**ВВЕДЕНИЕ**

Основной задачей электромашиностроения является практическое применение последних достижений научно-технического прогресса в области электротехники, интенсивное использование созданного ранее производственного потенциала, повышение качества выпускаемых электрических машин и трансформаторов, создание новых видов электрических машин, удовлетворяющих современным требованиям. При этом необходимо учитывать возрастающие экологические требования к источникам электроэнергии и наряду с традиционными способами развивать экологически чистые (альтернативные) способы производства электроэнергии с использованием энергии солнца, ветра, морских приливов, термальных источников.

Данное учебное пособие предназначено для практических занятий и самостоятельной работы студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», изучающих курс «Электрические машины» и «Электропривод», а также может быть полезным студентам неэлектрических специальностей, изучающих раздел «Электрические машины» в рамках курса «Электротехника». Для более глубокого освоения материала в пособии приведены основные теоретические положения и формулы для решения задач. Каждый раздел снабжен контрольными вопросами. Для проверки остаточных знаний предложены тесты.

**1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ**

*Электрической машиной* называется электромеханическое устройство, которое осуществляет взаимное преобразование механической и электрической энергии.

По своему назначению электрические машины можно подразделить на следующие основные группы:

Выработка электрической энергии на электростанциях производится электрическими машинами, называемыми *генераторами*, которые преобразуют механическую энергию в электрическую. Основная часть всей электроэнергии ( до 80 %) вырабатывается на тепловых электростанциях.

Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется *электродвигателями*. Двигатели применяют для приведения в движение различных станков, механизмов, электротранспорта. Электродвигатель является основным элементом электропривода рабочих машин различных областей промышленности. В настоящее время широкое распространение получили многодвигательные электроприводы, когда отдельные звенья рабочей машины приводятся в движение отдельными двигателями. Это дает большие возможности для автоматизации электроприводов различных технологических процессов.

Для передачи электрической энергии на дальние расстояния и распределения ее между отдельными потребителями служат статические электромагнитные устройства называемые *трансформаторами*. В процессе передачи и распределения электроэнергии неоднократно повышают и понижают напряжение. Передача электроэнергии на большие расстояния осуществляется при высоком напряжении 500кВ и выше, что обеспечивает минимальные ее потери в ЛЭП. Трансформатор не является электрической машиной, т.к. при его работе нет взаимного преобразования электрической и механической энергии, в нем нет никаких вращающихся частей, но электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторах при работе аналогичны процессам, протекающим в электрических машинах и основанным на явлении электромагнитной индукции.

Электрические машины являются обратимыми, т. е. они могут работать и в генераторном, и в двигательном режимах. Точно так же в электромашинном преобразователе и трансформаторе направление преобразования электрической энергии может быть изменено на обратное. Однако выпускаемые электропромышленностью машины обычно предназначаются для предпочтительной работы в каком-то одном режиме. Это позволяет лучше приспособить машину к требованиям эксплуатации, не делая ее чрезмерно тяжелой и дорогой.

*Электромашинные преобразователи* – служат для преобразования постоянного тока в переменный и наоборот, могут изменять частоту, число фаз и другие функции. В настоящее время электромашинные преобразователи используют крайне редко, а уже установленные электромашинные преобразователи активно модернизируются полупроводниковыми (тиристорными и транзисторными).

[*Электромашинные компенсаторы*](http://elenergi.ru/sinxronnyj-kompensator-reaktivnoj-moshhnosti.html) – осуществляют регулирование коэффициента мощности cosφ, а именно баланса реактивной мощности в сети.

*Электромашинные усилители* – используют для объектов большой мощности. Это, своего рода усилители, они усиливают сигналы большой мощности, при этом управление ведется сигналами малой мощности. Роль этих усилителей, как и электромашинных компенсаторов, в современном мире практически сведена на нет из – за применения полупроводниковых усилителей (транзисторных и тиристорных).

*Электромеханические преобразователи сигналов* – это, как правило, электрические микромашины (например, сельсины), которые довольно широко используют в системах автоматического управления.

*Сельсины* представляют собой особый вид электрических машин переменного тока мощностью от нескольких ватт до нескольких сот ватт (менее киловатта). Сельсины применяются для дистанционной передачи механического угла поворота электрическим путем между устройствами, не имеющими между собой механической связи.

Сельсин имеет статор и ротор, на которых расположены обмотки переменного тока. По своему назначению в схемах авторегулирования сельсины делятся на:

* сельсин-датчики,
* сельсин-приемники
* дифференциальные.

*Сельсин-датчик* и *сельсин-приемник* своими однокатушечными обмотками статора подключены к одной и той же сети переменного тока, а трехкатушечные обмотки ротора соединены между собой. Если повернуть ротор датчика на произвольный угол, то на такой же угол повернется ротор приемника. Если ротор датчика вращать непрерывно с произвольной скоростью, то с такой же скоростью будет вращаться и ротор приемника.

Действие сельсинной связи основано на принципе электромагнитной индукции, заключающейся в следующем. Переменный ток однокатушечной обмотки статора индуктирует в трехкатушечной обмотке ротора токи, величины которых зависят от относительного расположения обмоток ротора и статора.

**Индукционный регулятор напряжения (ИР)** представляет собой асинхронную машину с фазным ротором, предназначенную для плавного регулирования напряжения. Рассмотрим работу трехфазного ИР, получившего преимущественное применение. Ротор ИР заторможен посредством червячной пере­дачи, которая не только удерживает его в заданном положении, но и позволяет плавно поворачивать его относительно статора. Обмотки статора и ротора в ИР имеют автотрансформаторную связь, поэтому ИР иногда называют поворотным автотрансформатором.

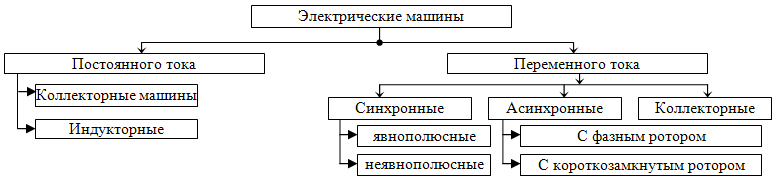
**Фазорегулятор (ФР)** предназначен для изменения фазы вторичного напряжения относительно первичного при неизменном вторичном напряжении. В отличие от ИР обмотки ротора и статора ФР электрически не соединены друг с другом, т.е. имеют трансформаторную связь, поэтому ФР иногда называют поворотным трансформатором. Изменение фазы вторичного напряжения осуществляется поворотом ротора относительно статора. Первичной обмоткой в ФР обычно является обмотка статора. Фазорегуляторы применяются в устройствах автоматики (для фазового управления) и измерительной технике (для проверки ваттметров и счетчиков).

Каждая электрическая машина имеет паспортную табличку, выбитую на металлической пластине и прикрепленную к корпусу. В этой табличке указаны тип машины и ее *номинальные данные,* характеризующие основные энергетические показатели и условия работы, на которые она рассчитана. К номинальным данным относятся: мощность, напряжение, ток, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия, (КПД), число фаз, коэффициент мощности и режим работы, класс изоляции, а также дополнительные данные, необходимые для монтажа и эксплуатации машины (масса, схема включения обмоток и др.). *Номинальной мощностью* электрической машины называют мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. Для электрических двигателей под номинальной мощностью понимают полезную механическую мощность на валу, выраженную в ваттах или киловаттах; для генераторов постоянного тока – полезную электрическую мощность на зажимах машины (в ваттах или киловаттах); для генераторов переменного тока – полную электрическую мощность на зажимах (в вольт-амперах или киловольт-амперах). Номинальные мощности всех видов электрических машин и трансформаторов стандартизованы; точно так же стандартизованы номинальные частоты вращения электрических машин.

*Классификация электрических машин*

Электрические машины классифицируются по различным признакам.

По роду тока различают машины постоянного и переменного тока:



По мощности различают:

* Микромашины – их мощность может варьироваться от нескольких долей ватта до 500 Вт. Они могут производится для двух родов тока – постоянного и переменного. Могут быть рассчитаны как на работу при нормальной (промышленной) частоте 50 Гц, так и при повышенной ( от 400 до 2000 Гц).
* Электродвигатели малой мощности – от 0,5 до 10 кВт. Также могут изготавливаться для двух родов тока – постоянного и переменного нормальной и повышенной частоты.
* Электродвигатели средней мощности – от 10 кВт до нескольких сотен ватт.
* Электродвигатели большой мощности – мощность данных машин больше нескольких сотен киловатт. Такие электродвигатели предназначены для работы на постоянном и переменном напряжении нормальной частоты. Исключение могут составлять электродвигатели специального назначения (авиация, флот) и другие.

Классификация по частоте вращения:

* До 300 об/мин – тихоходные.
* От 300 до 1500 об/мин – средней быстроходности.
* От 1500 до 6000 об/мин – быстроходные.
* Более 6000 об/мин – сверхбыстроходные.

Микромашины же могут изготавливать с частотой вращения вала от нескольких оборотов в минуту до 60 000 оборотов в минуту. Скорость вращения машин средней и большой мощности, как правило, не превышает 3000 об/мин.

Конструктивное исполнение электрической машины во многом определяют требования, предъявляемые к защите ее от внешних воздействий. В зависимости от этого используют буквенно-цифровое обозначение исполнений электрических машин, состоящее из двух букв IP (*International Protection*) и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины и от попадания внутрь ее твердых посторонних предметов. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты машины от проникновения в нее влаги. Различают следующие виды исполнения электрических машин: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное, взрывозащищенное.

*Материалы, применяемые при конструировании электрических машин и трансформаторов*

Для изготовления электрических машин и трансформаторов применяются следующие материалы: конструкционные, магнитные, проводниковые и изоляционные.

*Конструкционные материалы* служат для изготовления частей и деталей машин и трансформаторов, необходимых для передачи и восприятия механических воздействий. В основном применяется чугун (простой, ковкий), сталь (литая, кованая), цветные металлы и их сплавы, пластмассы.

*Магнитные материалы*. Для изготовления магнитной системы электрических машин применяются различные *ферромагнитные материалы*: листовая электротехническая сталь различных сортов, чугун, стальное литье, листовая (конструкционная) сталь, кованая сталь. Для сердечников трансформаторов применяется специальная электротехническая листовая сталь с относительно большим содержанием кремния (до 4–5%) толщиной обычно 0,5 или 0,35 мм при частоте переменного тока 50 Гц. При более высоких частотах тока, например при 300–400 Гц и выше, толщина стали выбирается 0,20 и 0,10 мм. В этом случае значительно снижаются потери от вихревых токов, наведенных переменным магнитным полем, имеющим место в сердечнике трансформатора.

Листовая сталь по способу изготовления делится на горячекатаную и холоднокатаную, которая имеет более высокие электромагнитные свойства, поэтому в последнее время применяется чаще для трансформаторов и крупных электрических машин.

*Проводниковые материалы*. В основном это медь – сравнительно недорогой материал, имеющий малое удельное сопротивление, также применяют алюминий и сплавы (латунь, фосфористая бронза). Медные и алюминиевые провода для обмоток трансформаторов и электрических машин изготовляются круглых и прямоугольных сечений с различными видами изоляции. Для изоляции применяются хлопчатобумажная пряжа, асбест, стеклопряжа, пластмассы, синтетические пленки, специальные эмалевые лаки.

Провода с хлопчатобумажной изоляцией широко применяются для нормальных трансформаторов и электрических машин.

Для машин небольшой и средней мощности (примерно до 300 кВт) на напряжения до 700 В часто выбираются провода с эмалевой изоляцией. Применяемые при этом нагревостойкие эмалевые лаки позволяют получить тонкое и вместе с тем достаточно надежное изоляционное покрытие проводов.

*Изоляционные материал*ы.

Надежность работы электрических машин во многом определяется изоляционными материалами. Изоляционные материалы необходимы для электрической изоляции токопроводящих частей трансформаторов и машин.

Нагревостойкость изоляционных материалов, примененных для изоляции обмоток, определяет допустимые температуры обмоток, а следовательно, и нагрузки активных материалов (плотность тока для проводников, индукция для стали). Большое значение имеют теплопроводность изоляции, а также ее влагостойкость и химическая стойкость. Помимо этого, изоляция должна обладать достаточной механической прочностью, так как при сборке машины, а также в условиях эксплуатации она подвергается значительным механическим воздействиям. Лучше всего этим условиям удовлетворяет слюда, однако, материалы, изготовленные на ее основе являются относительно дорогими изоляционными материалами и применяются в основном для машин высокого напряжения (от 3 000 В и выше).

Наиболее часто для изоляции применяются волокнистые материалы: бумаги, картоны, ленты, ткани и т. п. Их основные достоинства – высокая механическая прочность и гибкость и сравнительно низкая стоимость. Они применяются для изоляции электрических машин только в пропитанном виде, что значительно улучшает их свойства.

Изоляционные материалы по нагревостойкости, разделяются на несколько классов. Из них наиболее часто применяются материалы классов А и В.

*Класс изоляции А*: хлопок, шелк, бумага и другие подобные органические материалы, пропитанные либо погруженные в масло, а также состав, называемый эмалью и применяемый при изготовлении эмалированной проволоки.

*Класс изоляции В:* изделия из слюды, асбеста, стеклянного волокна, содержащие вяжущие вещества.

В последние годы для электрических машин применяются классы изоляции Е, F и Н. Из них класс Е занимает промежуточное положение между классами А и В. К классам изоляции F и Н относятся наиболее нагревостойкие изоляционные материалы.

*Способы охлаждения электрических машин*

По способу охлаждения различаются:

Машины с *естественным охлаждением*, в которых нет никаких специальных приспособлений для охлаждения.Машины с естественным охлаждением в настоящее время строятся лишь на мощности порядка нескольких десятков ватт. В некоторых случаях естественное охлаждение применяется также для закрытых машин мощностью до нескольких сотен ватт, но в этом случае для усиления отдачи тепла поверхность охлаждения увеличивают путем изготовления корпуса машины с ребрами.

*Машины с внутренней самовентиляцией*, охлаждение которых происходит с помощью вентиляторов или других вентиляционных устройств, укрепленных на вращающихся частях самой вентилируемой машины и осуществляющих вентиляцию внутренних ее полостей (открытые и защищенные машины); *Машины с внутренней самовентиляцией* имеют наибольшее распространение. При этом различают аксиальную и радиальную систему вентиляции. В первом случае передача тепла воздуху происходит при движении последнего вдоль охлаждаемых поверхностей в аксиальном направлении, а во втором – в радиальном направлении.

При аксиальной вентиляции поток воздуха движется вдоль внешней поверхности ротора , а при Da > 200 мм также по выполняемым в этом случае по аксиальным вентиляционным каналам. Воздух поступает в машину с одного ее конца и выбрасывается с другого. При этом воздух при движении вдоль охлаждаемых частей машины подогревается, и, следовательно, нагрев машины при аксиальной вентиляции будет в аксиальном направлении неравномерным. Поэтому аксиальная вентиляция применяется обычно при активной длине машины до 200 – 250 мм.

При радиальной системе вентиляции сердечник ротора имеет радиальные каналы. Воздух при этой системе вентиляции поступает внутрь машины с торцов и выбрасывается по бокам станины или через отверстия в ней.

*Машины с наружной вентиляцией,* в которых путем самовентиляции охлаждается внешняя поверхность машины, а внутренние ее части закрыты для доступа внешнего воздуха (закрытые машины). Машины с наружной самовентиляцией – это машины закрытой конструкции, у которых на валу установлен наружный вентилятор, обдувающий наружную поверхность станины. При этом для увеличения поверхности охлаждения наружная поверхность станины часто снабжается продольными ребрами. Часто машина имеет также внутренний вентилятор или вентиляционные крылышки для создания более интенсивного движения воздуха внутри машины и усиления теплообмена между внутренними частями машины и станиной.

*Машины с независимым охлаждением*, в которые охлаждающая газообразная или жидкая среда подается с помощью отдельного вентилятора, компрессора или насоса, имеющего собственный привод. Такую вентиляцию называют также принудительной.

Иногда вентилятор со своим приводным двигателем устанавливается на корпусе вентилируемой машины. При этом система вентиляции может быть как аксиальной, так и радиальной. Применяется этот способ вентиляции обычно тогда, когда скорость вращения машины регулируется в широких пределах, так как в этом случае при самовентиляции (с вентилятором на валу машины) нельзя обеспечить необходимый расход воздуха при низкой скорости вращения.

**Контрольные вопросы**

* 1. Дайте определение понятию «Электрическая машина».
  2. Какая электрическая машина служит для выработки электрической энергии?
  3. Какое преобразование энергии происходит в электродвигателях?
  4. Назначение трансформаторов.
  5. В чем заключается свойство обратимости электрических машин?
  6. Что относится к номинальным данным электрических машин?
  7. Классификация электрических машин по роду тока.
  8. Классификация электрических машин по мощности.
  9. Классификация электрических машин по частоте вращения.
  10. Классификация электрических машин по степени защиты от внешних воздействий.
  11. Материалы, используемые при конструировании ЭМ.
  12. Способы охлаждения ЭМ.

**2. ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**Основные понятия и определения**

*Трансформатором* называется статическое электромагнитное устройство, с двумя (или больше) индуктивно связанных обмотками, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в энергию переменного тока другого напряжения при сохранении частоты. Если первичное напряжение меньше вторичного, трансформатор называется повышающим, если больше вторичного – понижающим. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий. Повышающие трансформаторы применяют для передачи электроэнергии на большие расстояния, а понижающие – для ее распределения между потребителями.

Трансформаторы широко применяются при передаче электрической энергии на большие расстояния, распределении ее между приемниками, а также в различных выпрямительных, усилительных, сигнализационных и других устройствах.

*Классификация трансформаторов:*

а) по числу фаз – однофазные и трехфазные;

Силовые трансформаторы выпускаются в основном в трехфазном исполнении. Для применения в однофазных сетях выпускаются однофазные трансформаторы.

б) по числу обмоток – двухобмоточные и трехобмоточные;

Трансформаторы имеют две или несколько обмоток, индуктивно связанных друг с другом. Обмотки, потребляющие энергию из сети, называются первичными. Обмотки, отдающие электрическую энергию потребителю, называются вторичными.

в) по классу точности, т. е. по допускаемым значениям погрешностей;

г) по способу охлаждения – трансформаторы с масляным охлаждением (масляные), с естественным воздушным охлаждением (сухие и с литой изоляцией);

д) по роду установки – для внутренней установки, для наружной установки и для комплектных распределительных устройств (КРУ).

е) по конструкции – силовые трансформаторы делят на два основных типа – масляные и сухие.

В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками находится в баке, заполненном трансформаторным маслом, которое является хорошим изолятором и охлаждающим агентом.

Сухие трансформаторы охлаждаются воздухом. Они применяются в жилых и промышленных помещениях, в которых эксплуатация масляного трансформатора является нежелательной. Трансформаторное масло является горючим, и при нарушении герметичности бака масло может повредить другое оборудование.

е) по назначению – трансформаторы разделяют на силовые общего и специального применения. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Для режима их работы характерна частота переменного тока 50 Гц и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений. К трансформаторам специального назначения относятся силовые специальные (печные, выпрямительные, сварочные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т.д.

*Устройство и принцип действия трансформатора*

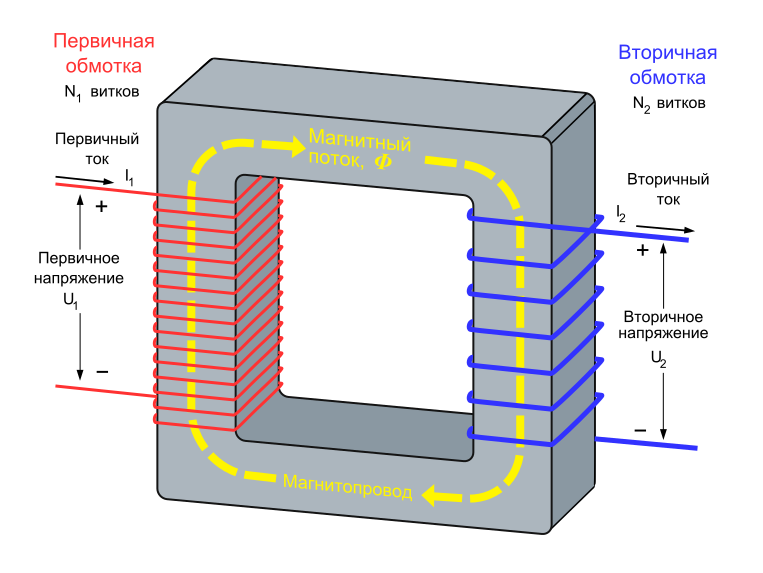


Рис.2.1 Устройство трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении взаимной индукции. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет протекать переменный ток, который создаст в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Этот магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, будет индуктировать в ней электродвижущую силу (ЭДС). Если вторичную обмотку замкнуть на какой-либо приемник энергии, то под действием индуктируемой ЭДС по этой обмотке и через приемник энергии начнет протекать ток. Одновременно в первичной обмотке также появится нагрузочный ток. Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной сети во вторичную при напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную сеть.  
В целях улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальной магнитопровод. Обмотки изолируют как друг от друга, так и от магнитопровода. Обмотка более высокого напряжения называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а обмотка более низкого напряжения - обмоткой низшего напряжения (НН). Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется первичной; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, – вторичной.

Отношение индуктированных в первичной и вторичной обмотках ЭДС, равное отношению чисел витков этих обмоток, называют *коэффициентом трансформации K*=*e*l/*e*2=*w*l/*w*2.

Таким образом, подбирая число витков обмоток, можно при заданном напряжении *u*l, которое примерно равно ЭДС *e*l, получить требуемое выходное напряжение трансформатора *u*2 = *e*2.

Для *силовых трансформаторов* установлены стандартные обозначения (маркировка) начал и концов (выводов) обмоток.

В однофазном трансформаторе начало и конец обмотки *высшего напряжения* (ВН) обозначается соответственно прописными буквами *А* и *X*, а обмотки *низшего напряжения* (НН) – строчными латинскими буквами *а* и *х*. При наличии третьей обмотки с промежуточным (*средним*) *напряжением* (СН) начало и конец обмотки обозначают соответственно *Аm* и *Хm*. В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначаются соответственно *А*, *В*, *С* и *X*, *Y*, *Z* и т.д.

В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам «звезда», «треугольник» или «зигзаг», которые соответственно обозначают русскими буквами У и Д и латинской *Z*. При выводе от нейтрали (общей точки обмоток фаз) у схемы «звезда» или «зигзаг» отвода (ответвления) его обозначают 0, добавляя к буквенным обозначениям схем соединения обмоток индекс «0» (У0).

Схемы соединения трехфазного трансформатора обозначаются в виде дроби, в числителе которой ставят обозначение схемы соединения обмотки ВН, а в знаменателе – НН, например для трансформатора с обмоткой ВН, соединенной по схеме треугольник, а НН – в звезду с выведенной нейтралью обозначение имеет вид Д/У0.

При обслуживании трансформаторов кроме схем соединения необходимо знать взаимное направление ЭДС в обмотках ВН и НН. Если две обмотки *1* и *2* размещены на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же потоком Ф, то при одинаковом направлении намотки и обозначении выводов (концов) (рис.2.2 *а*) наведенные ЭДС одинаково направлены (от концов к началам) и, следовательно, совпадают по фазе.

Для характеристики сдвига фаз линейных ЭДС обмоток ВН и НН введено понятие *группы соединения обмоток трансформатора*.

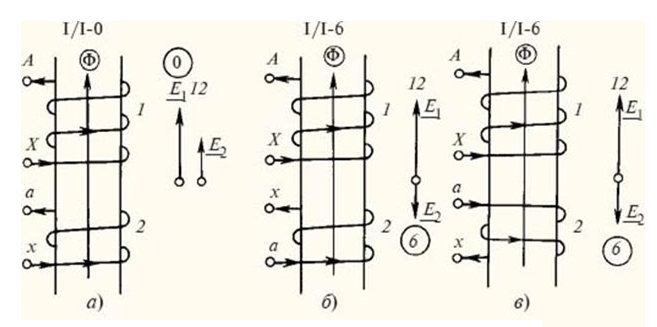


Рис.2.2 Группа соединений обмоток однофазных трансформаторов

( а-0; б,в -6)

Группа соединения обозначается целым числом, которое получено от деления на 30° угла сдвига между линейными ЭДС на одноименных выводах обмоток ВН и НН трансформатора, причем отсчет угла производится от вектора ЭДС обмотки ВН по направлению движения часовой стрелки.

На рис. 2.2 *а* сдвиг между ЭДС *Е*1 и *Е*2 обмоток *АХ* и *ах* равен нулю, поэтому группа соединений обмоток обозначается как I/I-0, где «I» говорит об однофазном варианте трансформатора, при этом ЭДС высшего напряжения *Е*1 ассоциируется с минутной стрелкой часов и условно направляется на циферблате часов на цифру 12. Часовая стрелка часов представляет собой ЭДС низшего напряжения *Е*2 и обозначает группу соединения. Фазовый сдвиг между фазными ЭДС обмоток ВН и НН зависит как от обозначения выводов, так и от направления намотки. При размещении обмоток на одном стержне этот сдвиг может быть равным либо 0, либо 180°.

На рис. 2.2 *б*, *в* при изменении обозначений концов обмотки НН (рис. 2.2 *б*) или изменении направления намотки обмотки НН (рис.2.2 *в*) ЭДС *Е*2 поворачивается на угол 180°, что дает группу соединений I/I-6.

В трехфазных трансформаторах схемы соединения У, Д,  *Z* могут образовывать 12 различных групп со сдвигом фаз линейных ЭДС через 30°.

На рис. 3 для примера приведены схема соединения обмоток У/У и соответствующая векторная диаграмма для нулевой группы, которая обозначается У/У-0 (рис. 2.3, *а*), а также векторная диаграмма для одиннадцатой группы при соединении обмоток У/Д (обозначение У/Д-11) (рис. 2.3, *б*).

Из всех возможных групп соединения трехфазных двухобмоточных трансформаторов стандартизировано только две группы: 0 и 11 – с выводом в случае необходимости нулевой точки «звезды» или «зигзага», а для однофазных трансформаторов – только с соединением I/I-0.

Для *трансформации* трехфазного тока и напряжения применяют или три однофазных трансформатора, или один трехфазный трансформатор, в котором общий для трех фаз *магнитопровод* может быть образован из трех однофазных.

Режимы работы трансформаторов:

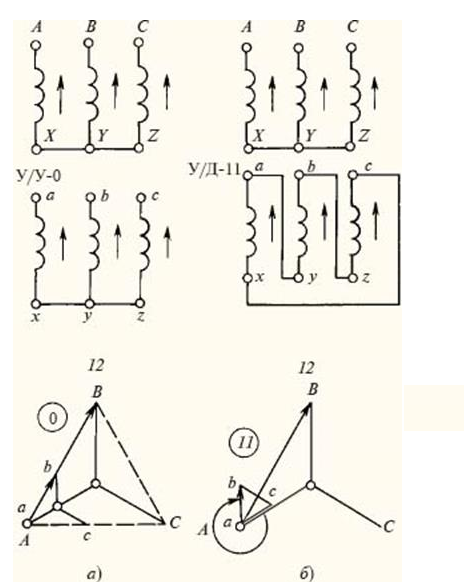


Рис.2.3 Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов

Режим работы силового трансформатора определяется его нагрузкой, напряжением на обмотках, температурой масла, обмоток, условиями окружающей среды и другими параметрами. Можно выделить следующие режимы работы трансформатора:

*Нормальный режим* работы характеризуется условиями (рабочими параметрами), при которых трансформатор может проработать весь гарантированный заводом-изготовителем срок службы. К нормальному режиму относятся следующие режимы: номинальный режим, режим холостого хода, режим параллельной работы и др.

*Номинальный режим* трансформатора соответствует его работе с номинальным напряжением, номинальной нагрузкой при температуре окружающей среды (воздуха) +20°С. Данный режим является идеализированным.

*Нормальный рабочий режим.* Практически при работе трансформатора его параметры отклоняются от номинальных, эти отклонения в нормальном режиме лежат в пределах допустимых стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами.

*Режим холостого хода* характеризуется работой трансформатора без нагрузки. С точки зрения эксплуатации данный режим является нежелательным, так как связан с непроизводственными расходами электроэнергии.

*Режим параллельной работы* трансформаторов допускается при условии, что ни один из них не будет перегружен. Это достигается при соблюдении следующих условий: группы соединений обмоток трансформатора должны быть одинаковы; коэффициенты трансформации не должны отличаться более чем на 0,5%; соотношение номинальных мощностей трансформаторов должно быть не более 1:3; напряжения короткого замыкания должны отличаться не более чем на 10%; должна быть выполнена фазировка трансформаторов.

*Режим перегрузки* характеризуется отклонением параметров трансформатора (нагрузка, температура) за пределы, установленные нормативными документами для нормального нагрузочного режима. При длительной работе трансформатора в режиме перегрузки происходит сокращение срока его службы. Перегрузка трансформатора может быть систематической, вызванной суточными изменениями графиков нагрузки, и аварийной, вызванной аварийным отключением какого-либо элемента системы электроснабжения. Режим перегрузки трансформатора допускается стандартами и техническими условиями в течение определенного времени.

*Аварийный режим работы* трансформатора связан со значительными отклонениями параметров трансформатора от номинальных значений. Работа трансформатора в данном режиме недопустима, так как может привести к его значительным повреждениям. Аварийный режим работы может быть связан с внутренними повреждениями в трансформаторе или с внешними повреждениями в системе электроснабжения. Признаками возникновения аварийного режима связанного с внутренними повреждениями может быть:

* сильный и неравномерный шум или потрескивание внутри бака трансформатора;
* повышенный нагрев трансформатора при нагрузке, не превышающей номинальную и нормальной работе охлаждающих устройств;
* выброс масла из расширителя или разрыв диафрагмы выхлопной трубы;
* течь масла или уменьшение уровня масла ниже уровня масломерного стекла в расширителе.

Аварийный режим, связанный с внутренними повреждениями трансформатора, как правило, отключается газовой или дифференциальной защитами.

Аварийный режим, связанный с внешними повреждениями, как правило, характеризуется значительным увеличением тока трансформатора и отключается максимальной токовой защитой.

*Потери энергии и КПД трансформатора.*

В процессе работы трансформатора под нагрузкой часть активной мощности *Р*1, поступает в первичную обмотку из сети, рассеивается в трансформаторе на покрытие потерь. В результате активная мощность *Р*2, поступающей в нагрузку, оказывается меньше мощности *Р*1 на величину суммарных потерь в трансформаторе. В трансформаторе существует два вида потерь – магнитные и электрические.

Магнитные потери прямо пропорциональны массе магнитопровода и квадрату магнитной индукции в нем. Они также зависят от свойств стали, из которой изготовлен магнитопровод. Уменьшению потерь на гистерезис способствует изготовления магнитопровода из ферромагнитных материалов (электротехнической стали). Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод изготавливают шихтованным (из тонких стальных пластин, изолированных друг от друга тонким слоем лака или оксидной пленки) или витым из стальной ленты. Магнитные потери зависят также и от частоты переменного тока: с повышением частоты *f* магнитные потери повышаются за счет потерь на гистерезис и вихревые токи. Экспериментально потери в стали определяются из опыта холостого хода трансформатора, когда ток I2=0, а ток I1 имеет небольшую величину (единицы процентов от номинальной величины). При этом практически вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на покрытие потерь в сердечнике трансформатора *Р*0=*Р*ст.

Электрические потери – это потери в обмотках трансформатора обусловленные нагревом обмоток токами, проходящими по ним. Электрические потери являются переменными, и пропорциональны квадрату тока в обмотках. Потери в медных проводах определяются из опыта короткого замыкания, при котором токи в обеих обмотках имеют номинальное значение, а напряжение, подводимое к первичной обмотке, составляет 5-10 % от номинального.

*Коэффициент полезного действия* трансформатора очень высок и обычно равен в номинальном режиме 0,98...0,99 и определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки *Р*2, (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки *Р*1 (подводимая мощность):



**Основные формулы для решения задач**

Максимальное значение основного магнитного потока

.

где *Bmax* ***–*** максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода, *Тл*;

*Qст*– площадь поперечного сечения стержня трансформатора, *м2* ;

*kc****–*** коэффициент заполнения магнитопровода сталью,обычно принимают *k*c=0,95.

Коэффициент трансформации:

*k=E1 /E2= w1 / w2 = U1ном/U20*

где *E1*и *E2* –э.д.с., индуцируемые в первичной и вторичной обмотках трансформатора соответственно;

*E1 =4,44 f w1Фmax;; E2 =4,44 f w2Фmax*

*w1* и*w2*– число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора

Номинальная мощность трансформатора:

*Sном= U1ном I1ном ≈U2ном I2ном .*

Номинальные токи в первичной и вторичной обмотках соответственно

*I1ном* = *Sном 3·U1ном  ; I2ном* = *Sном 3·U2ном*



Изменение напряжения на выходе трансформатора при номинальной нагрузке

*ΔUном= β( uk.а · сosφ2+ uk.р· sinφ2),*

Коэффициент нагрузки

*β = I1 / I2ном*

КПД трансформатора



**Задача 2.1**. Для однофазного трансформатора известно: номинальная мощность *S*, кВ∙А, номинальное входное напряжение *U*1, В, выходное *U*2, В. Определить коэффициент трансформации, токи в первичной и вторичной обмотках. Потерями в трансформаторе пренебречь.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | S, кВ∙А | U1,В | U2,В | вариант | S, кВ∙А | U1,В | U2,В |
| 1. | 0,63 | 220 | 12 | 11. | 10 | 380 | 230 |
| 2. | 0,1 | 380 | 24 | 12. | 16 | 660 | 400 |
| 3. | 0,16 | 220 | 36 | 13. | 25 | 220 | 36 |
| 4. | 0,25 | 660 | 42 | 14. | 40 | 380 | 230 |
| 5. | 0,4 | 660 | 110 | 15. | 63 | 660 | 230 |
| 6. | 0,63 | 660 | 220 | 16. | 100 | 660 | 400 |
| 7. | 1 | 660 | 130 | 17. | 160 | 380 | 230 |
| 8. | 0,25 | 380 | 110 | 18. | 10 | 660 | 400 |
| 9. | 0,63 | 380 | 56 | 19. | 16 | 380 | 230 |
| 10. | 0,16 | 380 | 110 | 20 | 25 | 660 | 230 |

**Задача 2.2**. Известно: мощность, потребляемая трансформатором из сети при активной нагрузке, *Р*1,, Вт, напряжение сети *U*1,, В, коэффициент трансформации k. Определить ток нагрузки (значения условные).

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | Р1,Вт | U1,В | k | вариант | Р1,Вт | U1,В | k |
| 1. | 500 | 100 | 10 | 11. | 400 | 130 | 5 |
| 2. | 800 | 200 | 8 | 12. | 700 | 220 | 4 |
| 3. | 200 | 40 | 5 | 13. | 250 | 130 | 3 |
| 4. | 130 | 60 | 4 | 14. | 180 | 130 | 4 |
| 5. | 120 | 50 | 5 | 15. | 200 | 130 | 5 |
| 6. | 600 | 220 | 6 | 16. | 300 | 220 | 6 |
| 7. | 300 | 50 | 7 | 17. | 500 | 80 | 3 |
| 8. | 800 | 100 | 8 | 18. | 450 | 100 | 7 |
| 9. | 250 | 80 | 4 | 19. | 150 | 50 | 4 |
| 10. | 300 | 150 | 5 | 20 | 600 | 200 | 6 |

**Задача 2.3.** При холостом ходе трансформатора были получены следующие показания приборов: *U*10, В; *I*10, А; *Р*10, Вт. Определить коэффициент мощности cosφ=1; индуктивность первичной обмотки трансформатора, частота 50 Гц



|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | U10,В | I10, А | Р10Вт | вариант | U10,В | I10, А | Р10Вт |
| 1. | 220 | 0,4 | 70 | 11. | 400 | 0, 3 | 100 |
| 2. | 200 | 0,3 | 80 | 12. | 300 | 0,22 | 40 |
| 3. | 200 | 0,4 | 55 | 13. | 250 | 0,3 | 60 |
| 4. | 130 | 0,25 | 40 | 14. | 180 | 0,4 | 70 |
| 5. | 120 | 0,5 | 50 | 15. | 200 | 0,25 | 45 |
| 6. | 400 | 0,3 | 60 | 16. | 300 | 0,3 | 80 |
| 7. | 300 | 0,3 | 70 | 17. | 200 | 0,6 | 100 |
| 8. | 200 | 0,2 | 80 | 18. | 250 | 0,2 | 45 |
| 9. | 250 | 0,5 | 60 | 19. | 150 | 0,3 | 40 |
| 10. | 300 | 0,4 | 70 | 20 | 100 | 0,5 | 55 |

**Задача 2.4.** Определить активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора и какую долю от номинального значения составляет напряжение короткого замыкания, если известны номинальная мощность *S*, ВА, активное сопротивление первичной обмотки R1, Ом, показания приборов при опыте короткого замыкания *U*1,кВ, *I*1, А, *I*2, А *Р*к, Вт.



|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар. | S, ВА | R1, Ом | U1к, В | I1к,  А | I2к, А | Рк,  Вт | №  вар. | S, ВА | R1, Ом | U1к,  В | I1к,  А | I2к, А | Рк,  Вт |
| 1 | 250 | 5 | 10 | 4 | 10 | 20 | 11 | 80 | 3 | 5 | 0,2 | 0,8 | 10 |
| 2 | 200 | 3 | 5 | 0,5 | 1 | 16 | 12 | 100 | 4 | 5 | 0,3 | 1 | 12 |
| 3 | 160 | 4 | 8 | 0,4 | 2 | 16 | 13 | 120 | 5 | 6 | 0,3 | 1 | 15 |
| 4 | 400 | 2,5 | 10 | 2 | 10 | 15 | 14 | 130 | 6 | 5,5 | 0,35 | 2 | 18 |
| 5 | 120 | 3 | 15 | 0,5 | 1 | 30 | 15 | 150 | 7 | 7,5 | 0,5 | 2 | 18 |
| 6 | 300 | 20 | 10 | 4 | 10 | 20 | 16 | 160 | 8 | 8 | 0,8 | 4 | 20 |
| 7 | 200 | 8 | 12 | 0,25 | 3 | 15 | 17 | 200 | 10 | 6 | 0,8 | 4 | 20 |
| 8 | 80 | 5 | 6 | 0,4 | 2 | 15 | 18 | 130 | 5 | 6 | 0,3 | 5 | 15 |
| 9 | 100 | 8 | 8 | 0,5 | 3 | 20 | 19 | 250 | 7 | 5 | 0,8 | 5 | 25 |
| 10 | 150 | 10 | 5 | 0,3 | 5 | 25 | 20 | 300 | 10 | 10 | 0,5 | 5 | 30 |

**Задача 2.5** Для однофазного двухобмоточного понижающего трансформатора известно: номинальная мощность *S*ном, кВА, номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток *U*вн , кВ, *U*нн, кВ, , ток холостого хода *I*0,% от номинального, напряжение короткого замыкания *U*к, % от номинального, мощность холостого хода *P*0, кВт, мощность короткого замыкания *P*к, кВт, коэффициент мощности *cosφ*. Определить номинальные значения токов в первичной и вторичной обмотках *I*1н и *I*2н, значение тока холостого хода , *I*0 коэффициент трансформации k, максимальные к.п.д. ηmax и оптимальный коэффициент нагрузки *β*опт.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | Sном, кВА | Uвн, кВ | Uнн, кВ | I0,% | Uк, % | P0, кВт | Pк, кВт | cosφ. |
| 1 | 10500 | 110 | 10 | 7 | 10 | 30 | 90 | 0,87 |
| 2 | 8500 | 80 | 7 | 5 | 10 | 29 | 80 | 0,8 |
| 3 | 6500 | 80 | 8 | 6 | 8 | 8 | 60 | 0,85 |
| 4 | 10500 | 115 | 20 | 5 | 8 | 25 | 100 | 0,8 |
| 5 | 10000 | 100 | 10 | 5 | 7 | 25 | 70 | 0,8 |
| 6 | 8900 | 80 | 10 | 5 | 7 | 21 | 63 | 0,8 |
| 7 | 12500 | 125 | 25 | 6 | 8 | 32 | 90 | 0,87 |
| 8 | 9500 | 100 | 15 | 6 | 8 | 22 | 70 | 0,87 |
| 9 | 6500 | 85 | 7,5 | 5 | 8 | 15 | 60 | 0,8 |
| 10 | 9500 | 60 | 7 | 6 | 8 | 26 | 70 | 0,82 |
| 11 | 8500 | 80 | 7 | 5 | 10 | 29 | 80 | 0,8 |
| 12 | 9500 | 105 | 15 | 7 | 8 | 22 | 78 | 0,87 |
| 13 | 9000 | 90 | 9 | 6 | 7 | 30 | 100 | 0,85 |
| 14 | 7500 | 80 | 10 | 7 | 8 | 25 | 60 | 0,85 |
| 15 | 7000 | 65 | 7 | 6 | 5 | 20 | 70 | 0,8 |
| 16 | 8000 | 70 | 5 | 6 | 7 | 15 | 60 | 0,87 |
| 17 | 10000 | 120 | 6 | 6 | 7 | 20 | 80 | 0,87 |
| 18 | 8700 | 80 | 4 | 5 | 6 | 12 | 70 | 0,85 |
| 19 | 11000 | 100 | 5 | 6 | 7 | 10 | 100 | 0,85 |
| 20 | 9300 | 80 | 10 | 5 | 5 | 10 | 70 | 0,8 |

**Задача 2.6** Определить число витков в обмотках однофазного двухобмоточного трансформатора и коэффициент трансформации, если известно: номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток *U*вн , кВ, *U*нн, кВ, максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода *B*max, Тл, площадь поперечного сечения стержня *Q*ст, м2, коэффициент заполнения стержня сталью kс, частота переменного тока *f*=50 Гц.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар. | Uвн , кВ | Uнн, кВ | Bmax, Тл | Qст, м2 | kс | № вар. | Uвн , кВ | Uнн, кВ | Bmax, Тл | Qст, м2 | kс |
| 1 | 6,3 | 0,23 | 1,5 | 0,024 | 0,9 | 11 | 0,042 | 0,006 | 1,3 | 0,02 | 0,95 |
| 2 | 3,15 | 0,12 | 1,4 | 0,025 | 0,92 | 12 | 0,208 | 0,012 | 1,3 | 0,03 | 0,94 |
| 3 | 1,2 | 0,006 | 1,55 | 0,022 | 0,93 | 13 | 0,63 | 0,12 | 1,4 | 0,02 | 0,9 |
| 4 | 0,63 | 0,006 | 1,3 | 0,015 | 0,94 | 14 | 3,15 | 0,115 | 1,5 | 0,04 | 0,92 |
| 5 | 0,4 | 0,012 | 1,4 | 0,01 | 0,95 | 15 | 0,4 | 0,006 | 1,55 | 0,025 | 0,93 |
| 6 | 0,23 | 0,012 | 1,45 | 0,07 | 0,9 | 16 | 0,12 | 0,006 | 1,3 | 0,015 | 0,94 |
| 7 | 0,208 | 0,062 | 1,35 | 0,08 | 0,92 | 17 | 6,3 | 0,12 | 1,4 | 0,03 | 0,95 |
| 8 | 0,12 | 0,042 | 1,6 | 0,05 | 0,93 | 18 | 1.2 | 0,042 | 1,45 | 0, 04 | 0,9 |
| 9 | 0,115 | 0,042 | 1,55 | 0,06 | 0,94 | 19 | 0,62 | 0,012 | 1,35 | 0,03 | 0,93 |
| 10 | 0,062 | 0,012 | 1,45 | 0,04 | 0,95 | 20 | 0,23 | 0,012 | 1,6 | 0,02 | 0,92 |

**Задача 2.7** Для трехфазного трансформатора известно: Номинальная мощность *S*ном, кВА, номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток *U*вн, В, *U*нн, В, мощности холостого хода *P*0, Вт, и короткого замыкания *P*кз, Вт, ток холостого хода *I*0,% от номинального, напряжение короткого замыкания *U*к, % от номинального. Определить параметры Г-образной схемы замещения и составить ее, коэффициент трансформации k, для значений коэффициента нагрузки β = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 рассчитать и построить характеристики ; . Коэффициент мощности для активно-индуктивной нагрузки cosφ = 0,8.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | Группа  соединения обмоток | Sном, кВА | Uвн , В | Uнн, В | Uк, % | Pкз, Вт | P0, Вт | I0,% |
| 1 | Y/Y0-0 | 630 | 6000 | 400 | 4,5 | 7600 | 1680 | 2,3 |
| 2 | Y/Y0-0 | 630 | 3000 | 400 | 4,2 | 7600 | 1680 | 2,3 |
| 3 | Y/Y0-0 | 630 | 10000 | 690 | 4,7 | 5500 | 1080 | 2,3 |
| 4 | Y/Y0-0 | 400 | 10000 | 690 | 5 | 5500 | 1080 | 3,4 |
| 5 | Y/Y0-0 | 400 | 6300 | 400 | 5,3 | 5500 | 1080 | 3,4 |
| 6 | Y/Y0-0 | 400 | 6000 | 230 | 5,5 | 5500 | 1080 | 3,4 |
| 7 | Y/Y0-0 | 400 | 6000 | 400 | 4,8 | 5500 | 1080 | 2,8 |
| 8 | Y/Y0-0 | 250 | 6000 | 400 | 4 | 5500 | 1080 | 2,8 |
| 9 | Y/Δ-11 | 250 | 3000 | 690 | 5,2 | 5500 | 780 | 2,8 |
| 10 | Y/Δ-11 | 250 | 3000 | 400 | 4,5 | 5500 | 780 | 4,3 |
| 11 | Y/Δ-11 | 250 | 10000 | 400 | 4,7 | 4200 | 780 | 4,3 |
| 12 | Y/Δ-11 | 250 | 6000 | 400 | 4,8 | 4200 | 780 | 3,6 |
| 13 | Y/Δ-11 | 160 | 3000 | 690 | 5,3 | 4200 | 540 | 3,6 |
| 14 | Y/Δ-11 | 160 | 3000 | 690 | 5,5 | 3700 | 540 | 4,2 |
| 15 | Y/Δ-11 | 160 | 3000 | 400 | 4,8 | 3700 | 540 | 3,6 |
| 16 | Y/Δ-11 | 100 | 6000 | 230 | 4 | 3700 | 540 | 2,8 |
| 17 | Y/Y0-0 | 100 | 2000 | 400 | 5,2 | 3100 | 400 | 2,8 |
| 18 | Y/Y0-0 | 100 | 2000 | 400 | 4,5 | 3100 | 400 | 4,4 |
| 19 | Y/Y0-0 | 100 | 6000 | 690 | 4,7 | 2650 | 230 | 2,8 |
| 20 | Y/Y0-0 | 63 | 3000 | 400 | 4,8 | 2650 | 230 | 3,6 |

**Контрольные вопросы**

1. Какое устройство называется трансформатором?
2. Назначение трансформаторов.
3. Классификация трансформаторов.
4. Устройство и принцип действия трансформатора.
5. Коэффициент трансформации.
6. Группы соединения обмоток однофазного трансформатора.
7. Группы соединения обмоток трехфазного трансформатора.
8. Нормальные режимы работы трансформаторов.
9. Аварийные режимы работы трансформаторов.
10. Потери энергии и КПД трансформаторов.

**3. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ (АМ)**

**Основные понятия и определения**

*Асинхронными* называют машины переменного тока, при работе которых возбуждается вращающееся магнитное поле, но скорость вращения поля отличается от скорости вращения ротора. Асинхронные машины обладают свойством обратимости, т.е. могут работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора, однако, в режиме двигателя АМ имеют лучшие рабочие характеристики, поэтому в основном используются в качестве двигателей (АД).

Благодаря простоте и надежности конструкции АД нашли широкое применение в различных областях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

*Устройство АМ*

Неподвижная часть машины называется *статор*, подвижная – *ротор*. Сердечник статора набирается из круглых листов электротехнической стали со штампованными пазами. В пазы закладывается *трёхфазная обмотка* (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия.

Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых *фазами*. Начала фаз обозначаются буквами с1, с2, с3, концы – с4, с5, с6.

Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник в зависимости от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 660/380, Y/∆. Данный двигатель можно включать в сеть с *U*л=660 В по схеме звезда или в сеть с *U*л=380В – по схеме треугольник.

Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающего магнитного поля.

*Сердечник ротора* набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: *короткозамкнутая и фазная*. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами). В пазы сердечника короткозамкнутого ротора укладывают стержневую обмотку или заливают расплавленный алюминий. Кольца-перемычки накоротко замыкают обмотку ротора по концам (отсюда и название – короткозамкнутый). Жесткая система стержней с кольцами называется «беличья клетка». В отличие от короткозамкнутого ротора, в пазах фазного ротора размещают обмотку, выполненную по типу обмотки статора. Концы обмотки подводят к контактным кольцам, укреплённым на валу. По кольцам скользят щетки, соединяя обмотку с пусковым или регулировочным реостатом. Асинхронные электродвигатели с фазным ротором являются более дорогостоящими устройствами, требуют квалифицированного обслуживания, менее надёжны, а потому применяются только в тех отраслях производства, в которых без них обойтись нельзя. Их использование обосновано в следующих случаях:

когда двигатели с короткозамкнутым ротором неприемлемы по условиям регулирования частоты вращения;

когда статический момент сопротивления на валу при пуске  велик и поэтому асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с пуском при пониженном напряжении неприемлем, а прямой пуск такого двигателя недопустим по условиям воздействия больших пусковых токов на сеть;

когда приводимые в движение массы настолько велики, что выделяемая во вторичной цепи двигателя тепловая энергия вызывает недопустимый нагрев короткозамкнутой обмотки ротора.

На рисунке 3.1 приведен вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (КЗР): 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.

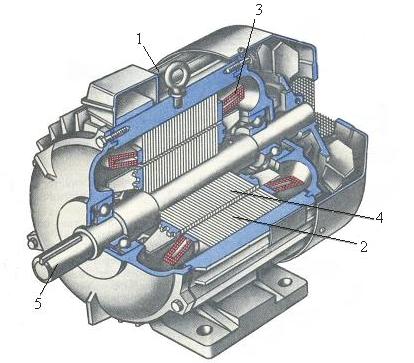


Рис. 3.1 устройство АД с КЗР

*Число пар полюсов АД*

У асинхронного двигателя число пар полюсов определяется по формуле



Для частоты f = 50 Герц число полюсов соответствует синхронной частоте.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *p* | 1 | 2 | 3 | 4 |
| *n0* | 3000 | 1500 | 1000 | 750 |

Конструктивно число полюсов АД формируется исключительно схемой обмотки статора - числом пазов в статоре и количеством слоев в пазу. У трехфазного АД число пазов в статоре всегда кратно 6. Визуально для трехфазного двигателя число пар полюсов определяется так – достаточно подсчитать число пазов на статоре, поделить на три (фазы) , затем на 2 (пары полюсов) и на число катушечных групп (количества обмоток соединенных последовательно и параллельно – для этого необходимо знать схему обмотки) Переключение схем обмоток позволяет изменять число пар полюсов и скорость двигателя. В последние годы разработаны схемы обмоток, дающие возможность путем переключения катушечных групп изменять числа полюсов. Особенность этих схем заключается в специфической компоновке катушечных групп из разновитковых катушек, при которой изменение точек подсоединения обмотки к питающей сети приводит не только к изменению полярности отдельных катушечных групп, но и к переключению групп между фазами или даже к отключению отдельных катушек. При переключениях изменяется и амплитуда МДС обмотки при разных числах полюсов, поэтому такой метод построения схем называют полюсно-амплитудной модуляцией (ПАМ) . Для трехскоростных и четырехскоростных асинхронных двигателей используют оба принципа изменения числа полюсов: устанавливают две независимые обмотки, каждая из которых (в четырехскоростных) или одна из них (в трехскоростных двигателях) выполняется полюснопереключаемой.

*Принцип действия АД*

Преобразование электрической энергии в механическую в трехфазном асинхронном двигателе осуществляется посредством вращающегося магнитного поля, для возбуждения которого фазы статорной обмотки смещают в пространстве угол 1200 и подключают к сети трехфазного переменного тока. При включении двигателя в трехфазную сеть в обмотке статора протекают токи одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 1/3 периода. Токи фаз обмотки создают магнитное поле, вращающееся относительно статора с частотой n0, об/мин, которая называется синхронной частотой вращения двигателя. Вращаясь, поле пересекает проводники обмотки ротора, наводя в них ЭДС. При замкнутой обмотке ротора ЭДС вызывает токи, взаимодействие которых с вращающимся магнитным полем вызывает вращающий электромагнитный момент. Частота вращения ротора *n* в двигательном режиме асинхронной машины всегда меньше частоты вращения поля, т.е. ротор «отстает» от вращающегося поля. В противном случае в проводниках ротора не будет наводиться ЭДС, следовательно, не будет протекать ток и не возникнет вращающий момент. Относительная разность скоростей ротора и магнитного поля называется скольжением *s*:



*Механическая характеристика АД*

Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента *n*=*f*(*M*).

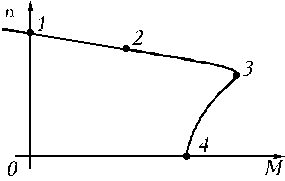


Рис. 3.2

Участок 1-3 соответствует устойчивой работе, участок 3-4 – неустойчивой работе.

1 – идеальный холостой ход двигателя, когда *n*=*n*0.

2 – номинальный режиму работы двигателя

3 – соответствует критическому моменту *M*кр и критической частоте вращения *n*кр.

4 – соответствует пусковому моменту двигателя *M*пуск

*Способы пуска АД*

Основными характеристиками пуска являются величина пускового момента и величина пускового тока.

Ротор двигателя придет во вращение и достигнет номинальной частоты вращения, если развиваемый двигателем пусковой момент будет больше момента сопротивления на валу, создаваемого приводимым механизмом. При пуске ряда механизмов (шаровых мельниц, компрессоров и т. д.) требуется значительный пусковой момент, равный номинальному или превышающий его. Пусковой ток необходимо ограничить значением, не опасным для нормального режима работы сети, механической и термической прочности основных элементов двигателя. Схема пуска должна быть по возможности простой, а число и стоимость пусковых устройств минимальными.

Наиболее простым способом пуска двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора. Такой способ пуска называют *прямым пуском*. Двигатели обычно пускают с помощью электромагнитного выключателя.

Недостатком данного способа пуска является сравнительно небольшой пусковой момент при значительном броске пускового тока. При электрических сетях сравнительно небольшой мощности такой бросок тока может вызвать значительное понижение напряжения, нежелательное для других потребителей.

Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируют с таким расчетом, чтобы они по значению возникающих электродинамических усилий, действующих на обмотки, и по условиям нагрева обмоток допускали прямой пуск.

Величину пусковых токов можно уменьшить за счет изменения конструкции роторных обмоток, включения в сеть ротора добавочных сопротивлений, снижения напряжения питающей сети. Первые два способа, уменьшая пусковые токи, сохраняют достаточно высокие значения пусковых моментов. Применение третьего способа неизбежно приводит к уменьшению пускового и критического моментов, зависящих от второй степени питающего напряжения.

Если по условиям падения напряжения в сети прямой пуск двигателя с короткозамкнутым ротором невозможен, применяют различные способы пуска при пониженном напряжении. Способы пуска применяют для высоковольтных двигателей большой мощности при их пуске на холостом ходу или при незначительной нагрузке.

*Автотрансформаторный пуск*осуществляют подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор.

*Пуск двигателей переключением «звезда − треугольник»* возможен в двигателях (при выведенных всех шести концах обмотки статора), предназначенных работать по схеме соединения обмоток статора в «треугольник» и приводящих в ход механизмы с малыми пусковыми моментами.

Если на период пуска обмотку статора переключить на схему «звезда», а питающее напряжение оставить тем же, что и при схеме «треугольник», то напряжение на фазу уменьшится в . В  уменьшится и фазный ток, а электромагнитный момент – в три раза, так как . В период пуска уменьшится в три раза (по сравнению со схемой «треугольник») и линейный ток. Работа двигателей в схеме «звезда» выгодна для нагрузок, не превышающих 40−50 % от номинальной: КПД и коэффициент мощности заметно повышаются.

Для двигателей с фазным ротором применяют *реостатный* способ пуска.

Включение в цепь фазного ротора добавочного активного сопротивления в виде пускового реостата не только снижает пусковые токи, но и увеличивает пусковой момент. В конце пуска пусковой реостат полностью выводят, обмотка ротора замыкается накоротко, и двигатель переходит на работу по естественной характеристике, разгоняясь до частоты вращения, соответствующей моменту нагрузки на валу двигателя. Ток статорной обмотки и частота вращения достигают установившихся значений, соответствующих моменту на валу двигателя.

### *Регулирование частоты вращения АД*

Частота вращения АД определяется по формуле:



Скорость вращения двигателей с короткозамкнутым ротором регулируется следующими способами:

1. *Изменением частоты* ***f*** питающего напряжения. Для этого необходимо иметь автономный источник питания АД. Система получается довольно громоздкой. В последнее время всё чаще применяются полупроводниковые преобразователи частоты (тиристоры). Частное регулирование – это плавное регулирование.

2. *Изменением числа пар полюсов*. Выпускаются двигатели с короткозамкнутым ротором, допускающие пересоединение катушек в одной из фаз – это многоскоростные АД позволяют регулировать скорость вращения ротора ступенчато. Такое регулирование скорости экономично.

3. *Изменением скольжения.* Этот способ применяется для АД с фазным ротором. Регулирование осуществляется при помощи регулировочных реостатов, подключаемых к обмотке ротора через щётки и контактные кольца

4. *Изменением напряжения.*

Вращающий момент АД пропорционален квадрату питающего напряжения, поэтому меняя напряжение можно изменить частоту вращения двигателя. Диапазон регулирования частоты вращения этим способом очень мал. Для изменения напряжения на обмотке статора АД можно использовать автотрансформаторы, магнитные усилители, тиристорные регуляторы напряжения.

*Реверсирование АД*

Реверсирование – изменение направления вращения. Т.к. ротор асинхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и магнитное поле, для изменения направления вращения ротора необходимо изменить направление вращения магнитного поля. Для этого достаточно поменять местами два линейных провода трехфазной обмотки.

**Основные формулы для решения задач**

Магнитный поток на полюс

Ф = *B*ср τ *l* , Вб

где *B*ср – среднее значение магнитной индукции, Тл

τ - полюсное деление

*l –* ширина пакета магнитопровода статора

ЭДС в фазных обмотках статора и неподвижного ротора

*E1 =4,44 fk1 w1Фmax;; E2 =4,44 f k2 w2Фmax*

*w1* и*w2*– число витков обмотки статора и ротора соответственно

k1  и k2 – обмоточные коэффициенты

Коэффициент трансформации

*k= w1 k1 / w2 k2*

ЭДС вращающегося ротора

*E2 =4,44 f sном k2 w2Фmax*

Номинальное скольжение *s*ном

,

где *n*0 – частота вращения магнитного поля , об/мин;

*nном* – номинальная частота вращения ротора, об/мин;

*n = n0(1 - s)*

,

*f* – частота питающего напряжения, Гц; *p* – число пар полюсов,

Угловая скорость вращения магнитного поля , с-1



Угловая скорость вращения ротора, с-1

Частота ЭДС. и тока в обмотке вращающегося ротора

*f р= fs*,

Мощность, потребляемая двигателем

P1ном = Pном/η,

где *Pном* , Вт – номинальная мощность

η - КПД двигателя,

,

где Σ- мощность потерь в двигателе,

механическая мощность на валу

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем

*M*=*C*м Фm *I*р *cosφ*.р,

где Cм – коэффициент, зависящий о конструктивных особенностей машины

Номинальный момент , Н·м

, если Pном  в кВт,

, если Pном  в Вт

Максимальный момент

,

где *R* – активное сопротивление фазной обмотки статора

*X*к – индуктивное сопротивление двигателя

Формула Клосса (для построения механической характеристики)

Критическое скольжение

,

где λ – коэффициент перегрузки по моменту

При подключении реостата к фазному ротору асинхронного двигателя, критическое скольжение можно определить по формуле:

Где R2 - активное сопротивления обмотки ротора, Ом ;

Rд – добавочное сопротивление реостата, Ом

**Задача 3.1** Частота вращения ротора асинхронного двигателя *n*, об/мин, частота питающего напряжения *f*=50 Гц. Определить число пар полюсов *p*, скольжение s, и частоту тока в обмотке вращающегося ротора *f р.*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| n, об/мин | 570 | 730 | 980 | 1450 | 2970 | 1470 | 970 | 740 | 580 | 2980 |
| вариант | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| n, об/мин | 720 | 960 | 1480 | 2990 | 560 | 955 | 590 | 740 | 2890 | 2900 |

**Задача 3.2**

Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором известно: номинальные напряжение *U*ном, мощность Pном, скольжение sном,% ; коэффициент перегрузки по моменту λ, отношения , . Определить потребляемую двигателем мощность, номинальный, максимальный и пусковой моменты; номинальный и пусковой токи; номинальной и критическое скольжение . По формуле Клосса построить механическую характеристику для значений скольжения s = 0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; sном; sкр.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *U*ном, В | *P*ном, кВт | *s*ном,% | *cosφ* | λ |  |  |  |
| n0 = 3000 об/ мин | | | | | | | | |
| 1 | 220 | 10 | 2 | 0,85 | 2 | 1,1 | 5 | 0,86 |
| 2 | 220 | 15 | 2 | 0,85 | 2 | 1,2 | 7 | 0,86 |
| 3 | 220 | 20 | 2 | 0,87 | 2 | 1,3 | 5 | 0,87 |
| 4 | 220 | 30 | 3 | 0,87 | 2 | 1,4 | 6 | 0,88 |
| 5 | 220 | 40 | 3 | 0,88 | 2 | 1,5 | 6 | 0,885 |
| 6 | 220 | 25 | 3 | 0,9 | 2 | 1,6 | 6 | 0,89 |
| 7 | 380 | 40 | 4 | 0,85 | 2 | 1,7 | 6 | 0,9 |
| 8 | 380 | 50 | 4 | 0,87 | 2 | 1,1 | 7 | 0,86 |
| 9 | 380 | 60 | 4 | 0,87 | 2 | 1,2 | 7 | 0,86 |
| 10 | 380 | 70 | 5 | 0,88 | 2 | 1,3 | 7 | 0,87 |
| n0 = 1500 об/ мин | | | | | | | | |
| 11 | 380 | 45 | 5 | 0,9 | 2 | 1,4 | 5,5 | 0,88 |
| 12 | 380 | 55 | 5 | 0,85 | 2,2 | 1,5 | 5,5 | 0,885 |
| 13 | 380 | 35 | 3,5 | 0,87 | 2,2 | 1,6 | 6,5 | 0,89 |
| 14 | 380 | 30 | 3,5 | 0,87 | 2,2 | 1,7 | 6,5 | 0,9 |
| 15 | 220 | 8 | 3,5 | 0,88 | 2,2 | 1,1 | 7 | 0,86 |
| 16 | 220 | 6 | 3,5 | 0,9 | 2,2 | 1,5 | 7 | 0,86 |
| 17 | 220 | 12 | 2,5 | 0,9 | 2,2 | 1,6 | 5,5 | 0,87 |
| 18 | 220 | 17 | 2.5 | 0,9 | 2,2 | 1,7 | 5,5 | 0,88 |
| 19 | 220 | 22 | 2,5 | 0,85 | 2,2 | 1,1 | 6,5 | 0,885 |
| 20 | 220 | 5 | 2.5 | 0,85 | 2,2 | 1,2 | 6,5 | 0,89 |

**Задача 3.3** Определить КПД трехфазного АД. Известно: линейное напряжение сети Uл, В; ток в обмотке статора Iст, А, коэффициент мощности cosφ, мощность суммарных потерь пот,Вт..

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | Uл, В | Iст, А | cosφ | пот,Вт | вариант | Uл, В | Iст, А | cosφ | пот,Вт |
| 1 | 380 | 22 | 0,78 | 1000 | 11 | 380 | 29 | 0,85 | 920 |
| 2 | 220 | 24 | 0,8 | 900 | 12 | 220 | 20 | 0,87 | 1050 |
| 3 | 380 | 30 | 0,82 | 800 | 15 | 380 | 34 | 0,75 | 870 |
| 4 | 220 | 26 | 0,85 | 1200 | 14 | 220 | 22 | 0,83 | 1130 |
| 5 | 380 | 35 | 0,87 | 1100 | 15 | 380 | 31 | 0,87 | 930 |
| 6 | 220 | 25 | 0,75 | 1150 | 16 | 220 | 21 | 0,78 | 1250 |
| 7 | 380 | 32 | 0,83 | 950 | 17 | 380 | 27 | 0,8 | 960 |
| 8 | 220 | 28 | 0,87 | 1300 | 18 | 220 | 18 | 0,82 | 1080 |
| 9 | 380 | 33 | 0,78 | 850 | 19 | 380 | 30 | 0,85 | 1010 |
| 10 | 220 | 23 | 0,82 | 980 | 20 | 220 | 19 | 0,87 | 920 |

**Задача 3.4** Для трехфазного АД известно: число полюсов 2р, частота напряжения сети *f* = 50 Гц, вращающий момент Мвр, Н·м, скольжение s, %, мощность суммарных потерь пот, кВт. Найти КПД.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | 2р | Мвр, Н·м | s, % | пот,кВт | вариант | 2р | Мвр, Н·м | s, % | пот,кВт |
| 1 | 1 | 58 | 8 | 1,5 | 11 | 3 | 56 | 5 | 0,92 |
| 2 | 2 | 60 | 5 | 0,9 | 12 | 4 | 61 | 2 | 1,05 |
| 3 | 3 | 62 | 2 | 0,8 | 15 | 1 | 65 | 4 | 0,87 |
| 4 | 4 | 63 | 4 | 1,2 | 14 | 2 | 72 | 8 | 1,13 |
| 5 | 1 | 55 | 7 | 1,1 | 15 | 3 | 59 | 5 | 0,93 |
| 6 | 2 | 60 | 3 | 1,15 | 16 | 4 | 58 | 2 | 1,25 |
| 7 | 3 | 63 | 6 | 0,95 | 17 | 1 | 64 | 4 | 0,96 |
| 8 | 4 | 70 | 2 | 1,3 | 18 | 2 | 67 | 7 | 1,08 |
| 9 | 1 | 68 | 4 | 0,85 | 19 | 3 | 59 | 3 | 1,01 |
| 10 | 2 | 71 | 7 | 0,98 | 20 | 4 | 54 | 6 | 0,92 |

**Задача 3.5** Определить коэффициент трансформации; действующие значения ЭДС в фазах статора, неподвижного и вращающегося ротора асинхронного двигателя, если известно: частота напряжения сети *f* = 50 Гц; амплитудное значение магнитного потока Фmax, Вб; скольжение s, %, число витков обмотки статора и ротора *w1* и*w2*; обмоточные коэффициенты k1  = 0,94 и k2 = 0,96;

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *w1* | *w2* | s, % |  | вариант | *w1* | *w2* | s, % |  |
| 1 | 180 | 20 | 8 | 0,02 | 11 | 160 | 20 | 5 | 0,014 |
| 2 | 220 | 15 | 5 | 0,025 | 12 | 170 | 10 | 2 | 0,021 |
| 3 | 210 | 10 | 2 | 0,018 | 15 | 180 | 15 | 4 | 0,017 |
| 4 | 200 | 20 | 4 | 0,022 | 14 | 190 | 25 | 8 | 0,02 |
| 5 | 190 | 20 | 7 | 0,015 | 15 | 200 | 20 | 5 | 0,025 |
| 6 | 170 | 10 | 3 | 0,01 | 16 | 210 | 20 | 2 | 0,018 |
| 7 | 230 | 15 | 6 | 0,012 | 17 | 220 | 20 | 4 | 0,022 |
| 8 | 250 | 25 | 2 | 0,014 | 18 | 175 | 15 | 7 | 0,015 |
| 9 | 185 | 15 | 4 | 0,021 | 19 | 165 | 10 | 3 | 0,01 |
| 10 | 195 | 20 | 7 | 0,017 | 20 | 190 | 20 | 6 | 0,012 |

**Задача 3.6** Для асинхронного двигателя с фазным ротором определить сопротивление пускового реостата, если известно: номинальное скольжение sном, коэффициент перегрузки по моменту λ =2,2; активное сопротивление фазы обмотки ротора R2, Ом и критическое скольжение при подключенном реостате .

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | sном, | . | R2, Ом | вариант | sном, | . | R2, Ом |
| 1 | 0,02 | 0,7 | 0,02 | 11 | 0,06 | 0,75 | 0,0178 |
| 2 | 0,03 | 0,8 | 0,018 | 12 | 0,07 | 0,8 | 0,0183 |
| 3 | 0,04 | 0,85 | 0,019 | 13 | 0,08 | 0,85 | 0,0192 |
| 4 | 0,05 | 0,85 | 0,022 | 14 | 0,02 | 0,65 | 0,024 |
| 5 | 0,06 | 0,9 | 0,0175 | 15 | 0,03 | 0,7 | 0,0188 |
| 6 | 0,07 | 0,95 | 0,0195 | 16 | 0,04 | 0,75 | 0,0191 |
| 7 | 0,08 | 0,95 | 0,021 | 17 | 0,05 | 0,77 | 0,0187 |
| 8 | 0,02 | 0,6 | 0,0185 | 18 | 0,06 | 0,8 | 0,0194 |
| 9 | 0,04 | 0,65 | 0,0197 | 19 | 0,07 | 0,82 | 0,0196 |
| 10 | 0,05 | 0,7 | 0,0186 | 20 | 0,08 | 0,9 | 0,0198 |

**Контрольные вопросы**

1. Какие электрические машины называются асинхронными?
2. Устройство асинхронной машины с КЗР.
3. Устройство асинхронной машины с ФР.
4. Способы соединения обмоток статора.
5. Принцип действия АД.
6. Дайте определение понятию «скольжение»
7. Число пар полюсов АМ.
8. Способы пуска АД.
9. Регулирование частоты вращения АД
10. Реверсирование АД

**4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Основные понятия и определения**

*Машина постоянного тока* (МПТ) представляет собой электрическую машину с механическим преобразователем частоты в цепи якоря и поэтому имеет обращенное исполнение. Машины постоянного тока применяются как в качестве [электродвигателей](http://www.mtomd.info/archives/tag/%d1%8d%d0%bb%d0%b5%d0%ba%d1%82%d1%80%d0%be%d0%b4%d0%b2%d0%b8%d0%b3%d0%b0%d1%82%d0%b5%d0%bb%d0%b8), так и в качестве генераторов.

*Области применения машин постоянного тока*

Двигатели постоянного тока (ДПТ), в отличие от двигателей [переменного тока](http://www.mtomd.info/archives/tag/%d0%bf%d0%b5%d1%80%d0%b5%d0%bc%d0%b5%d0%bd%d0%bd%d1%8b%d0%b9-%d1%82%d0%be%d0%ba), обладают хорошими регулировочными свойствами и могут иметь механические характеристики*,* удовлетворяющие требованиям большинства рабочих механизмов. Поэтому двигатели постоянного тока широко используются на транспорте (магистральные электровозы, тепловозы, пригородные электропоезда, метрополитен, трамваи, троллейбусы), в [станках](http://www.mtomd.info/archives/2135), [прокатных станах](http://www.mtomd.info/archives/tag/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%BA%D0%B0), кранах, судовых установках. В большинстве автомобилей, тракторов, самолетов и других летательных аппаратов двигатели постоянного тока приводят во вращение все вспомогательное оборудование. Широкое распространение получили генераторы постоянного тока специального назначения (сварочные генераторы, генераторы для освещения поездов, электромашинные усилители постоянного тока, возбудители синхронных машин).

Недостатком машин постоянного тока является их относительно высокая стоимость, а также наличие скользящего контакта между щетками и коллектором. В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники ведутся работы по замене механического коллектора полупроводниковым преобразователем. Однако, несмотря на большие усилия, направленные на создание полупроводниковых преобразователей частоты, электроприводы с такими преобразователями оказываются в 1,5 – 2,5 раза тяжелее и дороже электроприводов с двигателями постоянного тока. Поэтому выпуск машин постоянного тока не сокращается, и они находят все новые области применения.

*Устройство МПТ*

Неподвижная часть МПТ – статор 1, представляет собой станину, на которой укреплены главные полюсы 2 с обмоткой возбуждения 6, необходимые для создания главного магнитного потока, между главными полюсами устанавливают дополнительные полюсы 3, улучшающие условия коммутации машины. Вращающаяся часть МПТ называется якорем 4. Якорь состоит из ротора, представляющего собой зубчатый сердечник, в пазы которого уложена якорная обмотка 5, и коллектора. Коллектор жестко крепится на валу ротора рядом с сердечником якоря. Для обеспечения электрической связи с внешней цепью служат щетки 7.

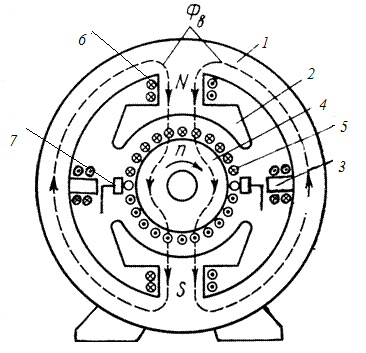
****

Рис. 4.1 Устройство МПТ

*Классификация машин постоянного тока*

Машины постоянного тока (двигатели и генераторы) различают по способу включения обмоток главных полюсов или возбуждения в сеть (рис. 4.2):

* машины постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 4.2, а), электрическая цепь обмотки возбуждения является независимой от силовой цепи ротора; для генераторов это практический единственный вариант схемного решения;
* машины постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 4.2, б), обмотка возбуждения включается параллельно с цепью якоря;
* машины постоянного тока с последовательным возбуждением (рис. 4.2, в) обмотка статора включается последовательно с обмоткой ротора, что обуславливает зависимость магнитного потока от тока якоря; на практике такой способ возбуждения используются редко;
* машины постоянного тока со смешанным возбуждением (рис. 4.2, г), присутствуют две обмотки возбуждения: параллельно и последовательно включенные с цепью якоря.

*Принцип действия ГПТ*

Якорь вращается первичным двигателем, магнитное поле возбуждено, а цепь якоря соединена через щетки с приемником. При этом под действием ЭДС, индуцируемой в обмотках якоря, в замкнутой цепи якорь-приемник, возникает ток, совпадающий по направлению с ЭДС. Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем вызывает тормозной момент, который преодолевается первичным двигателем, таким образом, происходит преобразование механической энергии в электрическую.

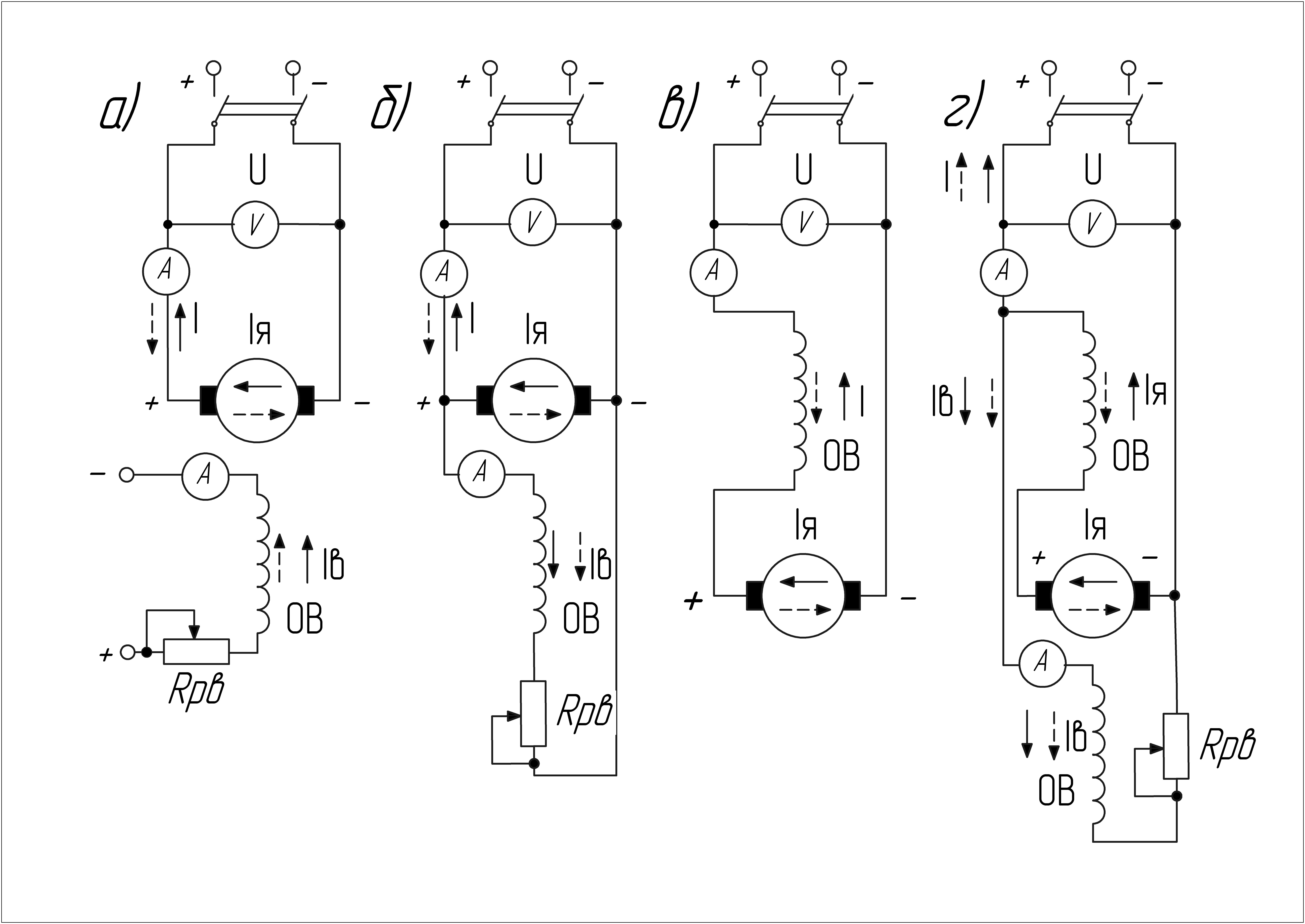


Рис. 4.2 Способы включения обмоток возбуждения в сеть

*Принцип действия ДПТ*

Цепи якоря и возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии. Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает вращающий момент, под действием которого якорь преодолевает момент нагрузки на валу. Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую. При этом ЭДС якоря противодействует току в цепи якоря и направлена ему на встречу.

*Способы пуска ДПТ.*

При пуске двигатель разгоняется до определенной скорости вращения. Пуск продолжается до нескольких секунд. *В момент пуска в цепи якоря двигателя может возникнуть большой пусковой ток.*

Пусковые качества двигателя тем выше, чем больше его пусковой момент при пусковом токе, не превышающем допустимый. Пуск ДПТ может быть *прямой, реостатный и при пониженном напряжении*.

Ток в цепи якоря при вращении двигателя создается небольшой разностью между напряжением и противо-ЭДС (ЭДС якоря, направленная навстречу току):



*При прямом пуске,* т.е. непосредственном включении якоря на номинальное напряжение сети, *пусковой ток* недопустимо большой – в 10 –30 раз превышает номинальный: .

Такой ток опасен для коллектора и сети, напряжение которой может значительно снизится. Поэтому часто применяют *реостатный* пуск двигателя – в цепь его якоря вводят добавочное сопротивление в виде специального пускового реостата. Сопротивление реостата выбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный в 2 – 2.5 раз (кратковременно допустимо). По мере увеличения скорости, противо-ЭДС якоря растет, ток уменьшается и сопротивление пускового реостата выводят, т.к. он рассчитан на кратковременное включение.

Двигатели малой мощности (до 1 кВт) имеют сравнительно большое сопротивление якоря, поэтому их включают в сеть без пусковых реостатов.

Ограничение пускового тока достигается также в случае пуска при пониженном напряжении, подводимом к якорю двигателя от источника с регулируемым напряжением в системе генератор – двигатель.

Для быстрого разгона двигателя необходим большой пусковой момент, который обеспечивается при ограниченном пусковом токе максимальным магнитным потоком двигателя. Чем короче пуск, тем меньше потери энергии в цепи якоря.

# *Механическая характеристика двигателя*

Это зависимость установившейся скорости вращения от момента двигателя при постоянном напряжении и сопротивлении цепи якоря.

Уравнение механической характеристики в общем виде:

(1)

Механические характеристики двигателей существенно зависят от способа возбуждения потока. При параллельном и независимом возбуждении поток практически постоянный, а в двигателях последовательного и смешанного возбуждения он зависит от нагрузки на валу. Поэтому в первом случае механическая характеристика представляется прямой (рис. 4.3), а во втором – гиперболой.

Механическая характеристика при *r*доб = 0 и Ф = Фн называется *естественной.*

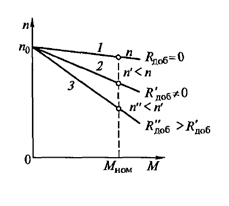


Рис. 4.3 Механическая характеристика ДПТ независимого

и параллельного возбуждения

*Регулирование скорости вращения. Реверсирование.*

Из уравнения механической характеристики видно, что регулировать скорость вращения ДПТ можно изменением напряжения *U* на якоре, потока возбуждения *Ф* и добавочного сопротивления *r*доб в цепи якоря. (М – независимая переменная).

*Реверсирование – изменение направления вращения двигателя можно достичь, изменив направление тока в ОВ или в якоре,* тогда направление вращающего момента изменится на обратное.

У двигателей с параллельным возбуждением регулировать скорость вращения можно двумя способами:

1. *Полюсное регулирование*- регулирование скорости изменения потока полюсов.

При значительном уменьшении тока возбуждения (особенно при обрыве цепи) ток якоря и скорость вращения нагруженного двигателя сильно возрастают, усиливается искрение щеток и появляется опасность механических повреждений двигателя. Это явление недопустимо, поэтому двигатель снабжают автоматической защитой, отключающей его от сети при чрезмерном уменьшении потока.

Полюсное регулирование обычно ведется на уменьшение потока при небольших нагрузках для увеличения скорости сверх номинальной.

При моментах нагрузки, близких к номинальному, с уменьшением потока ток якоря превысит номинальный, что в длительном режиме недопустимо.

Полюсное регулирование на уменьшение потока очень распространено, т.к. оно экономично и удобно.

Пусть двигатель вращается с постоянной скоростью, преодолевая постоянный момент сопротивления на валу. Уменьшим ток на возбуждения и поток. Переходный процесс установления нового значения скорости при уменьшенном потоке возбуждения протекает следующим образом. Т.к. скорость вращения вследствие инерции якоря в первые мгновения остается неизменной, то ЭДС якоря уменьшается. Даже при незначительном уменьшении потока и ЭДС, ток якоря резко увеличивается. Электромагнитный момент становится больше момента сопротивления. Это приводит к возрастанию скорости и ЭДС якоря. Но ЭДС уменьшает ток якоря. Уменьшается и вращающий момент. Когда вращающий момент двигателя вновь станет равен моменту сопротивления, увеличение скорости прекратится, процесс закончится установлением повышенной скорости вращения при *большем токе якоря* (т.к. поток уменьшен).

1. *Реостатное регулирование*

Регулирование скорости изменением сопротивления реостата в цепи якоря при постоянном напряжении и токе возбуждения.

При включении реостата в цепь якоря его ток и вращающий момент уменьшаются (Mвр < Mсопр) – двигатель начинает тормозиться. При этом уменьшается противо-ЭДС, отчего возрастают ток и момент двигателя. Когда

Mвр = Mсопр, изменение скорости прекращается, ток якоря достигает прежнего значения, а скорость остается пониженной.

*Реостатное регулирование* связано с большими потерями мощности в цепи якоря. Поэтому применяется только для двигателей малой мощности.

*Якорное регулирование* – безреостатное изменение напряжения на якоре. Применяется в двигателях независимого возбуждения. Для такого регулирования необходим отдельный источник, напряжение которого регулируется. Это осуществляется, например, в системе генератор – двигатель. Источником независимого возбуждения является генератор независимого возбуждения, вращаемый с постоянной скоростью первичным двигателем.

Регулировать скорость можно, изменяя небольшой ток возбуждения генератора. Пуск начинается при пониженном напряжении, которое можно плавно повышать – пусковой реостат не нужен.

Ток якоря и вращающий момент уменьшаются. При этом скорость вращения и противо-ЭДС падают, а ток якоря и вращающий момент увеличиваются. При равенстве моментов изменение скорости прекращается.

Используется для привода мощных двигателей.

Двигатель независимого возбуждения широко используется в схемах автоматики в качестве исполнительного двигателя с якорным регулированием.

**Основные формулы для решения задач**

Магнитный поток на полюс

*, Вб*

где - среднее значение магнитной индукции, Тл

- полюсное деление

*l –*длина сердечника якоря

ЭДС якоря

– коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей машины;

*N* – число активных проводников в обмотке якоря

*2а –*число параллельных ветвей в обмотке якоря

- угловая скорость вращения якоря, с-1

Номинальный ток ГПТ:

;

Номинальный ток ДПТ:

;

Электромагнитный момент

, Н·м

- ток якоря:

в ГПТ при параллельном и смешанном возбуждении:

в ДПТ при параллельном и смешанном возбуждении:

При независимом и последовательном возбуждении

*,*

Электромагнитная мощность

Напряжение на зажимах генератора постоянного тока

Напряжение двигателя постоянного тока

КПД двигателя η:

,

где Σ- мощность потерь в двигателе,

механическая мощность на валу

**Задача4.1** Для МПТ параллельного возбуждения известно: номинальный ток , А; коэффициент С = 124; магнитный поток Ф, Вб ; частота вращения якоря n, об/ мин; ток возбуждения , А; и сопротивление цепи якоря , Ом. Определить напряжение на зажимах машины при работе в режиме генератора и в режиме двигателя.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | , А | , А | , Ом |  | вариант | , А | , А | , Ом |  |
| n = 3000 об/ мин | | | | | n = 1000 об/ мин | | | | |
| 1 | 70 | 3,5 | 0,15 | 0,02 | 11 | 85 | 4 | 0,3 | 0,014 |
| 2 | 75 | 3,5 | 0,2 | 0,025 | 12 | 90 | 5 | 0,32 | 0,021 |
| 3 | 65 | 3 | 0,25 | 0,018 | 15 | 95 | 5 | 0,16 | 0,017 |
| 4 | 60 | 3 | 0,3 | 0,022 | 14 | 100 | 7 | 0,27 | 0,02 |
| 5 | 80 | 4 | 0,18 | 0,015 | 15 | 70 | 3 | 0,2 | 0,025 |
| n = 1500 об/ мин | | | | | n = 750 об/ мин | | | | |
| 6 | 85 | 4,5 | 0,19 | 0,01 | 16 | 100 | 4 | 0,18 | 0,018 |
| 7 | 90 | 5 | 0,1 | 0,012 | 17 | 120 | 4 | 0,22 | 0,022 |
| 8 | 95 | 5 | 0,125 | 0,014 | 18 | 85 | 3 | 0,26 | 0,015 |
| 9 | 100 | 5 | 0,13 | 0,021 | 19 | 160 | 3 | 0,135 | 0,01 |
| 10 | 70 | 3 | 0,14 | 0,017 | 20 | 180 | 4 | 0,14 | 0,012 |

**Задача 4.**2 Для генератора постоянного тока известно: магнитный поток Ф, Вб, ЭДС якоря =230В, коэффициент С. Определить частоту вращения якоря n, об/ мин.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Ф, Вб, | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,015 | 0,022 | 0,045 | 0,035 | 0,065 | 0,025 | 0,055 |
| С | 126 | 134 | 142 | 156 | 160 | 148 | 152 | 128 | 130 | 144 |
| вариант | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Ф, Вб, | 0,045 | 0,035 | 0,065 | 0,025 | 0,055 | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,015 | 0,022 |
| С | 146 | 132 | 136 | 138 | 150 | 154 | 158 | 124 | 138 | 148 |

**Задача 4.3** Определить номинальный вращающий момент ДПТ, мощность потерь и КПД, если известно: номинальная мощность двигателя *P*ном, кВт; номинальное напряжение *U*ном = 220В; номинальный ток , А; частота вращения якоря n, об/ мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *P*ном, кВт | , А | n, об/ мин | вариант | *P*ном, кВт | , А | n, об/ мин |
| 1 | 1,5 | 9 | 3000 | 11 | 15 | 85 | 750 |
| 2 | 2,2 | 12 | 1500 | 12 | 18,5 | 100 | 750 |
| 3 | 3 | 17,1 | 1000 | 13 | 22 | 120 | 750 |
| 4 | 4 | 21,6 | 3000 | 14 | 30 | 160 | 1000 |
| 5 | 5,5 | 30,5 | 1500 | 15 | 2,2 | 13,3 | 1000 |
| 6 | 7,5 | 40,3 | 1000 | 16 | 4 | 26,7 | 1500 |
| 7 | 11 | 59 | 3000 | 17 | 3 | 17,2 | 1500 |
| 8 | 15 | 79 | 1500 | 18 | 1,5 | 9,3 | 1000 |
| 9 | 18,5 | 102 | 1000 | 19 | 2,2 | 12,5 | 3000 |
| 10 | 22 | 112,5 | 3000 | 20 | 3 | 16,5 | 3000 |

**Задача 4.4** Для ДПТ известно: номинальное напряжение *U*ном, В; частота вращения n, об/ мин; коэффициент *C*; магнитный поток Ф, Вб и сопротивление якоря , Ом. Определить ток якоря , А и электромагнитный момент ,.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *U*ном, В | n, об/ мин | *C* | , Ом | Ф, Вб |
| 1 | 110 | 800 | 148 | 1,29 | 0,009 |
| 2 | 220 | 750 | 154 | 27,2 | 0,007 |
| 3 | 440 | 1000 | 160 | 4,54 | 0,012 |
| 4 | 110 | 750 | 162 | 5,84 | 0,014 |
| 5 | 220 | 1120 | 144 | 2,52 | 0,008 |
| 6 | 110 | 1060 | 156 | 3,99 | 0,015 |
| 7 | 220 | 1500 | 152 | 10.61 | 0,013 |
| 8 | 440 | 750 | 148 | 0,11 | 0,009 |
| 9 | 110 | 2360 | 154 | 1 | 0,007 |
| 10 | 220 | 2360 | 160 | 3,99 | 0,012 |
| 11 | 440 | 1500 | 162 | 2,28 | 0,014 |
| 12 | 110 | 3000 | 144 | 0,2 | 0,008 |
| 13 | 220 | 1000 | 156 | 7,05 | 0,015 |
| 14 | 110 | 1000 | 152 | 1,79 | 0,013 |
| 15 | 220 | 2200 | 148 | 0,788 | 0,009 |
| 16 | 440 | 2240 | 154 | 0,906 | 0,007 |
| 17 | 110 | 2120 | 160 | 0,196 | 0,012 |
| 18 | 220 | 800 | 162 | 5,07 | 0,014 |
| 19 | 440 | 2360 | 144 | 0,279 | 0,008 |
| 20 | 110 | 3150 | 156 | 0,084 | 0,015 |

**Задача 4.5** Определить токи , А, , А; , А, ДПТ параллельного возбуждения, если известно: *P*ном, кВт; *U*ном, В; n, об/ мин; η,%; , Ом.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *U*ном, В | n, об/ мин | *P*ном, кВт | , Ом | η,%; |
| 1 | 110 | 800 | 0,6 | 233 | 59 |
| 2 | 220 | 750 | 0,17 | 162 | 48,5 |
| 3 | 440 | 1000 | 2,5 | 134 | 73 |
| 4 | 110 | 750 | 0,17 | 610 | 47,5 |
| 5 | 220 | 1120 | 0,25 | 612 | 57 |
| 6 | 110 | 1060 | 0,25 | 610 | 56 |
| 7 | 220 | 1500 | 0.37 | 612 | 61.5 |
| 8 | 440 | 750 | 3 | 34,3 | 76 |
| 9 | 110 | 2360 | 0,71 | 470 | 69,5 |
| 10 | 220 | 2360 | 0,71 | 123 | 70 |
| 11 | 440 | 1500 | 4 | 111 | 79 |
| 12 | 110 | 3000 | 2,5 | 134 | 72 |
| 13 | 220 | 1000 | 2,5 | 35 | 73,5 |
| 14 | 110 | 1000 | 0,5 | 470 | 65 |
| 15 | 220 | 2200 | 2,5 | 39,4 | 76 |
| 16 | 440 | 2240 | 26 | 12,8 | 89 |
| 17 | 110 | 2120 | 2,5 | 156 | 76 |
| 18 | 220 | 800 | 0,6 | 61,4 | 58 |
| 19 | 440 | 2360 | 13 | 16,4 | 86,5 |
| 20 | 110 | 3150 | 3,6 | 129 | 78,5 |

**Задача 4.6** Для двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением известно: *P*ном, кВт; *U*ном, В; n, об/ мин; η,%; потери мощности цепи возбуждения Δ*P*в. % (в процентах от мощности *P*1, потребляемой из сети), потери мощности в цепи якоря Δ*P*я. % (в процентах от суммарных потерь мощности электродвигателя). Необходимо определить:

1. Номинальный момент на валу; ток, потребляемый двигателем из сети при номинальной нагрузке, токи в цепях возбуждения и якоря; сопротивления якоря и цепи возбуждения;

2. Для значений тока якоря ; ; ; определить суммарную мощность потерь; КПД; момент на валу; частоту вращения якоря;

3. В общей системе координат построить зависимости: ; ;

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *U*ном, В | *P*ном, кВт | n, об/ мин | η,%; | Δ*P*в. % | Δ*P*я. % |
| 1 | 110 | 0,6 | 800 | 59 | 2 | 48 |
| 2 | 220 | 0,17 | 750 | 48,5 | 2 | 49 |
| 3 | 440 | 2,5 | 1000 | 73 | 3 | 50 |
| 4 | 110 | 0,17 | 750 | 47,5 | 3 | 51 |
| 5 | 220 | 0,25 | 1120 | 57 | 4 | 52 |
| 6 | 110 | 0,25 | 1060 | 56 | 4 | 48 |
| 7 | 220 | 0.37 | 1500 | 61.5 | 2 | 49 |
| 8 | 440 | 3 | 750 | 76 | 2 | 50 |
| 9 | 110 | 0,71 | 2360 | 69,5 | 3 | 51 |
| 10 | 220 | 0,71 | 2360 | 70 | 3 | 52 |
| 11 | 440 | 4 | 1500 | 79 | 4 | 48 |
| 12 | 110 | 2,5 | 3000 | 72 | 4 | 49 |
| 13 | 220 | 2,5 | 1000 | 73,5 | 2 | 50 |
| 14 | 110 | 0,5 | 1000 | 65 | 2 | 51 |
| 15 | 220 | 2,5 | 2200 | 76 | 3 | 52 |
| 16 | 440 | 26 | 2240 | 89 | 3 | 48 |
| 17 | 110 | 2,5 | 2120 | 76 | 4 | 49 |
| 18 | 220 | 0,6 | 800 | 58 | 4 | 50 |
| 19 | 440 | 13 | 2360 | 86,5 | 2 | 51 |
| 20 | 110 | 3,6 | 3150 | 78,5 | 2 | 52 |

**Контрольные вопросы**

1. Область применения машин постоянного тока.
2. Достоинства и недостатки машин постоянного тока.
3. Устройство МПТ.
4. Классификация МПТ по способу возбуждения.
5. Принцип действия ДПТ.
6. Принцип действия ГПТ.
7. Механическая характеристика ДПТ.
8. Способы пуска ДПТ.
9. Регулирование частоты вращения ДПТ.
10. Реверсирование ДПТ.

**5. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

**Основные понятия и определения**

Синхронной машиной (СМ) называют электрическую машину, у которой одна из обмоток присоединена к электрической сети переменного тока, а вторая - возбуждается постоянным током.

Синхронные машины могут работать в режиме генератора, двигателя и компенсатора реактивной мощности.

*Устройство СМ*

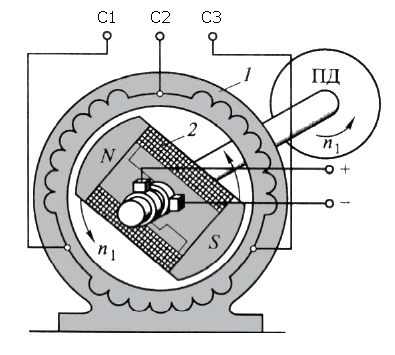


Рис. 5.1 Устройство СМ

Статор *1* является неподвижной частью синхронной машины и конструктивно аналогичен статору асинхронной машины - состоит из корпуса и сердечника, в пазах которого располагается статорная обмотка, предназначенная для индуктирования в ней ЭДС. Сердечник статора набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, в которых вырубают пазы для укладки проводников обмотки статора.

Статор является якорем, т.к. в статорной обмотке наводится эдс и протекает ток нагрузки, а ротор является индуктором, в нем расположена обмотка возбуждения.

Роторы *2* в синхронных машинах бывают двух типов – явнополюсные и неявнополюсные (рис. 5.2 а, б). Первые представляет собой вал, на котором укреплены сердечники полюсов с обмоткой возбуждения, неявнополюсные набирают из листов электротехнической стали, в пазы укладывают обмотку возбуждения.

В высокоскоростных синхронных машинах применяют неявнополюсные роторы для обеспечения нужной механической прочности. Для тихоходных машин, работающих, например, от гидравлических турбин применяют явнополюсные роторы.

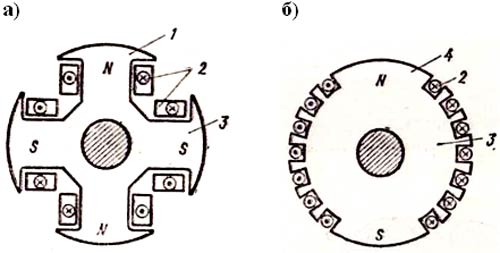


Рис.5.2. Явнополюсные и неявнополюсные роторы СМ.

Обмотка возбуждения выполняется из медного провода прямоугольного сечения, концы которой выводятся на контактные кольца, установленные на роторе. Токосъём с контактных колец осуществляется с помощью щёток.

Обмотка возбуждения питается постоянным током от генератора постоянного тока, называемого возбудителем и жестко соединенным с валом синхронной машины, или от выпрямительной установки. Мощность, необходимая для возбуждения составляет 0,3 -3 % от мощности СМ.

Магнитное поле якоря вращается с синхронной скоростью об/мин,

*Синхронные генераторы*

Синхронные генераторы соединяют жестко с первичным двигателем, приводящим генератор во вращение на электростанциях – с паровыми и газовыми турбинами (турбогенераторы, с частотой вращения 1500-3000 об/мин, с неявнополюсным ротором), с гидротурбинами – гидрогенераторы, с меньшей частотой вращения – **с** явнополюсным ротором (скорость вращения которого определяется высотой напора воды от 50 до 750 об/мин, имеет число пар полюсов соответственно от 60 до 4.

*Принцип действия синхронного генератора*

При помощи первичного двигателя ротор-индуктор вращается. Магнитное поле находится на роторе и вращается вместе с ним, поэтому скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля – отсюда название **синхронная машина.**

Приводным двигателем (ПД), в качестве которого используется турбина, либо другой источник механической энергии, ротор генератора приводится во вращение с синхронной скоростью. В обмотке статора под действием вращающегося [магнитного поля](http://scask.ru/book_s_phis2.php?id=48) ротора наводится ЭДС, подаваемая на внешнюю цепь генератора (в режиме двигателя на обмотку статора подается напряжение сети).

При этом магнитное поле электромагнита ротора также вращается с синхронной скоростью и индуцирует в трёхфазной обмотке статора переменные ЭДС *E*A, *E*B и *E*C, которые будучи одинаковыми по значению и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 1/3 периода (120°), образуют симметричную трёхфазную систему ЭДС.

C подключением нагрузки к зажимам обмотки статора С1, С2 и С3 в фазах обмотки статора появляются токи *I*A, *I*B, *I*C, которые создают вращающееся магнитное поле. Частота вращения этого поля равна частоте вращения ротора генератора. Таким образом, в синхронном генераторе магнитное поле статора и ротор вращаются синхронно.

*Условия включения синхронного генератора в сеть*

Для включения генератора в сеть необходимо:

* одинаковое чередование фаз в сети и генераторе;
* равенство напряжения сети и ЭДС генератора;
* равенство частот ЭДС генератора и напряжения сети;
* включать генератор в тот момент, когда ЭДС генератора в каждой фазе направлена встречно напряжению сети.

Невыполнение этих условий ведёт к тому, что в момент включения генератора в сеть возникают токи, которые могут оказаться большими и вывести генератор из строя.

*Синхронные двигатели*

Синхронные двигатели нашли широкое применение для механизмов приводами большой мощности. По сравнению с асинхронными синхронные двигатели имеют большое преимущество, заключающееся в том, что благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с cosφ = 1 и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе, с перевозбуждением даже отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален U, а у асинхронного двигателя U2. Поэтому при понижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность. Кроме того, использование возможности увеличения тока возбуждения синхронных двигателей позволяет увеличивать их надежность работы при аварийных понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях условия работы энергосистемы в целом. Вследствие большей величины воздушного зазора добавочные потери в стали и в клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем у асинхронных, благодаря чему к. п. д. синхронных двигателей обычно выше.

Однако, конструкция синхронных двигателей сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

*Принцип действия синхронного двигателя*

Для работы синхронной машины в режиме двигателя обмотку статора подключают к трёхфазной сети, а обмотку ротора к источнику постоянного тока. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля машины с постоянным током обмотки возбуждения, возникает вращающий момент М, который увлекает его со скоростью магнитного поля.

В синхронном двигателе вращающий момент зависит от угла *θ*, получающегося между полем статора и осями полюсов ротора и описывается формулой:

*М = Мm \* sin θ*,

где  *Мm* – максимально возможное значение момента.

Зависимость *М = f (θ)* называют угловой характеристикой синхронной машины

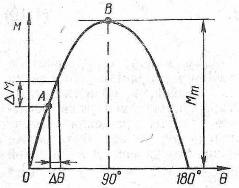


Рис. 5.3 Угловая характеристика работы синхронного двигателя

Работа синхронного двигателя будет стабильна и устойчива на начальном участке, поэтому обычно выбирает угол *θ* , не превышающий значение 30-35°. С ростом угла устойчивость работы существенно снижается, в точке В (предельная точка), когда угол *θ = 900*, стабильная работа невозможна. Момент, соответствующий пределу устойчивости, называют опрокидывающим (максимальным) моментом.

Если нагрузка синхронного двигателя превысит *Мm*, то ротора двигателя выпадет из режима синхронизма, произойдет его остановка, машина перейдет в аварийный режим. Поэтому, с учетом резервирования мощности, номинальный момент для двигателя подбирают меньше в 2-3 раза, чем опрокидывающий.

*Синхронные компенсаторы*

**Синхронный компенсатор**(СК) представляет собой синхронную машину облегчённой конструкции, предназначенную для работы на холостом ходу, работающую в режиме двигателя без активной нагрузки и генерирующую в сеть реактивный опережающий (емкостный) или отстающий (индуктивный) ток. При работе в режиме перевозбуждения СК является *генератором реактивной мощности*. Наибольшая мощность СК в режиме перевозбуждения называется его номинальной мощностью. При работе в режиме недовозбуждения СК является *потребителем реактивной мощности*. По конструктивным условиям СК обычно не может потреблять из сети такую же реактивную мощность, которую он может генерировать.

Синхронные компенсаторы предназначаются для компенсации коэффициента мощности сети и поддержания нормального уровня напряжения сети в районах сосредоточения потребительских нагрузок. Нормальным являемся перевозбужденный режим работы синхронного компенсатора, когда он отдает в сеть реактивную мощность.

Поэтому компенсаторы, как и служащие для этих же целей батареи конденсаторов, устанавливаемые на потребительских подстанциях, называют также генераторами реактивной мощности. Однако в периоды спада потребительских нагрузок (например, ночью) нередко возникает необходимость работы синхронных компенсаторов также в недовозбужденном режиме, когда они потребляют из сети индуктивный ток и реактивную мощность, так как в этих случаях напряжение сети стремится возрасти и для поддержания его на нормальном уровне необходимо загрузить сеть индуктивными токами, вызывающими в ней дополнительные падения напряжения.

Для этого каждый синхронный компенсатор снабжается автоматическим регулятором возбуждения или напряжения, который регулирует величину его тока возбуждения так, что напряжение на зажимах компенсатора остается постоянным.

**Основные формулы для решения задач**

*Синхронные генераторы*

ЭДС, индуцируемая в фазной обмотке статора основным магнитным потоком

*E0 = -j4,44jωkФ0m*

Уравнение напряжения

*U=E0 – R+ j(Xя+Xярас )I = E0 - j XcI*

где *Xc* – полное индуктивное сопротивление фазной обмотки статора;

электромагнитная мощность

электромагнитный момент

где -угол нагрузки.

Статическая перегруженность:

,

где - максимальная мощность при *I*в = *I*в ном, - номинальная активная мощность генератора

Область устойчивой работы

*Синхронные двигатели*

Уравнение движения

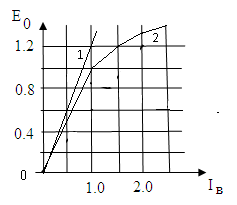
*U= E0 + j XcI*

Кратность максимального момента

Максимальный вращающий момент

Область устойчивой работы

Нормальная характеристика холостого хода для неявнополюсных машин (1 – без учета насыщения, 2 – c учетом насыщения), используемая при расчетах *E0 =f(Iв)* при *I*=0 и *n = const*



**Задача 5.1** Определить угловую характеристику, статическую перегруженность и угол нагрузки в номинальном режиме синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, если известно полное индуктивное сопротивление обмотки якоря *X*c , Ом, номинальные данные генератора:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *S*ном, МВ А | *U*ном, кВ |  | cosφ | *X*c , Ом |
| 1 | 9,4 | 10,5 | 1,36 | 0,8 | 20 |
| 2 | 20 | 3,15 | 1,95 | 0,95 | 18 |
| 3 | 6,9 | 6,3 | 1,2 | 0,85 | 17 |
| 4 | 19 | 10.5 | 2,3 | 0,85 | 16 |
| 5 | 3,75 | 6,3 | 2,55 | 0,9 | 23 |
| 6 | 9,4 | 10,5 | 1,89 | 0,9 | 15 |
| 7 | 20 | 3,15 | 2,4 | 0,8 | 14 |
| 8 | 6,9 | 6,3 | 2,35 | 0,8 | 22 |
| 9 | 19 | 10.5 | 1,4 | 0,95 | 16 |
| 10 | 3,75 | 6,3 | 0,95 | 0,85 | 20 |
| 11 | 9,4 | 10,5 | 2,7 | 0,85 | 18 |
| 12 | 20 | 3,15 | 1,8 | 0,9 | 17 |
| 13 | 6,9 | 6,3 | 1,2 | 0,9 | 16 |
| 14 | 19 | 10.5 | 2,9 | 0,8 | 23 |
| 15 | 3,75 | 6,3 | 1,2 | 0,8 | 15 |
| 16 | 9,4 | 10,5 | 1,3 | 0,95 | 14 |
| 17 | 20 | 3,15 | 2,4 | 0,85 | 22 |
| 18 | 6,9 | 6,3 | 1,9 | 0,85 | 16 |
| 19 | 19 | 10.5 | 2,2 | 0,9 | 20 |
| 20 | 3,75 | 6,3 | 1,4 | 0,9 | 18 |

**Задача 5.2** По данным задачи 5.1 определить как изменится угол нагрузки, если 1) вращающий момент, приложенный к валу генератора при номинальном токе возбуждения уменьшится в 1,5 раза; 2) при номинальной мощности ток возбуждения увеличить до ; уменьшить до

**Задача 5.3** Для синхронного двигателя известно *U*ном =6 кВ, cosφ = 0,9/ Определить полную мощность, угловую скорость вращения ротора, номинальный и пусковой токи якоря, номинальный, максимальный и пусковой моменты. Данные для расчета представлены в таблице:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | 2*p* | *P*ном, МВт | η,%; |  |  |  |  |  |
| 1 | 10 | 0,63 | 93,8 | 0,8 | 2 | 5,4 | 1,2 | 0,8 |
| 2 | 10 | 0,8 | 94,4 | 0,85 | 2,1 | 5,7 | 1,4 | 0,8 |
| 3 | 10 | 1 | 94,6 | 0.85 | 2,1 | 5,8 | 1,5 | 0,8 |
| 4 | 10 | 1,25 | 95,1 | 0,8 | 2,1 | 5,8 | 1,6 | 0,4 |
| 5 | 10 | 1,6 | 95,7 | 0,9 | 2,1 | 5,9 | 1,4 | 0,8 |
| 6 | 8 | 0,8 | 84,8 | 0,75 | 2 | 6,2 | 1,2 | 0,8 |
| 7 | 8 | 1 | 95,4 | 0,85 | 2 | 5.6 | 1,4 | 0,8 |
| 8 | 8 | 1,25 | 94,8 | 0,8 | 2 | 6 | 1,5 | 0,8 |
| 9 | 8 | 1,6 | 95,6 | 0,85 | 2 | 5,4 | 1,6 | 0,4 |
| 10 | 6 | 2,5 | 96,6 | 0.85 | 2 | 5,7 | 1,4 | 0,8 |
| 11 | 6 | 3,2 | 96,8 | 0,8 | 2 | 5,8 | 1,2 | 0,8 |
| 12 | 6 | 5 | 96,4 | 0,9 | 2 | 5,8 | 1,4 | 0,8 |
| 13 | 8 | 3,2 | 96,7 | 0,75 | 2 | 5,9 | 1,5 | 0,8 |
| 14 | 8 | 4 | 96,9 | 0,85 | 2 | 6,2 | 1,6 | 0,4 |
| 15 | 8 | 6,3 | 95,2 | 0,8 | 2 | 5.6 | 1,4 | 0,8 |
| 16 | 6 | 1 | 95,8 | 0,85 | 2 | 6 | 1,2 | 0,8 |
| 17 | 6 | 1,25 | 95,7 | 0.85 | 2 | 5,4 | 1,4 | 0,8 |
| 18 | 6 | 1,6 | 96,3 | 0,8 | 2 | 5,7 | 1,5 | 0,8 |
| 19 | 6 | 2 | 97,3 | 0,9 | 2 | 5,8 | 1,6 | 0,4 |
| 20 | 6 | 4 | 95.4 | 0,75 | 2 | 5,8 | 1,4 | 0,8 |

**Задача 5.4** Определить мощность синхронного компенсатора, необходимого для повышения коэффициента мощности установки до значения cosφ2, если извесно: количество асинхронных двигателей N, их номинальная мощность P2, кВт, КПД η, коэффициент мощности cosφ1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | N | P2, кВт | η | cosφ1 | cosφ2 |
| 1 | 10 | 1,5 | 0,75 | 0,74 | 0,92 |
| 2 | 8 | 2,2 | 0,81 | 0,74 | 0,94 |
| 3 | 5 | 3 | 0,82 | 0,73 | 0,96 |
| 4 | 6 | 4 | 0,78 | 0,76 | 0,95 |
| 5 | 7 | 5 | 0,76 | 0,74 | 0,92 |
| 6 | 8 | 5,5 | 0,73 | 0,74 | 0,94 |
| 7 | 5 | 1,5 | 0,75 | 0,73 | 0,96 |
| 8 | 10 | 2,2 | 0,81 | 0,76 | 0,95 |
| 9 | 8 | 3 | 0,82 | 0,74 | 0,92 |
| 10 | 5 | 4 | 0,78 | 0,74 | 0,94 |
| 11 | 6 | 5 | 0,76 | 0,73 | 0,96 |
| 12 | 7 | 5,5 | 0,73 | 0,76 | 0,95 |
| 13 | 8 | 1,5 | 0,75 | 0,74 | 0,92 |
| 14 | 5 | 2,2 | 0,81 | 0,74 | 0,94 |
| 15 | 10 | 3 | 0,82 | 0,73 | 0,96 |
| 16 | 8 | 4 | 0,78 | 0,76 | 0,95 |
| 17 | 5 | 5 | 0,76 | 0,74 | 0,92 |
| 18 | 6 | 5,5 | 0,73 | 0,74 | 0,94 |
| 19 | 7 | 1,5 | 0,75 | 0,73 | 0,96 |
| 20 | 8 | 2,2 | 0,81 | 0,76 | 0,95 |

**Контрольные вопросы**

1. Какую электрическую машину называют синхронной
2. Режимы работы синхронной машины.
3. Устройство синхронной машины.
4. Синхронный генератор, область применения
5. Принцип действия синхронного генератора.
6. Синхронный двигатель, область применения.
7. Принцип действия синхронного двигателя.
8. Угловая характеристика синхронного двигателя.
9. Синхронный компенсатор, назначение и принцип действия.

**6. ЭЛЕКТРОПРИВОД**

**Основные понятия и определения**

*Электроприводом* (ЭП) называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств и предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин и управления этим движением.

Электроприводы различны по своим техническим характеристикам: по мощности, скорости вращения, конструктивному исполнению Диапазон мощности электроприводов очень широк – от несколько ватт в различных приборах и устройствах автоматики до нескольких тысяч киловатт в приводах прокатных станов, компрессоров газоперекачивающих станций. Электропривод бытовых приборов и машин обычно составляет от 10 до 1000 Вт, электропривод станков – от 0,25 кВт до 100 кВт и т.д.. Также велик диапазон электроприводов по скорости вращения. Так, скорость вращения центрифуг доходит до 100 000 об/мин. Есть механизмы, у которых скорость вращения рабочего органа составляет менее одного оборота в минуту.

Электроприводы нашли применение не только в промышленном производстве, но и в сельском хозяйстве, транспорте, медицине, электробытовых установках и др. С энергетической точки зрения электропривод – *главный потребитель электрической энергии*: сегодня в развитых странах он потребляет более 60% всей производимой электроэнергии.

*Структурная схема электропривода и назначение его элементов.*

Жирными стрелками на рис. 6.1 показаны силовые каналы передачи электрической и механической энергии, а тонкими - каналы передачи сигналов управления.

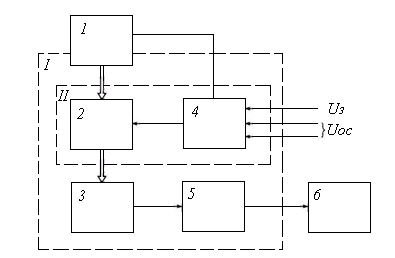


Рис. 6.1 Структурная схема ЭП

1 – Источник электроэнергии шины промышленной электрической сети, автономный электрогенератор, аккумуляторная батарея и т.п.

2 – Силовой (электрический) преобразователь – устройство, передающее электроэнергию от источника к электромагнитному преобразователю (двигателю) и обратно, и, осуществляющее при необходимости. преобразование этой электроэнергии, т.е. служит для передачи электроэнергии требуемых параметров. Бывают неуправляемыми – трансформаторы, выпрямители и т.п. и управляемыми – управляемые выпрямители, преобразователи частоты и т.п.

3 – Электромеханическое устройство - основной элемент электропривода – ***электродвигатель*** (ЭД), который преобразует электрическую энергию в механическую.

4 – Управление преобразователем осуществляется от блока управления (4), на вход которого поступают задающий сигнал *Uз* и сигналы *Uос* обратной связи (ОС), содержащие информацию о характере движения исполнительных органов, работе отдельных узлов, аварийных режимах. Преобразователь вместе с блоком управления образуют систему управления.

5 – Передаточное устройство (редукторы; передачи: винтовые, зубчатые, ременные, барабанно-канатные, кривошипно-шатунные механизмы) осуществляет согласование момента *М* и скорости  двигателя с моментом *Мм* (усилием *Fм*) и скоростью *ωм* рабочего органа технологической машины.

6 – Рабочая машина.

По общности выполняемых операций и принципу действия рабочие машины можно объединить в следующие группы:

● турбомеханизмы: насосы, вентиляторы, турбокомпрессоры;

● грузоподъемные машины: краны, лифты, подъемники и др.;

● транспортные машины: конвейеры, эскалаторы и др.;

● металлообрабатывающие станки;

● машины возвратно-поступательного движения: прессы, поршневые насосы и компрессоры;

● экскаваторы;

● прокатные станы.

*Классификация электроприводов.*

Существует большое разнообразие электроприводов. Их классификация обычно производится по виду движения и степени управляемости эл.привода, роду электрического и механического передаточных устройств, способу передачи механической энергии исполнительным органам и ряду других признаков.

*По виду движения* различаются электроприводы вращательного и поступательного однонаправленного и реверсивного движения, а также электроприводы возвратно-поступательного движения. Эти движения могут иметь как непрерывный, так и дискретный характер.

*По принципам регулирования скорости и положения* электропривод может быть:

* нерегулируемый (исполнительный орган приводится в движение с одной постоянной скоростью);
* регулируемый (путем воздействия на электропривод скорость движения исполнительного органа изменяется в соответствии с требованиями технологического процесса);
* следящий (с помощью электропривода воспроизводится перемещение исполнительного органа в соответствии с произвольно изменяющимся задающим сигналом);
* программно-управляемый (электропривод обеспечивает перемещение исполнительного органа в соответствии с заданной программой);
* адаптивный (электропривод автоматически обеспечивает оптимальный режим движения исполнительного органа при изменении условий его работы);
* позиционный (электропривод обеспечивает регулирование положения исполнительного органа рабочей машины).

*По роду механического передаточного устройства различают*редукторный электропривод, содержащий один из видов механического передаточного устройства, и безредукторный, в котором электродвигатель непосредственно соединен с исполнительным органом.

*По роду электрического преобразовательного устройства* различают:

* вентильный электропривод, преобразовательным устройством которого является вентильный преобразователь энергии. Разновидностями вентильного электропривода являются ионный и полупроводниковый электроприводы. Полупроводниковый электропривод, в свою очередь, делится на тиристорный и транзисторный электроприводы, преобразовательным устройством в которых является соответственно тиристорный или транзисторный преобразователь электроэнергии;
* система управляемый выпрямитель – двигатель (УВ – Д) – вентильный электропривод постоянного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемый выпрямитель;
* система преобразователь частоты – двигатель (ПЧ – Д) – вентильный электропривод переменного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемой преобразователь частоты;
* система генератор – двигатель (Г – Д) и магнитный усилитель – двигатель (МУ – Д) – регулируемый электропривод, преобразовательным устройством которого является соответственно электромашинный преобразовательный агрегат или магнитный усилитель.

*По способу передачи механической энергии* исполнительному органу электроприводы делятся на индивидуальный, взаимосвязанный и групповой.

*Индивидуальный* электропривод характеризуется тем, что каждый исполнительный орган рабочей машины приводится в движение своим отдельным двигателем.

*Взаимосвязанный* электропривод содержит два или несколько электрически или механически связанных между собой электроприводов. Частным случаем взаимосвязанного электропривода является многодвигательный электропривод, при котором несколько двигателей работают на общий вал, приводя в движение один исполнительный орган.

*Групповой*электропривод характеризуется тем, что от одного двигателя приводится в движение несколько исполнительных органов одной или нескольких рабочих машин.

*Координаты электропривода.*

Величины, характеризующие преобразуемую энергию, – напряжения, токи, моменты (силы), скорости называют *координатами электропривода.*

Основная функция электропривода состоит в *управлении* координатами, т.е. в их принудительном направленном изменении в соответствии с требованиями обслуживаемого технологического процесса.

Управление координатами должно осуществляться в пределах, разрешенных конструкцией элементов электропривода, чем обеспечивается надежность работы системы. Эти допустимые пределы обычно связаны с *номинальными значениями координат*, назначенными производителями оборудования и обеспечивающими его оптимальное использование.

В правильно организованной системе при управлении координатами (потоком энергии) должны минимизироваться *потери* *Р* во всех элементах и к рабочему органу должна подводиться требуемая в данный момент мощность.

*Требования, предъявляемые к электроприводам*

Основное влияние на режим работы электропривода и на требования, предъявляемые к нему, оказывает характер технологического процесса. По характеру технологического процесса все машины и механизмы можно разделить на две группы: механизмы ***непрерывного*** действия и механизмы ***циклического*** действия. В первой группе технологический процесс протекает непрерывно, во второй – технологический процесс состоит из однотипных повторяющихся циклов.

Электроприводы механизмов непрерывного действия характеризуются редкими пусками, не требуют, как правило, реверсирования и точного останова. Электроприводы механизмов циклического действия отличаются от них частыми пусками, реверсами и необходимостью регулирования скорости и точным остановом.

Общие требования, которые предъявляют к электроприводам всех механизмов:

– обеспечение заданного технологического процесса и требуемой производительности;

– обеспечение требуемых условий пуска и торможения производственных механизмов, а при необходимости – реверсирования и регулирования скорости;

– ограничение перегрузок – динамических и ударных;

– обеспечение требуемого уровня автоматизации (управление автоматическое, полуавтоматическое и т.п.);

– обеспечение надежности,

– конструктивная защищенность электрооборудования в зависимости от условий окружающей среды, климатического исполнения;

– минимальные стоимость и затраты электроэнергии на работу электропривода;

– экологические: уровень шума и ограничение влияния электропривода на сеть питающего напряжения, связанное с искажениями, вызываемыми высшими гармониками тока.

В требованиях указываются также параметры электроснабжения (вид и величина питающего напряжения, частота, допустимые отклонения и т.п.).

*Режимы работы электропривода*

Все режимы в электроприводе делятся на *установившиеся*(номинальный режим работы)*и переходные*(пуск, реверс, торможение**)**.

*Установившийся режим*работы электропривода определяется из условия равенства нулю динамического момента. Этот режим характеризуется работой двигателя с неизменной угловой скоростью, постоянными во времени и равными по величине моментом двигателя и моментом сопротивления. Так как момент, развиваемый двигателем в установившемся режиме, есть функция скорости, то равенство М = Мс возможно только при условии, что момент сопротивления – постоянная величина или функция скорости. Если МС есть функция, например, пути (угла поворота), то даже при постоянной угловой скорости момент сопротивления изменяется во времени и установившийся режим невозможен.

Установившийся режим описывается статическими характеристиками.

*Переходным режимом* электропривода называют режим работы при переходе от одного установившегося состояния к другому, когда изменяются скорость, момент и ток.

Причинами возникновения переходных режимов в электроприводах является либо изменение нагрузки, связанное с производственным процессом, либо воздействие на электропривод при управлении им, т. е. пуск, торможение, изменение направления вращения и т.п. Переходные режимы в электроприводах могут возникнуть также в результате аварий или нарушения нормальных условий электроснабжения (например, изменения напряжения или частоты сети, несимметрия напряжения и т. п.).

Характер переходного режима электропривода зависит от свойств рабочей машины, типа примененного двигателя и механической передачи, принципа действия и свойств аппаратуры управления, а также от режима работы двигателя (пуск, торможение, прием и сброс нагрузки и т. д.)

По длительности непрерывной работы электродвигателя различают режимы: *длительный, кратковременный и повторно-кратковременный*.

*Длительным* называют режим работы, при котором рабочий период электродвигателя настолько велик, что нагрев последнего достигает своего стабильного состояния. При таком режиме работают двигатели вентиляторов, насосов и других механизмов непрерывного действия.

*Кратковременный* режим работы характеризуется тем, что в течение рабочего периода нагрев электродвигателя не достигает стабильного состояния, а перерыв в работе настолько велик, что при возобновлении ее температура двигателя близка к температуре окружающей среды. При таком режиме, например, работают двигатели подъема стрелы одноковшового экскаватора. Их работа продолжается несколько минут, после чего они надолго выключаются.

При *повторно-кратковременном* режиме рабочие периоды чередуются с паузами, т. е. с периодами остановки электродвигателя. За период работы двигатель не успевает полностью нагреться, а за период остановки – полностью остыть. Повторно-кратковременный режим дополнительно подразделяется на режим периодический и непериодический. При таких режимах работают электродвигатели кранов, лифтов и других подъемных механизмов. Рассматриваемый режим характеризуется показателем ПВ (продолжительность включения), который равен отношению продолжительности рабочего периода к продолжительности цикла (рабочего периода и остановк

*Нагрузочные диаграммы и тахограммы*

Основой для выбора электропривода и расчета его мощности являются нагрузочные диаграммы и диаграмма скорости (тахограмма) (рис.6.2). Нагрузочной диаграммой производственного механизма называют зависимость приведенного к валу двигателя момента сопротивления движению *Мс* (статического момента) от времени: *Мс =f(t).* Эту диаграмму рассчитывают на основе данных, характеризующих работу машины (механизма).

Нагрузочная диаграмма электропривода – это зависимость момента, развиваемого двигателем от времени. Ее рассчитывают как алгебраическую сумму статического *Мс*  и динамического *Мдин*  моментов: *М= Мс + Мдин* = *f(t).*

Тахограмма – это зависимость скорости рабочего органа машины или вала двигателя от времени ω= *f(t)* (рис. 6.2 пунктирные линии*).*

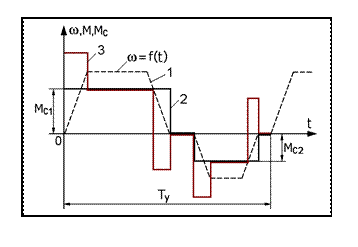


Рис 6.2 Нагрузочные диаграммы и диаграмма скорости (тахограмма)

*Расчет мощности и выбор типа электродвигателя*

При выборе приводного электродвигателя осуществляют:

● расчет мощности электродвигателя;

● расчет номинальной скорости и определение передаточного отношения механической передачи;

● выбор двигателя в соответствии с режимом его работы по условиям нагрузки;

● выбор двигателя по условиям пуска;

● определение необходимой степени защиты оболочки двигателя;

● выбор конструктивного исполнения на соответствие условиям окружающей среды;

● выбор системы охлаждения двигателя.

Расчеты температуры перегрева двигателя в соответствии с известной нагрузочной диаграммой весьма трудоемки. Наиболее точным методом является метод средних потерь энергии *ΔРср* в двигателе. Для каждой нагрузки определяют потери в двигателе и затем находят среднее значение потерь за цикл работы. На практике наиболее часто применяют методы определения эквивалентных величин: тока, момента или мощности.

*Методы эквивалентных величин*

*Метод эквивалентного тока*

Потери в двигателях примерно пропорциональны току в квадрате. Зная график тока, протекающего по обмоткам двигателя, можно определить для каждого конкретного режима работы значение эквивалентного тока *Iэкв ,* характеризующее его нагрев.

Эквивалентный ток *Iэкв –* это такой ток с постояннымзначением, который вызывает такой же нагрев электродвигателя, как и реально протекающий с изменяющим значением в соответствии с графиком нагрузки механизма:

Метод эквивалентного тока дает достаточно достоверные результаты, если сохраняется постоянство сопротивлений двигателя и потерь в стали независимо от нагрузки.

*Метод эквивалентного момента*

Если момент двигателя пропорционален току, то можно пользоваться методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент *Мэ –* это постоянный момент нагрузки, который вызывает такой же нагрев двигателя, как и реально изменяющийся момент в соответствии с графиком работы механизма

Условие правильности выбора двигателя ,

где *Мн*  - номинальный момент двигателя.

Этот метод применим для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, для асинхронных двигателей и других, у которых момент пропорционален току и соблюдены условия, указанные для метода эквивалентного момента.

*Метод эквивалентной мощности*

Если скорость двигателя изменяется мало и можно считать, что мощность пропорциональна моменту и, следовательно, току, то эквивалентная мощность

Производить проверку двигателя на нагрев по эквивалентной мощности можно для нерегулируемых по скорости электродвигателей, у которых момент пропорционален току. Условия правильности выбора электродвигателя: .

**Основные формулы для решения задач**

Эквивалентный ток



где: *tц* – время цикла; *I1, I2*, *… In* - ток соответственно в течение времени *t1* , *t2*, *…tn.*

Условие проверки двигателя на нагрев: ,

где: *Iн* – номинальный ток двигателя.

Эквивалентный момент



где: M*1,M2*, *… Mn*  - моментсоответственно в течение времени *t1* , *t2*, *…tn.*

Условие правильности выбора двигателя ,

где: *Мн*  - номинальный момент двигателя.

Эквивалентная мощность



где: P*1,P2*, *…Pn*  - мощностьсоответственно в течение времени *t1* , *t2*, *…tn.*

Условия правильности выбора электродвигателя: .

С учетом условия ухудшения охлаждения у двигателей с самовентиляцией во время пауз и при снижении скорости формула для эквивалентного тока:



где: *β*1 =0 ,5 – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения в процессе разгона и торможения двигателя; *β*2 = 0,8 … 1,0 – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения при работе с постоянной скоростью; *β*0= 0,3 – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения при стоянке двигателя в течение времени *t*0 .

Уравнение моментов:

*M = M*с *+ M*д

Где: *M* – вращающий момент двигателя; *M*с – статический момент сопротивления механизма; *M*д – динамический момент

*;*

*J* – момент инерции вращающихся масс;

- угловое ускорение

В установившемся режиме *M = M*с

Максимальный момент двигателя



,

где – кратность максимального момента, для ДПТ 2 – 2.5, для АД – 1.6 – 2.5

Передаточное отношение от вала барабана к валу двигателя:



Статический момент на валу двигателя при подъеме груза



Суммарный момент инерции при подъеме груза



Продолжительность включения



где: *Σtp ΣtП –* сумма времени соответственно работы и пауз, если в цикле несколько операций;

Если расчетная  *ПВ* (%) не соответствует стандартной, эквивалентную мощность рассчитывают по формуле;



Расчетная мощность двигателей:

1. вентиляторов ;

где *Q* – производительность вентилятора; *p* - давление газа, - КПД вентилятора; - КПД передачи.

2. подъемных механизмов

где *G* – масса груза; *G*0 – масса захватывающего приспособления; - КПД подъемного механизма

**Задача 6.1** Выбрать по каталогу АД, предназначенный для привода механизма с циклическим графиком нагрузки в продолжительном или повторно-кратковременном режимах работы. Построить нагрузочную диаграмму, определить расчетную мощность двигателя, провести проверку по перегрузочной способности.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №вар. | М1, | М2 | М3 | ,с | ,с | ,с | ,с |  |  |
| 1 | 80 | 40 | 60 | 10 | 5 | 20 | 25 | 1410 | 0.95 |
| 2 | 120 | 100 | 95 | 10 | 10 | 15 | 55 | 930 | 0.9 |
| 3 | 50 | 20 | 30 | 10 | 15 | 10 | 5 | 915 | 0.85 |
| 4 | 150 | 125 | 145 | 10 | 20 | 10 | 60 | 930 | 0.95 |
| 5 | 150 | 130 | 160 | 10 | 25 | 20 | 35 | 1415 | 0.9 |
| 6 | 40 | 30 | 10 | 5 | 15 | 20 | 10 | 930 | 0.85 |
| 7 | 40 | 25 | 20 | 5 | 15 | 15 | 5 | 1420 | 0.95 |
| 8 | 30 | 15 | 25 | 5 | 20 | 10 | 25 | 930 | 0.9 |
| 9 | 20 | 15 | 10 | 5 | 10 | 5 | 60 | 935 | 0.85 |
| 10 | 180 | 140 | 150 | 5 | 15 | 15 | 25 | 1440 | 0.95 |
| 11 | 30 | 20 | 10 | 15 | 10 | 20 | 5 | 1440 | 0.9 |
| 12 | 30 | 40 | 60 | 15 | 5 | 15 | 5 | 1400 | 0.85 |
| 13 | 30 | 45 | 20 | 15 | 10 | 10 | 5 | 1410 | 0.95 |
| 14 | 30 | 50 | 30 | 15 | 15 | 10 | 10 | 940 | 0.9 |
| 15 | 200 | 180 | 170 | 15 | 20 | 5 | 60 | 930 | 0.85 |
| 16 | 220 | 230 | 215 | 10 | 15 | 10 | 25 | 940 | 0.95 |
| 17 | 20 | 15 | 25 | 10 | 10 | 15 | 5 | 930 | 0.9 |
| 18 | 20 | 45 | 40 | 10 | 5 | 10 | 75 | 950 | 0.85 |
| 19 | 25 | 20 | 15 | 10 | 15 | 15 | 60 | 950 | 0.95 |
| 20 | 20 | 25 | 15 | 10 | 10 | 5 | 20 | 1440 | 0.9 |

- моменты нагрузки на валу для соответствующих участков графика нагрузки,  – время работы двигателя с заданными моментами нагрузки, *tП* – время паузы, *n* – частота вращения двигателя,  – коэффициент, учитывающий возможное снижение напряжения сети.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип двигателя |  |  |  | ПВ=25% | | | ПВ=40% | | | ПВ=60% | | | ПВ=100% | | |
| кВт | η,  % | cos φ | кВт | η,  % | cosφ | кВт | η,  % | cosφ | кВт | η,  % | cosφ |
| 4АС71А4УЗ | 2.0 | 2.2 | 8.2 | 0.65 | 67.0 | 0.76 | 0.6 | 68.0 | 0.73 | 0.6 | 68.0 | 0.73 | 0.60 | 68.0 | 0.73 |
| 4АС71В4УЗ | 2.0 | 2.2 | 8.7 | 0.9 | 68.0 | 0.77 | 0.8 | 68.5 | 0.75 | 0.8 | 68.5 | 0.75 | 0.70 | 69.0 | 0.74 |
| 4АС80А4УЗ | 2.0 | 2.2 | 5.6 | 1.3 | 68.5 | 0.82 | 1.3 | 68.5 | 0.82 | 1.1 | 70.0 | 0.8 | 0.95 | 70.5 | 0.79 |
| 4АС80В4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.5 | 1.9 | 69.5 | 0.83 | 1.7 | 70.0 | 0.82 | 1.5 | 70.5 | 0.8 | 1.3 | 71.0 | 0.79 |
| 4АС90L4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.8 | 2.4 | 76.0 | 0.82 | 2.4 | 76.0 | 0.82 | 2.2 | 76.5 | 0.8 | 1.9 | 77.0 | 0.78 |
| 4АС100S4У3 | 2.0 | 2.2 | 4.2 | 3.7 | 76.0 | 0.84 | 3.2 | 76.5 | 0.82 | 2.8 | 77.0 | 0.8 | 2.3 | 77.5 | 0.78 |
| 4АС100L4У3 | 2.0 | 2.2 | 4.1 | 5.0 | 77.0 | 0.84 | 4.3 | 78.0 | 0.82 | 3.8 | 79.0 | 0.8 | 3.3 | 80.0 | 0.78 |
| 4АС112M4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.6 | 6.7 | 77.5 | 0.84 | 5.6 | 79.0 | 0.83 | 5.0 | 80.0 | 0.81 | 4.2 | 81.0 | 0.78 |
| 4АС132S4У3 | 2.0 | 2.2 | 6.9 | 9.5 | 82.0 | 0.85 | 8.5 | 82.5 | 0.85 | 7.5 | 83.5 | 0.83 | 7.1 | 84.0 | 0.81 |
| 4АС132M4У3 | 2.0 | 2.2 | 6.1 | 14.0 | 83.0 | 0.86 | 11.8 | 84.0 | 0.85 | 10.5 | 84.5 | 0.83 | 9.0 | 85.0 | 0.81 |
| 4АС160S4У3 | 2.0 | 2.2 | 6.1 | 19.0 | 83.5 | 0.86 | 17.0 | 84.5 | 0.86 | 15.0 | 85.5 | 0.85 | 13.0 | 86.0 | 0.784 |
| 4АС160M4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.3 | 23.0 | 86.0 | 0,86 | 20.0 | 87.0 | 0.87 | 18.5 | 87.5 | 0.87 | 17.0 | 88.0 | 0.86 |
| 4АС180S4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.7 | 24.0 | 84.5 | 0.87 | 21.0 | 86.0 | 0.92 | 20.0 | 86.5 | 0.92 | 19.0 | 87.0 | 0.92 |
| 4АС180M4У3 | 2.0 | 2.2 | 4.4 | 30.0 | 87.0 | 0.93 | 26.5 | 88.5 | 0.91 | 25.0 | 89.0 | 0.91 | 24.0 | 89.5 | 0.91 |
| 4АС200M4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.7 | 35.0 | 87.0 | 0.92 | 31.5 | 87.5 | 0.92 | 28.0 | 88.0 | 0.92 | 26.0 | 88.0 | 0.92 |
| 4АС200L4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.8 | 47.0 | 88.0 | 0.93 | 40.0 | 89.0 | 0.93 | 37.0 | 89.5 | 0.93 | 35.0 | 90.0 | 0.93 |
| 4АС225M4У3 | 2.0 | 2.2 | 5.8 | 55.0 | 87.0 | 0.94 | 50.0 | 87.5 | 0.92 | 45.0 | 88.0 | 0.92 | 40.0 | 88.5 | 0.92 |
| 4АС250S4У3 | 2.0 | 2.2 | 6.3 | 43.0 | 87.0 | 0.93 | 56.0 | 87.5 | 0.92 | 53.0 | 88.0 | 0.92 | 50.0 | 88.0 | 0.92 |
| 4АС250M4У3 | 2.0 | 2.2 | 6.4 | 71.0 | 86.5 | 0.93 | 63.0 | 87.0 | 0.93 | 60.0 | 87.0 | 0.93 | 56.0 | 87.5 | 0.93 |
| 4АС71A6У3 | 2.0 | 2.1 | 10.4 | 0.4 | 62.5 | 0.94 | 0.4 | 62.0 | 0.70 | 0.4 | 62.5 | 0.70 | 0.4 | 62.5 | 0.70 |
| 4АС71B6У3 | 2.0 | 2.1 | 10.2 | 0.65 | 65.0 | 0.70 | 0.63 | 65.0 | 0.70 | 0.65 | 65.0 | 0.70 | 0.5 | 63.5 | 0.62 |
| 4АС980A6У3 | 2.0 | 2.1 | 7.0 | 0.9 | 61.0 | 0.70 | 0.8 | 61.0 | 0.68 | 0.7 | 61.0 | 0.64 | 0.5 | 60.0 | 0.51 |
| 4АС80B6У3 | 2.0 | 2.1 | 7.8 | 1.3 | 65.6 | 0.72 | 1.2 | 66.5 | 0.73 | 1.1 | 67.5 | 0.71 | 0.8 | 69.0 | 0.64 |
| 4АС90L6У3 | 1.9 | 2.1 | 6.2 | 1.8 | 70.0 | 0.75 | 1.7 | 71.0 | 0.72 | 1.3 | 71.5 | 0.65 | 1.1 | 72.0 | 0.60 |
| 4АС100L6У3 | 1.9 | 2.1 | 5.3 | 2.9 | 74.0 | 0.74 | 2.6 | 75.0 | 0.76 | 2.2 | 76.0 | 0.72 | 1.8 | 76.5 | 0.67 |

**Задача 6.2** По каталогу (см. задачу 6.1)выбрать асинхронный двигатель для работы вентилятора, если известно: Производительность вентилятора *Q*, м3/час; КПД вентилятора ηв ,%; частота вращения двигателя n, об/ мин, давление *p*, Па.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *Q*, м3/час | ηв ,%; | n,  об/ мин | *p*, Па | вариант | *Q*, м3/час | ηв ,%; | n,  об/ мин | *p*, Па |
| 1 | 4000 | 48 | 1430 | 960 | 11 | 2200 | 43 | 730 | 920 |
| 2 | 3500 | 45 | 980 | 950 | 12 | 2700 | 44 | 730 | 930 |
| 3 | 4200 | 45 | 1455 | 950 | 13 | 3200 | 45 | 920 | 930 |
| 4 | 5000 | 50 | 1480 | 980 | 14 | 3700 | 47 | 985 | 940 |
| 5 | 2500 | 40 | 920 | 920 | 15 | 4300 | 48 | 1460 | 960 |
| 6 | 3000 | 42 | 980 | 930 | 16 | 4800 | 48 | 1480 | 970 |
| 7 | 3500 | 45 | 950 | 940 | 17 | 5200 | 50 | 1435 | 960 |
| 8 | 4500 | 47 | 1460 | 970 | 18 | 3300 | 45 | 975 | 950 |
| 9 | 2000 | 40 | 720 | 910 | 19 | 2300 | 42 | 710 | 940 |
| 10 | 4700 | 50 | 1470 | 975 | 20 | 4900 | 50 | 1420 | 930 |

**Задача 6.3** Определить наибольшую эквивалентную мощность асинхронного двигателя, если известно: расчетная продолжительность включения ПВр, %; стандартная продолжительность включения ПВст,%; номинальная мощность двигателя *P*ном,кВт

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | ПВр, %; | ПВст,%; | *P*ном, кВт | вариант | ПВр, %; | ПВст,%; | *P*ном, кВт |
| 1 | 12 | 15 | 0,09 | 11 | 33 | 40 | 3 |
| 2 | 20 | 25 | 0,12 | 12 | 20 | 25 | 4 |
| 3 | 35 | 40 | 0,18 | 13 | 14 | 15 | 2,2 |
| 4 | 55 | 60 | 0,25 | 14 | 95 | 100 | 0,09 |
| 5 | 30 | 40 | 0,37 | 15 | 11 | 15 | 0,12 |
| 6 | 22 | 25 | 0,55 | 16 | 23 | 25 | 0,18 |
| 7 | 10 | 15 | 0,75 | 17 | 36 | 40 | 0,25 |
| 8 | 90 | 100 | 1,1 | 18 | 54 | 60 | 1,1 |
| 9 | 38 | 40 | 1,5 | 19 | 14 | 15 | 1,5 |
| 10 | 57 | 60 | 2,2 | 20 | 23 | 25 | 0,25 |

**Задача 6.4** Для подъемного механизма, работающего в циклическом режиме известно: КПД передачи ηп ,%; радиус барабана Rб, *м* номинальная скорость вращения кранового ДПТ n, об/ мин;, скорость подъема груза vп, и скорость спуска крюка *v*с, м/с; масса груза, *m* кг; момент инерции якоря двигателя *J*, *кг·м2;* высота подъема *h*,м. Цикл работы состоит из подъема груза и спуска пустого крюка. Построить нагрузочные диаграммы и тахограмму движения.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | ηп, % | *R*б, *м* | *n*,  об/ мин | *v*п, м/с | *v*с, м/с | *m* кг | *J*, *кг·м2* | *h*, м |
| 1 | 80 | 0,3 | 460 | 1 | 2 | 600 | 0,2 | 18 |
| 2 | 82 | 0,3 | 475 | 1,2 | 2 | 650 | 0,22 | 15 |
| 3 | 84 | 0,35 | 500 | 1,3 | 2 | 630 | 0,23 | 15 |
| 4 | 85 | 0,35 | 525 | 1,4 | 2,5 | 640 | 0,18 | 16 |
| 5 | 87 | 0,25 | 575 | 1,5 | 2,5 | 610 | 0,19 | 16 |
| 6 | 88 | 0,25 | 515 | 1,6 | 2,5 | 600 | 0,2 | 15 |
| 7 | 90 | 0,2 | 550 | 1,7 | 2,8 | 590 | 0,21 | 17 |
| 8 | 80 | 0,25 | 475 | 1,8 | 2,8 | 580 | 0,2 | 17 |
| 9 | 82 | 0,4 | 500 | 1,9 | 2,8 | 550 | 0,22 | 18 |
| 10 | 84 | 0,3 | 525 | 2 | 3 | 500 | 0,23 | 20 |
| 11 | 85 | 0,3 | 575 | 1 | 3 | 500 | 0,18 | 20 |
| 12 | 87 | 0,35 | 515 | 1,2 | 3 | 480 | 0,19 | 22 |
| 13 | 88 | 0,35 | 575 | 1,3 | 3 | 480 | 0,2 | 23 |
| 14 | 90 | 0,25 | 460 | 1,4 | 3 | 560 | 0,21 | 18 |
| 15 | 80 | 0,25 | 475 | 1,5 | 3,5 | 570 | 0,2 | 20 |
| 16 | 82 | 0,2 | 500 | 1,6 | 3,5 | 400 | 0,22 | 25 |
| 17 | 84 | 0,25 | 525 | 1,7 | 3,5 | 400 | 0,23 | 20 |
| 18 | 85 | 0,4 | 550 | 1,8 | 3,5 | 390 | 0,18 | 25 |
| 19 | 87 | 0,3 | 515 | 1,9 | 3,5 | 410 | 0,19 | 18 |
| 20 | 88 | 0,3 | 550 | 2 | 3,5 | 380 | 0,2 | 25 |

**Задача 6.5** Для ДПТ независимого возбуждения, работающего в циклическом режиме построить нагрузочную диаграмму и определить мощность двигателя по условиям нагрева, если известно: *M*1, *M*2, *M*3, *M*4 , - моменты нагрузки на валу для соответствующих участков графика нагрузки, *t*1, *t*2, *t3, t4* , *с*– время работы двигателя с заданными моментами нагрузки, *tП* – время паузы, *n* – частота вращения двигателя,

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *M*1, | *M*2, | *M*3, | *M*4, | *t*1, *с* | *t*2, *с* | *t3, с* | *t4, с* | *tП, с* | *n, об/мин* |
| 1 | 100 | 20 | 10 | 80 | 30 | 20 | 40 | 20 | 20 | 800 |
| 2 | 120 | 30 | 20 | 90 | 30 | 30 | 10 | 30 | 15 | 750 |
| 3 | 80 | 40 | 30 | 70 | 35 | 40 | 15 | 40 | 25 | 1000 |
| 4 | 40 | 50 | 40 | 60 | 20 | 10 | 25 | 10 | 30 | 750 |
| 5 | 50 | 60 | 10 | 100 | 15 | 15 | 35 | 15 | 40 | 1120 |
| 6 | 60 | 70 | 20 | 80 | 25 | 25 | 20 | 25 | 20 | 1060 |
| 7 | 70 | 80 | 30 | 90 | 20 | 35 | 30 | 35 | 15 | 1500 |
| 8 | 20 | 90 | 40 | 70 | 30 | 20 | 40 | 20 | 25 | 750 |
| 9 | 110 | 20 | 10 | 60 | 30 | 30 | 10 | 30 | 30 | 2360 |
| 10 | 30 | 30 | 20 | 100 | 35 | 40 | 15 | 40 | 40 | 2360 |
| 11 | 100 | 40 | 30 | 80 | 20 | 10 | 25 | 10 | 20 | 1500 |
| 12 | 120 | 50 | 40 | 90 | 15 | 15 | 40 | 15 | 15 | 3000 |
| 13 | 80 | 60 | 10 | 70 | 25 | 25 | 10 | 25 | 25 | 1000 |
| 14 | 40 | 70 | 20 | 60 | 20 | 35 | 15 | 20 | 30 | 1000 |
| 15 | 50 | 80 | 30 | 100 | 30 | 20 | 25 | 30 | 40 | 2200 |
| 16 | 60 | 90 | 40 | 80 | 30 | 30 | 35 | 40 | 20 | 2240 |
| 17 | 70 | 20 | 10 | 90 | 35 | 40 | 20 | 10 | 15 | 2120 |
| 18 | 20 | 30 | 20 | 70 | 20 | 10 | 30 | 15 | 25 | 800 |
| 19 | 110 | 40 | 30 | 60 | 15 | 15 | 40 | 25 | 30 | 2360 |
| 20 | 30 | 50 | 40 | 100 | 25 | 25 | 10 | 35 | 40 | 3150 |

**Задача 6.6** Определить жесткость механической характеристики электродвигателя, частоту вращения и мощность двигателя в установившемся режиме (1 – механическая характеристика двигателя, 2 – механическая характеристика рабочей машины).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 |  | 11 |  |
| 2 |  | 12 |  |
| 3 |  | 13 |  |
| 4 |  | 14 |  |
| 5 |  | 15 |  |
| 6 |  | 16 |  |
| 7 |  | 17 |  |
| 8 |  | 18 |  |
| 9 |  | 19 |  |
| 10 |  | 20 |  |

**Задача 6.7** Определить время пуска и время торможения электропривода, если известно: момент инерции, приведенный к валу электродвигателя *J*, *кг·м2*, момент статического сопротивления Мс, , номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя *Р, кВт,* номинальная частота вращения *n* *, об/мин,* коэффициент, характеризующий изменение момента при пуске принимается α=1,5

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| вариант | *J*, *кг·м2* | Мс, | *Р, кВт* | *n* *, об/мин* | вариант | *J*, *кг·м2* | Мс, | *Р, кВт* | *n* *, об/мин* |
| 1 | 0,2 | 3 | 5 | 1480 | 11 | 0,18 | 7 | 7,5 | 1480 |
| 2 | 0,22 | 4 | 5,5 | 980 | 12 | 0,19 | 6 | 7 | 980 |
| 3 | 0,23 | 5 | 6 | 970 | 13 | 0,2 | 3 | 6 | 970 |
| 4 | 0,18 | 6 | 6,5 | 740 | 14 | 0,21 | 4 | 5 | 740 |
| 5 | 0,19 | 7 | 7 | 720 | 15 | 0,2 | 5 | 5,5 | 720 |
| 6 | 0,2 | 8 | 7,5 | 960 | 16 | 0,22 | 6 | 6 | 960 |
| 7 | 0,21 | 9 | 8 | 1470 | 17 | 0,23 | 7 | 6,5 | 1470 |
| 8 | 0,2 | 10 | 9 | 1490 | 18 | 0,18 | 8 | 7 | 1490 |
| 9 | 0,22 | 8 | 7,5 | 950 | 19 | 0,19 | 9 | 7,5 | 1470 |
| 10 | 0,23 | 9 | 7 | 740 | 20 | 0,2 | 10 | 8 | 980 |

**Контрольные вопросы**

1. Что называется электроприводом.
2. Структурная схема электропривода.
3. Классификация электроприводов.
4. Требования, предъявляемые к электроприводам.
5. Координаты электропривода.
6. Нагрузочные диаграммы и тахограммы.
7. Расчет мощности и выбор типа электродвигателя.
8. Метод эквивалентных величин.

**7. ТЕСТ ДЛЯ ПРВЕРКИ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ**

**1.Что называется электрической машиной**

А) Устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации производства.

Б) Электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования одной системы переменного тока в другую.

В) Электромеханический преобразователь, в котором преобразуется механическая энергия в электрическую и наоборот.

**2.** **Машины, мощностью 15000Вт относят к**

А) Микромашинам ;

Б) Машинам большой мощности;

В) Машинам средней мощности;

Г) Машинам малой мощности

**3. Выберете устройство, которое служит для преобразования электроэнергии одного напряжения в электроэнергию другого напряжения:**

А) Электродвигатель;

Б) Трансформатор;

В) Катушка индуктивности;

Г) Генератор.

**4. Какая величина не является показателем качества электроэнергии:**

А) Отклонение частоты;

Б) Несинусоидальность формы кривой напряжения;

В) Коэффициент мощности;

Г) Несимметрия 3-х фазной системы напряжения.

**5. Что является номинальной мощностью электрических двигателей**

А) Полезная механическая мощность, кВт;

Б) Полная электрическая мощность кВА;

В) Полезная активная мощность кВт;

Г) Полезная реактивная мощностькВАР

**6. Электрические машины, генерирующие реактивную мощность называются:**

А) Трансформаторами;

Б) Генераторами;

В) Двигателями;

Г) Компенсаторами

**7. Электрические машины, используемые для управления объектами большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности называются:**

А) Усилителями

Б) Генераторами;

В) Двигателями;

Г) Компенсаторами

**8.** **Номинальной мощностью генератора переменного тока является:**

А) Полезная механическая мощность, кВт;

Б) Полная электрическая мощность кВА;

В) Полезная активная мощность кВт;

Г) Полезная реактивная мощностькВАР

**9. Какие машины используют в качестве генераторов переменного тока:**

А) Асинхронные;

Б) Синхронные;

В) Коллекторные;

Г) Трансформаторы.

**10. Машины, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал называются:**

А) Усилителями;

Б) Сельсинами;

В) Тахогенераторами;

Г) Компенсаторами.

**11.Дайте определение электродвигателя**

А) Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую;

Б) Электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования одной системы переменного тока в другую;

В) Машина, преобразующая электрическую энергию в механическую.

**12. Как обозначаются машины, которые могут работать в районах умеренного климата на открытом воздухе**

А) У3;

Б) ХЛ1;

В) У1;

Г) М2.

**13. Какие законы лежит в основе работы электрических машин?**

А) Законы Ома;

Б) Закон  Джоуля – Ленца;

В) Законы электромагнитной индукции и электромагнитных сил;

Г) Законы Ньютона.

**14. Производство и распределение электроэнергии в энергосистеме Российской Федерации осуществляется на частоте**

А) 200 Гц;

Б) 60 Гц;

в) 50 Гц;

Г) 100 Гц.

**15. В цепях синусоидального тока активными являются сопротивления \_\_\_ элементов:**

А) Емкостных;

Б) Резистивных;

В) Индуктивных;

Г) Индуктивно связанных.

**16. Машины синхронной связи называются:**

А) Усилители

Б) Сельсины;

В) Тахогенераторы;

Г) Компенсаторы.

**17. Машины, осуществляющие синхронный поворот, или вращение нескольких механически не связанных между собой осей называются:**

А) Усилители;

Б) Сельсинами;

В) Тахогенераторы;

Г) Компенсаторы.

**18. Какие машины могут работать на открытом воздухе**

А) Открытые;

Б) Защищенные;

В) Брызго- и капле- защищенные;

Г) Закрытые.

**19. Машины, с частотой вращения 5000 об/мин относят к:**

А) Быстроходным;

Б) Тихоходным;

В) Сверхбыстроходным.

**20. Машины, применяемые для преобразования напряжения в системе передачи и распредления электроэнергии называют**

А) Усилителями;

Б) Генераторами;

В) Двигателями;

Г) Трансформаторами.

**21. Электропривод состоит из каких основных частей, как…**

А) Силовая часть и система управление;

Б) Механическая и динамическая;

В) Система регулирования;

Г) Система устойчивости.

**22. 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.

**23. Плавность регулирования характеризуется…**

А) Числом устойчивых скоростей;

Б) Числом устойчивых моментов;

В) Числом устойчивых сил;

Г) Устойчивостью по всем характеристикам.

**24. Диапазон регулирования зависит от…**

А) От нагрузки;

Б) От внешних сил;

В) От внутренних сил;

Г) От скорости момента.

**25. 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 в электродвигателю;

Г) Передачи электрической энергии к управляющему устройству.

**26. 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.

**27. Характеристики электродвигателя, полученные при номинальных параметрах электродвигателя и отсутствии в его цепях добавочных сопротивлений, называются…**

А) Искусственными;

Б) Естественными;

В) Физическими;

Г) Параметрическим.

**28. Режим электродвигателя, при котором создаваемый им момент противодействует движению рабочей машины называется…**

А) Тормозным;

Б) Противодействующим;

В) Обратным;

Г) Холостым ходом.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В условиях интенсивного развития энергоемких электротехнологических процессов, важное значение приобретает эффективность электропривода, который является основным потребителем электроэнергии во всех развитых странах. Для надежной и безаварийной работы электропривода необходим грамотный расчет и выбор типа электродвигателя.

В пособии рассмотрены характерные особенности трансформаторов, асинхронных машин, машин постоянного тока, синхронных машин, предложены варианты заданий и контрольные вопросы по каждому разделу, тесты для проверки остаточных знаний.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ванурин, В.Н. Электрические машины. [Электронный ресурс] : Учебники — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 304 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/72974 — Загл. с экрана.
2. Епифанов, А.П. Электропривод. [Электронный ресурс] : Учебники / А.П. Епифанов, Л.М. Малайчук, А.Г. Гущинский. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 400 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/3812 — Загл. с экрана
3. Мищенко А.В., Моторина Н.П. «Электромеханика» - учебно-методическое пособие. – 2008. Из-во ТГТУ- 82с.
4. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
5. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко.- М.: «Академия», 2008.-202с.
6. Епифанов А.П. Основы электропривода [Электронный ресурс]: Учебник для вузов / А.П. Епифанов.- СПб.: Лань, 2009.-192с. : ил. Загл. с экрана.- Режим доступа: [http://e.lanbook.com](http://e.lanbook.com/)
7. Фролов, Ю.М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу. [Электронный ресурс] : Учебные пособия / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 368 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/book/3185 — Загл. с экрана

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ | 4 |
| 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ | 16 |
| 3. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ (АМ) | 34 |
| 4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 50 |
| 5. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ | 66 |
| 6. ЭЛЕКТРОПРИВОД | 79 |
| 7. ТЕСТ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ | 103 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 110 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 111 |