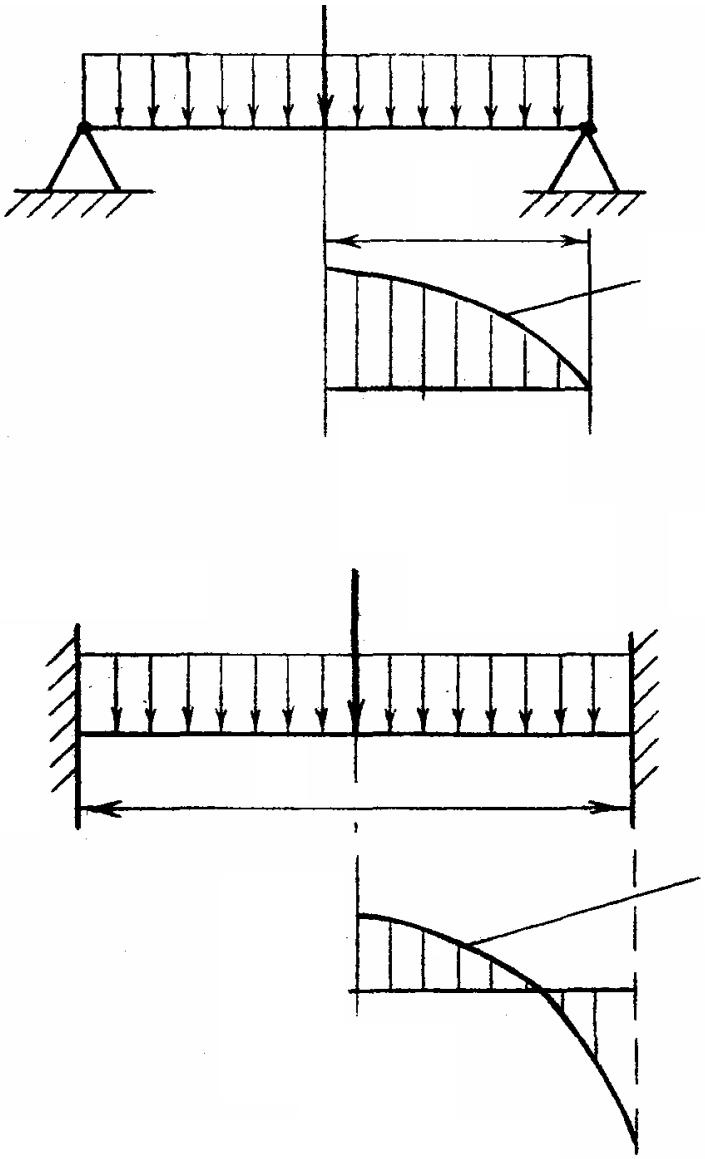


Рис. 2. Расчетные схемы крышек гидроцилиндров

7.3. Расчет фланцев гидроцилиндра

По окружности фланцевого соединения (рис. 3) действует создаваемое давлением жидкости усилие

$$T = p \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \tag{54}$$

где p - рабочее давление;

D - внутренний диаметр гидроцилиндра.

Усилие затяжки болтов фланца определится

$$T_3 = k \cdot T, \tag{55}$$

где k - коэффициент, учитывающий ослабление затяжки вследствие внутреннего давления k=1,25.

Момент затяжки, отнесенный к диаметру окружности размещения болтов:

для затяжки

$$M_З=1{,}25T_т, \tag{56}$$

под рабочей нагрузкой

$$M=T_т\cdot l, \tag{57}$$

где l - плечо приложения силы.

Суммарному моменту М противодействует момент внутренних сил, представляющий собой произведение напряжений в материале на момент сопротивления в наиболее опасном сечении. При проверочном расчете необходимо определить наиболее вероятные опасные сечения.

Момент сопротивления любого сечения А-А (рис. 3, *а*) переходной части фланца составит

$$W = 2\pi\left[2X + \frac{1}{8}(D + S_A)\left(S_A^2 - \frac{S_0^2}{4}\right)\right], \tag{58}$$

где X - статический момент п-го участка сечения фланца до линии А-А;

D - внутренний диаметр цилиндра;

S_A - толщина гильзы в сечении А-А;

S_0 - толщина гильзы.

Для случая, когда опасное сечение оказывается на переходе от конусной части гильзы к фланцу, момент сопротивления

$$W = 2\pi\left[(D_ф - D - 2d)h^2 + (D + S_1)\left(S_1^2 - \frac{S_0^2}{4}\right)\right], \tag{59}$$

где $D_ф$ — наружный диаметр фланца;

D - внутренний диаметр гильзы;

d - диаметр отверстия под болт;

h - толщина фланца;

S_1- толщина гильзы у перехода к фланцу.

Если фланец очень тонкий, опасное сечение окажется на диске фланца (рис. 3, *б,* сечение В-В). В этом случае момент сопротивления определится

$$W = \frac{\pi}{2}h^2\left(b_1 - d + \frac{d_1}{2}\right), \tag{60}$$

где b - вылет фланца (см. рис. 3, *б*);

d_1 - диаметр опасного сечения.

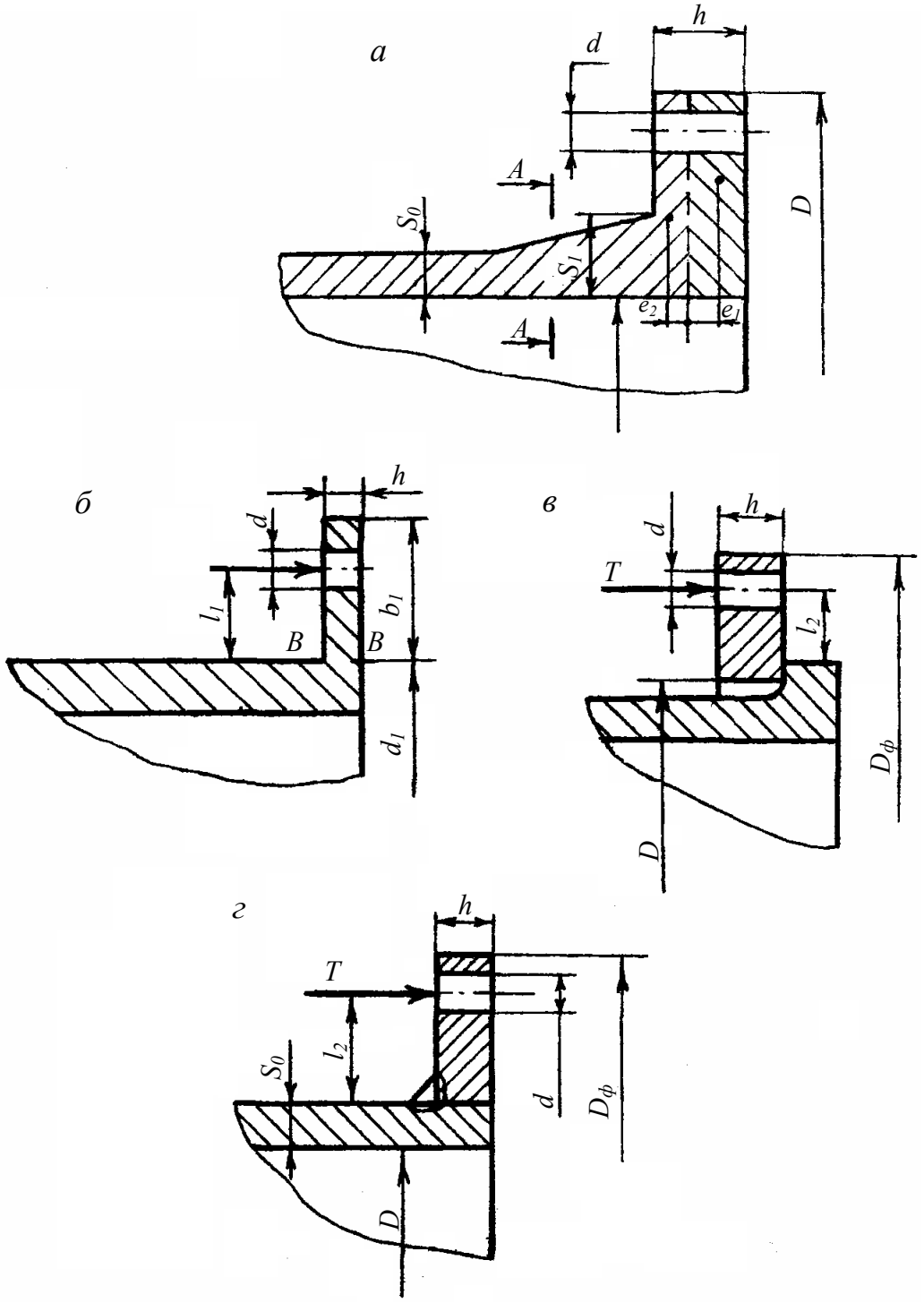


Рис. 3. Расчетные схемы фланцев

В этом случае

$$M = T_3 \cdot l_1, \quad (61)$$

где l_1 - плечо приложения силы.

При свободных фланцах (рис. 3, *в*) момент сопротивления определится

$$W = \frac{\pi}{2}\left(D_ф - D - 2d\right)h^2. \quad (62)$$

В этом случае

$$M=T \cdot l_2, \quad (63)$$

где T - усилие на болтах;

$1_:$ - плечо приложения силы.

Момент сопротивления приварных фланцев (рис. 3, *г*)

Таким образом, толщина фланца в опасном сечении определяется из выражения

$$\sigma_д = M/W, \quad (64)$$

где M - внешний момент на фланце;

W - момент сопротивления в опасном сечении.

7.4. Расчет элементов крепления крышек

Расчетные схемы соединений крышек с гильзой на внутренних полукольцах или на разрезном кольце круглого сечения показаны на рис. 4, *а*.

Упорное кольцо I рассчитывается на срез и смятие. Напряжение среза кольца определится

$$\tau_{ср} = T_c/F, \quad (65)$$

где T_c - усилие, срезывающее кольцо; $T_c = p\frac{\pi D^2}{4}$

F - площадь среза кольца; $F = \pi Dl$ или $F = \pi Dd$. Тогда

$$\tau_{ср} = \frac{pD}{4 \cdot l}, \quad (66)$$

(для круглого кольца d = l).

Напряжение смятия кольца определится

$$\sigma_{см} = \frac{pD^2}{2Dh - h^2}, \quad (67)$$

(для круглого кольца h = d).

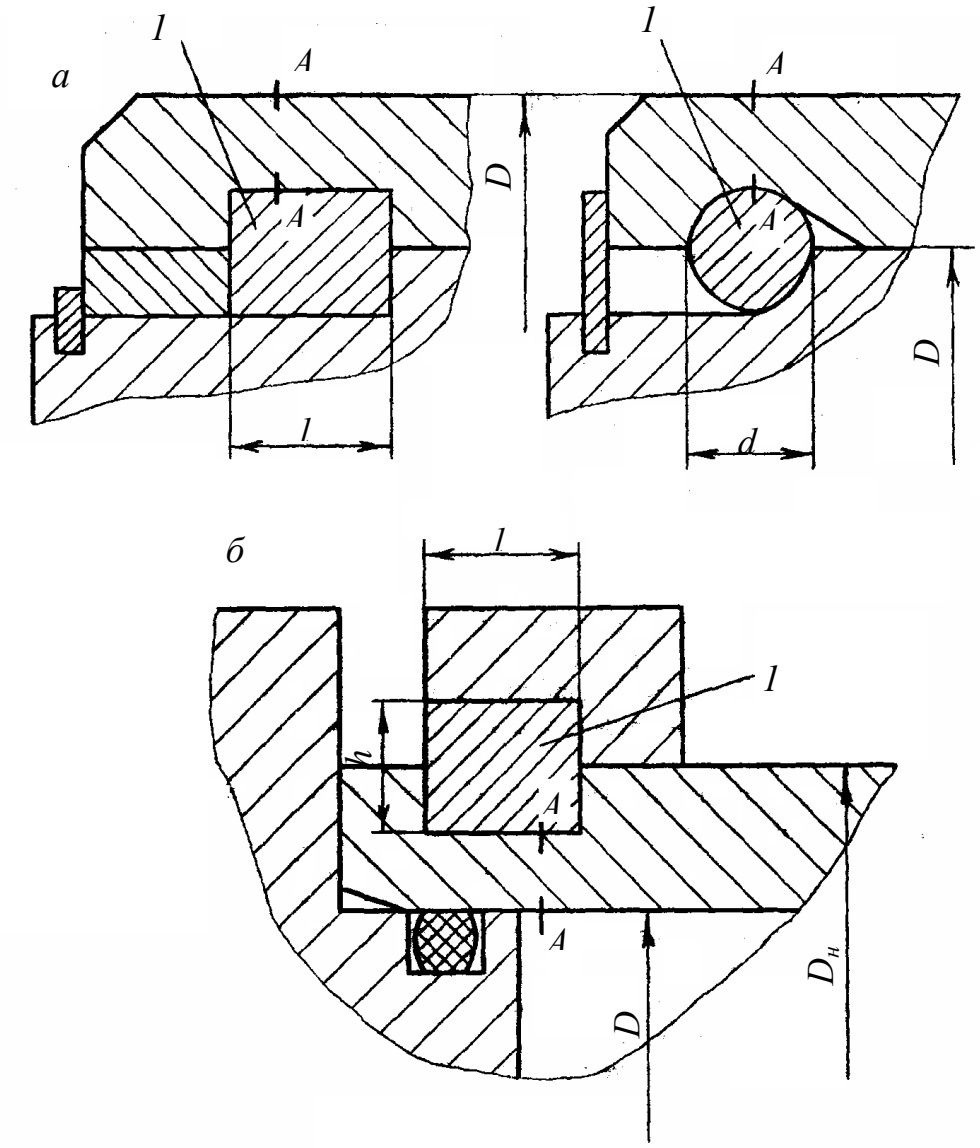


Рис. 4. Расчетные схемы соединений крышек с гильзой

Напряжение в опасном сечении А-А гильзы определится

$$\sigma = \frac{pD^2}{D_н^2 - (D + h)^2}, \tag{68}$$

Крепление крышки с помощью наружных полуколец изображено на рис. 4, *б*.

Упорное кольцо I рассчитывается:

на срез

$$\tau_{ср} = \frac{pD_н}{4 \cdot l}, \tag{69}$$

на смятие

$$\sigma_{см} = \frac{pD_н^2}{2D_н h - h^2}, \tag{70}$$

Напряжение в опасном сечении А-А гильзы определится

$$\sigma = \frac{pD_н^2}{(D_н - h)^2 - D^2}, \qquad (71)$$

где p - расчетное давление;

D, $D_н$ - диаметры гильзы соответственно внутренний и наружный;

h - толщина кольца.

При креплении крышек к фланцам на болтах диаметр болта определится

$$d = \sqrt{\frac{4T}{\pi n \sigma_д}} + C, \qquad (72)$$

где d - внутренний диаметр резьбы;

T - усилие, действующее на крышку;

n - количество болтов;

C - поправка к расчетному диаметру (C ≈ 3 мм).

7.5. Расчет стяжных шпилек

Нагрузка, действующая на стяжные шпильки гидроцилиндра, определяется многими факторами: давлением жидкости внутри гидроцилиндра, величиной предварительной затяжки шпилек, положением поршня в гидроцилиндре, способом установки гидроцилиндра.

Если шпильки установлены без предварительной затяжки, то нагрузка на них изменяется по прямой 1 (рис. 5, *б*).

Если цилиндр нагружен грузом G (рис. 5, *а)* и предварительная затяжка отсутствует, нагрузка изменяется по прямой 2:

$$T_ш = pF + G. \qquad (73)$$

При наличии предварительной затяжки шпилек нагрузка на них изменяется по прямой 3:

$$T_ш = T_з + \frac{1 - 2\mu}{k} pF + \frac{G}{k}, \qquad (74)$$

где $T_з$ - усилие предварительной затяжки шпилек;

μ - коэффициент Пуассона;

p - давление в гидроцилиндре;

F - активная площадь;

k - коэффициент жесткости,

$$k = 1 + \frac{F_ц \cdot L_ш}{F_ш \cdot L_ц}, \qquad (75)$$

где $F_ц$, $F_Ш$ - площади сечения соответственно гильзы и шпилек;

$L_ц$, $L_Ш$ - длины соответственно шпильки и гильзы.

В средних положениях поршня внутреннее давление в цилиндре не действует на гильзу по всей ее длине. В этом случае можно принять $\mu = 0$, тогда

$$T_ш = T_з + \frac{pF + G}{k}, \qquad (76)$$

Точки пересечения прямой 3 с прямой 1 и 2 указывают, при каком давлении в цилиндре произойдет отрыв головок цилиндра от гильзы. Из графиков (рис. 5, *б*) видно, что чем больше усилие предварительной затяжки, чем при большем давлении произойдет отрыв.

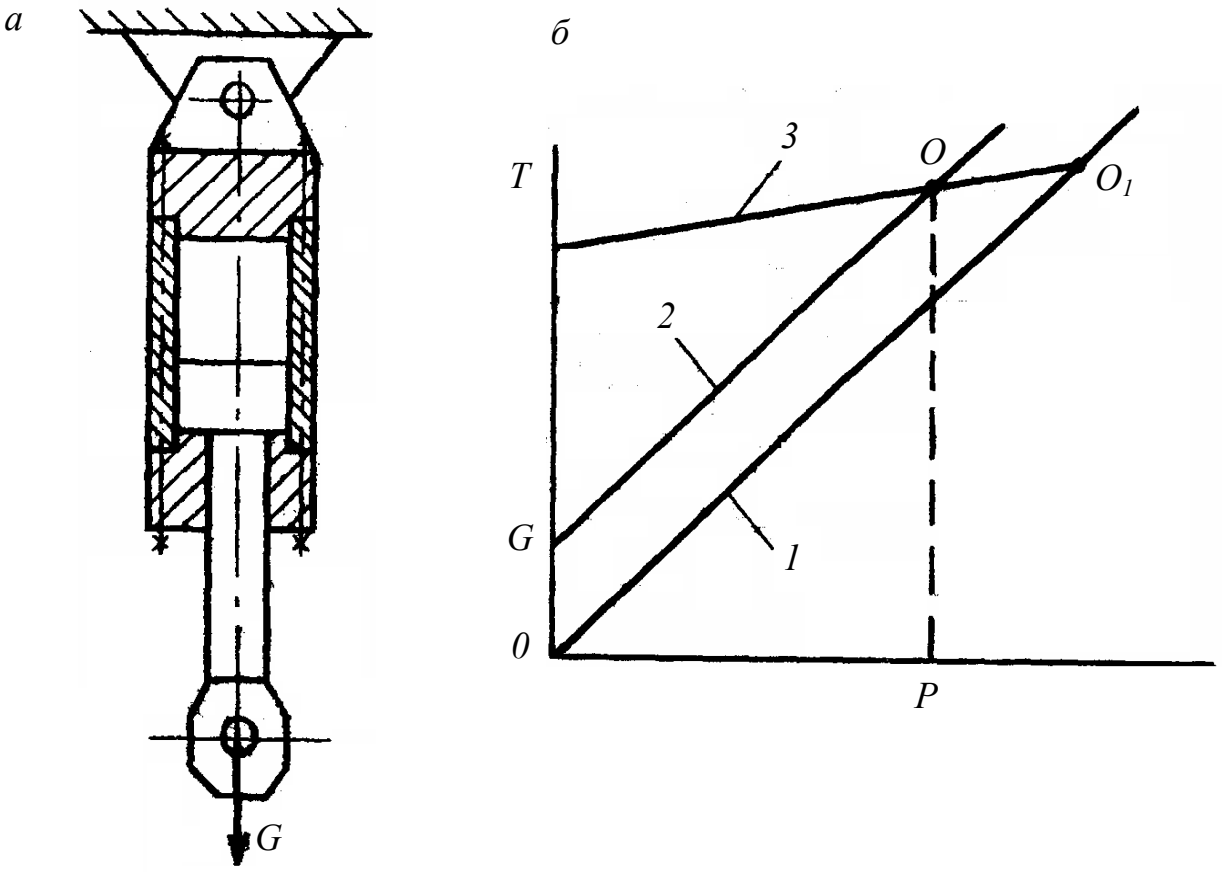


Рис. 5. К расчету стяжных шпилек

7.6. Расчет проушины, сварного соединении крышки с гильзой и резьбового крепления поршня

Запас прочности проушины на разрыв (рис. 6) можно определить из выражения

$$n = \frac{kF_n\sigma_т}{T_{шт}} \geq [n] = 1{,}5, \qquad (77)$$

где k - коэффициент концентрации напряжений;

$$k = 0{,}46\left(1 + \frac{h}{c}\right) - \frac{c}{5d_0} \leq 1, \qquad (78)$$

где h, c, d_0 – геометрические параметры (рис. 6, *б*)

F_n - площадь сечения проушины по центру отверстия (рис. 6, сечение А-А);

$T_ш$ - расчетная продольная сила, растягивающая шток.

Конструкция проушины рациональна, если c≤h. Если c>h, в расчетах принимают c=h и определяют расчетную площадь.

При расчете пальца изгибающий момент определяют при таком возможном положении проушины цилиндра, при котором соотношение a/b (рис. 6, *б*) стремится к единице:

$$M = T\left(\frac{ab}{L} + \frac{c}{b}\right), \tag{79}$$

где a, b, c, L - линейные размеры (рис. 6, б).

Момент сопротивления пальца на изгиб определится

$$W = \frac{\pi d^3}{32}\left[1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^4\right], \tag{80}$$

где $d_{l;}$ d - диаметры соответственно пальца и отверстия. Запас прочности пальца определится

$$n = \frac{\sigma_т W}{M} \geq [n] = 1{,}2\,. \tag{81}$$

Запас прочности сварного соединения крыгшки (проушины) с гильзой (рис. 6, *в*) определится

$$n = \frac{\varphi - 4K_ш(d - K_ш)}{D^2} \cdot \frac{\sigma_{т\,min}}{p_н} \geq [n] = 1{,}5\,, \tag{82}$$

где φ = 0,65 - коэффициент прочности при угловых соединениях;

$K_ш$ - катет сварного шва;

d - наибольший диаметр, описанный по поверхности шва;

$\sigma_{тmin}$ - наименьший предел текучести соединяемых деталей шва;

D - активный диаметр;

$p_и$ - испытательное давление (принимается на 50% выше рабочего давления).

Соединение поршня со штоком во многих случаях осуществляется с помощью резьбы. Запас прочности резьбового соединения на смятие (рис. 6, *г*) определится

$$n = \frac{\pi(d_н^2 - d_в^2)\sigma_т}{4k_н T_{шт}} \geq [n] = 2{,}5\,, \tag{83}$$

где $d_н$, $d_в$ - диаметр резьбы соответственно наружный и внутренний;

$\sigma_т$ - наименьший предел текучести материала соединяемых деталей (гайки или штока);

$k_н$ - коэффициент нагрузки (табл. 7);

$T_{шт}$ - сила гидроцилиндра при работе штоковой полостью.

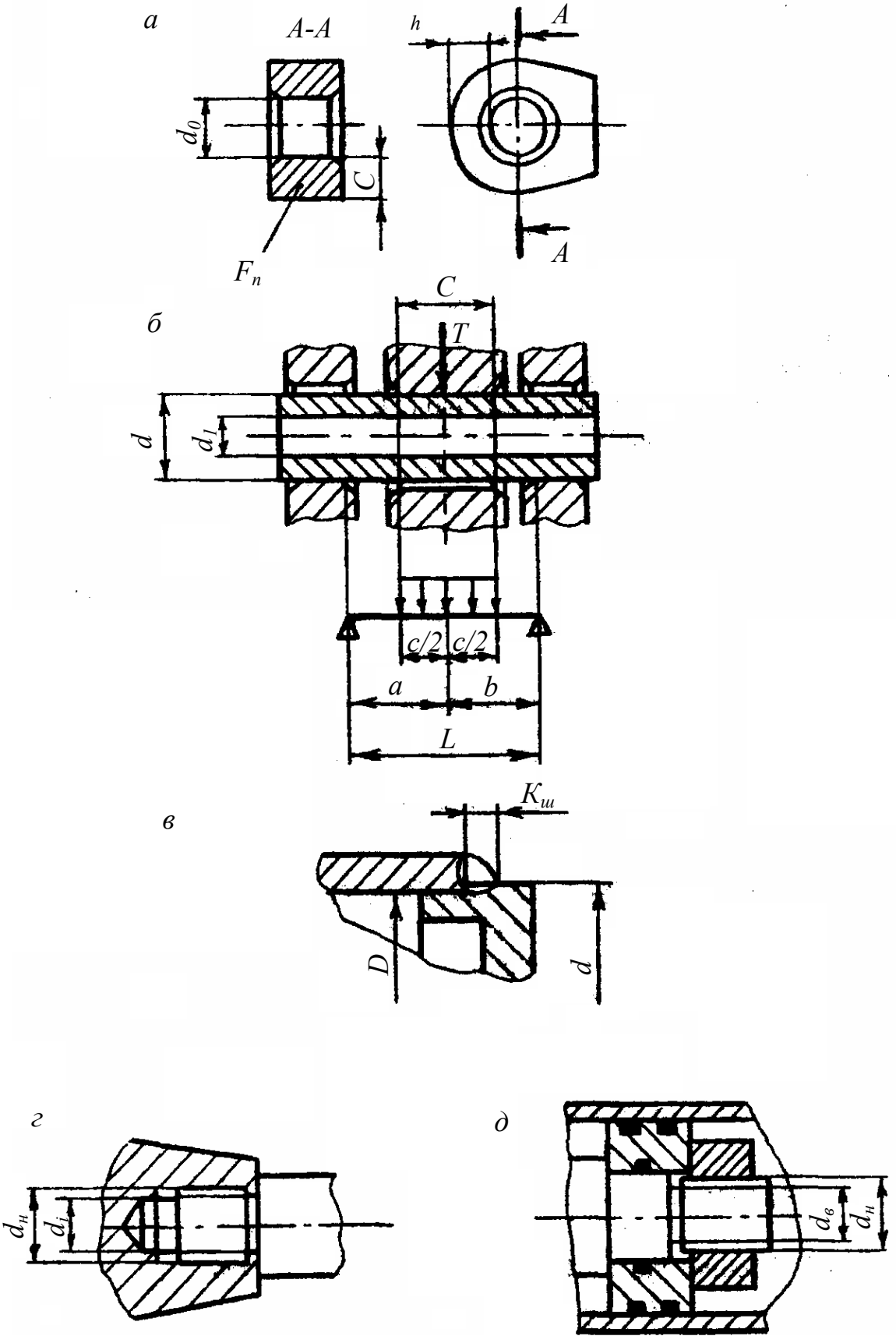


Рис. 6. Расчетные схемы проушины, пальцев, сварных швов и резьб

Таблица 7

Значения коэффициента нагрузки

$d_н/S$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$k_н$	0,45	0.37	0,33	0.30	0,25	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18
$k_р$	0,83	0,71	0,62	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

Запас прочности по срезу витков штока определится

$$n = \frac{\pi \cdot d_в \cdot k_н \cdot H \cdot \tau_т \cdot k_р}{T_{шт}} \geq [n] = 1{,}6, \qquad (84)$$

где $k_н$ - коэффициент полноты резьбы (для метрических резьб $k_н = 0{,}87$;

$k_р$ - коэффициент распределения нагрузки (см. табл. 7);

H - расчетная высота гайки;

$\tau_т$ - предел текучести материала штока на срез.

Запас прочности по срезу витков гайки определится

$$n = \frac{\pi \cdot d_н \cdot k_н \cdot H \cdot \tau_т \cdot k_р}{T_{шт}}, \qquad (85)$$

$\tau_т$ - предел текучести материала гайки на срез.

7. 7. Расчет гидроцилиндров на устойчивость

Условия продольной устойчивости

$$n_1 = \frac{T_{кр}}{T_ш} \geq [n_1]; n_2 = \frac{T_{кр}}{T_и} \geq [n_2], \qquad (86)$$

где n_1, n_2 - запас устойчивости при действии на шток соответственно продольной расчетной силы $T_{шт}$ и $T_{кр}$ при испытании;

$T_{кр}$ - критическая сила для гидроцилиндра, в качестве которой принимают наименьшее из значений эйлеровой силы $T_э$ и критической силы по строительным нормам $T_с$;

$[n_1]$ - минимально допустимый запас устойчивости, $[n_1] = 1{,}4$;

$[n_2]$ - минимально допустимый запас устойчивости при испытании по ГОСТ 18464-87, $[n_2]=1{,}1$.

Для гидроцилиндров, конструктивная схема которых соответствует рис. 7, расчетная продольная сила, сжимающая шток, определится

$$T_ш = p\frac{\pi \cdot D^2}{4}, \qquad (87)$$

где p - расчетное давление в поршневой полости, равное давлению настройки предохранительного клапана отчетом превышения давления при его срабатывании.

Для гидроцилиндров эйлерова сила определится

$$T_э = k\frac{\pi^2 \cdot E_ш J_ш}{L^2}, \qquad (88)$$

где k - коэффициент устойчивости (табл. П.1 и П.2);

$E_ш$ - модуль продольной упругости материала (табл. П.3);

$J_ш$ - осевой момент инерции площади поперечного сечения штока;

L - длина гидроцилиндра (см. рис. 7).

Критическая сила по строительным номерам определится

$$T_c = \varphi \cdot F_ш \cdot \sigma_{т.ш}, \qquad (89)$$

где φ - коэффициент продольного изгиба в зависимости от предела текучести $\sigma_{т.ш}$ материала штока и приведенной гибкости гидроцилиндра (табл.П.4).

Приведенная гибкость гидроцилиндра определится

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{k\frac{J_ш}{F_ш}}}, \qquad (90)$$

где $F_ш$ - площадь поперечного сечения штока.

Пример.

Гидроцилиндр выполнен по схеме, показанной на рис. 7, *в*.

Исходные данные. Поперечная сила N=0.

Диаметр цилиндра: внутренний D=100 мм, наружный $D_н$=114 мм; диаметр штока d=50 мм; расчетное давление p=20 МПа; ход штока S=800 мм; общая длина L=1886 мм; длина участка жесткости L_1=870 мм.

Материал штока - сталь 30ХГСА; модуль упругости согласно табл. П.3. $E_ш=1{,}98\cdot10^{11}$ Н/м^2; предел текучести $\sigma_{т.ш}=600\cdot10^6$ Н/м^2.

Подставив числовые значения в (87) получим

$$T_ш = \frac{20\cdot10^6 \cdot 3{,}14 \cdot 01^2}{4} = 0{,}157\cdot10^6 \text{ Н}.$$

Предварительно вычислив величины коэффициентов β и μ (см. табл. П.2).

$\beta = L_1/L = 870/1886 = 0{,}46$;

$$\mu = \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1} = \frac{1{,}98\cdot10^{11}\cdot340\cdot10^{-8}}{1{,}98\cdot10^{11}\cdot30{,}7\cdot10^{-8}} = 11{,}02,$$

находим по табл. П.2 значение k=1,77.

Определим (согласно 88) эйлерову силу

$$T_э = 1{,}77\frac{3{,}14^2 \cdot 2{,}1\cdot10^{11}\cdot30{,}7\cdot10^{-8}}{1{,}886^2} = 0{,}3\cdot10^6 \text{ Н}.$$

Вычисляем (в соответствии с 90) гибкость гидроцилиндра

$$\lambda = \frac{1{,}886}{\sqrt{1{,}77\dfrac{30{,}7\cdot 10^{-8}}{19{,}63\cdot 10^{-4}}}} = 113{,}3\,.$$

Коэффициент продольного изгиба находим интерполированием по табл.П.4: φ=0,189.

Сила по строительным нормам (согласно 89)

$T_c = 0{,}189\cdot 19{,}63\cdot 10^{-4}\cdot 600\cdot 10^6 = 2{,}4\cdot 10^5$ Н.

т.е. критическая сила $T_{кр} = 2{,}4\cdot 10^5$ Н;

Условие устойчивости (по 86)

$$n_1 = \frac{T_{кр}}{T_ш} = \frac{2{,}4\cdot 10^5}{15{,}7\cdot 10^4} = 1{,}53\,.$$

Условие устойчивости выполнено, так как

$$n_1 \geq [\,n_1].$$

7.8. Расчет штока на прочность

Запас прочности штока в сечении А-А определится из уравнения.

$$\sigma_{т.ш} = n\cdot\sigma + \frac{n\cdot T_ш (f_н + n\cdot f_{TN})}{W\left(1 - n\cdot\dfrac{T_ш}{T_э}\right)}, \qquad (91)$$

где σ - напряжение на штоке без учета прогибов;

$$\sigma = \frac{T_ш}{F_ш} + \frac{M_{TN}}{W};$$

$T_ш$ - расчетная продольная сила;

$f_н$ - начальный прогиб, равный геометрической сумме прогиба от зазоров в заделке штока с цилиндром (первым цилиндром в телескопических гидроцилиндрах), заделке первого цилиндра со вторым и т.д. и прогиба от собственной силы тяжести гидроцилиндра;

f_{TN} - геометрическая сумма прогибов f_T и f_N от действия продольной силы Т и поперечной силы N;

W - момент сопротивления штока;

M_{TN} - геометрическая сумма изгибающих моментов M_T и M_N (Мт = $T_ш e_н$ - изгибающий момент от силы $T_ш$; M_N - изгибающий момент от силы N);

$e_н$ - эксцентриситет силы $T_ш$ в сечении А-А.

Запас прочности штока есть меньшее положительное значение корня, полученное в результате решения квадратного уравнения (91) относительно n.

$$n_{1,2} = -\frac{c_2}{2} \pm \sqrt{\frac{c_2^2}{4} - c_3}\,;$$

$$c_2 = \frac{T_э \cdot \sigma \cdot W + T_э \cdot T_ш \cdot f_н + T_ш \cdot \sigma_{т.ш} \cdot W}{c_1};$$

$$c_3 = \frac{-T_э \cdot \sigma_{т.ш} \cdot W}{c_1};$$

$$c_1 = T_ш \cdot (T_э \cdot f_{TN} - \sigma \cdot W).$$

Для одноступенчатого гидроцилиндра начальный прогиб определится

$$f_н = \frac{\Delta \cdot L_1}{b \cdot L}\left(L_2 - \frac{b}{2}\right),$$

где L_1, L_2 и L - длины выдвинутой части штока, корпуса цилиндра и гидроцилиндра соответственно;

Δ - диаметральный зазор в сопряжении штока с цилиндром (Δ = 0,3 мм);

b - база заделки штока в цилиндре;

b_1 и b_2 - база заделки штока в первом цилиндре и первого цилиндра во втором.

Для двухступенчатого гидроцилиндра начальный прогиб определится (см рис. 8)

$$f_н = \frac{L_1}{L}\left[\frac{\Delta_1}{b_1} \cdot L_2 + \left(\frac{\Delta_1}{b_1} + \frac{\Delta_2}{b_2}\right)L_3 - \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}\right],$$

где Δ_1 и Δ_2 - диаметральные зазоры в сопряжении штока с первым цилиндром и в сопряжении первого цилиндра со вторым.

Эксцентриситет силы $T_ш$ определится

$$e_н = e_A + \frac{L_1}{L}(e_B - e_A),$$

где e_A, e_B - эксцентриситеты в шарнирных опорах соответственно A и B.

$$e_A = e_0 + r_A \cdot \left(\text{arctg}\mu_A + \text{arctg}\frac{R_A}{T_ш}\right);$$

$$e_B = e_0 + r_B \cdot \left(\text{arctg}\mu_B + \text{arctg}\frac{R_B}{T_ш}\right)$$

где l_0 - эксцентриситет центров опор из-за погрешностей изготовления, 1_0=1,5мм;

r_A и r_B - радиусы опор штока и цилиндра;

μ_A и μ_B - коэффициенты, учитывающие тип опор; для опор качения шарнирных на пальцах μ=0,02; для опор скольжения μ=0,15;

R_A и R_B - реакции в опорах от поперечной силы.

Изгибающий момент от действия сил T и N определится

$$M_T = T_ш \cdot e_н,$$

$$M_N = N \cdot L_1.$$

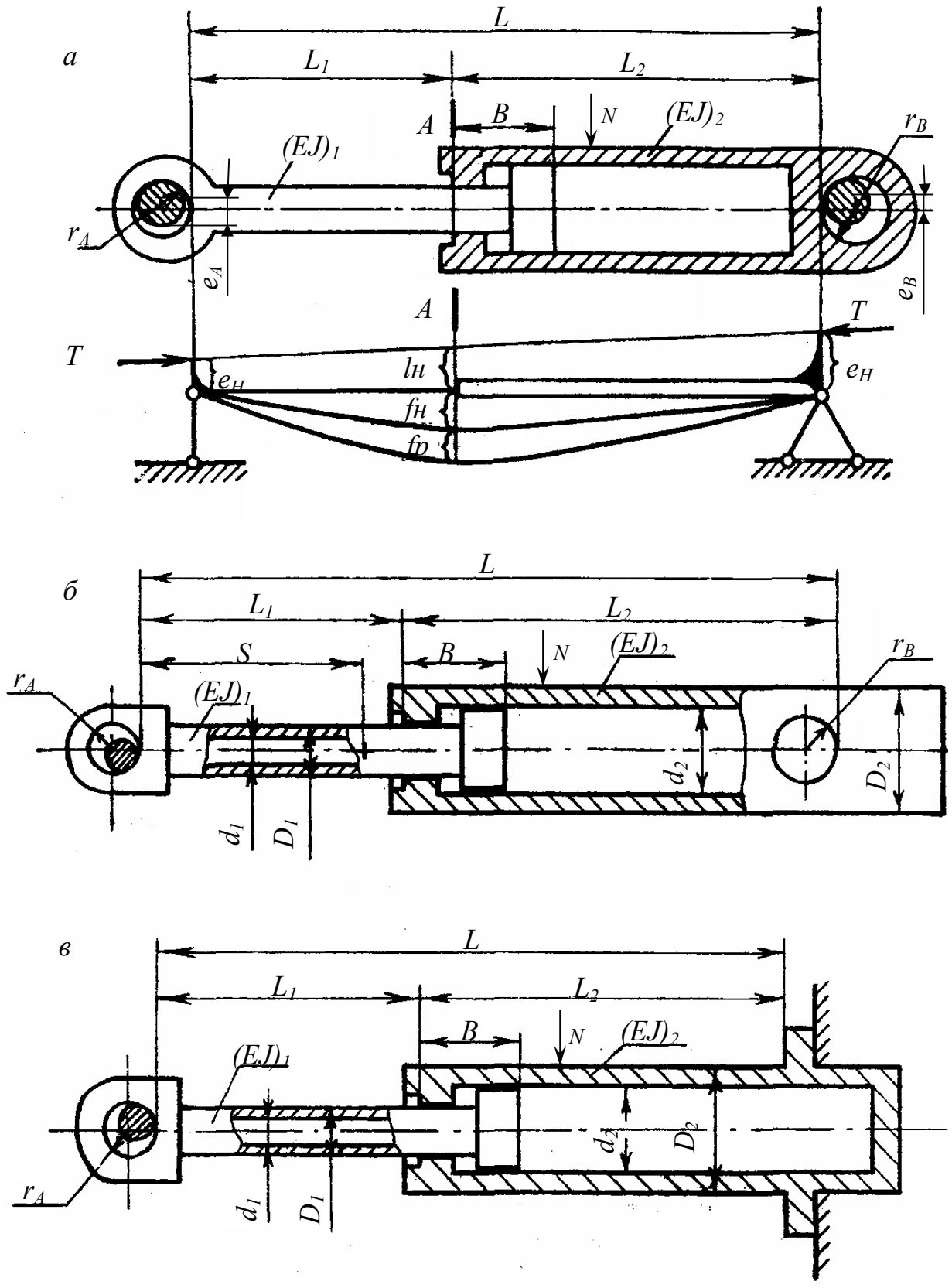


Рис. 7. Схемы нагружения цилиндров

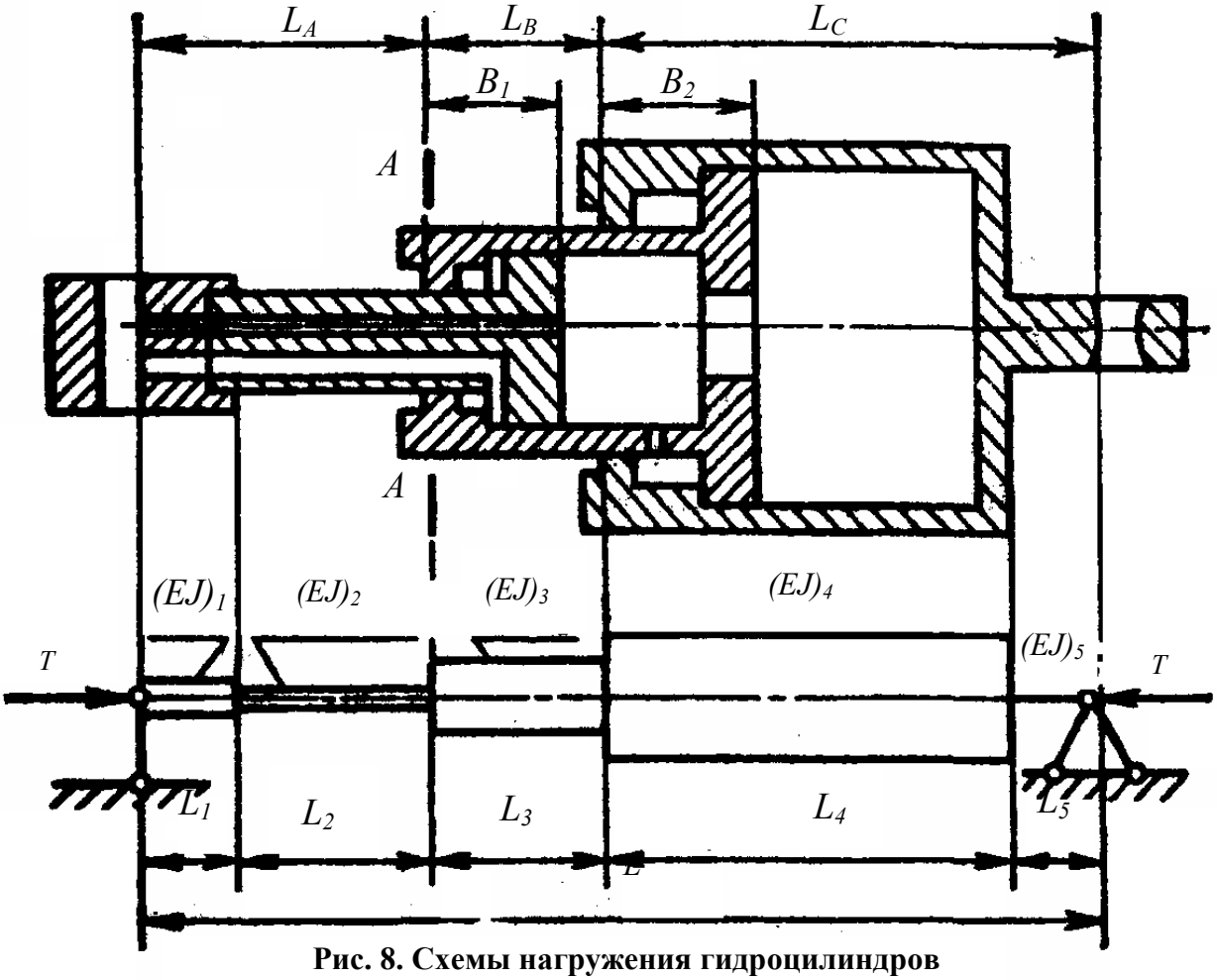


Рис. 8. Схемы нагружения гидроцилиндров

Прогиб в сечении А-А гидроцилиндра от действия силы $T_ш$ определится

$$f_T = \frac{T_ш \cdot L_1 \cdot L_2}{B \cdot L^2}\left\{e_A\left[\frac{L_1(L_1+3L_2)}{E_1 \cdot J_1}+\frac{2L_2^2}{E_2 \cdot J_2}\right]+e_B\left[\frac{2L_1^2}{E_1 \cdot J_1}+\frac{L_2(3L_1+L_2)}{E_2 \cdot J_2}\right]\right\};$$

при $e_A = e_B = e$

$$f_T = \frac{T_ш \cdot e \cdot L_1 \cdot L_2}{2L}\left(\frac{L_1}{E_1 \cdot J_1}+\frac{L_2}{E_2 \cdot J_2}\right).$$

Прогиб от N в сечении А-А гидроцилиндра определится

$$f_N = \frac{N \cdot L_1 \cdot L_B}{B \cdot E_1 \cdot J_1 \cdot L^2}\left[2L_1^2 L_2 \frac{E_1 \cdot J_1}{E_2 \cdot J_2}\left(2L_1^3 + L^3 - L \cdot L_B^2 - 3L_1^2 L\right)\right],$$

где L_B - расстояние от опоры В до точки приложения силы N.

Коэффициенты, учитывающие дополнительные прогибы вследствие формации заделанной части штока в цилиндре

от продольной силы $T_ш$

$$k_T = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{B - 0{,}5B_{min}}{L_1},$$

от поперечной силы N

$$k_N = 1 + \frac{B - 0{,}5B_{min}}{L_1},$$

где B_{min} - минимальная база сопряжения штока с цилиндром при полностью выдвинутом штоке.

Расчетный прогиб от сил T и N в сечении А-А при любых опорах определится

$$f_{TN} = f_T \cdot k_T + f_N \cdot k_N.$$

Пример.

Гидроцилиндр выполнен по схеме, изображенной на рис. 7, *б.*

Исходные данные. Радиусы опор: штока r_A = 0,0425 м; цилиндра r_B=0,04 м, длина штока $L_ш$ = 1,66 м; общая длина гидроцилиндра L = 1,92 м; расчетный зазор $\Delta = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ м; база сопряжения штока с цилиндром B = 0,171 м; диаметр штока d=0,09 м; продольная сила на штоке $T=0{,}8 \cdot 10^6$ Н; рабочий ход штока S = 1,6 м; эксцентриситет продольной силы относительно геометрической оси e_0 = 0,0015 м; материал штока - сталь 40Х; эйлерова сила $T_э=1{,}911 \cdot 10^6$ Н.

Расчет выполняется в такой последовательности:

$$e_A = 0{,}0015+0{,}0425\sin(\text{arctg}0{,}02) = 0{,}00235 \text{ м};$$

$$e_B = 0{,}0015+0{,}04 \cdot \sin(\text{arctg}0{,}015) = 0{,}00743 \text{ м};$$

$$e_H = 0{,}00235+ \frac{1{,}66}{1{,}92}(0{,}00743 - 0{,}00235) = 0{,}00674 \text{ м};$$

$$M_{TN}=0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 0{,}00674=5392 \text{ Н·м};$$

$$f_н = \frac{0{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}66}{0{,}171 \cdot 0{,}192}\left(0{,}26 - \frac{0{,}171}{2}\right) = 0{,}26 \cdot 10^{-3};$$

$$f_T = \frac{0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 1{,}66 \cdot 0{,}26}{6 \cdot 1{,}92}\left\{\begin{array}{l} 0{,}00235\left[\frac{1{,}66(1{,}66 + 3 \cdot 0{,}26)}{2{,}18 \cdot 10^{11} \cdot 322 \cdot 10^{-8}} + \frac{2 \cdot 0{,}26^2}{1{,}98 \cdot 10^{11} \cdot 3180 \cdot 10^{-8}}\right] + \\ +{,}0073\left[\frac{2 \cdot 1{,}66^2}{2{,}18 \cdot 10^{11} \cdot 322 \cdot 10^{-8}} + \frac{0{,}26(3 \cdot 168 + 0{,}26)}{1{,}98 \cdot 10^{11} \cdot 3180 \cdot 10^{-8}}\right] \end{array}\right\} = 1{,}148 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$k_T = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{0{,}171 - 0{,}5 \cdot 0{,}171}{1{,}66} = 1{,}034;$$

$$f_{TN} = 1{,}148 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}034 = 1{,}187 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\sigma = \frac{0{,}8 \cdot 10^6}{63{,}6 \cdot 10^{-4}} + \frac{5392}{71{,}5 \cdot 10^{-6}} = 201{,}2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$c_1 = 0{,}8\cdot10^6\cdot\left(1{,}911\cdot10^6\cdot1{,}187\cdot10^{-3} - 201{,}2\cdot10^6\cdot71{,}5\cdot10^{-6}\right) = -9{,}694\cdot10^9\ \text{Н}^2\cdot\text{м};$$

$$c_2 = \frac{1{,}911\cdot10^6\cdot201{,}2\cdot10^6\cdot71{,}5\cdot10^{-6} + 0{,}8\cdot10^6\cdot1{,}91\cdot10^6\cdot0{,}26\cdot10^{-3}}{-9{,}694\cdot10^9} +$$

$$+\frac{0{,}8\cdot10^6\cdot600\cdot10^6\cdot71{,}5\cdot10^{-6}}{-9{,}694\cdot10^9} = -6{,}418$$

;

$$c_3 = \frac{-1{,}911\cdot10^6\cdot600\cdot10^6\cdot71{,}5\cdot10^{-6}}{-9{,}694\cdot10^9} = 8{,}457;$$

$$n_{1,2} = -\frac{-6{,}418}{2} \pm \sqrt{\frac{-6{,}418^2}{4} - 8{,}457};$$

$$n_{1,2} = 4{,}566;\ n_2 = 1{,}852;$$

Запас прочности n = 1,852 > [n].

7.9. Расчет цилиндра на прочность

Условия прочности:

при действии продольных и поперечных сил

$$n_ц = \frac{\sigma_{т.ц}}{\sigma_{эmax}} \geq [n], \qquad (92)$$

где $\sigma_{т.ц}$ - предел текучести материалов цилиндров;

$\sigma_{эmax}$ - наибольшие эквивалентные напряжения на внутренних или наружных волокнах цилиндров;

при испытании внутренним давлением и отсутствии продольных и поперечных сил

$$n_и = \frac{D^2 - d^2}{D^2\sqrt{3}}\cdot\frac{\sigma_{т.ц}}{p_и} \geq [n], \qquad (93)$$

где D и d - соответственно наружный и внутренний диаметр рассчитываемых цилиндров;

$p_п$ - давление в поршневых полостях при испытаниях цилиндров по ГОСТ 18464-87, $p_п = 1{,}5\cdot p$.

Расчетные и изгибающие моменты в точке 2 (см. рис. 7 *а*, *б*)

$$M_ц = M_{цT} + M_{цN}, \qquad (94)$$

uде $M_{цT}$ - изгибающий момент от силы T; $M_{цT} = Te_ц$;

$e_ц$ - эксцентриситет T относительно геометрической оси гидроцилиндра в расчетных сечениях;

$M_{цN}$ - изгибающий момент от поперечной силы.

Если моменты $M_{цT}$ и $M_{цN}$ имеют разные направления в течение всего

времени эксплуатации гидроцилиндра, то в формуле (94) принимают абсолютную разность слагаемых.

Напряжения во внутренних стенках:

осевые

$$\sigma_{zB} = -\frac{M_ц D}{2J_p}, \qquad (95)$$

где J_p - осевой момент инерции рассчитываемого цилиндра;

окружные

$$\sigma_{tB} = p\frac{D^2_H + D^2}{D^2_H - D^2}, \qquad (96)$$

радиальные

$$\sigma_{rB} = -p, \qquad (97)$$

эквивалентные

$$\sigma_{эB} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_{rB} - \sigma_{tB})^2 + (\sigma_{tB} - \sigma_{zB})^2 + (\sigma_{zB} - \sigma_{rB})^2\right]}. \qquad (98)$$

Пример.

Исходные данные. Продольная сила на штоке $T=0{,}8\cdot10^6$ Н; эксцентриситет в шарнирной опоре $e_B=0{,}00743$ м; диаметры цилиндра: внутренний $D=0{,}16$ м, наружный $D_H=0{,}19$ м; рабочее давление $p=40$ МН/м^2; момент инерции цилиндра $J=3180\cdot10^{-8}$ м^4; поперечная сила $N=0$.

Расчет выполняется в такой последовательности:

$$M_ц = M_{цT} = 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 0{,}00743 = 5944 \text{ Н·м};$$

$$\sigma_{zB} = -\frac{5944 \cdot 0{,}16}{2 \cdot 3180 \cdot 10^{-8}} = -15 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$\sigma_{tB} = 40 \cdot 10^6 \frac{0{,}19^2 + 0{,}16^2}{0{,}19^2 - 0{,}16^2} = 233{,}9 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$\sigma_{rB} = -40 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$\sigma_{эB} = 10^6 \sqrt{\frac{1}{2}\left[(-40 - 233{,}9)^2 + (233{,}9 + 15)^2 + (-15 + 40)^2\right]} = 262{,}2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$n_ц = \frac{600 \cdot 10^6}{262{,}2 \cdot 10^6} = 2{,}288.$$

Испытательное давление

$$p_и = 1{,}5p = 1{,}5 \cdot 40 \cdot 10^6 = 60 \cdot 10^6;$$

$$n_и = \frac{0{,}19^2 - 0{,}16^2}{0{,}19\sqrt{3}} \cdot \frac{600 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^6} = 1{,}688;$$

$1{,}688 > [n]$.

7.10. Материалы деталей гидроцилиндров и технические условия на изготовление

7.10.1. Гильзы

Гильзы изготавливают из бесшовных горячедеформированных труб по ГОСТ 8732-78. Эти детали определяют работоспособность гидроцилиндра, поэтому к ним предъявляются высокие требования по точности размеров, геометрической форме и чистоте обработки поверхностей.

При изготовлении гильз должны выполняться следующие технические требования:

1)шероховатость внутренней поверхности R_a = 0,32...0,15 мкм, продольные риски не допускаются;

2)непрямолинейность по оси гильзы - не более 0,03 мм на длине 500 мм;

3)конусность, овальность и бочкообразность внутреннего диаметра на всей длине гильзы - в пределах не более половины допуска на внутренний диаметр;

4)биение оси диаметра внешней обработанной поверхности относительно оси внутреннего диаметра - не более половины допуска на внешний диаметр;

5)биение торцов гильзы относительно продольной оси - не более 0,05 мм;

6)монтажные фаски, облегчающие заводку под углом 20^0 при шероховатости R_a=l,25 мкм;

7)резьбы и крепления головок должны быть выполнены по классу точности 2а, допускаемое биение среднего диаметра резьбы относительно поверхности центрирования головки - не более половины допуска на диаметр центрирующей поверхности;

8)у гильз, к которым приварены задние головки с проушинами, а также траверсы или цапфы, допускаются:

а)смещение оси отверстия под палец в задней проушине относительно оси внутреннего диаметра гильзы — не более 0,03 мм;

б)неперпендикулярность оси отверстия относительно оси внутреннего диаметра гильзы - не более 0,01 мм на длине 100 мм;

в)отклонение от соосности поверхности цапфы относительно внутреннего диаметра гильзы - не более 0,1 мм;

г)неперпендикулярность оси цапфы относительно оси внутреннего диаметра - не более 0,1 мм на длине 100 мм;

9)предельное отклонение рабочей поверхности в зависимости от типа применяемого уплотнения и давления рабочей жидкости (H9-H8).

В отечественном машиностроении гильзы силовых гидроцилиндров изготавливают из углеродистых сталей марок 35 и 45. В отдельных случаях

гильзы могут быть изготовлены из легированных сталей.

7.10.2. Штоки

Штоки гидроцилиндров изготовляют из сталей марок 35, 45, 20Х, 40Х и 40ХН. Они должны отвечать следующим техническим требованиям:

1)шероховатость рабочих поверхностей R,=0,32.. .0,16 мкм;

2)предельное отклонение рабочей поверхности в зависимости от типа применяемого уплотнения и давления рабочей жидкости (f9-f8);

3)овальность и конусность рабочих поверхностей, а также их относительное смещение - не более половины допуска на размер;

4)непрямолинейность образующей цилиндрической поверхности штока - не более 0,01 мм на длине 500 мм; .

5)рабочая поверхность штока должна иметь двухслойное хромирование для обеспечения стойкости к непосредственному воздействию шахтной среды и рабочей жидкости, износостойкости и антифрикционных свойств;

6)в сварных штоках следует предусматривать отверстия для выхода газов при сварке и термообработке во избежание разрыва трубы.

В качестве заготовки обычно используют круглый прокат, поэтому первой операцией служит отрезка заготовки, подрезка торцов и центрирование.

Если проушина спроектирована как одно целое со штоком, то для ее образования производится высадка конца штока перед фрезерно-центровальной операцией.

В сварных конструкциях перед фрезерно-центровальной операцией проушины приваривают на сварочном полуавтомате в среде углекислого газа (в заготовке штока предварительно растачивают отверстие дня, проушины). Качество сварного шва контролируют магнитным дефектоскопом.

Термическая обработка штоков заключается в улучшении после предварительной механической обработки до НВ 240...280 с последующей закалкой ТВЧ до HRC 45...55. Штоки из стали 20Х цементируются до h = 2...2 мм; HRC 54.. .60. Для этого перед шлифованием производится закалка ТВЧ с высокотемпературным отпуском или улучшение.

7.10.3. Поршни

Поршни изготавливают из серого чугуна СЧ 21, СЧ 28, СЧ 32, а также из стали 35 или 45 с покрытием бронзой, латунью, капроном.

При изготовлении поршней должны выполняться следующие технические требования:

1)рабочая поверхность поршня выполняется с предельными отклонениями по f8, f9, а отверстие, которым поршень насаживается на шток - Н9;

2)шероховатость сопрягаемых поверхностей - R_a = 32...0,16 мкм;

3)биение рабочей поверхности относительно посадочного отверстия, а также конусность и овальность - не более половины, допуска на размер;

4)биение торцов поршня не более - 0,05 мм.

Биметаллические поршни изготавливают наплавкой бронзы на основание стали 35 (реже - 45). Заготовку под наплавку подготавливают следующим образом. Места наплавки нужно очистить от масла и ржавчины травлением. Перед наплавкой заготовки подогревают в электропечи или газовой горелкой до температуры 700 ^{0}С. Наплавку выполняют газовой горелкой; заготовку в процессе наплавки постепенно поворачивают.

В качестве флюса при наплавке используется обезвоженная мелкотолченая бура, которой посыпают места наплавки. Бронзу применяют в виде прутков диаметром 6.,.10 мм или полос шириной 6...8 мм и толщиной 3...4 мм. Качество наплавки проверяют внешним осмотром (на наплавленной поверхности не должно быть газовых раковин и трещин). После окончательной механической обработки толщина наплавленного слоя должна быть не менее 2 мм, ширина - не менее 8 мм.

Реже применяют напрессовку бронзового кольца на стальное основание поршня.

7.10.4. Втулки

Биметаллические втулки изготовляют наплавкой бронзы на внутреннюю поверхность. Заготовкой служит стальной стакан с глухим или приваренным дном.

Общие технические требования для направляющих втулок:

1)шероховатость рабочей поверхности Ra=2,5...0,63 мм;

2)предельное отклонение рабочей поверхности в зависимости от типа применяемого уплотнения и давления рабочей жидкости (H9-H8);

3)отклонение от геометрической формы - в пределах половины допуска на размер;

4)неперпендикулярность рабочего торца втулки к оси отверстия рабочей поверхности - не более 0,05 мм.

7.10.5. Крышки

Крышки (головки) изготовляют из стальных поковок (сталь 35, 45), отливок из стали, серого чугуна СЧ 21, СЧ 28, СЧ 32, а также из сплавов алюминия Д16Т, АК4, АК6.

Если сама крышка является направляющей, то в этом случае она должна быть изготовлена из серого чугуна или иметь на рабочей поверхности наплавку из бронзы, развальцованную латунную втулку или наплавку капрона.

8. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГИДРОСИСТЕМЫ

В процессе эксплуатации гидросистем масло нагревается. Основной причиной нагрева является наличие гидравлических сопротивлений в системе гидропривода. С возрастанием температуры жидкости интенсифицируется процесс окисления масла, выпадают сгустки смол и шлама, что нарушает нормальную работу гидросистемы. Обычно принимают максимально допустимую температуру масла в баке 55-60°С. При длительной работе гидропривода температурный перепад достигает значения установившегося. Тепловая энергия расходуется на нагревание гидробака с маслом, а также рассеивается в пространство путем теплопередачи от нагретых поверхностей бака, трубопроводов, гидроаппаратов и гидродвигателей.

Для установившегося теплового режима температурный перепад в °С определится по формуле

$$\Delta T = \frac{\Delta N_{пот}}{\Sigma K_1 \cdot F_1}, \qquad (99)$$

где $\Delta N_{пот}$ - потерянная мощность, кВт;

F_1 - поверхность теплопередачи, $м^2$;

K_1 - коэффициент теплопередачи участка, $кВт/м^{2\cdot 0}С$ (таблица 8).

С другой стороны температурный перепад ΔT определится

$$\Delta T = T_м - T_в, \qquad (100)$$

где $T_м$ - установившаяся температура масла в баке, $^0С$;

$T_в$ - температура окружающего воздуха, $^0С$ (в расчетах можно принимать 20…25°С). Установившаяся температура масла должна быть не выше $60^0С$.

Таблица 8

Значения коэффициента теплопередачи

	Условия теплообмена	K_1, $кВт/м^{2\cdot 0}С$
1.	Свободно обтекаемая открытая поверхность	0,015
2.	Обдув поверхности вентилятором	0,023
3.	Затрудненная циркуляция воздуха вокруг нагретой поверхности (привод расположен в нише)	0,010
4.	Охлаждение проточной водой змеевиков и ребристых поверхностей	0,110…0,175

Потерянная мощность $N_{пот}$ в кВт определится

$$N_{пот} = N_{вх}(1-\eta).$$

При тепловых расчетах считается, что в бак масло залито до 0,8 его высоты. Площадь стенок бака $F_б$ в м^2, соприкасающихся с жидкостью, учитывается полностью (в том числе основание), а остальная площадь учитывается на 50%.

$$F_б = F_1 + \frac{F_2}{2}, \quad (101)$$

где $F_б$ - расчетная площадь бака, м^2;

F_1 - площадь стенок бака, соприкасающихся с жидкостью (в том числе крышка), м^2;

F_2 - площадь стенок бака, не соприкасающихся с жидкостью (в том числе крышка), м^2.

При отношении ребер бака от 1:1:1 до 1:2:3 расчетная площадь бака $F_б$ в м^2 может быть ориентировочно определена по формуле

$$F_б = 6{,}5\sqrt[3]{V_б^2}, \quad (102)$$

где $V_б$ - объем масла в баке, м^3.

Емкость бака должна быть не меньше емкости гидросистемы. Обычно емкость бака' выбирают равной трехминутной подачи насоса и более. Если длина трубопроводов невелика, то считают, что теплопередача происходит только через поверхности стенок бака.

Если установившаяся температура масла получается более 60^0С, следует выполнять бак с ребрами для увеличения площади поверхности теплоотдачи, увеличить площадь стенок или улучшить условия теплообмена.

9. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ И РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОПРИВОДА

Возможности разработанной гидравлической схемы могут быть оценены путем построения регулировочной и механической характеристик гидропривода. Эти характеристики взаимоувязывают три основных параметра гидросистемы:

скорость движения выходного звена (V или n).

нагрузку на выходном звене (R или M).

параметр регулирования гидромашины ($U_н$ или $U_м$) или дросселя ($U_{др}$).

Скорость движения выходного звена определится:

для гидропривода с поступательным движением выходного звена

$$V = \frac{Q_п}{F_{п.р}}, \quad (103)$$

для гидропривода с вращательным движением выходного звена

$$n = \frac{Q_п}{q}, \quad (104)$$

где $Q_п$ - фактический полезный расход жидкости, затрачиваемый на совершение рабочих движений. м^3/с;

$F_{п.р}$ - рабочая площадь поршня, м^2.

Расход жидкости Q_n на совершение рабочих движений зависит от способа регулирования гидропривода, типа привода и места установки дросселя в гидросистему.

При объемном способе регулирования: для гидросистемы с гидроцилиндром

$$Q_п = Q_{нт} \cdot U_н - a_{п1}\left(\Sigma\Delta p + \frac{R}{F_{п.р}}\right), \quad (105)$$

для гидросистемы с гидромотором

$$Q_п = Q_{нт} \cdot U_н - a_{п2}\left(\Sigma\Delta p + \frac{2\pi \cdot M}{q_м}\right). \quad (106)$$

При дроссельном способе регулирования, когда дроссель установлен в напорной гидролинии:

для гидросистемы с гидроцилиндром

$$Q_п = Q_{др} - a_{п3} \cdot \frac{R}{F_{п.р}}, \quad (107)$$

для гидросистемы с гидромотором

$$Q_п = Q_{др} - a_{п4} \cdot \frac{2\pi \cdot M}{q_м}. \quad (108)$$

При дроссельном способе регулирования, когда дроссель установлен в сливной гидролинии

$$Q_п = Q_{др} \cdot \frac{F_{пр}}{F_{пд}}. \quad (109)$$

При дроссельном способе регулирования, когда дроссель установлен параллельно гидродвигателю: для гидросхемы с гндроцилиндром

$$Q_п = Q_{нт} - Q_{др} - a_{п5}\left(\Sigma\Delta p + \frac{R}{F_{п.р}}\right), \quad (110)$$

для гидросхемы с гидромотором

$$Q_п = Q_{нт} - Q_{др} - a_{п5}\left(\Sigma\Delta p + \frac{2\pi \cdot M}{q_м}\right). \quad (111)$$

где $\Sigma\Delta p$ - суммарные потери давления, определяемые по формулам 34, 35, 36, 37, 38 как сумма всех членов после ($p_р$+$p_{др}$);

$Q_{нт}$ - теоретическая подача насоса, м^3/с;

$Q_{др}$ - расход жидкости дросселем, м^3/с.

$$Q_{др} = \alpha \cdot f_{max} \cdot U_{др} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (112)$$

где f_{max} - максимальное значение величины расходного окна дросселя, $м^2$;

Δp - перепад давления на дросселе, Па.

Перепад давления на дросселе зависит от места установки дросселя в гидросистеме и типа гидродвигателя.

При установке дросселя в напорной гидролинии:

для гидросистемы с гидроцилиндром

$$\Delta p_{др} = p_{кл} - \Delta p_{нм} - \frac{R}{F_{п.р}} - \Delta p_{ц} - \Delta p_{сл} \cdot \frac{F_{шр}}{F_{п.р}}, \quad (113)$$

для гидросистемы с гидромотором

$$\Delta p_{др} = p_{кл} - \Delta p_{нм} - \frac{2\pi \cdot M}{q_{м}} - \Delta p_{м} - \Delta p_{сл}, \quad (114)$$

где $\Delta p_{ц}$ - потери давления на преодоление сил трения в гидроцилиндре;

$$\Delta p_{ц} = \frac{R_{п} + R_{ш}}{F_{пр}}, \quad (115)$$

$\Delta p_{м}$ - потери давления на преодоление сил трения в гидромоторе;

$$\Delta p_{м} = p(1 - \eta_{мм}), \quad (116)$$

где $\eta_{мм}$ - механический КПД гидромотора.

При установке дросселя в сливной гидролинии: для гидросистемы с гидроцилиндром

$$\Delta p_{др} = (p_{кл} - \Delta p_{нм} - \Delta p_{ц})\frac{F_{пр}}{F_{пд}} - \frac{R}{F_{пд}} - \Delta p_{сл} \quad (117)$$

для гидросистемы с гидромотором

$$\Delta p_{др} = p_{кл} - \Delta p_{нм} - \Delta p_{нм} - \frac{2\pi \cdot M}{q_{м}} - \Delta p_{сл} \quad (118)$$

При установке дросселя параллельно гидродвигателю для гидросистемы с гидроцилиндром

$$\Delta p_{др} = \Delta p_{нм} + \Delta p_{ц} + \frac{R}{F_{пд}} + \Delta p_{сл} \cdot \frac{F_{пр}}{F_{пд}} - \Delta p_{сл} \quad (119)$$

для гидросистемы с гидромотором

$$\Delta p_{др} = p_{нм} + \Delta p_{м} + \Delta p_{сл} + \frac{2\pi \cdot M}{q_{м}}. \quad (120)$$

Полный градиент утечек $a_{п}$ определится:

для гидросистемы с гидроцилиндром при объемном способе регулирования

$$a_{п1} = a_{н} + a_{р} + a_{кл};$$

для гидросистемы с гидроцилиндром при дроссельном способе регулирования

$$a_{п2} = a_н + a_м + a_{кл};$$

для гидросистемы с гидроцилиндром при дроссельном способе регулирования, когда дроссель установлен в напорной гидролинии

$$a_{п3} = a_р + a_ц;$$

для гидросистемы с гидромотором при дроссельном способе регулирования, когда дроссель в напорной гидролинии

$$a_{п4} = a_р + a_м;$$

для гидросистемы с гидромотором при установке дросселя параллельно или в сливной гидролинии

$$a_{п5} = a_н + a_м + a_р + a_{кл}.$$

В этих выражениях градиенты утечек аппаратов имеют обозначения: $a_н$ - насоса; $a_м$ - гидромотора; $a_р$ - гидрораспределителя; $a_{кл}$ – предохранительного или переливного клапана; $a_ц$.-гидроцилиндра.

Градиенты утечек отдельных шдроаппаратов определятся

$$a = \frac{\Delta Q_{ном.а}}{P_{ном.а}},$$

где $\Delta Q_{ном.а}$ - объемные потери в гидроаппарте при его номинальном давлении $P_{ном\cdot а.}$

Значения параметров берутся из паспортной характеристики соответствующего гидроаппарата.

Пользуясь выражениями (103),(104),(105),(106) вычисляем значения скоростей V и n при изменении параметров регулирования $U_{др}$ или $U_н$ от 0 до 1 для нескольких значений R или M (не менее пяти). По результатам вычислений строим регулировочную характеристику V = f(U) или n = f (U) для нескольких значений R или M.

Вычислив значения V или n при изменении R или M от нуля до максимального значения, для нескольких значений U (не менее пяти), строим механическую характеристику V = f(R) или n = f(M). Для удобства работы результаты вычислений можно свести предварительно в таблицу.

Момент M, Н·м R (кН)	Частота вращения, n, об/мин (υ, м/с)				
	U = 0	U = 0,25	U = 0,5	U = 0,75	U = 1
0					
2					
4					
6					
8					

10. НЕКОТОРЫЕ ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ГИДРОСИСТЕМ

На гидравлических и пневматических схемах все машины и аппараты, а также линии связи изображаются сплошной линией толщиной S. Линии управления изображают сплошной линией толщиной S/2, дренажные линии изображают пунктиром толщиной S/2.

Функциональные группы гидросхем обводят тонкой штрихпунктирной линией S/3.

Все элементы схемы нумеруются по порядку по направлению потока рабочей среды. Номера проставляются на полках линий-выносок, другой конец которых оканчивается точкой. Все элементы схемы, имеющие номер, записываются в перечень элементов, который помещают на первом листе схемы над основной надписью.

На схемах с небольшим количеством входящих элементов их наименования, обозначения и характеристики указываются на полках линий-выносок. Перечень элементов отсутствует.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Значение коэффициента устойчивости К для гидроцилиндров конструкции, соответствующей рис. 7 *а, б*

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	1,2	**1,4**	**1,6**	**1,8**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
0,10	1,199	1,397	1,594	1,791	1,927	2,960	3,917	4,858	5,780
0,20	1,188	1,372	1,552	1,727	1,898	2,683	3,351	3,908	4,365
0,21	1,187	1,368	1,545	1,717	1,883	2,639	3,66	3,776	4,186
0,22	1,185	1,364	1,537	1,705	1,867	2,592	3,178	3,643	4,010
0,23	1,183	1,359	1,520	1,693	1,850	2,543	3,088	3,511	3,839
0,24	1,181	1,354	1,570	1,680	1,832	2,492	2,999	3,383	3,675
0,25	1,178	1,349	1,511	1,666	1,813	2,441	2,909	3,257	3,518
0,26	1,176	1,343	1,501	1,652	1,794	2,388	2.821	3,136	3,369
0,27	1,173	1,337	1,491	1,637	1,773	2,336	2,735	3,020	3,228
0,28	1,170	1,330	1,481	1,621	1,752	2,283	2,650	2,908	3,095
0,29	1,167	1,324	1,470	1,605	1,731	2,231	2,568	2,802	2,970
0,30	1,164	1317	1,458	1,589	1,709	2,179	2,489	2,701	2,852
0,31	1,161	1310	1,446	1,572	1,686	2,128	2,413	2,605	2,741
0,32	1,158	1,303	1,434	1,555	1,664	2,078	2,340	2,515	2,637
0,33	1,155	1,295	1,422	1,537	1,641	2,029	2,270	2,429	2,540
0,34	1,152	1,288	1,411	1,522	1,621	1,986	2,209	2,355	2,457
0,35	1,148	1,280	1,399	1,504	1,598	1,940	2,145	2,278	2,370
0,36	1,144	1,272	1,386	1,486	1,576	1,895	2,084	2,205	2,289
0,37	1,141	1,264	1373	1,469	1,553	1,851	2,025	2,136	2,213
0,38	1,137	1,256	1,360	1.451	1,531	1,809	1,970	2,071	2,141
0,39	1,133	1,248	1,348	1,434	1,509	1,769	1,917	2,010	2,073
0,40	1,129	1,240	1,335	1,417	1,488	1,730	1,866	1,952	2,10
0,41	1,125	1,231	1,322	1,400	1,467	1,692	1,818	1,897	1,950
0,42	1.121	1,223	1,310	1,383	1,446	1,657	1,772	1,845	1,894
0,43	1,117	1,215	1,297	1367	1,426	1,729	1,622	1,796	1,840
0,44	1,113	1,207	1,285	1,350	1,406	1,589	1,688	1,749	1,790
0,45	1,109	1,198	1,273	1,335	1,387	1,557	1,649	1,705	1,743
0,46	1,105	1,190	1,261	1,319	1,368	1,527	1,611	1,663	1,698
0,47	1,101	1,182	1,249	1,304	1,350	1,498	1,576	1,624	1,656
0,48	1,097	1,174	1,237	1,289	1332	1,470	1,542	1,586	1,616
0,49	1,093	1,167	1,226	1,275	1,443	1,315	1,510	1,551	1,579
0,50	1,089	1,159	1,215	1.261	1,299	1,418	1,480	1,517	1,543
0,60	1,052	1,091	1,120	1,144	1,162	1,219	1,247	1,264	1,275
0,70	1,025	1,043	1,056	1,066	1,074	1,098	1,110	1,117	1,122
0,80	1,008	1,014	1,018	1,021	1,024	1,031	1,035	1,037	1,039
0,90	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,004	1,005	1,005	1,005

Продолжение таблицы П.1

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	7	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
0,10	6,684	7,566	8,427	9,264 I	10,077	10,863	11,622	12,352	13,053
0,20	4,741	5,047	5,300	5,509	5,684	5,833	5,959	6,069	6,164
0,21	4,516	4,782	4,999	5178	5,327	5,453	5,560	5,652	5,732
0,22	4,300	4,531	4,719	4,872	5,000	5,107	5,199	5,277	5,345
0,23	4,094	4.296	4,459	4,591	4,701	4,793	4,876	4,939	4,997
0,24	3,900	4,076	4,218	4,333	4,428	4,508	4,575	4,633	4,684
0,25	3,717	3,872	3,995	4,096	4,178	4,248	4,307	4,357	4,401
0,26	3,545	3,682	3,790	4,878	3,950	4,011	4,062	4,107	4,145
0,27	3,384	3,505	3,601	3,678	3,742	3,795	3,840	1,879	3,912
0,28	3,234	3,341	3,426	3,494	3,500	3,597	3,637	3,671	3,701
0,29	3,094	3,189	3,264	3,325	3,375	3,417	3,452	3,482	3,508
0,30	2,963	3,048	3,115	3,169	3,214	3,251	3,282	3,309	3,332
0,31	2,841	2,917	2,977	3,025	3,065	3,098	3,126	3,150	3,171
0,32	2,727	2,796	2,849	2,893	3,928	3,958	3,983	3,004	3,023
0,33	2,621	2,682	2,731	2,770	2,801	2,828	2,851	2,870	2,887
0,34	2,513	2,587	2,631	2,667	2,696	2,720	2,740	2,758	2,773
0,35	2,438	2,483	2,528	2,560	2,586	1,608	2,627	2,643	2,656
0,36	2,350	2,396	2,432	2,461	2,458	2,505	2,521	2,536	2,548
0,37	2,268	2,310	2,343	2,369	2,391	2,408	2,424	2,437	2,448
0,38	2,191	2,230	2,259	2,283	2,303	2,319	2,333	2,345	2,355
0,39	2,119	2,154	2,181	2,203	2,221	2,236	2,248	2,259	2,268
0,40	2,052	2,084	2,108	2,128	2,144	2,158	2,169	2,179	2,188
0,41	1,988	2,017	2,040	2,058	2,073	2,085	2,096	2,105	2,113
0,42	1,929	1,955	1,976	1,993	2,006	2,017	2,027	2,035	2,045
0,43	1,873	1,897	1,916	1,931	1,944	1,954	1,963	1,970	1,977
0,44	1,820	1,842	1,860	1,973	1,885	1,894	1,902	1,909	1,915
0,45	1,770	1,791	1,807	1,819	1,830	1,839	1,846	1,852	1.8581
0,46	1,723	1,742	1,757	1,768	1,778	1,786	1,793	1,799	1,804
0,47	1,679	1,696	1,710	1,721	1,729	1,737	1,743	1,748	1,753
0,48	1,637	1,653	1,666	1,676	1,684	1,690	1,696	1,701	1,705
0,49	1,598	1,613	1,624	1,633	1,641	1,647	1,652	1,657	1,661
0,50	1,561	1,574	1,585	1,593	1,600	1,606	1,611	1,615	1,618
0,60	1,283	1,289	1,294	1,297	1,300	1,303	1,305	1,037	1,308
0,70	1,125	1,128	1,130	1,131	1,132	1,133	1,134	1,135	1,136
0,80	1,040	1,041	1,040	1,042	1,042	1,043	1,043	1,043	1,043
0,90	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1.006	1,006	1,006	1,006

Продолжение таблицы П.1

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	16	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
0,10	1,3723	14,363	14,872	15,550	16,198	16,614	17,102	17,561	17,993
0,20	6,247	6,320	6,385	6,444	6,496	6,543	6,586	6,625	6,661
0,21	5,802	5,864	5.919	5,968	6,012	6,052	6,088	6,121	6,152
0,22	5,405	5,457	5,504	5,546	5,583	5,617	5,648	5,676	5,702
0,23	5,048	5.093	5,133	5,169	5,201	5,230	5,257	5,281	5,303
0,24	4,728	4,767	4,801	4,832	4,860	4,885	4,908	4,929	4,948
0,25	4,439	4,473	4,503	4,530	4,554	4,576	4,596	4,614	4,630
0,26	4,178	4,208	4,234	4,257	4,279	4,298	4,315	4,331	4,345
0,27	3,942	3,968	3,991	4,011	4,030	4,047	4,062	4,076	4,088
0,28	3,727	3,750	3,770	3,788	3,805	3,819	3,833	3,845	3,856
0,29	3,531	3,552	3,570	3,586	3,600	3,613	3,625	3,636	3.646
0,30	3,353	3,371	3,387	3,401	3,414	3,426	3,436	3,446	3,455
0,31	3,189	3,205	3,220	3,232	3,244	3,254	3,264	3,272	3,268
0,32	3,039	3,054	3,066	3,078	3,088	3,097	3,106	3,114	3,121
0,33	2,901	2,914	2,926	2,936	2,945	2,954	2,961	1,968	2,875
0,34	2,786	2,798	2,809	2,818	2,826	2,834	2,841	2,847	2,853
0,35	2,668	2,679	2,688	2,697	2,704	2,711	2,717	2,723	2,728
0,36	2,559	2,569	2,577	2,585	2,592	2,598	2,604	2,609	2,613
0,37	2,458	2,467	2,474	2,481	2,488	2,493	2,498	2,503	2,507
0,38	2,364	2,372	2,379	2,388	2,391	2,396	2,401	2,405	2,409
0,39	2,277	2,284	2,290	2,295	2,301	2,306	2,310	2,314	2,317
0,40	2,195	2,202	2,208	2,213	2,218	2,222	2,226	2,229	2,232
0,41	2,119	2,125	2,131	2,136	2.140	2,144	2,147	2,150	2,153
0,42	2,049	2,054	2,059	2,063	2,067	2.071	2,074	2,077	2,080
0,43	1,982	1,887	1,992	1,995	1,999	2,003	2,006	2,008	2,011
0,44	1,920	1,925	1,929	1,933	1,936	1,939	1,942	1,944	1,947
0,45	1,862	1,867	1,870	1,874	1,877	1,880	1,882	1,884	1,886
0,46	1,808	1,812	1,815	1,818	1,821	1,824	1,826	1,828	1,830
0,47	1,757	1,761	1,764	1,767	1,769	1,771	1,774	1,775	1,777
0,48	1,709	1,712	1,715	1,718	1,720	1,722	1,724	1,726	1,728
0,49	1,664	1,667	1,670	1,672	1,674	1676	1,678	1,680	1,681
0,50	1,621	1,624	1,627	1,629	1,631	1,633	1,634	1,636	1,637
0,60	1,310	1,311	1,312	1,313	1,314	1,315	1,315	1,316	1,317
0,70	1,136	1,137	1,137	1,138	1,138	1,138	1,139	1,139	1,139
0,80	1,044	1,044	1,044	1,044	1,044	1,044	1,044	1,044	1,044
0,90	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006

Продолжение таблицы П.1

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	25	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**35**	**45**	**50**
0,10	18,399	18,779	19,136	19,470	19,784	20,079	21,300	22,883	23,413
0,20	6,694	6,724	6,752	6,778	6,802	6,824	6,916	7,036	7,080
0,21	6,179	6,205	6,228	6,250	6,270	6,289	6,367	6,47	6,506
0,22	5,727	5,747	5,767	5,786	5,803	5,819	5,886	5,974	6,005
0,23	5,323	5 342	5,359	5,375	5,390	5,404	5,461	5,537	5,563
0,24	4,965	4,981	4,996	5,010	5,023	5,035	5,084	5,150	5,173
0,25	4,645	4,659	4,672	4,684	4,696	4,706	4,749	4,805	4,826
0,26	4,358	4,371	4,382	4,393	4,402	4,411	4,449	4,499	4,517
0,27	4,100	4,111	4,121	4,130	4,139	4,147	4,180	4,224	4,739
0,28	3,867	3,876	3,885	3,893	3,901	3,908	3,937	3,976	3,990
0,29	3,655	3,664	3,671	3,679	3,685	3,692	3,718	3,752	3,764
0,30	3,463	3,470	3,477	3,484	3,490	3,495	3,519	3,549	3,560
0,31	3,288	3,294	3,300	3,306	3,312	3,317	3,337	3,365	3,374
0,32	3,127	3,133	3,139	3,144	3,149	3,153	3,172	3,197	3,205
0,33	2,980	2,986	2,991	2,995	3,000	3,004	3,020	3,043	3,005
0,34	2,858	2,863	2,868	2,872	2,876	2,880	2,895	2,915	2,922
0,35	2,733	2,738	2,742	2,746	2,749	2,752	2,766	2,784	2,791
0,36	2,618	2,622	2,625	2,629	2,632	2,635	2,647	2,664	2,670
0,37	2,511	2,515	2,518	2,521	2,524	2,527	2,538	2,553	2,558
0,38	2,412	2,416	2,419	2,422	2,424	2,427	2,437	2,451	2,455
0,39	2,321	2,324	2,326	2,329	2,331	2 334	2,343	2,355	2,360
0,40	2,235	2,238	2,241	2,243	2,245	2,247	2,256	2,267	2,271
0,41	2,156	2,159	2,161	2,263	2,165	2,167	2,175	2,185	2,189
0,42	2,082	2,084	2,086	2,088	2,090	2,092	2,099	2,109	2,112
0,43	2,013	2.015	2,017	2,019	2,021	2,022	2,029	2,037	2,040
0,44	1,949	1,951	1,962	1,954	1,955	1,957	1,963	1,971	1,974
0,45	1,888	1,890	1,892	1,893	1,895	1,896	1,901	1,909	1,911
0,46	1,832	1,833	1,835	1,836	1,838	1,839	1,844	1,850	1,853
0,47	1,779	1,780	1.782	1,783	1,784	1,785	1,790	1,796	1,798
0,48	1,729	1,730	1,732	1,733	1,734	1,735	1,739	1.745	1,747
0,49	1,682	1,684	1,685	1,686	1,687	1,688	1,692	1,697	1,699
0,50	1,638	1,640	1,641	1,642	1,643	1,643	1,647	1,652	1,653
0,60	1,317	1,318	1,318	1,319	1,319	1,319	1,321	1,323	1,324
0,70	1,390	1,140	1,140	1,140	1,140	1,140	1,141	1,142	1,142
0,80	1,045	1,0 15	1,045	1,045	1,045	1,045	1,045	1,045	1,045
0,90	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006

Таблица П.2

Коэффициент устойчивости К для гидроцилиндров конструкции по рис. 7, *в*

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	1,2	**1,4**	**1,6**	**1,8**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
0,10	0,2999	0,3497	0,3995	0,4494	0,4992	0,7475	0,9950	1,242	1,487
0,20	0,2992	0,3482	0,3968	0,4454	0,4935	0,7301	0,9595	1,182	1,396
0,21	0,2991	0,3480	0,3963	0,4450	0,4924	0,7270	0,9532	1,171	1,380
0,22	0,2990	0,3475	0,3957	0,4438	0,4913	0,7236	0,9466	1,160	1,363
0,23	0,2989	0,3473	0,3952	0,4428	0,4901	0,7198	0,9391	1,147	1,344
0,24	0,2986	0,3470	0,3948	0,4420	0,4888	0,7159	0,9309	1,134	1,325
0,25	0,2984	0,3464	0,3938	0,4409	0,4874	0,7115	0,9225	1,120	1,304
0,26	0,2984	0,3461	0,3934	0,4400	0,4857	0,7071	0,9132	1,105	1,282
0,27	0,2981	0,3457	0,3923	0,4387	0,4842	0,7022	0,9038	1,089	1,259
0,28	0,2979	0,3451	0,3915	0,4374	0,4826	0,6970	0,8936	1,073	1,236
0,29	0,2976	0,3445	0,3907	0,4361	0,4807	0,9615	0,8831	1,056	1,211
0,30	0,2975	0,3440	0,3898	0,4347	0,4787	0,6859	0,8718	1,038	1,186
0,31	0,2972	0,3436	0,3889	0,4330	0,4764	0,6798	0,8607	1,020	1,160
0,32	0,2969	0,3429	0,3877	0,4315	0,4745	0,6737	0,8484	1,002	1,134
0,33	0,2966	0,3421	0,3865	0,4299	0,4721	0,6669	0,8365	0,9828	1,109
0,34	0,2965	0,3413	0,3854	0,4281	0,4696	0,6600	0,8238	0,9636	1,083
0,35	0,2961	0,3408	0,3841	0,4262	0,4670	0,6531	0,8110	0,9445	1,057
0,36	0,2957	0,3400	0,3830	0,4242	0,4644	0,6460	0,7979	0,9251	1,031|
0,37	0,2954	0,3391	0,3816	0,4222	0,4518	0,6384	0,7848	0,9057	4,005
0,38	0,2950	0,3385	0,3802	0,4202	0,4590	0,6312	0,7716	0,8862	0,9800
0,39	0,2946	0,3376	0,3787	0,4181	0.4560	0,6235	0,7582	0,8670	0,9552
0,40	0,2942	0,3367	0,3772	0,4159	0,4529	0,6154	0,7445	0,8477	0,9309
0,41	0,2937	0,3348	0,3757	0,4138	0,4501	0,6076	0,7311	0,8288	0,9068
0,42	0,2933	0,3348	03739	0,4113	0,4467	1,5994	0,7177	0,8102	0,8833
0,43	0,2929	0,3336	0,3721	0,4088	0,4437	0,5915	0,7044	0,7918	0,8603
0,44	0,2924	0,3326	0,3705	0,4065	0,4402	0,5831	0,8911	0,7736	0,8382
0,45	0,2919	0,3315	0,3688	0,4037	0,4367	0,5749	0,6779	0,7558	0,8164
0,46	0,2916	0,3303	0,3669	0,4013	0,4333	0,5666	0,6647	0,7385	0,7951
0,47	0,2910	0,3292	0,3649	0,3985	0,4300	0,5584	0,6519	0,7213	0,7745
0,48	0,2905	0,3282	0,3632	0,3958	0,4263	0,5502	0,6392	0,7046	0,7544
0,49	0,2900	0,3270	0,3612	0,3931	0,4226	0.5420	0,6265	0,6884	0,7350
0,50	0,2894	0,3258	t03592	0,3901	0,4189	0,5336	0,6140	0,5724	0,7162
0,60	0,2829	0,3119	0,3377	0,3806	0,3803	0,4555	0,5027	0,5347	0,5577
0,70	0,2754	0,2966	0,3145	0,3297	0,3428	0,3881	0,4143	0,4314	0,4434
0,80	0,2670	0,2806	0,2914	0,3005	0,3080	0,3324	0,3457	0,3540	0,3598
0,90	0,2585	0,2643	0,2698	0,2737	0,2769	0,2870	0,2922	0,2954	0,2975

Продолжение таблицы П.2

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	7	**8**	**9**	**10**	**12**	**14**	**16**	**18**	**20**
0,10	1,732	1,976	2,219	2,461	2,942	3,418	3,891	4,359	4,822
0,20	1,603	1,802	1,992	2,176	2,517	2,826	3,105	3,355	3,579
0,21	1,580	1,772	1,954	2,127	2,447	2,733	2,987	3,211	3,409
0,22	1,556	1,740	1,913	2,076	2,375	2,637	2,867	3,068	3,243
0,23	1,530	1,706	1,870	2,023	2,301	2,514	2,747	2,926	3,080
0,24	1,503	1,670	1,825	1,968	2,225	2,443	2,629	2,788	2,923
0,25	1,475	1,632	1,778	1,912	2,148	2,346	2,513	2,634	2,773
0,26	1,445	1,594	1,730	1,854	2,071	2,251	2,400	2,525	2,631
0,27	1,414	1,554	1,681	1,796	1,995	2,157	2,291	2,402	2,495
0,28	1,382	1,513	1,632	1,738	1,920	2,067	2,167	2,286	2,369
0,29	1,349	1,473	1,583	1,681	1,846	1,979	2,087	2,175	2,249
0,30	1,316	1,432	1,534	1,624	1,776	1,895	1,992	2,071	2,137
0,31	1,283	1,319	1,486	1,569	1,706	1,115	1,902	1,973	2,031
0,32	1,250	1,350	1,438	1,514	1,640	1,738	1,817	1,880	1,933
0,33	1,217	1,311	1,391	1,461	1,576	1,655	1,736	1,793	1,840
0,34	1,184	1,217	1,346	1,410	1,515	1,596	1,660	1,71.1	1,754
0,35	1,152	1,233	1,301	1,360	1,456	1,530	1,588	1,634	1,673
0,36	1,120	1,195	1,258	1,313	1,401	1,457	1,520	1,562	1,597
0,37	1,088	1,158	1,277	1,767	1,347	1,408	1,456	1,494	1,525
0,38	1,058	1,122	1,176	1,223	1,296	1,352	1,395	1,430	1,458
0,39	1,028	1,088	1,138	1,180	1,247	1,298	1,338	1,370	1,396
0,40	0,9983	1,054	1,100	1,139	1,201	1,248	1,284	1,313	1,337
0,41	0,9698	1,022	1,064	1,100	1,157	1,200	1,233	1,260	1,281
0,42	0,9424	0,9901	1,030	1,063	1,115	1,155	1,185	1,209	1,229
0,43	0,9153	0,959	0,9965	1,027	1,075	1,112	1,140	1,62	1,180
0,44	0,8891	0,9306	0,9648	0,9930	1,038	1,071	1,095	1,117	1,133
0,45	0,8641	0,9025	0,9340	0,9603	1,001	1,032	1,058	1,074	1,090
0,46	0,8395	0,8753	0,9047	0,9289	0,9670	0,9952	1,017	1,034	1,048
0,47	0,8161	0,8493	0,8765	0,9290	0,9342	0,9602	0,9803	0,9962	1,009
0,48	0,7933	0,8243	0,8495	0,8704	0,9029	0,9270	0,9456	0,9602	0,9721
0,49	0,7713	0,8002	0,8236	0,8430	0,8731	0,8954	0,9125	0,9261	0,9370
0,50	0,7501	0,7770	0,7988	0,8168	0,8447	0,8654	0,8812	0,8937	0,9039
0,60	0,5751	0,5885	0,5993	0,6081	0,6216	0,6314	0,6390	06449	0,6497
0,70	0,4522	0,4589	0,4643	0,4686	0,4753	0,4801	0,4837	0,4866	0,4889
0,80	0,3640	0,3672	0,3697	0,3717	0,3748	0,3770	0,3787	0,3800	0,3810
0,90	0,2991	0,3002	0,3012	0,3019	0,3030	0,3038	0,3044	0,3048	0,3052

Продолжение таблицы П.2

$\beta = \frac{L_1}{L}$	$\mu = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1}$								
	22	**24**	**26**	**28**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**
0,10	5,281	5,734	6,182	6,625	7,065	8,130	9,158	10,14	11,08
0,20	3,778	3,956	4,114	4,256	4,383	4,646	4,849	5,011	5,140
0,21	3,584	3,379	3,875	3,996	4,103	4,325	4,496	4,630	4,739
0,22	3,396	3,529	3,647	3,750	3,812	4,030	4,174	4,287	4,378
0,23	3,214	3,350	3,431	3,520	3,599	3,789	3,881	3,977	4,054
0,24	3,040	3,141	3,229	3,308	3,373	3,511	3,615	3,697	3,763
0,25	2,876	2,964	3,040	3,106	3,165	3,283	3,374	3,444	3,500
0,26	2,721	2,797	2,864	2,922	2,973	3,075	3,154	3,215	3,264
0,27	2,575	2,642	2,701	2.751	2,795	2,885	2,953	3,006	3,049
0,28	2,438	2,498	2,549	2,593	2,632	2,711	2,740	2,817	2,854
0,29	2,311	2,363	2,408	2,448	2,482	2,551	2,603	2,664	2,677
0,30	2,191	2,223	2,278	2,313	2,343	2,404	2,451	2,487	2,516
0,31	2,080	2,122	2,157	2,188	2,515	2,269	2,310	2,343	2,368
0,32	1,976	2,013	2,045	2,073	2.097	2,145	2,182	2,210	2,233
0,33	1,879	1,913	1,941	1,966	1,987	2,030	1,063	2,089	2,109
0,34	1,789	1,819	1,844	1,866	1,885	1,924	1,954	1,954	1,995
0,35	1,704	1,731	1,754	1,774	1,791	1,826	1,853	1,853	1,890
0,36	1,625	1,650	1,670	1,688	1,704	1,735	1,759	1,759	1,793
0,37	1,551	1,573	1,592	1,608	1,622	1,651	1,672	1,672	1,703
0,38	1,482	1,502	1,519	1,534	1,546	1,572	1,592	1,592	1,619
0,39	1,417	1,435	1,451	1,464	1,472	1,499	1,517	1,517	1,542
0,40	1,356	1,373	1,387	1,399	1,410	1,431	1,447	1,447	1,470
0,41	1,299	1,314	1,327	1,338	1,348	1,367	1,382	1,382	1,403
0,42	1,245	1,259	1,271	1,281	1,290	1,308	1,321	1,321	1,340
0,43	1,195	1,207	1,218	1,227	1,235	1,252	1,264	1,264	1,274
0,44	1,147	1,159	1,169	1,177	1,184	1,199	1,211	1,211	1,226
0,45	1,102	1,113	1,122	1,130	1,136	1,150	1,160	1,160	1,175
0,46	1,060	1,070	1,078	1,085	1,091	1,104	1,113	1,113	1,127
0,47	1,020	1,029	1,036	1,043	1,049	1,060	1,069	1,076	1,081
0,48	0,9820	0,9902	0,9973	1,003	1,009	1,019	1,027	1,034	1,039
0,49	0,9462	0,9538	0,9603	0,9659	0,9708	0,9806	0,9880	0,9938	0,9985
0,50	0,9122	0,9193	0,9253	0,9305	0,9350	0,9441	0,9509	0,9563	0,9606
0,60	0,6536	0,6569	0,6597	0,6621	0,6642	0,6685	0,6717	0,8742	0,6762
0,70	0,49	0,4924	0,4937	0,4949	0,4959	0,4979	0,4934	0,5005	0,5015
0,80	0,3919	0,3826	0,3832	0,3837	0,3842	0,851	0,3858	0,3863	0,3867
0,90	0,3055	0,3058	0,3060	0,3062	0,3064	0,3067	0,3069	0,3071	0,3073

Таблица П.3

Механические характеристики сталей

Марка стали	Размер сечения* заготовки, мм	Твердость, НВ	Параметр, МПа		
			$\sigma_т$	$\tau_т$	E
35	До 100	До 207	320	190	$2{,}1 \cdot 10$
45	До 100	До 207	360	210	$2{,}04 \cdot 10$
	До 100	241...285	580	350	
40Х	Свыше 100 до 200	197...241	480	290	$2{,}18 \cdot 10$
	До 100	241...285	600	360	
40ХН	Свыше 100 до 200	197...241	580	350	$2{,}04 \cdot 10$
	До 100	241...285	600	360	
30ХГСА	Свыше 100 до 200	197...241	470	280	$1{,}98 \cdot 10^5$
	До 100	241...285	600	360	
	До 30	269...321	700	420	

* Диаметр сплошного круга или толщина стенки трубы.

Таблица П.4

Коэффициент продольного изгиба φ

Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Приведенная гибкость, λ											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	ПО	120
200	0,988	0,567	0,939	0,906	0,869	0,827	0,782	0,734	0,665	0,599	0,537	0,479
240	0,987	0,962	0,931	0,894	0,852	0,805	0,754	0,686	0,612	0,542	0,478	0,419
280	0,985	0,959	0,924	0,883	0,836	0,785	0,724	0,641	0,565	0,493	0,427	0,366
320	0,984	0,955	0,917	0,873	0,822	0,766	0,687	0,602	0,522	0,448	0,381	0,321
360	0,983	0,952	0,911	0,863	0,809	0,749	0,654	0,566	0,483	0,408	0,338	0,287
400	0,982	0,949	0,905	0,854	0,796	0,721	0,623	0,532	0,447	0,369	0,306	0,260
440	0,981	0,946	0,900	0,845	0,785	0,696	0,595	0,501	0,413	0,335	0,280	0,237
480	0,980	0,943	0,895	0,839	0,775	0,672	0,568	0,471	0,380	0,309	0,258	0,219
520	0,979	0,941	0,891	0,832	0,764	0,650	0,542	0,442	0,349	0,286	0,239	0,203
560	0,978	0,938	0,887	0,825	0,746	0,628	0,518	0,414	0,326	0,267	0,223	0,190
600	0,977	0,935	0,883	0,820	0,729	0,608	0,494	0,386	0,305	0.250	0,209	0,178
о40	0,977	0,934	0,879	0,814	0,712	0,588	0,470	0,359	0,287	0.235	0,197	0,167
680	0,977	0,932	0,875	0,808	0,694	0,568	0,446	0,332	0,259	0,220	0,185	0,156
720	0,977	0,930	0,871	0,802	0,678	0,548	0,422	0,305	0,251	0,205	0,173	0,145
760	0,977	0,928	0,867	0,796	0,661	0,528	0,398	0,278	0,233	0,190	0,161	0,134
800	0,977	0,926	0,863	0,790	0,644	0,508	0,374	0,251	0,215	0,175	0,149	0,123

При гибкости > 120 следует увеличить жесткость штока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.С.Гудилин и др. Гидравлика и гидропривод (под общей редакцией И.Л.Пастоева. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Горные машины и оборудование». М.: Изд. МГГУ, 2006 г. – 520 с.
2. В.Н.Вернер и др. Гидро- и пневмопривод. Учебное пособие для студентов вузов РФ специальности «Горные машины и оборудование». Кемерово, 2003 г. – 225 с.
3. Н.М.Суслов, Ю.А.Лагунова. Объемные гидравлические машины гидро- и пневмоприводов. Екатеринбург, Изд. УГГУ, 2008 г. - 358 с.
4. Н.М.Суслов. Инструкция по оформлению пояснительной записки к курсовому и дипломному проектам для студентов профилизаций направления 551800 – «Технологические машины и оборудование». Екатеринбург, 1995 г. - 20 с.
5. В.Ф.Ковалевский и др. Справочник по гидроприводам горных машин. М., Недра, 1978 г. – 502 с.
6. В.И.Анурьев. Справочник конструктора–машиностроителя. – М., Машиностроение, 1968 г. – 686 с.
7. Н.М.Суслов, В.С.Шестаков, И.И.Рутковская. Основные элементы объемного гидравлического привода. Методические указания по курсовой работе. Екатеринбург, УГГА, 1958 г. – 34 с.
8. С.Ф.Бердин. Расчет гидроцилиндров на устойчивость и прочность. Вестник машиностроения, 1981. № 7. с. 29-31.
9. Н.М.Суслов и др. Вспомогательные элементы объемного гидравлического привода. Методические указания по курсовой работе. Екатеринбург, УГГА, 1998 г. – 12 с.
10. В.А.Марутов и др. Гидроцилиндры. Конструкции и расчет. М.: Машиностроение, 1966 г. – 170 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 5
2. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ 5
3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ 5
   3.1. Содержание пояснительной записки 6
   3.2. Содержание графического материала курсовой работы 6
4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ..... 7
   4.1. Исходные данные для расчета 8
   4.2. Разработка принципиальной гидравлической схемы..... 15
   4.3. Выбор гидродвигателей 15
   4.4. Выбор насоса 17
   4.5. Выбор направляющей аппаратуры 18
   4.6. Выбор регулирующей аппаратуры 18
   4.7. Выбор фильтра 20
5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ 22
6. РАСЧЕТ КПД ГИДРОСИСТЕМЫ 29
7. РАСЧЕТ ГИДРОЦИЛИНДРА 30
   7.1. Толщина стенки цилиндра 30
   7.2. Толщина задней крышки цилиндра 31
   7.3. Расчет фланцев гидроцилиндра..... 32
   7.4. Расчет элемнтов крепления крышек 35
   7.5. Расчет стыжных шпилек 37
   7.6. Расчет проушины, сварного соединения крышки с гильзой и резьбового крепления поршня 38
   7.7. Расчет гидроцилиндров на устойчивость 41
   7.8. Расчет штока на прочность 43
   7.9. Расчет цилиндра на прочность 48
   7.10. Материалы деталей гидроцилиндров и технические условия на изготовление..... 50
      7.10.1. Гильзы 50
      7.10.2. Штоки 51
      7.10.3. Поршни 51
      7.10.4. Втулки 52
      7.10.5. Крышки 52
8. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГИДРОСИСТЕМЫ 53
9. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ И РЕГУЛИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОПРИВОДА 54
10. НЕКОТОРЫЕ ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ГИДРОСХЕМ 58
Приложения 59
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 68

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 практические задания для обучающихся

Б1.В.04 ГИДРАВЛИКА И ГИДРОПНЕВМОПРИВОД

Направление подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль)
Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Форма обучения: ***очная, заочная, очно-заочная***

год набора: **2025**

Автор: Лагунова Ю. А., д-р техн. наук, профессор

Одобрено на заседании кафедры	Рассмотрено методической комиссией факультета
Горных машин и комплексов *(название кафедры)*	Горно-механического *(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Лагунова Ю. А. *(Фамилия И.О.)*	Осипов П. А. *(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024 *(Дата)*	Протокол № 2 от 18.10.2024 *(Дата)*

Екатеринбург

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 3

1. Повторение материала лекций 3

2. Выполнение самостоятельного домашнего задания 4

2.1. Задания для самостоятельной работы 4

2.2. Порядок выполнения. 13

4.3. Оформление и порядок защиты 13

ЛИТЕРАТУРА 14

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время невозможно представить современное оборудование, применяемое на нефтяных и газовых промыслах без гидравлических и пневматических приводов. Гидравлический пневматический привод позволяют повысить производительность, мощность и энергоэффективность машин, при этом сохраняя малые габариты. Выпускники университета должны уметь рассчитывать, проектировать, обслуживать гидравлические и пневматические системы, применяемые на нефтегазовых промыслах.

Цель самостоятельной работы: обучение студентов проектированию и расчетам гидравлического и пневматического приводов для технологических машин и оборудования в горном деле. Умение рассчитывать и проектировать гидравлические и пневматические системы приводов позволит в последующей профессиональной деятельности разрабатывать оптимальные конструкции с минимальной массой и стоимостью и сократить продолжительность разработки проектов.

В методических указаниях приведены задачи типовых заданий для самостоятельной работы, практикуется применение индивидуальных заданий, соответствующих выбранному студентом направлению будущей работы. Такими заданиями являются выполнение расчетов для отдельных механизмов и узлов экскаваторов, дробилок, буровых установок и т.п.

Результат изучения дисциплины:

Знать:

- проблемы создания горных машин из различных типов и назначений;
- конструктивные схемы приводов основных механизмов горных машин;
- технические характеристики и конструктивные особенности гидравлических машин и гидроаппаратов гидроприводов горных машин;
- теоретические основы, устройство и методики расчета гидравлических и пневматических приводов;

Уметь:

- проводить расчеты гидропневмоприводов горных машин, выбирать гидроаппараты и гидравлические машины для конкретной гидравлической схемы привода;
- анализировать, синтезировать и критически резюмировать полученную информацию, работать с технической документацией;
- работать с диагностическими приборами для мониторинга технического состояния гидравлических машин и гидроаппаратов;

Владеть:

- методами расчета геометрических, кинематических, силовых, прочностных и энергетических параметров гидравлических и пневматических машин и аппаратов для конкретной гидравлической схемы;
- методами и навыками организации технических мероприятий по обеспечению постоянной работоспособности гидравлических машин с заданными технико-экономическими параметрами эксплуатации;
- методами решения инженерно-технических и прикладных экономических задач с применением вычислительной техники и основных нормативных документов.

1. ПОВТОРЕНИЕ МАТЕРИАЛА ЛЕКЦИЙ

Тема 1: Гидростатика

Жидкость. Сжимаемость. Вязкость. Давление – абсолютное, избыточное, вакуумметрическое. Основное уравнение гидростатики. Сила давления жидкости на плоскую и криволинейную стенки. Относительный покой жидкости. Уравнение поверхности уровня.

Тема 2: Гидродинамика

Движение идеальной жидкости. Реальная жидкость. Уравнение расхода. Уравнение Бернулли. Гидравлические потери напора. Число Рейнольдса. Ламинарный, турбулентный и переходный режимы течения жидкости.

Тема 3: Общие сведения о гидроприводах горных машин общие. Объемные гидромашины

Рабочие жидкости гидропривода. Основные свойства рабочей жидкости. Структурная и принципиальная схема гидропривода. Основные термины и определения. Использование объемных гидромашин в нефтегазовых машинах Основные рабочие параметры объемных гидромашин. Принцип действия объемных гидромашин. Расчет основных параметров объемных гидромашин. Механическая и регулирующая характеристика горых машин. Особенности рабочих процессов объемных гидромашин. Потери энергии в объемных гидромашинах. Расчет основных параметров объемных гидромашин.

Тема 4: Гидроцилиндры

Использование гидроцилиндров в нефтегазовых машинах. Конструктивные схемы гидроцилиндров. Применяемые типы гидравлических уплотнений. Расчет основных параметров гидроцилиндров.

Тема 5: Объемные пневматические машины

Использование объемных пневматических машин в нефтегазовых машинах Основные рабочие параметры пневматических машин. Принцип действия объемных пневматических машин. Расчет основных параметров объемных пневматических машин.

Тема 6: Аппараты управления и регулирования приводов

Клапаны предохранительные. Гидродроссели. Регуляторы потока. Распределители. Основные параметры аппаратов управления и регулирования.

Тема 7: Гидродинамические передачи

Применение гидродинамических передач в нефтегазовых машинах. Преобразование механической энергии в гидродинамическую передачу. Гидромуфты гидротрансформаторы. Регулирование передач.

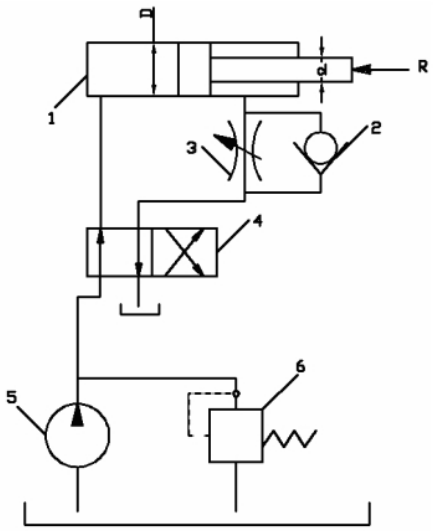
Тема 8: Проектирование гидросхем на стенде-тренажере. Смазочные системы

Условные обозначения гидромашин и гидроаппаратов в гидросхемах приводов. Способы регулирования приводов. Реализация на стенде-тренажере разработанной гидросхемы привода. Снятие характеристики разработанной схемы. Анализ полученных результатов. Основные подвижные соединения в нефтегазовом оборудовании. Системы смазки подвижных соединений. Подбор необходимого оборудования при проектировании смазочных систем и средств смазки.

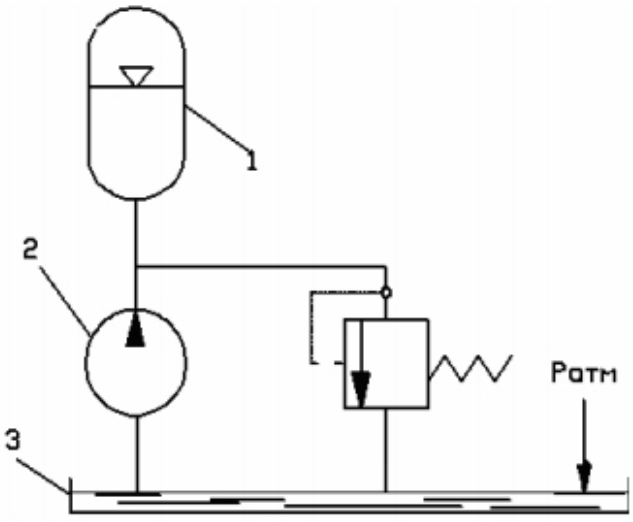
2. ВЫПОЛНЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

2.1. Задания для самостоятельной работы

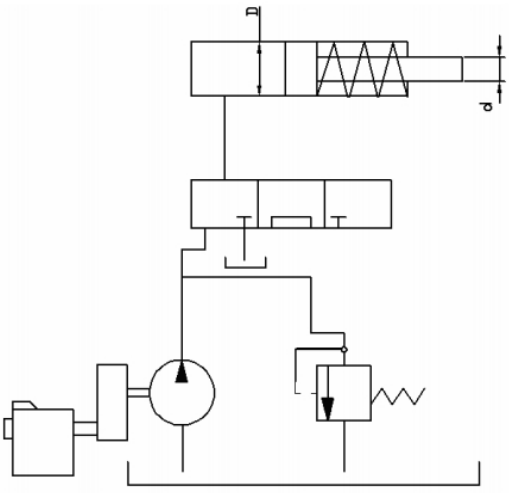
1. В объемном гидроприводе насос 5 развивает давление $p_н$ и постоянную подачу $Q_н$. Уплотнение поршня диаметром D и штока диаметром d в гидроцилиндре 1 манжетное. Пренебрегая утечками масла в обратном гидроклапане 2 и гидрораспределителе 4, определить минимальное и максимальное значения потери мощности из-за слива масла через переливной гидроклапан 6, если расход масла через гидродроссель 3 настраивается в пределах от 4 до 20 л/мин



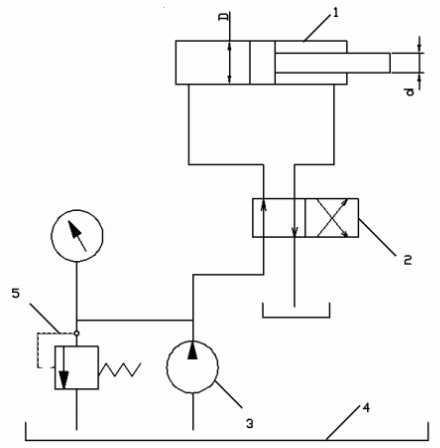
2. В процессе гидравлического испытания пневмогидроаккумулятора 1 емкостью V из открытого бака 3 насосом 2 подан объем V_1 минерального масла с модулем упругости E. Пренебрегая деформацией металла гидроаккумулятора и утечкой масла в гидросистеме, определить, до какой величины повысилось избыточное давление масла в гидроаккумуляторе в результате гидравлического испытания.



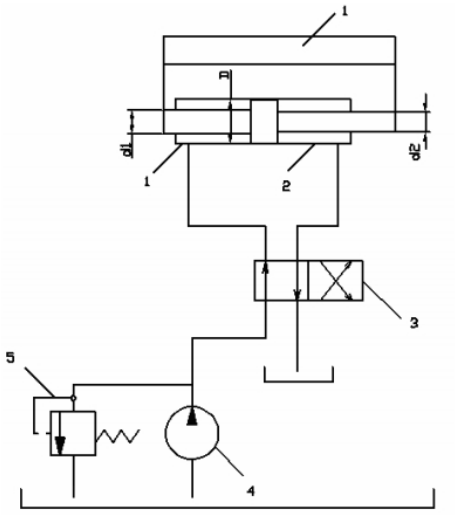
3. В объемном гидроприводе приводной вал роторного насоса вращается от коленвала двигателя внутреннего сгорания через редуктор. Пределы чисел оборотов коленвала двигателя внутреннего сгорания от n_1до n_2. При частоте вращения коленвала двигателя внутреннего сгорания n, насос развивает подачу $Q_н$. Пренебрегая утечкой масла в гидроаппаратуре, определить пределы регулирования скорости движения поршня гидроцилиндра 1 диаметром D. Поршень в гидроцилиндре уплотняется резиновыми кольцами круглого сечения.



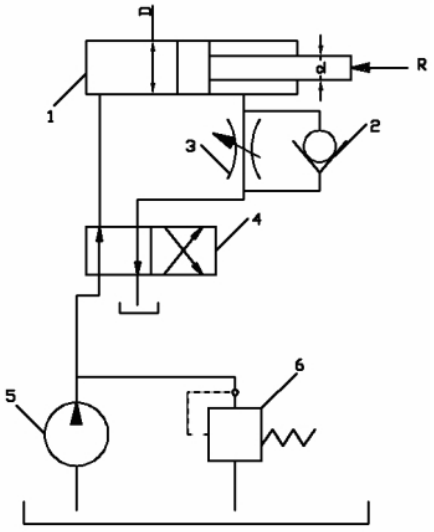
4. В объемном гидроприводе насос 3 при вращении своего приводного вала с частотой n развивает подачу $Q_н$. Уплотнение поршня диаметром dв гидроцилиндре 1 манжетное. Утечка масла в гидросистеме не превышает ΔQ. С учетом утечки масла в гидросистеме определить, с какой частотой необходимо вращать приводной вал насоса для сообщения поршню гидроцилиндра скорости υ при его движении а) вправо, б) влево.



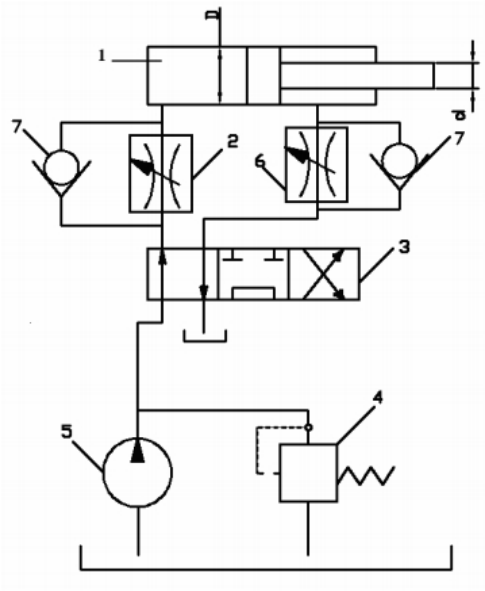
5. Гидроцилиндр 2 с двусторонним штоком одинакового диаметра (d_1–d_2) при давлении масла в рабочей полости Р и противодавлении в сливной полости $P_{пр}$=0,1 МПа развивает тяговое усилие F. Уплотнение поршня и штока в гидроцилиндре манжетное. Насос 4 при вращении собственного приводного вала с частотой $n_н$ развивает подачу $Q_н$. Определить пределы регулирования скорости движения поршня гидроцилиндра при изменении скорости вращения приводного вала насоса 4 от 1000 до 2000 об/мин. Принять $\eta_м$=0,97.



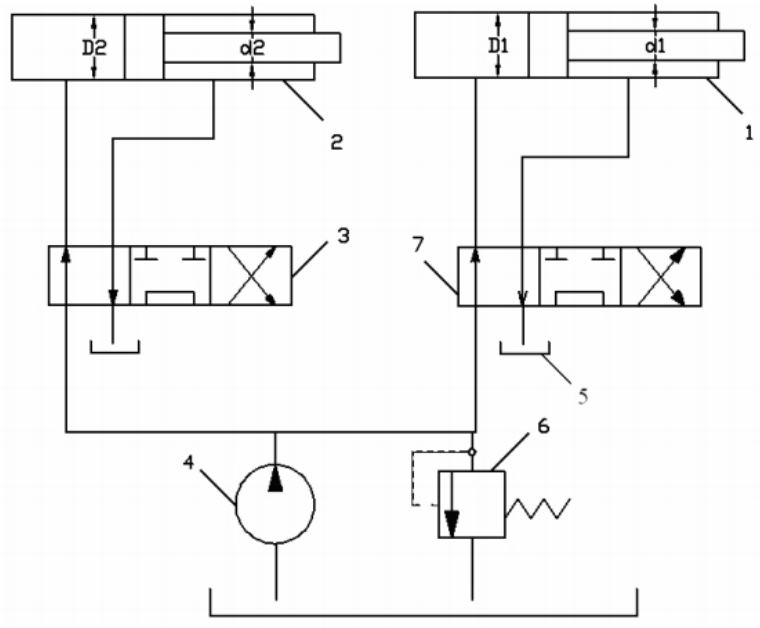
6. В объемном гидроприводе насос 5 развивает давление $p_н$ и постоянную подачу $Q_н$. Уплотнение поршня диаметром D и штока диаметром d в гидроцилиндре 1 манжетное. Пренебрегая утечками масла в обратном гидроклапане 2 и гидрораспределителе 4, определить минимальное и максимальное значения потери мощности из-за слива масла через переливной гидроклапан 6, если расход масла через гидродроссель 3 настраивается в пределах от 4 до 20 л/мин



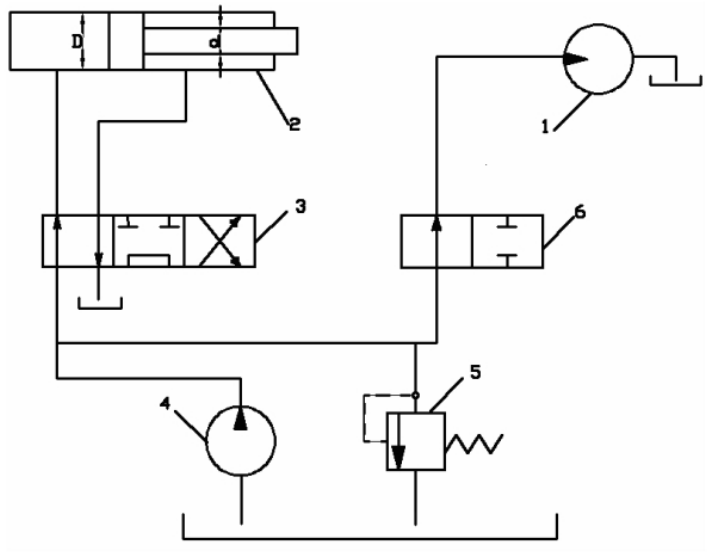
7. В левой полости гидроцилиндра 1 рабочее давление p. Диаметр гидроцилиндра D, диаметр штока d. Уплотнение поршня и штока в гидроцилиндре – манжетное. Противодавление в правой полости гидроцилиндра $p_{пр}$. Насос 5 развивает подачу $Q_н$=12л/мин. Падение (потеря) давления в напорной гидролинии Δp. Определить при движении поршня вправо общий КПД объемного гидропривода, если известны утечка масла через гидроклапан 4 ΔQ и общий КПД $\eta_н$.



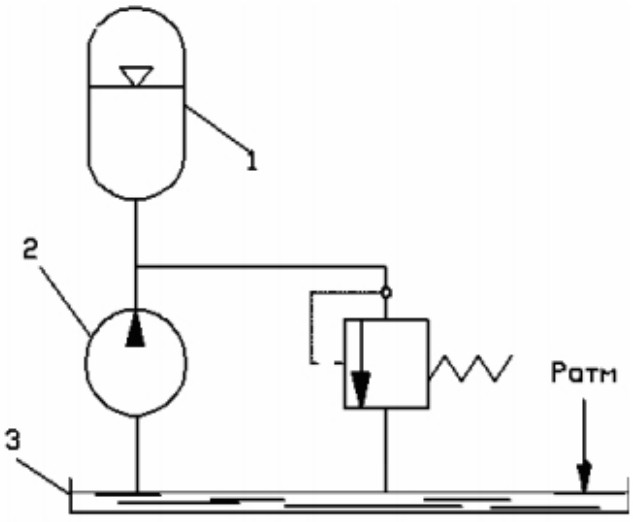
8. В объемном гидроприводе поршень гидроцилиндра 1 диаметром D_1 двигается вправо со скоростью υ_1, а поршень гидроцилиндра 2 D_2 двигается вправо со скоростью υ_2. Уплотнение поршня в каждом гидроцилиндре манжетное. Утечка масла в гидроаппаратуре составляет ΔQ. Определить подачу, развиваемую насосом 4.



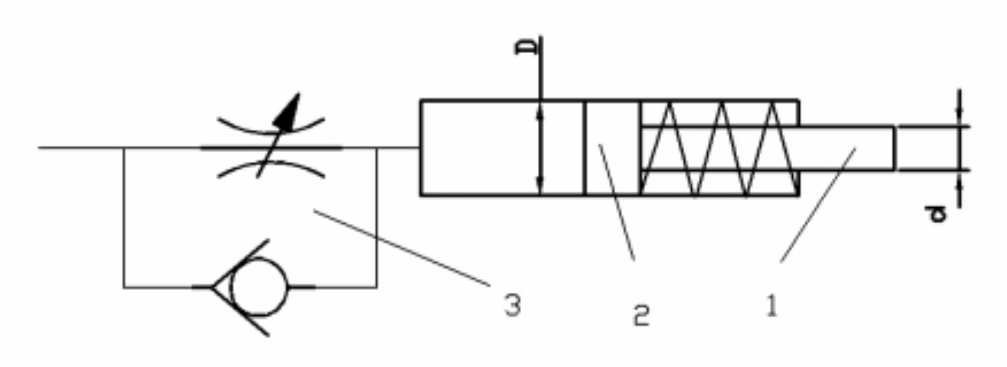
9. В объемном гидроприводе используется гидромотор 1 с рабочим объемом q_0 и гидроцилиндр 2 диаметром D. Уплотнение поршня в гидроцилиндре манжетное. С учетом суммарной утечки масла в гидроаппаратуре в количестве ΔQ определить, какую подачу создает насос 4, когда выходной вал гидромотора вращается со скоростью n, а поршень гидроцилиндра перемещается со скоростью υ. Объемный КПД гидромотора $\eta_{об}$.



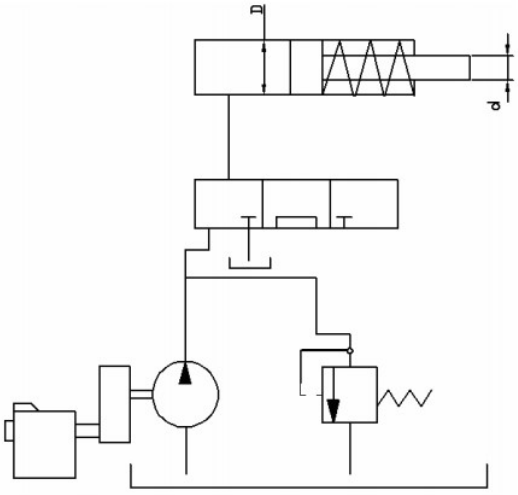
10. В процессе гидравлического испытания пневмогидроаккумулятора 1 емкостью V из открытого бака 3 насосом 2 подан объем V_1 минерального масла с модулем упругости E. Пренебрегая деформацией металла гидроаккумулятора и утечкой масла в гидросистеме, определить, до какой величины повысилось избыточное давление масла в гидроаккумуляторе в результате гидравлического испытания.



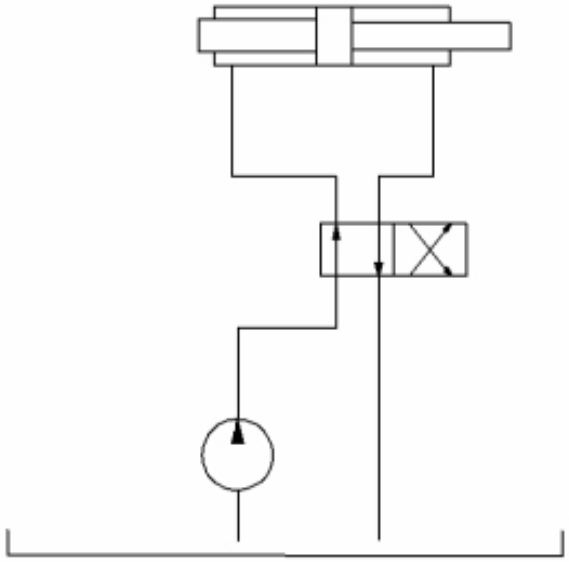
11. Гидравлическое реле выдержки времени с диаметром D поршня 2 срабатывает при перемещении штока 1 вверх на длину l. Определить, на пропуск какого расхода масла необходимо настроить гидродроссель 3, чтобы реле сработало (выдало сигнал управления) через промежуток времени t. Утечкой масла в данном реле пренебречь.



12. Ротор пластинчатого насоса получает вращение от асинхронного двигателя через клиноременную передачу, диаметры шкивов d0= 100мм и d=160мм, частота вращения вала электродвигателя nд, рабочий объем насоса q=16 см3, давление на выходе из насоса P=, объемный КПД ηоб= 0,95. Принять коэффициент проскальзывания клиноременной передачи ψ=0,98; общий КПД насоса ηн=0,8; КПД клиноременной передачи ηр=0,95 и КПД электродвигателя ηэ=0,87. Определить мощность, потребляемую электродвигателем.



13. Подача насоса равна Q=280 л/мин. Рассчитать диаметры всасывающей, напорной и сливной гидролиний, принимая следующие расчетные скорости: V1 =0,6 м/с – для всасывающей гидролинии; V2=4 м/с – для напорной гидролинии; V3= 1,4 м/с – для сливной гидролинии.

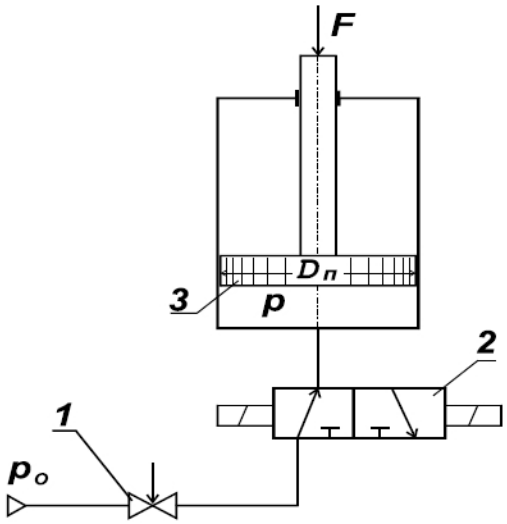


14. Определить конечную температуру воздухапневмодвигателя при адиабатном расширении, если начальная температура 20 ° С, абсолютное давление сжатия 0,6 МПа, а расширения 0,4 МПа.

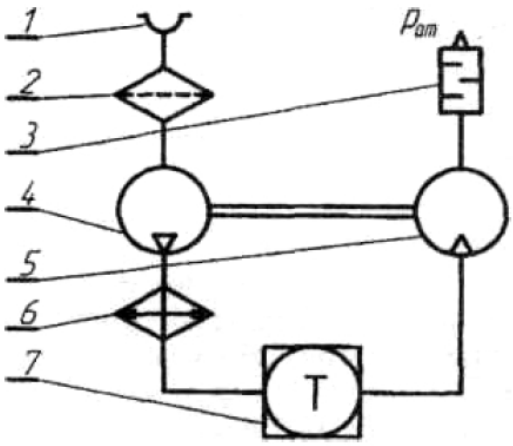
15. Определите теоретических расход четырехцилиндрового поршневого пневмомотора при частоте вращения 700 мин-1, если объем сжатого воздуха, перемещаемого одним поршнем за цикл, составляет 0,5 дм3, абсолютное давления сжатия 0,6 МПа, давление выхлопа 0,4 МПа, температура сжатого воздуха 300 К.

16. Определите расход турбинного пневмодвигателя, если абсолютное давление сжатого воздуха 0,5 МПа, а его температура 20 ° С. Двигатель имеет два сопла с насадками диаметром 24 мм. Коэффициент расхода насадки 0.92, коэффициент скорости 0.95

17. На рисунке показана расчетная схема магистрального пневмопривода, содержащая вентиль 1 ($\zeta_в = 5$), распределитель 2 ($\zeta_р = 12$) и пневмоцилиндр с поршнем 3. Диаметр поршня $D_п = 100$ мм. Сила полезного сопротивления, приложенная к поршню, $F = 0,8$ кН. Общая длина труб диаметром $D = 10$ мм составляет $l = 20$ м, эквивалентная шероховатость труб $\Delta Э = 0,01$ мм. Температура воздуха 20 ºС; подводимое давление $p0 = 0,63$ МПа. Определим скорость перемещения поршня Vп, пренебрегая силами трения. Из уравнения расхода (Мр) $V_П = \frac{M_p}{\rho \omega_П}$, где ωп - площадь поршня, ρ - плотность воздуха в поршневой полости.



18. На рисунке показана система турбонаддува двигателя внутреннего сгорания. Проходя последовательно через фильтр 2, компрессор 4 и охладитель 6 воздух попадает в двигатель внутреннего сгорания. Выхлопные газы, направляемые на выход, проходят через пневматический двигатель 5, который приводится во вращение. Пневмодвигатель в свою очередь приводит во вращение компрессор 4, который имеет с ним общий вал. Определить теоретическую подачу компрессора, если его рабочий объем равен q, а частота вращения вала пневмодвигателя n.



19. Выбрать проходное сечение элементов пневматической линии, состоящей из трубы длиной $L_1 = L_{э1}$ и распределителя; как установлено динамическим расчетом, ее пропускная способность характеризуется величиной $f^{э}_{расч}$

20. Требуется выбрать параметры привода одностороннего действия по следующим

данным $\upsilon_{ср} = 0{,}25\,{}^{м}\!/_{с}$ P = 980 Н, S= 0,5 м, m= $10\,\frac{кгс \cdot с^2}{м}$; рм= 0,5 МПа.

21. Определить диаметр цилиндра, а также параметры линий на входе и выходе по следующим данным: P2 = 980 Н; m= $10\ \frac{кгс \cdot с^2}{м}$; s = 0,6 м; рм = 0,5 МПа; диапазон изменения скорости Uср = 0,4…0,6 м/с.

22. Определить тормозной путь $x_т$ и время торможения привода, который нагружен силой P и должен переместить массу m; на длину S со средней скоростью $U_{ср}$. Относительный вредный объем тормозной полости $\xi_{от}=V_{jn}/F_s$ по конструктивным соображениям принимаем равным 0,05.

23. Требуется переместить горизонтально массу m, т. е. груз весом $P_т$ = mg на расстояние S с плавной остановкой в конце хода. По конструктивным соображениям эффективная площадь проходного сечения трубопроводов ограничена значением f (труба ${}^{1}\!/_{2}{}''$) сила полезного сопротивления P_2. Выбрать параметры пневмопривода, работающего в режиме автоторможения, чтобы время перемещения t_s было минимальным.

24. . Определить параметры привода и положение тормозного золотника, если требуется переместить массу m на расстояние S за время t_s. Полная сила сопротивления P. Значения $f_э$ ограничены теми же условиями: $f^э = f^э_{\max}$,$U \le U_{\max}$, $U_{\max}$.

25. Определить, на сколько изменится время перемещения поршня двустороннего пневмопривода, если через отверстие (Ω_{1-2}= 0,2) в нем часть сжатого воздуха будет перетекать из рабочей полости в выхлопную. Исходные данные: N; Ω , χ , δ_a; $П^F_{2,1}$.

26. Определить рабочее усилие, развиваемое мембранным приводом при перемещении центра мембраны на величину x. Исходные данные диаметр мембраны D_1 диаметр шайбы D_2; толщина ее h; давление сжатого воздуха $p_м$, модуль упругости материала мембраны E, угол наклона образующей мембраны в начальном положении υ (x_0 = 12 мм).

4.2. Порядок выполнения.

1. Выполнить анализ задачи по своему варианту
2. Составление чертежа схемы привода
3. Выбор оптимальных параметров работы привода
4. Выбор способа регулирования
5. Выбор метода расчета.
6. Выбор параметров работ схемы.
7. Решение задачи.

8. Составление графиков.

4.3. Оформление и порядок защиты

Отчет по самостоятельной работе должна включать следующие этапы:

1. Выполнить анализ задачи по своему варианту
2. Составление формул необходимых для решения задачи
3. Выбор переменных.
4. Составление чертежа привода.
5. Решение задачи.
6. Составление графиков.

Выполненное задание представляется преподавателю в письменном виде.

Защита задания выполняется пояснениями о порядке выполнения. Преподавателем оцениваются пояснения студента и ответы на дополнительные вопросы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов Н. М., Лагунова Ю. А. Гидравлика, гидро- и пневмопривод: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 62 с.
2. Суслов Н. М., Лагунова Ю. А. Объемные гидравлические машины гидро- и пневмоприводов: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 346 с
3. Суслов Н. М., Чиркова А. А. Проектирование и расчет объемного гидропривода: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 78 с.