

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования

«Самарский государственный университет путей сообщения» в г. Саратове

Филиал СамГУПС в г. Саратове

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

**ПМ 01. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава
МДК 01.01. Конструкция, техническое обслуживание и ремонт подвижного
состава**

тема «Электрические машины»

Саратов 2022

Введение

1. В.1 Роль электрических машин и трансформаторов в электрификации отраслей экономики и на железнодорожном транспорте

Электрификация является стержнем построения экономики общества. Промышленность, сельское хозяйство, транспорт, быт не могут обойтись без широкого применения разнообразных типов электрического оборудования. Одним из основных типов этого оборудования являются электрические машины.

Электрическая машина – это электромеханическое устройство, предназначенное для преобразования механической энергии в электрическую или наоборот, а также для преобразования электрической энергии с одними параметрами в электрическую энергию с другими параметрами.

Современная электроэнергетика предполагает:

- 1) производство электрической энергии на электрических станциях;
- 2) передачу электрической энергии к месту потребления;
- 3) распределение электрической энергии между потребителями;
- 4) потребление электрической энергии

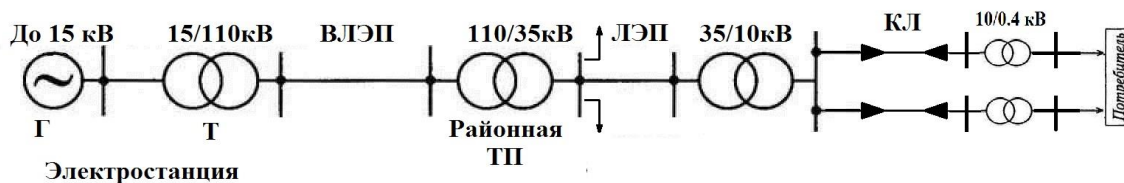


Рисунок 1

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами – **генераторами**, преобразующими механическую энергию в электрическую. Основная часть электроэнергии (до 80%) вырабатывается на тепловых станциях, где при сжигании топлива (уголь, мазут,

газ) нагревается вода и переводится в пар высокого давления, который подается в турбину и приводит во вращение ее ротор (тепловая энергия преобразуется в механическую). Вращение ротора турбины передается на вал генератора в котором в результате электромагнитных процессов механическая энергия преобразуется в электрическую. Процесс производства электроэнергии на атомных электростанциях аналогичен тепловым.

Процесс выработки электроэнергии на гидравлических электростанциях состоит в следующем: вода, поднятая плотиной на определенный уровень, сбрасывается на рабочее колесо турбины, получаемая при этом механическая энергия путем вращения колеса турбины передается на вал электрического генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую. В процессе потребления электрической энергии происходит преобразование ее в другие виды энергии (тепловую, механическую). Около 70% электрической энергии используются для приведения в движение станков, механизмов, транспортных средств, т. е. для преобразования ее в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электрическими машинами - *электродвигателями*.

Электродвигатель – основной элемент электропривода рабочих машин. Хорошая управляемость и простота распределение электроэнергии позволяет применять многодвигательный электропривод механизмов, что значительно упрощает механизмы машин, т.к. уменьшается число механических передач.

Электродвигатели широко применяются на транспорте в качестве тяговых двигателей, приводящих во вращение колесные пары электровазов, электропоездов, троллейбусов и т.д. Широко применяются электрические машины малой мощности (микромашин) от долей до нескольких сотен Ватт в бытовой технике.

Произведенную (выработанную) на электростанции электрическую энергию необходимо передать в место ее потребления и распределить среди множества потребителей (предприятия, транспорт, жилые дома). Передачу электрической энергии на большие расстояния осуществляют на высоком напряжении (до 500 кВ и более), чем обеспечивают минимальные потери в линии электропередачи. В процессе передачи и распределении электрической энергии приходится неоднократно повышать и понижать напряжение. Этот процесс выполняется с помощью электромагнитных устройств, называемых *трансформаторами*.

Строго говоря, трансформатор не является электрической машиной, поскольку его работа не связана с преобразованием электрической энергии в механическую или наоборот, кроме того трансформатор не имеет движущихся частей – это статичное устройство, но т.к. электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторе аналогичны процессам, происходящим при работе электрической машины, поэтому трансформаторы включают в состав электрических машин.

2. В.2 Классификация, назначение и номинальный режим электрических машин

По назначению электрические машины делятся на:

- генераторы;
- электродвигатели;
- трансформаторы.

Деление на генераторы и двигатели достаточно условное, так как работа электрических машин обратима. К преобразователям можно отнести как трансформаторы, так и машины преобразователи (тахогенераторы, электромашинные усилители, сельсины).

По принципу действия электрические машины делятся на:

- коллекторные;
- бесколлекторные.

Эти машины отличаются как принципом действия, так и конструкцией.

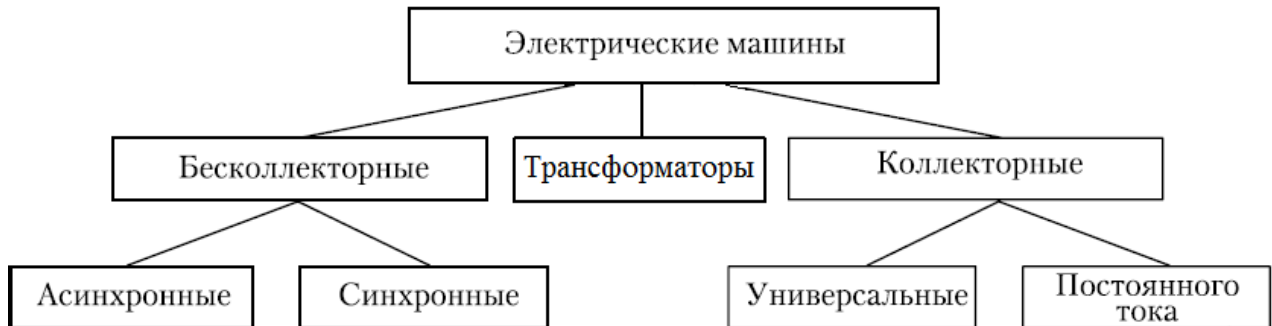


Рисунок 2

Бесколлекторные электрические машины разделяются на синхронные и асинхронные, бывают как однофазные, так и многофазные.

По мощности (Р) электрические машины разделяют на:

- микромашины: до 500 Вт;
- машины малой мощностью: 500 Вт ... 20 кВт;
- машины средней мощности: 20 кВт...250 кВт;
- машины большой мощности: более 250 кВт.

По частоте вращения электрические машины различают:

- тихоходные: до 300 об/мин;
- средней частоты вращения: от 300 до 1500 об/мин;
- быстроходные: 1500... 3000 об/мин;
- сверхбыстроходные: более 3000 об/мин.

Номинальным режимом работы электрической машины называют режим для которого была изготовлена эта машина заводом-изготовителем. Параметры, которые относятся к этому режиму, называются номинальными и указываются в паспорте электрической машины, напряжение и ток в паспорте всегда указываются **только линейные**.

3. В.3 Принцип действия электрических машин, как электромеханических преобразователей энергии

Работа электрических машин основана на законе электромагнитной индукции, описывающим взаимодействие проводника, обтекаемого током, с магнитным полем, а также на законе полного тока.

Первая формулировка закона электромагнитной индукции (формулировка Фарадея): **при движении проводника в магнитном поле, перпендикулярно линиям магнитной индукции, в нём наводится Э.Д.С. пропорциональная магнитной индукции поля, длине проводника и скорости его движения.**

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Направление наведенной в проводнике Э.Д.С определяется по правилу правой руки.

Вторая формулировка закона электромагнитной индукции (формулировка Максвелла): **Э.Д.С. электромагнитной индукции, наведенная в контуре, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур.**

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Знак « $\rightarrow$ » в правой части формулы показывает, что (согласно правила Ленца) *ток, возникающий в контуре под действием наведенной ЭДС всегда направлен таким образом, что противодействует изменению магнитного потока, пронизывающего контур.*

***Принцип преобразования механической мощности в электрическую
(принцип работы генератора)***

При работе электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую.

На проводник действует внешняя сила $F_{\text{мех}}$, под действием которой он перемещается в магнитном поле. В проводнике наводится ЭДС. Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление (нагрузку), то под действием ЭДС в проводнике начинает протекать ток I . Таким образом, проводник в магнитном поле в этом случае можно рассматривать, как элементарный генератор.

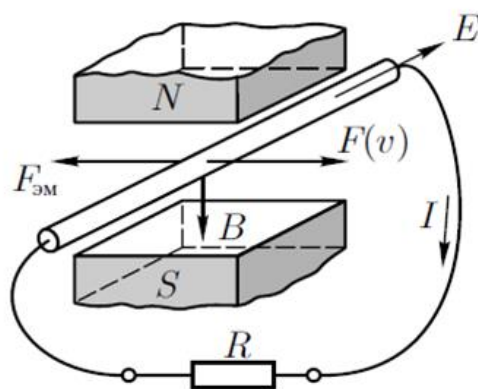


Рисунок 3

На проводник с током в магнитном поле начинает действовать электромагнитная сила. Направление этой силы определяется ***правилом левой руки***, это сила направлена противоположно движению проводника, то есть является тормозящей по отношению к движущей силе. При равномерном

движении проводника $F_{\text{мех}} = F_{\text{эл}}$, тогда первичный двигатель должен развивать мощность:

$$P_{\text{МЭХ}} = F_{\text{МЭХ}} \cdot \mathcal{L} = F_{\text{ЭМ}} \cdot \mathcal{L} = B \cdot I \cdot l \cdot \mathcal{L} = E \cdot I = P_{\text{ЭЛ}}$$

Вывод: *при движении проводника в магнитном поле происходит преобразование механической мощности, затрачиваемой внешней силой, в электрическую. На данном принципе основана работа генератора электрической энергии.*

Принцип преобразования электрической энергии в механическую (принцип работы электродвигателя)

Если проводник, обтекаемый током, поместить в магнитное поле, то на него начнет действовать электромагнитная сила, направление которой определяется правилом левой руки. Под действием электромагнитной силы проводник начинает движение.

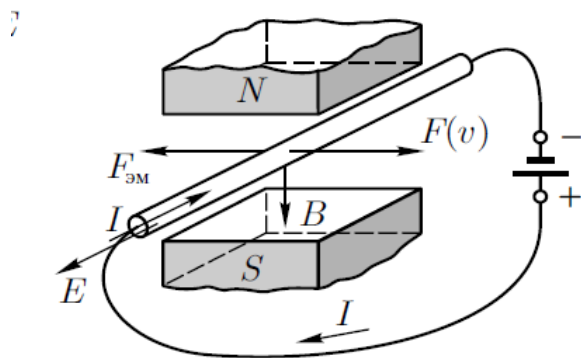


Рисунок 4

При движении проводника в магнитном поле в нем наводится ЭДС

$$E = B \cdot l \cdot \vartheta$$

с направлением противоположным напряжению U источника питания $E_{\text{встречная}}$.

Согласно 2-му закону Кирхгофа, составляем уравнение:

$$U - E_{\text{встр}} = I \cdot r,$$

где r – электрическое сопротивление проводника.

То есть часть напряжения U уравнивается ЭДС $E_{\text{встр}}$, наведенной в проводнике, а другая часть составляет падение напряжения в проводнике.

$$U \cdot I = E_{\text{встр}} \cdot I + I^2 \cdot r. \text{ Подставим значение Э.Д.С:}$$

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot \vartheta \cdot I + I^2 \cdot r$$

$$U \cdot I = F_{\text{эл}} \cdot \vartheta + I^2 \cdot r = F_{\text{мех}} \cdot \vartheta + I^2 \cdot r \rightarrow P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{ТЕПЛОВАЯ}}$$

$U \cdot I$ – электрическая мощность взятая от источника Э.Д.С

$E_{\text{встр}} \cdot I$ – механическая мощность = $F_{\text{мех}} \cdot \vartheta$

$I^2 \cdot r$ – тепловая мощность.

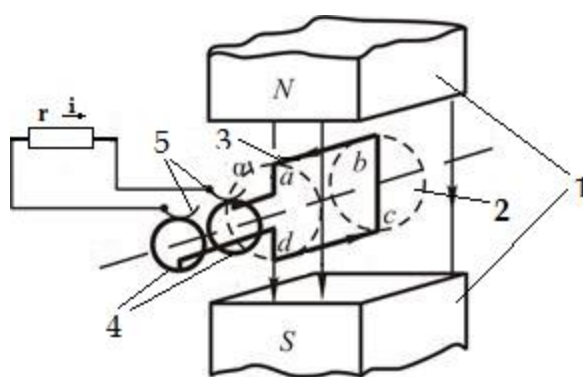
$$P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{ТЕПЛ}}$$

Вывод: при движении проводника с током в магнитном поле происходит преобразование электрической мощности в механическую и тепловую. На данном принципе основана работа электродвигателя.

Тема: Электрические машины постоянного тока

1. Принцип действия генератора постоянного тока

Машины постоянного тока относятся к коллекторным электрическим машинам. Их отличительный признак – наличие коллектора, который является механическим преобразователем переменного тока в постоянный. Это преобразование необходимо, поскольку в обмотке якоря коллекторной машины индуцируется переменная Э.Д.С и протекает переменный ток.



1-NS- неподвижный магнит

2-стальной цилиндр

3-обмотка из одного витка abcd

4-кольца, изолированные друг от друга и от вала

5-электрические щётки от которых ток отводится во внешнюю цепь.

Рисунок 5

При вращении цилиндра проводники, ab и cd перемещаются в магнитном поле и в них наводится Э.Д.С.

Если внешняя цепь замкнута, то по цепи протекает ток. Направление Э.Д.С. определяется правилом правой руки.

Для положения, указанного на чертеже, щетка А имеет положительный потенциал, а щетка В отрицательный.

При повороте цилиндра на 180° , проводники ab и cd поменяются местами в результате изменится направление наведенных в них Э.Д.С, а, следовательно, направление тока во внешней цепи.

Число пар полюсов электрической машины обозначается буквой «р». За один поворот витка число периодов наведённой ЭДС будет равным числу пар полюсов «р».

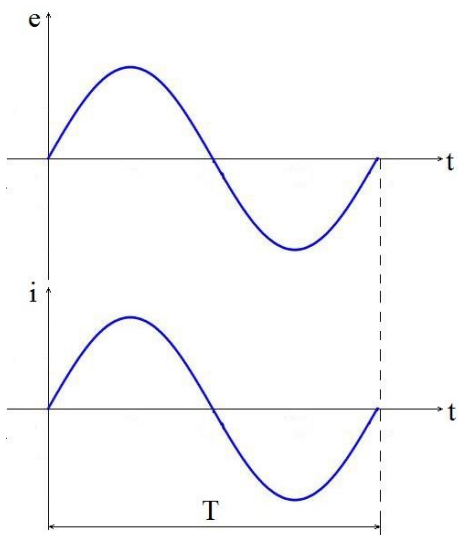


Рисунок 6

В минуту число периодов (циклов) будет равно произведению $p \cdot n$, где n - число оборотов в минуту. Тогда в секунду число периодов будет равно: $f = \frac{p \cdot n}{60}$ Это выражение является частотой переменного тока.

2. Принцип выпрямления тока

Чтобы получить постоянный ток во внешней цепи, вместо колец применяют специальное приспособление – коллектор, который выполняет роль выпрямителя.

Простейший коллектор представляет собой два полукольца, изолированные друг от друга и от вала.

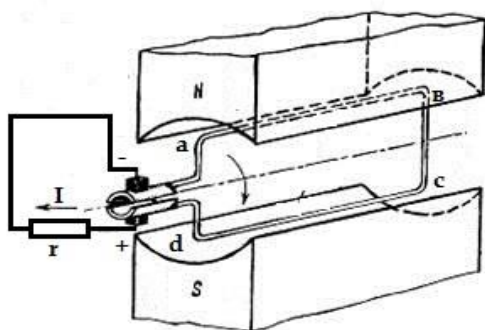


Рисунок 7

Если проводник ab находится под северным полюсом магнита, то на полукольце коллектора и на щётке B будет отрицательный потенциал, а на

щетке А – положительный. При повороте цилиндра на 180° проводник ab окажется под южным полюсом магнита, направление наведённой э.д.с. в нем изменится и на полукольце коллектора с которым он связан будет уже положительный потенциал. Так как полукольцо повернется на 180° вместе с проводником ab , то оно будет иметь контакт с щеткой А, таким образом на щетке А по-прежнему будет положительный потенциал, а на щетке В – отрицательный. Направление тока во внешней цепи при повороте витка обмотки на 180° не изменится.

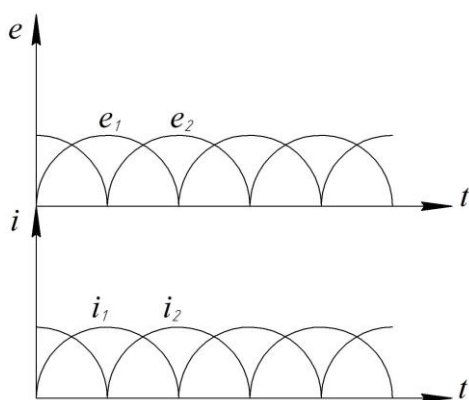


Рисунок 8

Для уменьшения пульсации выпрямленного тока, на цилиндре, который у машин постоянного тока называется якорем, располагают несколько витков обмотки, соответственно при этом увеличивается число коллекторных пластин, а вращение якоря электрической машины становится устойчивым и равномерным.

3. Устройство машины постоянного тока

Основными частями машины постоянного тока являются неподвижная часть – статор, на котором располагаются магнитные полюса, создающие магнитное поле машины. Эту часть машины также называют индуктором. Вращающаяся часть машины с расположенной на ней обмоткой, в которой наводится Э.Д.С., называется якорем.

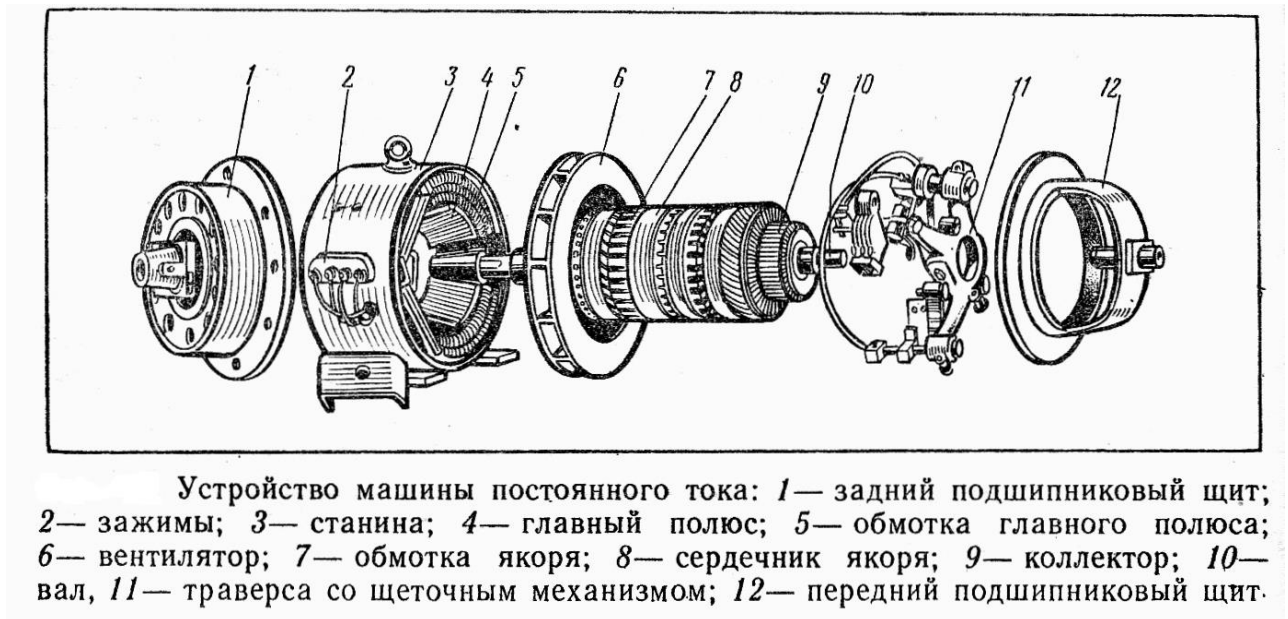


Рисунок 9

Статор электрической машины постоянного тока состоит из корпуса (станины), выполненного из чугуна или стали, у тяговых электродвигателей подвижного состава корпус называется остовом. Внутри корпуса укреплены сердечники главных магнитных полюсов, набранные из отдельных пластин электротехнической стали. Полюсные наконечники магнитных полюсов создают необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и якорем. На сердечник укладывается полюсная катушка с обмоткой возбуждения, выполненной из изолированного медного провода.

К торцевым частям корпуса прикреплены подшипниковые щиты, предназначенные для центрирования якоря относительно статора, в подшипниковых щитах укреплены подшипники.

На одном из подшипниковых щитов укреплен траверса – устройство, предназначенное для крепления щёточного механизма и смещения щёток относительно коллектора.

Щетки бывают графитные, угольные и медно-графитные. С их помощью осуществляется электрический контакт между подвижной и неподвижной частями электрической машины.

Корпус в нижней своей части имеет лапы для крепления электрической машины.

Якорь электрической машины постоянного тока состоит из вала, на который, запрессовывается сердечник якоря, набранный из листов электротехнической стали. Сердечник имеет форму цилиндра, на внешней поверхности которого имеются пазы, в которых уложена обмотка якоря, выполненная из медных изолированных проводов. Концы витков обмотки присоединяются к коллекторным пластинам. В якорной обмотке машины постоянного тока происходит преобразование подведённой к машине энергии.

Коллектор закреплён неподвижно на валу и вращается вместе с якорной обмоткой. Коллектор выполнен из пластин твердотянутой меди изолированных друг от друга миканитовыми прокладками. Между коллекторными пластинами имеются пазы глубиной до 1,5 мм. Электрический контакт с коллектором осуществляется через щетки.

Так же на валу укреплен крыльчатка вентилятора и напрессованы подшипники.

4. Материалы, применяемые при изготовлении трансформаторов и электрических машин

Для изготовления трансформаторов и электрических машин применяются материалы, которые можно разбить на следующие группы: *конструкционные*, *“активные”*, *изоляционные*.

Конструкционные материалы идут на изготовление тех частей и деталей электрических машин и трансформаторов, которые служат, главным образом, для передачи и восприятия механических воздействий в электрических машинах. В основном применяются те же конструкционные материалы, что и в общем машиностроении: чугун (простой, ковкий), сталь (литая, ковкая), цветные металлы и их сплавы, пластмассы.

Активные материалы служат в качестве магнитных и проводниковых (токопроводящих) для создания в трансформаторах или электрических машинах необходимых условий в которых протекают электромагнитные процессы.

Некоторые части электрических машин работают в сложных физических условиях, поэтому к ряду материалов предъявляются требования, относящиеся одновременно как к их механическим, так и к магнитным и электрическим свойствам.

Изоляционные материалы имеют своим назначением электрически изолировать токопроводящие части трансформаторов и электрических машин от других их частей и друг от друга.

Активные материалы.

а) *Магнитные материалы.* 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 миллиметра, поскольку в этом случае значительно снижаются потери от вихревых токов, наведенных переменным магнитным полем, имеющем место в сердечнике трансформатора.

Для изготовления отдельных частей магнитной системы электрических машин применяются различные ферромагнитные материалы: листовая электротехническая сталь различных сортов, чугуны, стальное литье, листовая (конструкционная) сталь, кованая сталь.

Те части машины, где имеет место переменное магнитное поле, собираются из изолированных один от другого листов электротехнической стали (такая конструкция называется шихтованной) с содержанием кремния до 2–3% обычно толщиной 0,5 мм.

Потери мощности в листовой стали от гистерезиса и вихревых токов характеризуется удельными потерями, то есть потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном изменении индукции. Они составляют для листовой стали, применяемой для нормальных машин, при толщине 0,5 мм около 3 Вт/кг; для листовой стали с содержанием кремния до 4-5% применяемой для трансформаторов при толщине 0,5 мм около 1,4–1,5 Вт/кг; при толщине 0,35 мм около 1,3-1,2 Вт/кг.

Указанная листовая сталь называется горячекатаной (по способу изготовления). В последние годы она в ряде случаев вытесняется холоднокатаной листовой сталью, имеющей более высокие электромагнитные свойства, большее значение магнитной проницаемости и меньшие удельные потери. Холоднокатаная сталь в настоящее время широко применяется для трансформаторов и крупных электрических машин. Чугун применяется для частей магнитной системы крайне редко из-за его плохих магнитных свойств

Стальное литье и ковкая сталь так же, как и конструкционная листовая сталь применяется для тех частей магнитной системы машин, в которых имеет место постоянное магнитное поле.

б) **Проводниковые материалы.** К ним относится, прежде всего, медь – сравнительно недорогой материал, имеющий малое удельное сопротивление (т.е., обладающий хорошей проводимостью).

Наряду с медью для проводников применяются также алюминий и иногда некоторые сплавы (латунь, фосфористая бронза).

Медные и алюминиевые проводники для обмоток трансформаторов и электрических машин изготавливаются круглых и прямоугольных сечений с различными видами изоляции. Для изоляции применяется хлопчатобумажная пряжа, телефонная бумага, 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 напряжение до 700 В часто выбирают провода с эмалевой изоляцией. Применяемые при этом нагревостойкие эмалевые лаки позволяют получить тонкое и вместе с тем достаточно надежное изоляционное покрытие проводов.

Изоляционные материалы.

Изоляцию необходимо считать одним из основных элементов трансформаторов и электрических машин. Она в большой степени определяет их надёжность в работе.

Нагревостойкость изоляционных материалов, применяемых 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.

Требуется также, чтобы изоляция обладала достаточной механической прочностью, так как в процессе изолирования обмоток, укладки их на сердечники трансформаторов или электрических машин, а также в условиях эксплуатации изоляция подвергается значительным механическим усилиям.

По приведённым признакам на первое место должна быть поставлена слюдяная изоляция. Она наилучшим образом удовлетворяет перечисленным выше требованиям. Исходным материалом здесь служит слюда. Из слюды, щипаной на мелкие пластинки, изготавливаются **миканиты**, **микаленты**, **микафолий**.

Миканиты представляют собой листы, состоящие из мелких пластинок слюды, склеенных между собой при помощи специальных лаков.

Микалента состоит из одного слоя тонкой щипаной слюды, оклеенной с двух сторон бумагой.

Микафолий состоит из одного — трех слоев щипаной слюды, наклеенной на бумагу; изготавливается в виде листов. Вместо бумаги применяется также стеклоткань.

Микалента и микафолий являются относительно дорогими изоляционными материалами и применяются главным образом для машин на высокие напряжения (от 3000 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. Однако непитанные волокнистые материалы обладают гигроскопичностью, плохой теплопроводностью и невысокой электрической прочностью. Поэтому они

применяются для изоляции электрических машин только в пропитанном виде, что значительно улучшает их свойства.

Большое практическое значение получили кремнийорганические изоляционные материалы для покрытия проводников, предложенные и разработанные в СССР.

Для улучшения свойств изоляции электрических машин необходимо применение пропиточных и покровных лаков, а также компаундов — специальных масс из битумов, высыхающих масел и канифоли.

Современные трансформаторы, как правило, делаются масляными. Их сердечник с обмотками помещается в баке, заполненном специальным трансформаторным маслом. Исходными продуктами для его получения являются масляные дистилляты нефти.

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, 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. Эти материалы допускают нагрев до 105°C.

Класс изоляции В: изделия из слюды, асбеста, стеклянного волокна, содержащие вяжущие вещества. Допускают нагрев до 135°C.

Кроме классов изоляции А и В, в последние годы для электрических машин применяются классы изоляции Е (120°C), Н (155°C) и F (180°C). Из них класс Е занимает промежуточное положение между классами А и В. К классам изоляции Н и F относятся наиболее нагревостойкие изоляционные материалы.

5. Якорные обмотки машин постоянного тока.

Якорной обмоткой электрической машины постоянного тока называют замкнутую систему проводников, расположенных в пазах якоря и присоединенных к коллектору.

Якорная обмотка является наиболее ответственной частью машины, т.к. в ней происходит преобразование подведенной к машине энергии.

К якорной обмотке предъявляются следующие требования:

- 1) Должна обеспечивать необходимую по величине и форме Э.Д.С.
- 2) Обмотка должна иметь необходимую механическую и электрическую прочность.
- 3) Обмотка должна выдерживать по нагреву заданную величину тока.
- 4) Электрическое сопротивление обмотки должно быть определенной величины.
- 5) Технология изготовления обмотки должна быть, по возможности простой.

Основным элементом обмотки является секция.

Секция — это один или несколько витков, присоединённые к двум коллекторным пластинам.

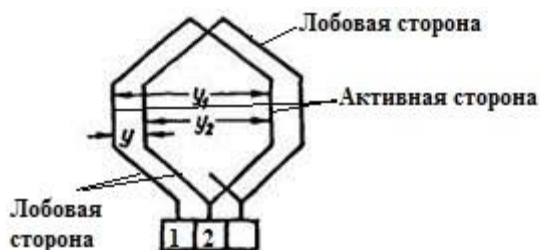


Рисунок 10

Ширина секции y_1 должна быть равна полюсному делению « τ ».

Полюсное деление « τ » - это часть поверхности якоря, приходящаяся на один полюс.

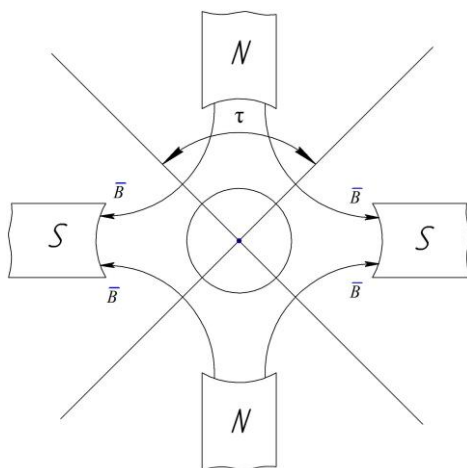


Рисунок 11

Геометрическая нейтраль

воображаемая плоскость, расположенная перпендикулярно силовым линиям основного магнитного поля машины в межполюсном пространстве и проходящая через центр якоря:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p},$$

где D_a – диаметр якоря в мм.

Ширина секции должна быть равна τ для того, чтобы в секции наводилась максимальная Э.Д.С. На практике y_1 может быть равен τ , тогда обмотка называется с полным шагом, так же y_1 может быть меньше τ , тогда обмотка называется с укороченным шагом.

Углубление на поверхности якоря, куда закладываются проводники обмотки, называется реальным пазом.

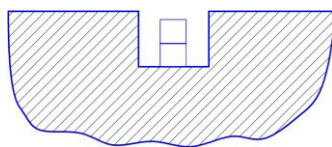


Рисунок 12

Обмотка якоря выполняются двухслойной:

начало секции укладывается в верхний слой, конец секции в нижний.

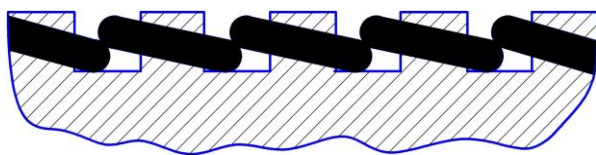


Рисунок 13

Два проводника, расположенные один над другим в реальном пазу называются элементарным пазом.

В одном реальном пазу может быть помещено несколько элементарных пазов.

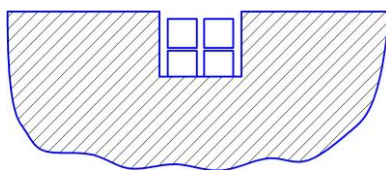


Рисунок 14

Число секций обмотки обозначается буквой S .

Число элементарных пазов $Z_э$.

Число коллекторных пластин K .

Число активных сторон (пазовых) в обмотке N .

В зависимости от способов соединения секций с коллекторными пластинами и формы секций различают следующие типы обмоток:

- 1) простая петлевая обмотка;
- 2) простая волновая обмотка;
- 3) сложная петлевая обмотка;
- 4) сложная волновая обмотка;
- 5) комбинированная обмотка.

Для уменьшения пульсации ЭДС, наводимой в якорной обмотке машины, эти обмотки конструируются так, чтобы под каждым из главных полюсов размещалось несколько активных (пазовых) сторон секций обмотки.

Получается, что в нескольких соседних секциях индуцируется Э.Д.С. одного направления, т.к. эти секции соединены последовательно между собой в секционную ветвь, то ЭДС ветви складывается из ЭДС наведенных в каждой секции.

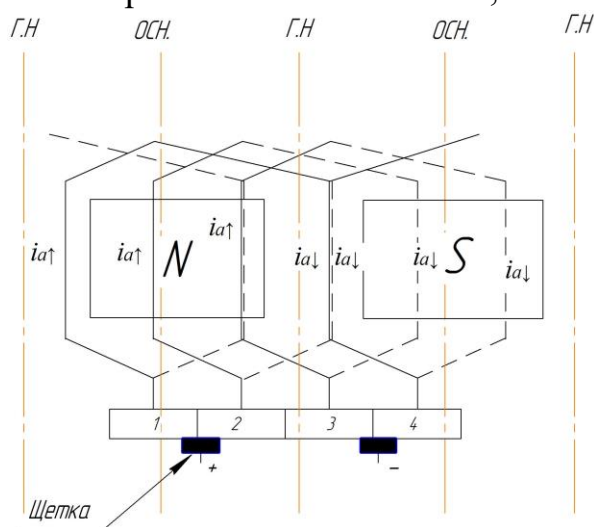


Рисунок 15

При количестве пар полюсов больше 1, количество секционных ветвей с индуцируемой одноименной ЭДС будет несколько и соединятся между собой они будут параллельно.

Таким образом, ЭДС всей обмотки якоря определяется значением ЭДС одной параллельной секционной ветви: $E_a = e_a$.

Величина тока всей якорной обмотки будет равна сумме токов всех параллельных ветвей.

$I_a = 2a \cdot i_a$, где a – число пар параллельных ветвей, i_a – ток, протекающий по одной параллельной ветви.

6. Э.Д.С. обмотки якоря и электромагнитный момент машины постоянного тока.

Величина ЭДС, индуцируемая в проводниках обмотки якоря определяется выражением: $e = B \cdot l \cdot \vartheta$

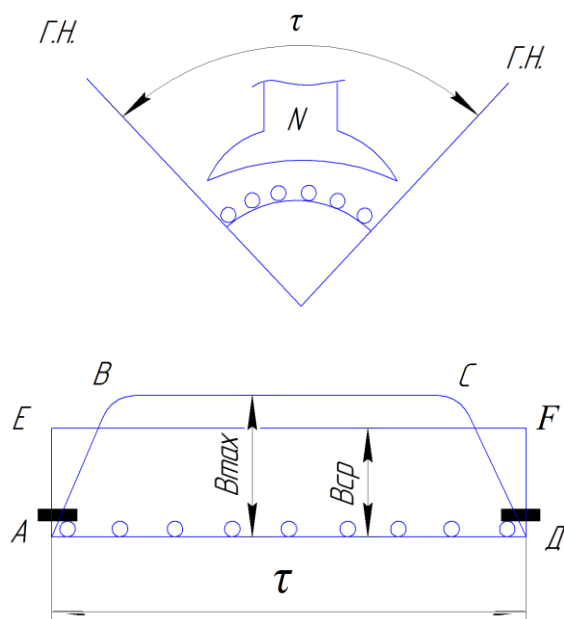


Рисунок 16

Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре под полюсами в пределах одного полюсного деления определяется трапецеидальной кривой ABCD. Для определения ЭДС удобнее пользоваться средним значением магнитной индукции, которое определяется высотой прямоугольника AEFД. Площадь прямоугольника равна площади трапеции ABCD.

Тогда значение ЭДС: $E_{cp} = B_{cp} \cdot l \cdot v$ – это среднее значение ЭДС в одном проводнике.

Если количество проводников обмотки N , а количество параллельных ветвей $2a$, то количество проводников, входящих в одну ветвь будет равно: $\frac{N}{2a}$

Величина якорной ЭДС обмотки определяется величиной ЭДС одной параллельной ветви и зависит от количества проводников, соединенных между собой последовательно, входящих в одну ветвь.

$$E_a = E_{cp} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} \cdot l \cdot v \cdot \frac{N}{2a},$$

где E_a – ЭДС якорной обмотки.

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60},$$

где n – частота вращения, об/мин,

πD – длина окружности.

$$2\pi D = \tau \cdot 2p$$

$$\text{Тогда: } E_a = B_{cp} \cdot l \cdot \frac{\tau \cdot 2p \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} \cdot l \cdot \frac{\tau \cdot N \cdot p}{60a} \cdot n = \frac{N \cdot p}{60a} \cdot \Phi \cdot n$$

$\frac{N \cdot p}{60a} = C_e$ – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции машины.

$$E_a = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

На ЭДС машины влияет положение щеток: при нахождении щеток на геометрической нейтрали ЭДС наибольшая, т.к. в этом случае в каждой параллельной ветви обмотки все секции имеют одинаковые направления ЭДС. Если же щетки сместить с нейтрали, то в параллельных ветвях окажутся секции с противоположным направлением ЭДС, в результате ЭДС обмотки якоря будет уменьшаться.

При прохождении по пазовым проводникам обмотки якоря тока i_a на каждом из проводников появляется электромагнитная сила: $F_{эл} = B_{cp} \cdot l \cdot i_a$

Совокупность этих электромагнитных сил на якоре, действующих на плечо, равное радиусу сердечника якоря $D_a/2$, создает на якоре электромагнитный момент $M_{эм}$.

$$M_{эм} = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a,$$

где I_a – ток якоря.

$\frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} = C_M$ – постоянный коэффициент для данной машины, зависит от ее конструкции.

$$M_{эм} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a$$

Электромагнитный момент машины постоянного тока при ее работе в двигательном режиме является вращающим, а при генераторном режиме – тормозящим.

Из выражения: $E_a = C_e \cdot \Phi \cdot n \longrightarrow \Phi = \frac{E_a}{C_e \cdot n}$

Подставив это выражение в формулу электромагнитного момента, получим:

$$M_{эм} = \frac{60}{2\pi \cdot n} \cdot E_a \cdot I_a = 9,55 \cdot \frac{P_{эм}}{n} = \frac{P_{эм}}{\omega},$$

где $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ – угловая частота вращения;

$P_{эм} = E_a \cdot I_a$ – электромагнитная мощность машины постоянного тока.

Из формулы следует, что **в машинах равной мощности электромагнитный момент больше у машин с меньшей частотой вращения якоря.**

7. Реакция якоря

При работе электрической машины холостую ток обмотки якоря равен нулю, в машине действует только М.Д.С. обмотки возбуждения.

$F_{\text{МДС ВОЗБ}} = I_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}$, где $I_{\text{в}}$ - ток возбуждения, $\omega_{\text{в}}$ - количество витков обмотки возбуждения.

Магнитный поток будет распределяться симметрично относительно оси симметрии полюсов и наибольшее значение магнитной индукции будет в воздушном зазоре на оси симметрии полюсов, а наименьшее – на геометрической нейтрале.

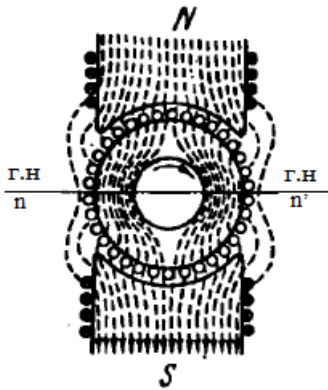


Рисунок 17

В нагруженной машине по обмотке якоря протекает ток, который создает МДС обмотки якоря: $F_{\text{МДСa}} = I_{\text{а}} \cdot \omega_{\text{а}}$
МДС обмотки якоря направлена по оси щеток, т.е. по геометрической нейтрале (ось n-n').

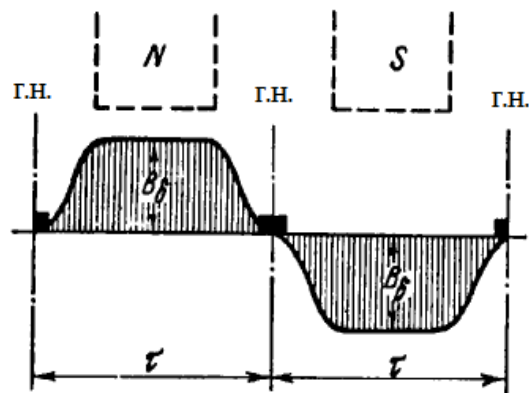


График распределения магнитной индукции

Рисунок 18

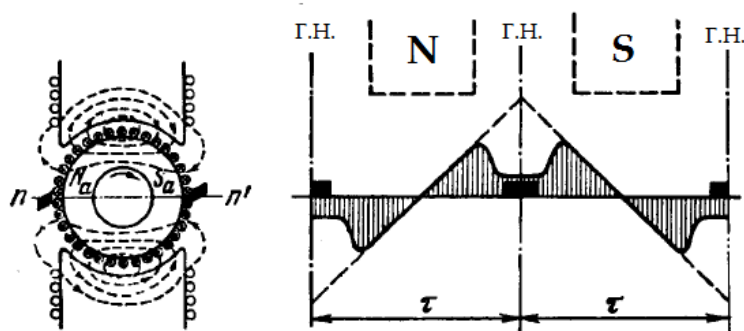


Рисунок 19

Наибольшая М.Д.С. будет на геометрической нейтрали, а наименьшая на оси симметрии полюсов, но из-за большого сопротивления воздушного зазора в межполюсном пространстве наибольшей М.Д.С. будет под концами полюсов и небольшое значение на геометрической нейтрали.

Т.е., в нагруженной машине действуют две М.Д.С.: обмотки возбуждения и обмотки якоря. Эти М.Д.С. складываются и создают результирующее магнитное поле.

Результирующее поле становится несимметричным относительно оси симметрии полюсов, а нейтральная плоскость смещается относительно геометрической нейтрали на угол α и называется физической нейтралью ($m-m'$).

Влияние М.Д.С. якоря на М.Д.С. главных полюсов называется реакцией якоря.

В результате реакции якоря происходит искажение магнитного поля машины.

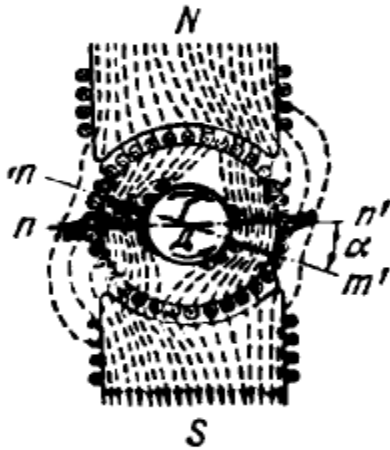


Рисунок 20

У генератора смещения физической нейтрали происходит по ходу вращения якоря, у двигателя - против хода вращения якоря.

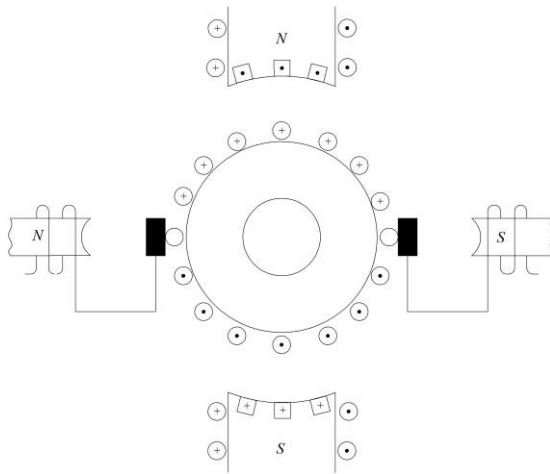
В результате реакции якоря в воздушном зазоре происходит неравномерное распределение магнитной индукции: под набегающими концами щеток магнитная индукция ослабевает, а под сбегающими усиливается. Это приводит к перенапряжению на коллекторных пластинах, что вызывает искрение на скользящем контакте и может привести к возникновению кругового огня, что очень опасно.

Так же реакция якоря приводит у машин, работающих в генераторном режиме, к уменьшению ЭДС, наводимой в якорной обмотке, а, следовательно, к уменьшению мощности машины. У машин, работающих в двигательном режиме, реакция якоря приводит к уменьшению вращающего момента.

Для того, чтобы не нарушалась работа щётчного контакта, щётки необходимо сместить с геометрической нейтрали на физическую нейтраль.

Для устранения вредного влияния реакции якоря в машинах постоянного тока применяют добавочные полюса, которые располагаются в межполюсном пространстве главных полюсов на геометрической нейтрали. Магнитное поле

добавочных полюсов направлено встречно магнитному полю якоря. Для того, чтобы процесс компенсации происходил автоматически – обмотку добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря.



В машинах большой мощности применяют компенсационные обмотки, которые располагают в пазах левых наконечников основных полюсов. Компенсационные обмотки включают последовательно с обмоткой якоря.

Рисунок 21

8. Коммутация в машинах постоянного тока

При работе электрической машины щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь щетки выбирается по допустимой плотности тока.

В щеточном контакте и на коллекторе возможно возникновение искрения. Сильное искрение вызывает порчу коллектора и сокращает срок службы машины.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе подразделяются на:

- 1) Механические – слабое прижатие щёток к коллектору, нарушение геометрической формы коллектора (бочкообразность, конусность, овальность), неплотное закрепление траверсы (вибрация щеткодержателей), негладкая поверхность или загрязнение коллектора и т.д.;
- 2) Потенциальные – повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами, превышающее допустимое значение;
- 3) Электромагнитные (коммутационные) – обусловлены накоплением в коммутирующих секциях якоря запаса электромагнитной энергии ($0,5 \cdot L_c \cdot i^2$) которая, разряжаясь через щётки и коллекторные пластины, приводит к искрению.

Любая из этих причин может вызвать сильное искрение, способное перейти в круговой огонь по коллектору. Искрение может быть вызвано не одной, а несколькими причинами.

Устранение искрения нужно начинать с устранения механических причин.

Искрение на коллекторе оценивают степенью или классом искрения:

Степень 1 – искрения нет

Степень $1\frac{1}{4}$ – слабое точечное искрение под небольшой частью края щётки, не вызывающее почернение коллектора и появления нагара на щётках.

Степень $1\frac{1}{2}$ – слабое искрение под большей частью щётки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, и появлению следов нагара на щётках.

Степень 2 – искрение под всем краем щётки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузках. Приводит к появлению следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также к появлению следов нагара на щётках.

Степень 3 – значительное искрение под всем краем щётки с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устранимому протиранием бензином, а также к подгару и разрушению щёток. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машины, если при этом щётки и коллектор остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Продолжительная надежная работа коллекторно-щеточного контакта происходит при степени искрения, не превышающей $1\frac{1}{2}$.

9. Физическая сущность коммутации

Коммутацией называют процесс переключения секций якорной обмотки машины постоянного тока, из одной параллельной ветви в другую и изменение направления тока в них на обратные, путем замыкания этих секций щетками.

Секцию, в которой происходит процесс коммутации, называют *коммутирующей*.

Время, в течение которого протекает процесс коммутации, называют *периодом коммутации*.

Предположим, что процесс коммутации происходит при идеальных условиях: в коммутирующей секции не наводится никаких ЭДС, а ширина щёток равна ширине одной коллекторной пластины.

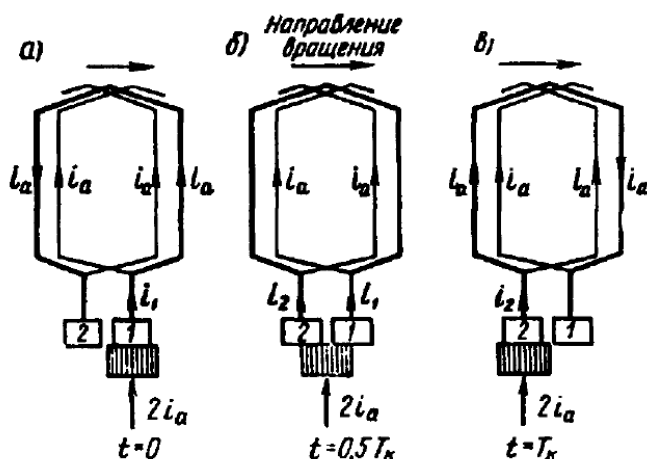


Рисунок 22

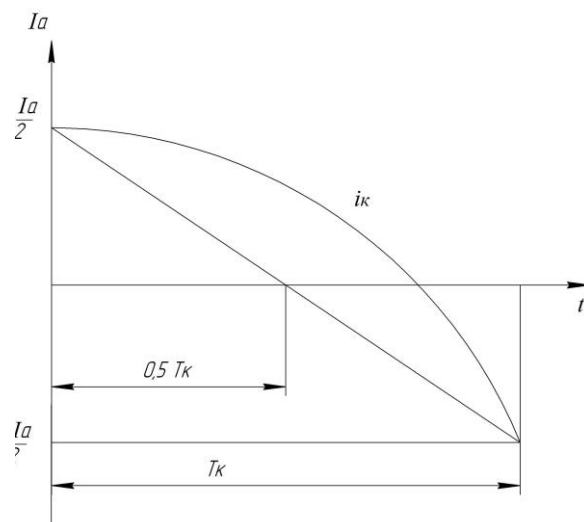


Рисунок 23

В начальный момент коммутации щётка соприкасается только с 1-й коллекторной пластиной, коммутирующая секция принадлежит левой ветви.

Когда щётка перекроет и 1-ю и 2-ю коллекторные пластины ($t=0,5T_k$), ток в коммутирующей секции будет равен нулю.

В конце коммутации щётка будет соприкасаться со 2-ой коллекторной пластиной ($t=T_k$) и коммутирующая секция принадлежит правой ветви.

За время коммутации ток в коммутирующей секции изменяется от $+\frac{I_a}{2}$ до $-\frac{I_a}{2}$.

Такая коммутация называется линейной или идеальной, она наиболее благоприятна, поскольку плотность тока под щеткой остается постоянной, благодаря чему отсутствует искрение.

В действительности, поскольку период коммутации составляет $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с и за это время ток в коммутирующей секции изменяет свое направление, то в процессе коммутации в ней наводятся ЭДС:

1) ЭДС самоиндукции $e_L = -L_c \cdot \frac{di}{dt}$, где L_c - индуктивность секции,

i - ток секции.

2) ЭДС взаимоиנדукции $e_M = -M_c \cdot \frac{di}{dt}$, где M_c - взаимная индуктивность одновременно коммутирующих секций.

Возникает, поскольку щетка одновременно перекрывает несколько коллекторных пластин и процесс коммутации происходит одновременно в нескольких секциях.

3) ЭДС вращения, вызванная магнитным потоком реакции якоря (коммутирующая секция попадает в зону магнитного поля из-за смещения физической нейтральной).

Эти ЭДС складываются и под действием результирующей ЭДС начинает протекать ток коммутации i_k , который направлен так, что препятствует изменению рабочего тока. В первую половину периода коммутации он направлен согласованно с рабочим током и задерживает его уменьшение, а во вторую половину периода коммутации i_k направлен встречно рабочему току и задерживает его увеличение.

Под сбегающим концом щетки плотность тока увеличивается и равна $\frac{I_a}{2} + i_k$, а под набегающим концом – уменьшается ($\frac{I_a}{2} - i_k$). Эта неравномерная плотность тока вызывает искрение под сбегающим концом щетки.

10.Способы улучшения коммутации

Для того чтобы коммутация была линейной необходимо избавиться от тока коммутации, т.е. от ЭДС которые наводятся в коммутирующей секции. Это возможно сделать несколькими способами:

- 1) уменьшить ЭДС взаимоиндукции можно за счет уменьшения ширины щетки, но слишком узкие щетки нежелательны по условиям механической прочности и из-за чрезмерно большой плотности тока, поэтому целесообразно применять щетки шириной 2...3 коллекторных деления;
- 2) для уменьшения ЭДС вращения применяют добавочные полюса, располагаемые между главными полюсами, при этом намагничивающую силу добавочных полюсов делают несколько больше чем МДС якоря, с таким расчетом, чтобы в обмотке якоря компенсировалась не только ЭДС вращения, но и ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции;
- 3) смещение щеток с геометрической нейтрали применяют в машинах у которых отсутствуют добавочные полюса.

Этот способ применим в машинах мощностью до 1кВт и нереверсируемых. Щетки смещают в направлении вращения якоря у генераторов и против направления вращения у двигателей.

Чтобы компенсировалась не только ЭДС вращения, но и ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции, необходимо смещать щетки немного дальше за физическую нейтраль.

11. Генератор постоянного тока

11.1 Классификация генераторов

В зависимости от способов создания магнитного поля электрические машины постоянного тока подразделяются на:

- 1) машины с возбуждением при помощи постоянных магнитов;
- 2) машины с электромагнитным возбуждением.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы подразделяются на:

- 1) генератор с независимым возбуждением – обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока – возбuditеля;
- 2) генератор с самовозбуждением – обмотка возбуждения питается от якоря собственного генератора.

Генераторы с самовозбуждением классифицируются в зависимости от способа включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря:

- 1) с параллельным возбуждением;
- 2) с последовательным возбуждением;
- 3) со смешанным возбуждением.

Номинальный режим работы электрической машины характеризуется следующими параметрами:

- 1) Номинальная мощность P_{2H}
- 2) Номинальное напряжение U_H
- 3) Номинальный ток I_H
- 4) Номинальная частота вращения n_H
- 5) Коэффициент полезного действия η_H

Все эти величины указываются в паспорте машины.

Эксплуатационные свойства электрических машин определяются их характеристиками, которые представляют собой зависимости одних величин от других.

Для генераторов снимаются следующие характеристики:

- 1) Характеристика холостого хода по которой судят о магнитных свойствах

машины: $U_0 = E = f(I_e)$ при $I_a=0$ и $n_n=\text{const}$

U_0 – напряжение х.х. или ЭДС

I_e – ток возбуждения

I_a – ток якоря

- 2) Внешняя характеристика показывает зависимость напряжения, отдаваемого генератором в сеть от тока якоря (тока нагрузки)

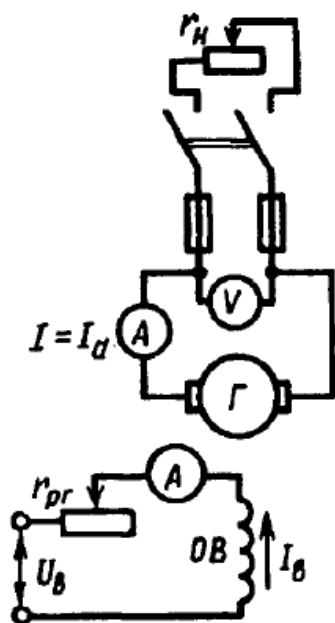
$U=f(I_a)$, при $r_b=\text{const}$ и $n_n=\text{const}$

- 3) Регулировочная характеристика показывает зависимость тока возбуждения от тока якоря.

$I_e=f(I_a)$ при $U=\text{const}$ и $n_n=\text{const}$

По этой характеристике определяется значение тока возбуждения необходимое для поддержания номинального тока нагрузки и номинального напряжения, отдаваемого генератором в сеть.

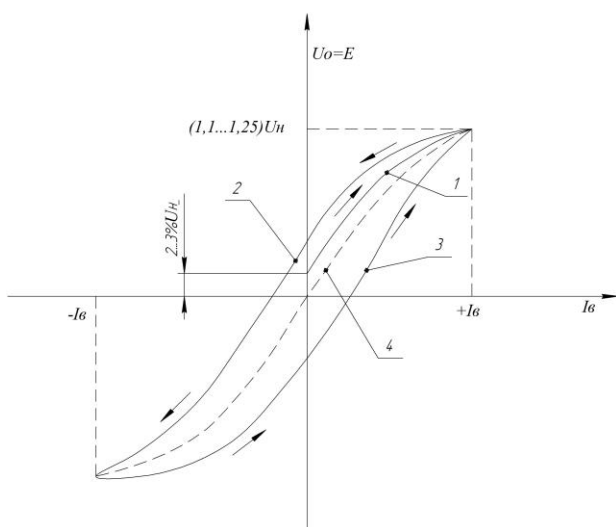
11.2 Генератор независимого возбуждения



Обмотка возбуждения ОВ питается от постороннего источника постоянного тока (возбудителя). Последовательно с ОВ включен регулировочный реостат $R_{\text{рег}}$, который необходим для регулирования тока возбуждения i_b . С изменением i_b изменяется магнитный поток, а, следовательно, величина ЭДС генератора и напряжение, отдаваемое генератором в сеть.

Рисунок 24

Характеристика холостого хода



$$U_0 = E = f(I_b)$$

$$I_a = 0$$

$$n_H = \text{const.}$$

2- нисходящая ветвь

3- восходящая ветвь

4- средняя линия или расчетная характеристика х.х

Рисунок 25

Поддерживая неизменной номинальную частоту вращения, увеличивают ток возбуждения i_b от нулевого значения до $+I_b$ при котором $U_0 = (1,1 \dots 1,25) U_{ном}$, при этом строится кривая 1.

Начальная ордината кривой 1 не равна нулю, что объясняется действием небольшого магнитного потока остаточного магнетизма от предыдущего намагничивания машины.

При небольших значениях I_b напряжение изменяется пропорционально току I_b , т.к. магнитная система ненасыщена. По мере магнитного насыщения приращение напряжения уменьшается.

Затем размагничивают магнитную систему машины изменяя ток I_b до значения $-I_b$.

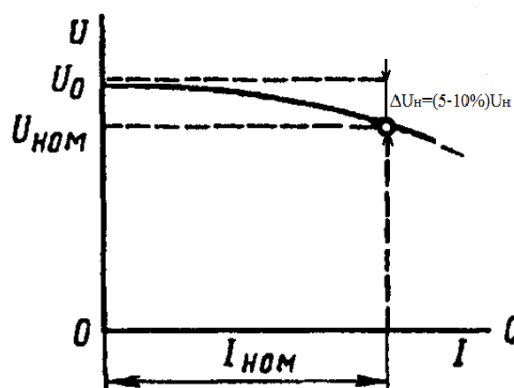
За счет остаточного магнетизма кривая 2 располагается выше кривой 1.

Затем вновь изменяют I_b от значения $-I_b$ до значения $+I_b$ (снимается восходящая ветвь характеристики х.х.).

Средняя линия между нисходящей ветвью 2 и восходящей ветвью 3 является расчетной характеристикой холостого хода.

Характеристика холостого хода дает возможность судить о магнитных свойствах машины.

Внешняя характеристика



$$U = f(I_a)$$

$$I_b = \text{const}$$

$$n_H = \text{const}$$

Генератор приводится во вращение с номинальной частотой вращения и нагружается до номинального тока при номинальном напряжении.

Рисунок 26

Затем, постепенно уменьшают нагрузку до холостого хода. ($I_a=0$)

При увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается за счет увеличения внутреннего падения напряжения $I_a \cdot r_a$

$$U = E - I_a \cdot r_a$$

r_a – суммарное сопротивление цепи якоря.

Наклон внешней характеристики к оси абсцисс (жесткость внешней характеристики) оценивается номинальным изменением напряжения генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_H = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100\%$$

Обычно для генератора независимого возбуждения: $\Delta U_H = (5 \dots 10\%) U_H$

Регулировочная характеристика

$$I_b = f(I_a)$$

$$U = \text{const}$$

$$n_H = \text{const}$$

Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять ток в цепи возбуждения, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его выводах оставалось неизменным, равным номинальному.

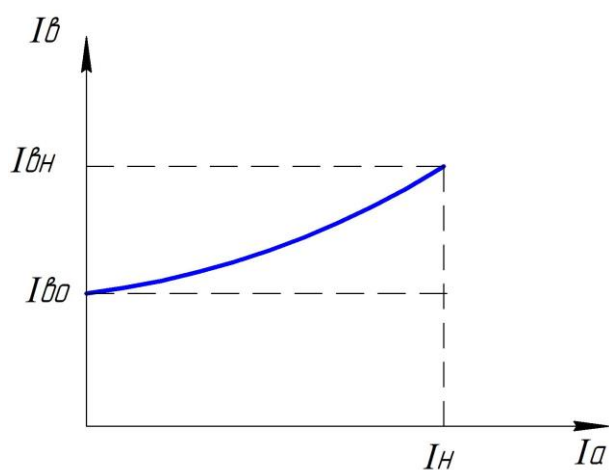


Рисунок 27

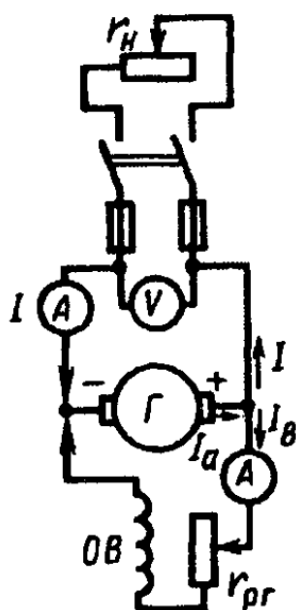
При работе генератора без нагрузки в цепи возбуждения устанавливается ток I_{b0} при котором напряжение на выводах генератора становится номинальным.

С увеличением нагрузки до номинального значения необходимо увеличивать ток возбуждения для того, чтобы U на выводах генератора оставалось неизменным, равным значению U_H .

Достоинством генератора независимого возбуждения является то, что он имеет достаточно жесткую внешнюю характеристику, т.е. относительно небольшое изменение напряжения $\Delta U = (5...10\%)U_H$ в пределах номинально нагрузки.

Недостатком является необходимость в постороннем источнике питания (возбудителе).

11.3 Генератор параллельного возбуждения



Обмотка возбуждения включается параллельно обмотке якоря, выполняется проводом относительно небольшого сечения, имеет относительно большое количество витков, т.е. обладает достаточно большим сопротивлением.

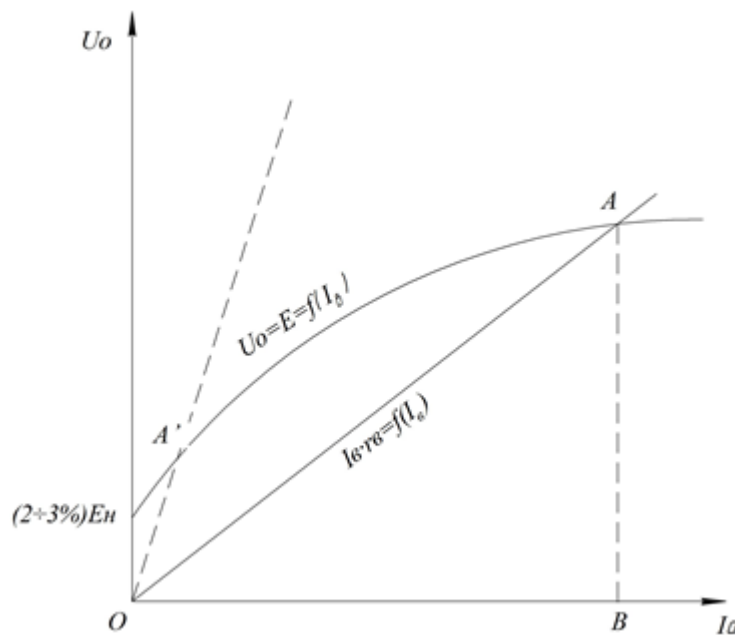
Самовозбуждение генератора основано на явлении остаточного магнетизма.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом.

Рисунок 28

Потоком остаточного магнетизма в якорной обмотке наводится небольшая ЭДС (2-3%) от номинальной. За счет этой ЭДС в обмотке возбуждения начинает протекать ток, которым создается дополнительный магнитный поток. Если его направление совпадает с потоком остаточного магнетизма, то в обмотке якоря наводится еще большая ЭДС, которая создает больший ток возбуждения, произойдет еще большее подмагничивание, что приведет к еще большему увеличению ЭДС.

Процесс самовозбуждения можно проследить по характеристикам х.х. и вольтамперной.



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{OB} = \frac{U_0}{I_B} = r_B;$$

$$\alpha = r_B$$

Рисунок 29

Процесс самовозбуждения прекращается в точке пересечения характеристик (т.А)

Угол наклона вольтамперной характеристики пропорционален сопротивлению цепи возбуждения.

Условия самовозбуждения:

- 1) Наличие потока остаточного магнетизма.
- 2) Магнитный поток от тока возбуждения должен совпадать по направлению с потоком остаточного магнетизма, т.е. обмотка возбуждения должна соединяться с якорной обмоткой согласованно.
- 3) Сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

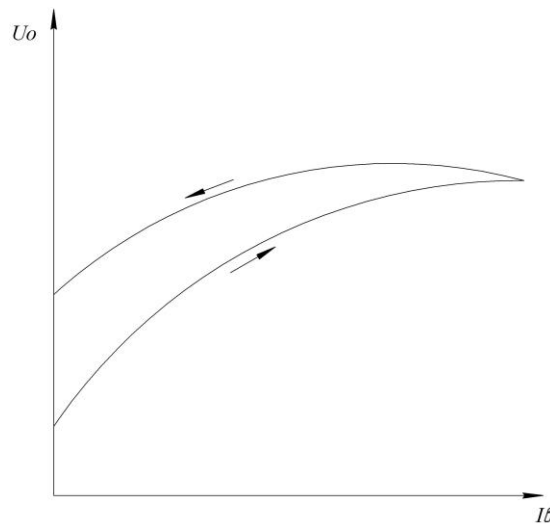
Критическим сопротивлением обмотки возбуждения называется такое сопротивление, при котором генератор не возбуждается.

Если вольтамперная характеристика сольется или пойдет параллельно с прямолинейным участком характеристики х.х., то генератор не возбуждётся.

Характеристика Х.Х.

$$U_0 = E = f(I_B) \text{ при } I_a = 0 \text{ и } n_H = \text{const}$$

Характеристика х.х. снимается так же, как и у генератора с независимым возбуждением, имеет такой же вид и служит для определения магнитных свойств машины.



В отличие от генератора с независимым возбуждением характеристика х.х. генератора с параллельным возбуждением снимается лишь в одном направлении, т.к. генератор возбуждается только в одном направлении.

Рисунок 30

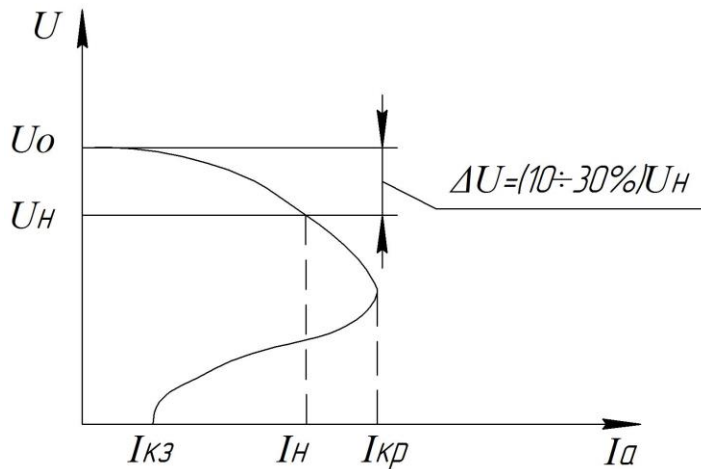
Внешняя характеристика

$$U = f(I_a) \text{ при } r_B = \text{const и } n_H = \text{const}$$

Генератор приводится во вращение $n_H = \text{const}$ и возбуждается до напряжения $(1,1-1,25) \cdot U_H$. После чего нагружается номинальным током. При увеличении нагрузки от 0 до I_H напряжение на зажимах генератора уменьшается за счет внутреннего падения напряжения:

$$U = E - I_a \cdot r_a, \text{ где } r_a \text{ — суммарное сопротивление якорной цепи.}$$

В результате уменьшения напряжения на зажимах генератора уменьшается ток возбуждения $I_{\text{в}}$, а, следовательно, магнитный поток и Э.Д.С. генератора.



Если генератор нагружать током больше номинального, то происходит резкое снижение напряжения с увеличением тока I_a . При некотором значении нагрузки ток достигает критического значения $I_{кр}$ и если

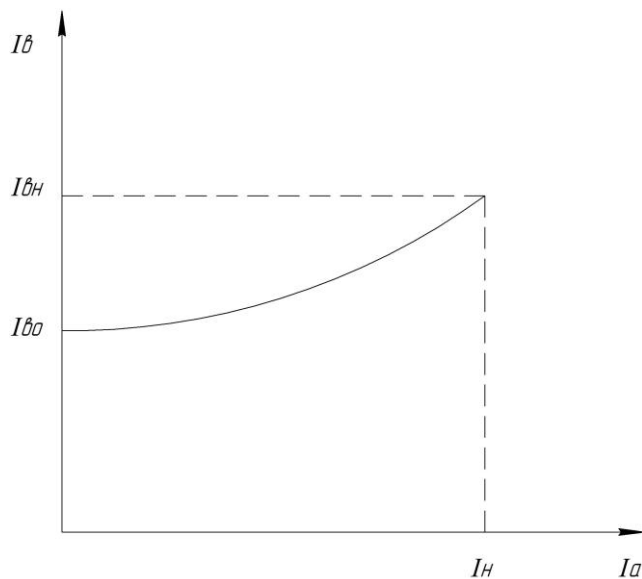
Рисунок 31

продолжать увеличивать нагрузку, то напряжение будет уменьшаться быстрее, чем сопротивление во внешней цепи и ток при этом будет уменьшаться.

Такое искусственное короткое замыкание не представляет опасности, т.к. $I_{кз} < I_H$. Однако, внезапное К.З. опасно для генератора, поскольку машина не успевает размагничиваться и $I_{кз}$ превышает номинальный ток I_H в 8-12 раз.

Регулировочная характеристика

$$I_b = f(I_a) \text{ при } U = \text{const и } n_n = \text{const}$$



Регулировочная характеристика показывает, как необходимо изменить ток возбуждения, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным.

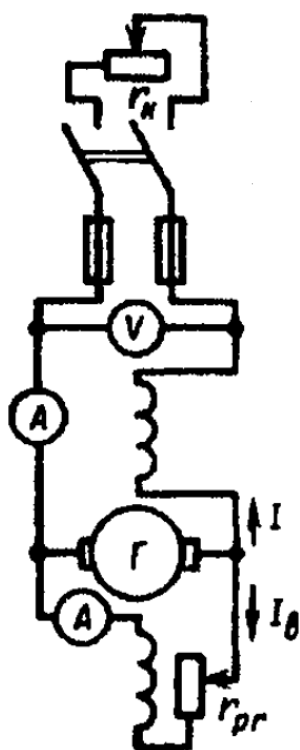
Регулировочная характеристика снимается так же как у генератора с независимым возбуждением.

Рисунок 32

Достоинством генератора параллельного возбуждения является то, что нет необходимости в возбудителе.

Недостатком является относительно большое изменение напряжения на зажимах генератора при изменении нагрузки $\Delta U = (10 \dots 30\%) U_H$

11.4 Генератор смешанного возбуждения.



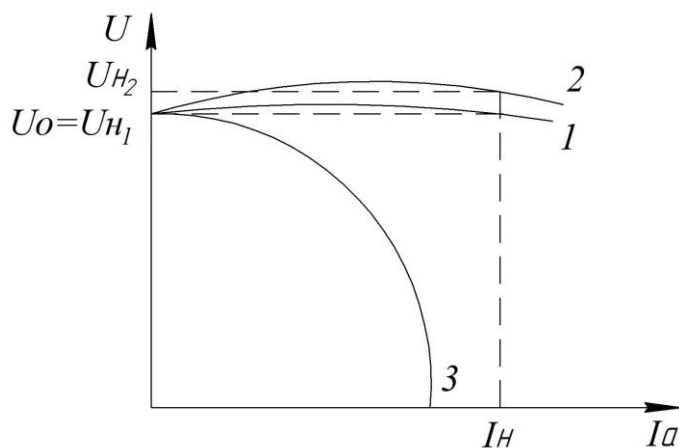
Генератор имеет две обмотки возбуждения, которые размещаются на одном и том же сердечнике магнитных полюсов.

Основная часть магнитного потока (до 80%) создается параллельной обмоткой возбуждения, оставшаяся часть магнитного потока создается последовательной обмоткой. Между собой обмотки могут соединяться согласованно или встречно.

Путем изменения соотношения ампер-витков обмоток, а также с помощью различных способов включения обмоток можно получить различные рабочие характеристики, что является достоинством данного генератора.

Рисунок 33

Последовательная обмотка при согласованном включении выполняет роль подмагничивающей обмотки, благодаря чему напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки может оставаться постоянным.



(характеристика 1)

Если же требуется чтобы напряжение на зажимах потребителя (в конце линии) оставалось неизменным, то число витков последовательной обмотки увеличивает так, чтобы подмагничивающее действие ее было таким при котором ЭДС на зажимах генератора компенсировала еще и падение напряжения в

Рисунок 34

проводах линии (кривая 2).

При встречном включении обмоток возбуждения напряжение на зажимах генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается (характеристика 3), что является следствием размагничивающего действия последовательной обмотки возбуждения.

Встречное включение обмоток возбуждения применяют в генераторах специального назначения, например, в сварочных, где необходимо получить крутопадающую внешнюю характеристику.

12. Двигатели постоянного тока

Коллекторные электрические машины обладают свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Если машину постоянного тока подключить к источнику энергии постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появляются токи.

Взаимодействие тока якоря с магнитным полем обмотки возбуждения создает на якоре электромагнитный момент, который является не тормозящим, как у генератора, а вращающим. Машина будет работать в режиме двигателя и в ней будет происходить преобразование электрической энергии в механическую.

На валу двигателя создаются следующие моменты:

- 1) Электромагнитный момент, который возникает за счет взаимодействия тока обмотки якоря с магнитным полем обмотки возбуждения:

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega}$$

- 2) Момент холостого хода M_0 , который обусловлен механическими и магнитными потерями внутри двигателя.

- 3) Полезный момент, который создается со стороны рабочего механизма M_2 .

Сумма M_0 и M_2 дает статический момент $M_{\text{ст}} = M_0 + M_2$.

При заданной нагрузке статический момент остается постоянным.

- 4) При всяком изменении частоты вращения, на валу двигателя возникает динамический момент, который равен моменту инерции тела, умноженному на приращение угловой скорости: $M_{\text{д}} = M_{\text{ин}} \cdot \frac{d\omega}{dt}$

В общем виде уравнение моментов имеет вид:

$$M = M_{\text{ст}} \pm M_{\text{д}}$$

Знак «+» или «-» определяется характером изменения частоты вращения (при увеличении частоты вращения: знак «+», при уменьшении знак «-»).

По мере разгона двигателя в его якорной обмотке появляется противо-Э.Д.С., направленная встречно току якоря. Ее значение определяется формулой:

$$E_a = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

По 2 закону Кирхгофа напряжение, подводимое к двигателю, уравнивается величиной противо-Э.Д.С. и падением напряжения в цепи якоря:

$$U = E_a + I_a \cdot \sum r_a$$

Умножив обе части уравнения на ток якоря I_a , получим уравнение мощности для цепи якоря: $U \cdot I_a = E_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot \sum r_a$, где

UI_a – полная мощность, взятая от источника;

$E_a I_a$ – электрическая мощность двигателя $E_a I_a = P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \cdot \omega$;

$I_a^2 \cdot \sum r_a$ – тепловая мощность.

Из уравнения следует, что с увеличением нагрузки на вал двигателя, т.е. с увеличением электромагнитного момента, возрастает мощность в цепи обмотки якоря $U \cdot I_a$, т.е. мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным ($U = \text{const}$), то увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря I_a .

Частота вращения двигателя определяется в соответствии с формулой Э.Д.С. якоря:

$$n = \frac{E_a}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot \sum r_a}{C_e \cdot \Phi} [\text{об/мин}]$$

Т.е. частота вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению, подводимому к нему, и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения.

12.1 Пуск двигателя постоянного тока.

Ток якоря двигателя определяется формулой: $I_a = \frac{U - E_a}{\sum r_a}$

Если принять U и $\sum r_a$ неизменными, то ток якорной обмотки I_a зависит от величины противо-Э.Д.С. E_a .

В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен ($n=0$) и в его обмотке не индуцируется ЭДС ($E_a=0$). Поскольку сопротивление $\sum r_a$ мало, то при прямом подключении двигателя к сети в его обмотке якоря возникает пусковой ток, который в 10...20 раз превышает номинальный ток двигателя.

Такой большой пусковой ток опасен для двигателя. Во-первых, он может вызвать круговой огонь на коллекторе, во-вторых, при таком токе в двигателе развивается чрезмерно большой пусковой момент, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может механически их разрушить. И наконец, этот ток вызывает резкое понижение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей.

Для ограничения пускового тока используют пусковые реостаты, включаемые последовательно в цепь якоря.

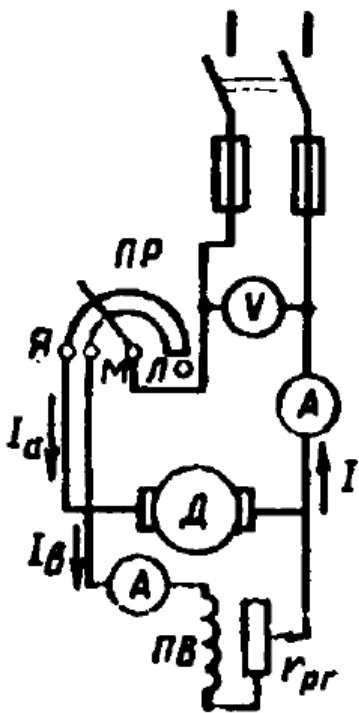
Ограничение пускового тока производится до 2-х...3-х кратного значения номинального тока.

С появлением тока в цепи якоря $I_{\text{Пmax}}$ (пусковой максимальный) возникает пусковой момент $M_{\text{Пmax}}$, под действием которого начинается вращение якоря.

По мере нарастания частоты вращения увеличивается противо-Э.Д.С. $E_a = C_e \cdot \Phi \cdot n$, что ведет к уменьшению пускового тока и пускового момента. Для того, чтобы обеспечить необходимый разгон двигателя необходимо поддерживать пусковой момент на определённом уровне, что достигается увеличением тока якоря путем частичного отключения пускового сопротивления. При этом увеличивается вращающий момент, частота вращения двигателя тоже увеличивается, что ведет к увеличению противо-Э.Д.С. и уменьшению тока якоря. Чтобы увеличить ток якоря отключается еще одна ступень пускового реостата и т.д. К концу пуска, когда частота вращения

двигателя станет номинальной, пусковое сопротивление полностью отключается и ограничение тока якоря в этом случае производится за счёт величины противо-Э.Д.С. E_a .

12.2 Двигатель параллельного возбуждения



Шунтовая обмотка возбуждения конструктивно выполняется так же, как у генератора.

Последовательно с обмоткой якоря включается пусковой реостат, перед запуском двигателя он должен быть полностью введен в электрическую цепь.

Реостат в цепи возбуждения $R_{рег}$ служит для регулирования тока в обмотке возбуждения и магнитного потока главных полюсов.

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его рабочими характеристиками, под которыми понимают зависимость частоты вращения n , тока I_a ,

полезного момента M_2 , вращающего момента $M_{эм}$ от Рисунок 35
мощности на валу двигателя P_2 при $U=const$ и $I_b=const$

1) $n=f(P_2)$ - скоростная характеристика

С увеличением мощности P_2 увеличивается ток якоря I_a , а, следовательно, внутреннее падение напряжения в двигателе, за счет чего частота вращения n уменьшается; Δn составляет 2...8% от n_n , т.е. скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения является жесткой.

2) Зависимость полезного момента от нагрузки

$M_2=f(P_2)$ при $n=const$, $I_b=const$

$$\text{Значение } M_2 = 9.55 \cdot \frac{P_2}{n}$$

При $n=\text{const}$ график имел бы вид прямой, но т.к. с увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается, поэтому характеристика имеет нелинейный характер

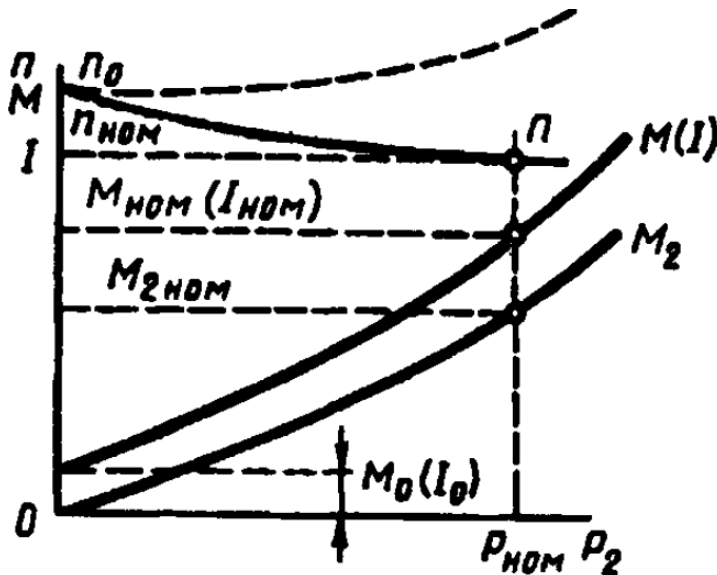


Рисунок 36

$$3) M_2 = f(P_2) \text{ при } n = \text{const}$$

$$M = M_{\text{стат}} = M_0 + M_2$$

Поскольку ток возбуждения $I_b = \text{const}$,

то магнитные потери в двигатели постоянны, а, следовательно, постоянен и M_0 .

Поэтому график $M = f(P_2)$ проходит параллельно графику M_2 .

4) $I_a = f(P_2)$ поскольку $M = C_M \cdot \Phi \cdot I_a$, то, приняв $\Phi = \text{const}$, можно сказать, что график $M = f(P_2)$ по формуле кривой будет совпадать с графиком $I_a = f(P_2)$.

Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения.

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{C_e \cdot \Phi}$$

Из формулы видно, что регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока можно осуществить:

1) Введением дополнительного сопротивления в цепь якоря, которое включается аналогично пусковому реостату последовательно в цепь

якоря, но в отличие от него дополнительное сопротивление должно быть рассчитано на продолжительное протекание тока.

Этот способ обеспечивает плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне, но только в сторону уменьшения от номинальной частоты вращения. Данный способ неэкономичен, т.к. имеют место значительные потери электроэнергии в дополнительном регулировочном сопротивлении ($I_a^2 \cdot R_d$) и с увеличением мощности двигателя эти потери интенсивно растут.

2) Регулирование частоты вращения изменением основного магнитного потока.

Этот способ реализуется регулированием тока возбуждения с помощью регулировочного реостата, включенного в цепь обмотки возбуждения.

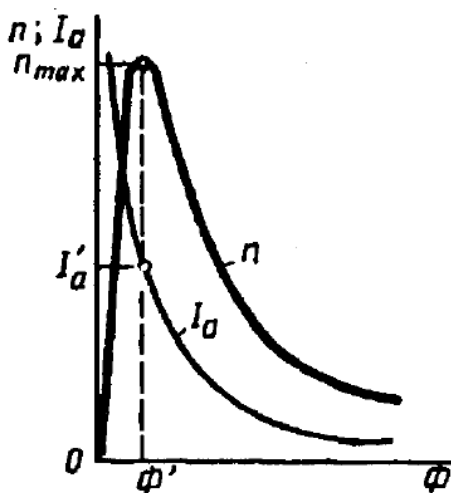


Рисунок37

Зависимость частоты вращения от тока возбуждения выражается регулировочной характеристикой $n=f(I_a)$ при $I_a=\text{const}$ и $U=\text{const}$

С изменением магнитного потока Φ частота вращения увеличивается по гиперболическому закону.

При небольшом нагрузочном моменте на валу двигателя максимальная частота вращения n_{max} во много раз превышает номинальную n_n , т.е. двигатель идет «вразнос», что недопустимо по условиям механической прочности двигателя.

12.3 Двигатель последовательного возбуждения.

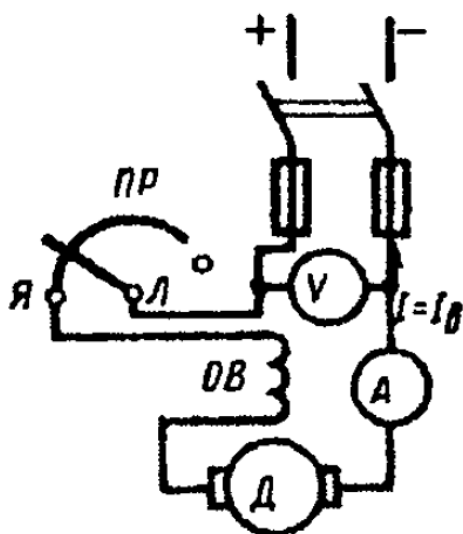


Рисунок 38

Обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря, поэтому магнитный поток в двигателе зависит от тока нагрузки $I_a = I_b$

$$\Phi = k \cdot I_b = k \cdot I_a$$

Вращающий момент двигателя:

$$M_{эм} = C_m \cdot \Phi \cdot I_a = C_m \cdot k \cdot I_a \cdot I_a = C_m \cdot k \cdot I_a^2$$

пропорционален квадрату тока нагрузки, поэтому у двигателя последовательного

возбуждения необходимый вращающий момент

можно получить при меньшем токе нагрузки, а, следовательно, при меньшей мощности по сравнению с двигателем параллельного возбуждения.

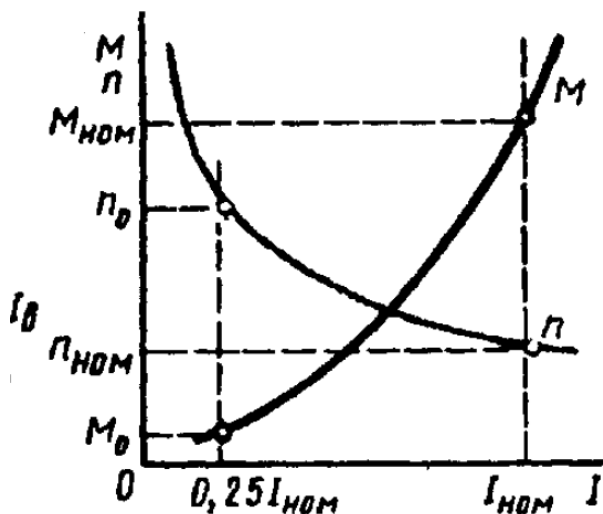


Рисунок 39

Частота вращения двигателя с увеличением нагрузки резко понижается.

При уменьшении нагрузки двигателя последовательного возбуждения частота вращения его резко увеличивается и при нагрузке меньше 25% от номинальной может достигнуть недопустимых значений, т.е. двигатель идет «вразнос».

В связи с этим двигатель последовательного возбуждения нельзя запускать при нагрузке на валу меньше 25% от номинальной.

Не разрешается сочленять вал двигателя с валом рабочего механизма при помощи ременных передач, он должен быть жестко соединен с рабочим механизмом.

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения осуществляется:

- 1) изменением напряжения, подводимого к двигателю, для этого последовательно в цепь якоря включается регулировочный реостат;
- 2) шунтированием обмотки якоря, при этом увеличивается ток возбуждения, а частота вращения снижается;
- 3) шунтированием обмотки возбуждения, при этом с уменьшением сопротивления шунтирующего реостата уменьшается ток возбуждения, а частота вращения увеличивается;
- 4) секционированием обмотки возбуждения: отключение части витков обмотки ведет к увеличению частоты вращения.

12.4 Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную.

Частота вращения этого двигателя:
$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{C_e \cdot (\Phi_1 \pm \Phi_2)}$$

Знак «+» соответствует согласованному включению обмоток возбуждения.

В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток возрастает за счет потока последовательной обмотки Φ_2 , что ведет к уменьшению частоты вращения двигателя.

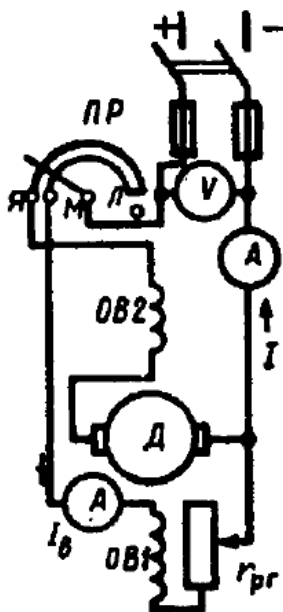


Рисунок 40

При встречном включении обмоток поток Φ_2 размагничивает машину, что повышает частоту вращения. Работа двигателя при этом становится неустойчивой, т.к. с увеличением нагрузки частота вращения двигателя неограниченно растёт. Однако, при небольшом числе витков последовательной обмотки с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает и во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменной.

Двигатель смешанного возбуждения имеет преимущество по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Этот двигатель может работать вхолостую, т.к. поток параллельной обмотки Φ_1 ограничивает частоту вращения двигателя в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса».

Регулирование частоты вращения осуществляется реостатом $R_{\text{рег}}$ в цепи параллельной обмотки возбуждения.

8.5 Потери и К.П.Д. коллекторной машины постоянного тока

В машине постоянного тока в процессе преобразования энергии происходят потери мощности, которые подразделяются на магнитные, электрические, механические и добавочные.

- 1) Магнитные потери $\Delta P_{\text{ст}}$ (потери в стали) происходят только в сердечнике якоря, т.к. только этот элемент магнитопровода машины постоянного тока подвергается перемагничиванию. Магнитные потери состоят из потерь от гистерезиса и вихревых токов и зависят от частоты перемагничивания: $f = \frac{p \cdot n}{60}$

При постоянной частоте вращения потери в стали - постоянны.

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{г}}$$

- 2) Электрические потери обусловлены нагревом обмоток и щеточных контактов.

Электрические потери в параллельной обмотке возбуждения: $\Delta P_{эв} = I_{эв} \cdot U_{эв}$, где $U_{эв}$ - напряжение на зажимах цепи возбуждения.

Электрические потери в обмотки якоря:

$\Delta P_{эа} = I_a^2 \cdot \sum r_{a(75^\circ C)}$, где $\sum r_{a(75^\circ C)}$ - сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре.

$\sum r_{a(75^\circ C)} = r[1 + \alpha(75 - \Theta)]$, где α – температурный коэффициент $\alpha_{\text{меди}} = 0,04$ 1/град, а Θ - температура окружающей среды.

Потери мощности в щеточных контактах

$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_a$, где $\Delta U_{щ}$ - переходное падение напряжения на щетках.

Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины поэтому эти потери называют переменными.

- 3) Механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ вызваны трением в подшипниках, щетках о коллектор, на вентиляцию.

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{вент}}$$

При постоянной частоте вращения механические потери постоянны.

- 4) Добавочные потери трудно подвергаются исследованию и их, согласно ГОСТу, принимают равными 1% от полезной мощности для генератора и 1% от подводимой мощности для двигателя.

К.П.Д. электрической машины представляется собой отношение мощности, отдаваемой (получаемой) P_2 к подводимой (потребляемой)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Полезная мощность меньше затраченной на величину суммарных потерь:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{CT} + \Delta P_{эв} + \Delta P_{эа} + \Delta P_{щ} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}$$

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}$$

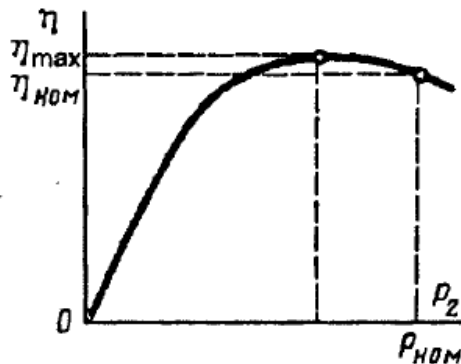
Для генератора:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + \sum \Delta P} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{U \cdot I + \sum \Delta P}$$

Для двигателя:

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I - \sum \Delta P}{U \cdot I} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{U \cdot I}$$

К.П.Д. машин постоянного тока зависит от нагрузки. С увеличением нагрузки К.П.Д. резко увеличивается и достигает максимального значения при нагрузке равной (0,75-0,8) $P_{\text{н}}$, затем, с дальнейшим увеличением нагрузки, начинают активно возрастать потери.



К.П.Д. машин мощностью от 1 кВт до

100 кВт: 0,75-0,90.

К.П.Д. машин мощность свыше

100 кВт 0,90-0,97

К.П.Д. машин мощностью от 5 до 50

Вт: 0,15-0,5.

Рисунок 41

Тема: Бесколлекторные машины переменного тока.

1. Общие вопросы теории машин переменного тока.

Электрические машины переменного тока составляют основу современной электротехники как в сфере производства, так в сфере потребления электрической энергии.

Машиной переменного тока называются машины, получающие от источника переменный ток, или вырабатывающие сами переменный ток. Те, которые получают переменный ток, называются двигателями, те, которые вырабатывают переменный ток, называются генераторами.

За небольшим исключением все эти электрические машины являются бесколлекторными.

Существуют два вида бесколлекторных электрических машин переменного тока: асинхронные и синхронные машины. Как асинхронные, так и синхронные машины обладают свойством обратимости.

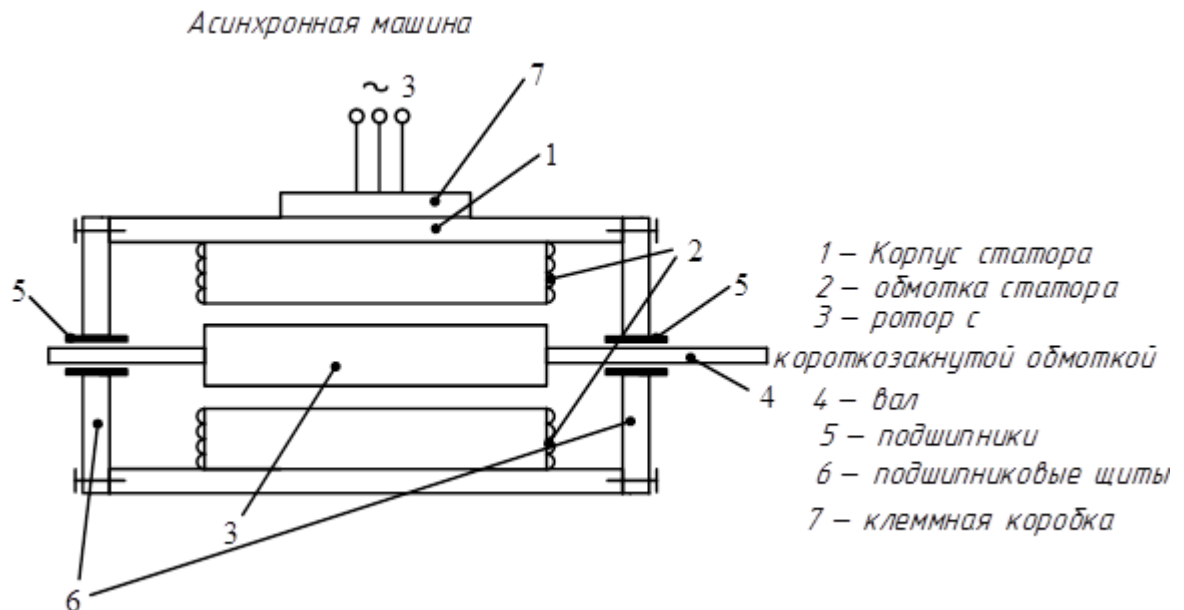


Рисунок 42

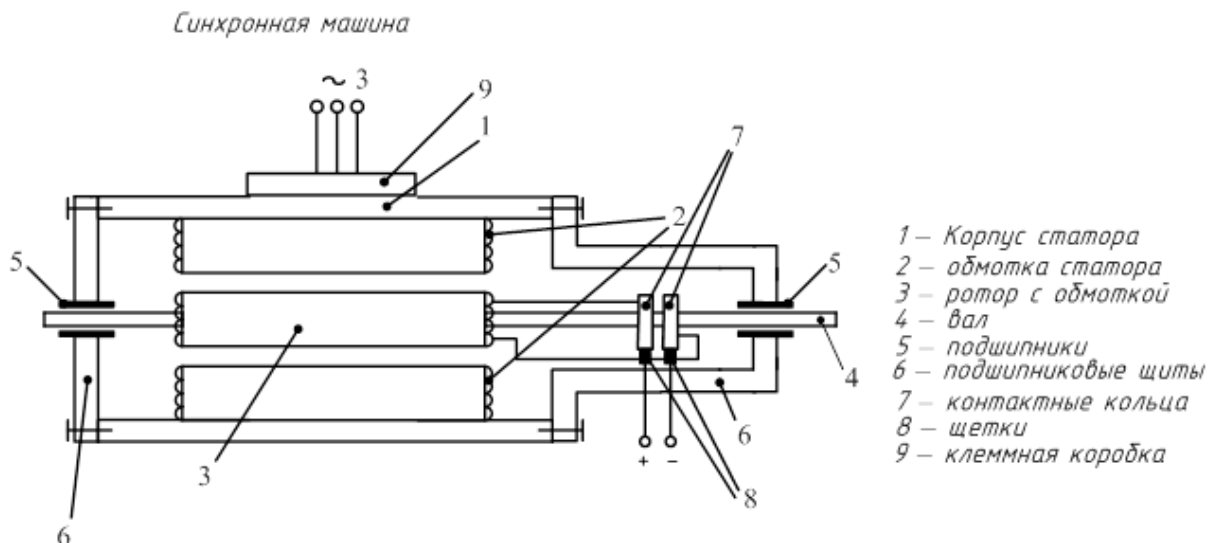


Рисунок 43

Машины переменного тока имеют неподвижную часть (статор), подвижную часть (ротор), между статором и ротором имеется воздушный зазор δ .

1.1 Основные конструктивные и расчетные элементы обмоток переменного тока.

Статорной обмоткой машины переменного тока называется разомкнутая система проводников, уложенных в пазы статора, и соединённых между собой по определенной схеме.

Два проводника, соединенные между собой последовательно, образуют виток:

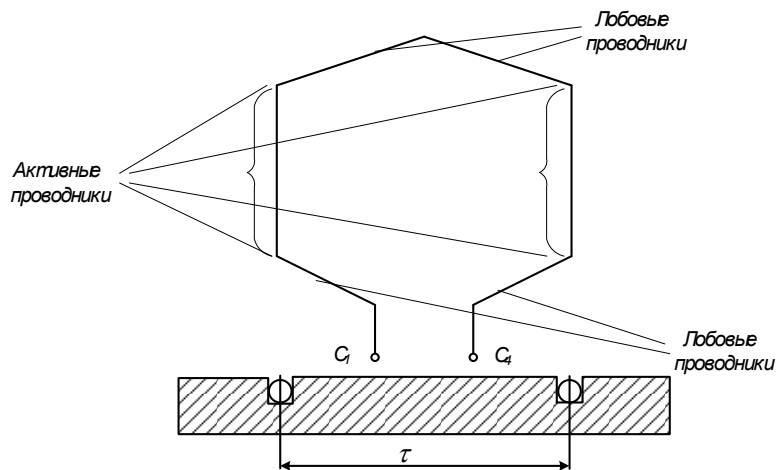


Рисунок 44

$\tau = \pi D_1 / 2p$, где τ – полюсное деление, т.е. часть дуги внутренней расточки статора, приходящаяся на один полюс;
 D_1 – внутренний диаметр статора в мм;
 $2p$ – число пар полюсов.

Группа витков, соединенных последовательно между собой называются секцией (катушкой).

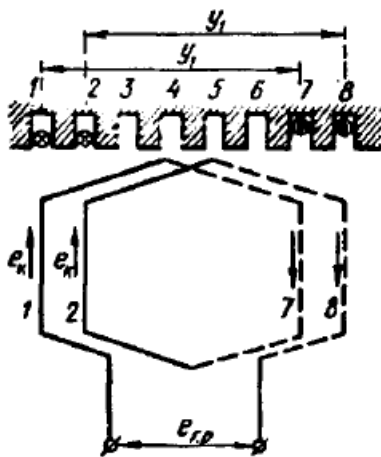


Рисунок 45

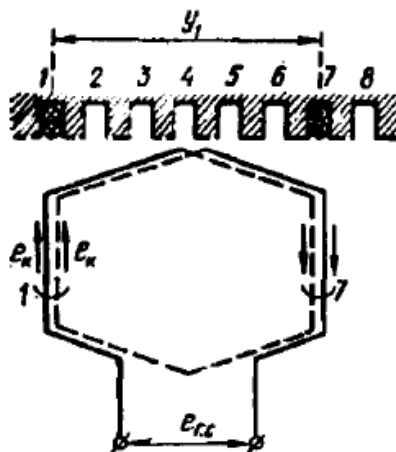
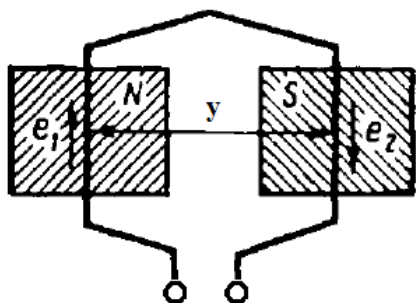


Рисунок 46

Катушечная группа из 2х витков.

Число пазов или катушек, приходящихся на одну пару полюсов (фаз) обозначается буквой q . В данном случае $q=2$.

Катушка может быть одно и многовитковой (когда в одном пазу укладывается более одного проводника).



Расстояние между активными частями витка называется шагом обмотки и обозначается буквой y .

Если $y = \tau$, то обмотка называется обмоткой с полным шагом.

Если шаг обмотки $y < \tau$, то она называется обмоткой с укороченным шагом.

Рисунок 47

1.2 Классификация статорных обмоток машин переменного тока:

- 1) По числу фаз – однофазные и многофазные;
- 2) По способу укладки катушек в пазы – однослойные и двухслойные;
- 3) В зависимости от размеров катушек – с полным (диаметральным) шагом и укороченным шагом

Многофазная обмотка статора состоит из m_1 фазных обмоток. Например, трехфазная обмотка ($m_1=3$) состоит из 3 фазных обмоток, каждая из которых занимает $z_1/3$ пазов, где z_1 - общее число пазов сердечника статора.

Каждая фазная обмотка представляет собой разомкнутую систему проводников. Э.Д.С. наводимая в витке обмотки равна арифметической сумме Э.Д.С., наведенных в сторонах этого витка: $e = e_1 + e_2$

Если шаг обмотки меньше полюсного деления τ ($y_1 < \tau$), т.е. обмотка укороченная, то наводимая Э.Д.С. в витке меньше, чем у обмотки с полным шагом.

Простейшая трехфазная обмотка статора двухполюсной машины состоит из трех катушек, оси которых смещены в пространстве относительно друг от друга

на 120° , т.е. на $2/3$ полюсного деления. Такая обмотка называется сосредоточенной. Каждая катушка здесь представляет собой фазную обмотку. В соответствии с ГОСТ выводы трехфазных обмоток статора маркируются следующим образом:

Первая фаза: начало C_1 – конец C_4

Вторая фаза: —" — C_2 - —" — C_5

Третья фаза: —" — C_3 - —" — C_6

1.3 Э.Д.С. обмотки статора

Э.Д.С. катушки статора, если принять закон распределения магнитной индукции в воздушном зазоре синусоидальным, будет равна:

$$E_k = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot \omega_k$$

Для определения Э.Д.С. обмотки фазы статора необходимо Э.Д.С. катушки E_k умножить на число последовательно соединенных катушек в фазной обмотке статора.

Т.к. число катушек в катушечной группе равно q_1 , а число катушечных групп в фазной обмотке равно $2p$, то фазная обмотка статора содержит $2p \cdot q_1$ катушек.

Тогда $\omega_1 = 2p \cdot q_1 \cdot \omega_k$, а Э.Д.С. фазной обмотки статора будет равна:

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}$$

Где $k_{об1}$ - коэффициент конструкции обмотки, учитывающий уменьшение Э.Д.С., наведенной в обмотке статора, обусловленное укорочением шага обмотки и ее распределением.

Значение линейной Э.Д.С. при соединении обмотки статора «звездой»: $E_{1л} = \sqrt{3} \cdot E_1$, а при соединении «треугольником»: $E_{1л} = E_1$

1.4 Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки статора

При включении трехфазной обмотки статора в сеть трехфазного тока в обмотках фаз появляется токи, сдвинутые по фазе относительно друг друга (во времени) на 120° .

$$i_A = I \sin \omega t; i_B = I \sin(\omega t - 120^\circ); i_C = I \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Ток каждой обмотки создает пульсирующую М.Д.С., а совокупное действие этих магнитодвижущих сил создаёт результирующую М.Д.С., вектор которой вращается относительно статора.

Принцип образования вращающейся М.Д.С. рассмотрим на простейшей трехфазной двухполюсной обмотке, каждая фаза которой состоит из одной катушки ($q=1$). Фазные обмотки соединены звездой и включены в сеть трехфазного тока.

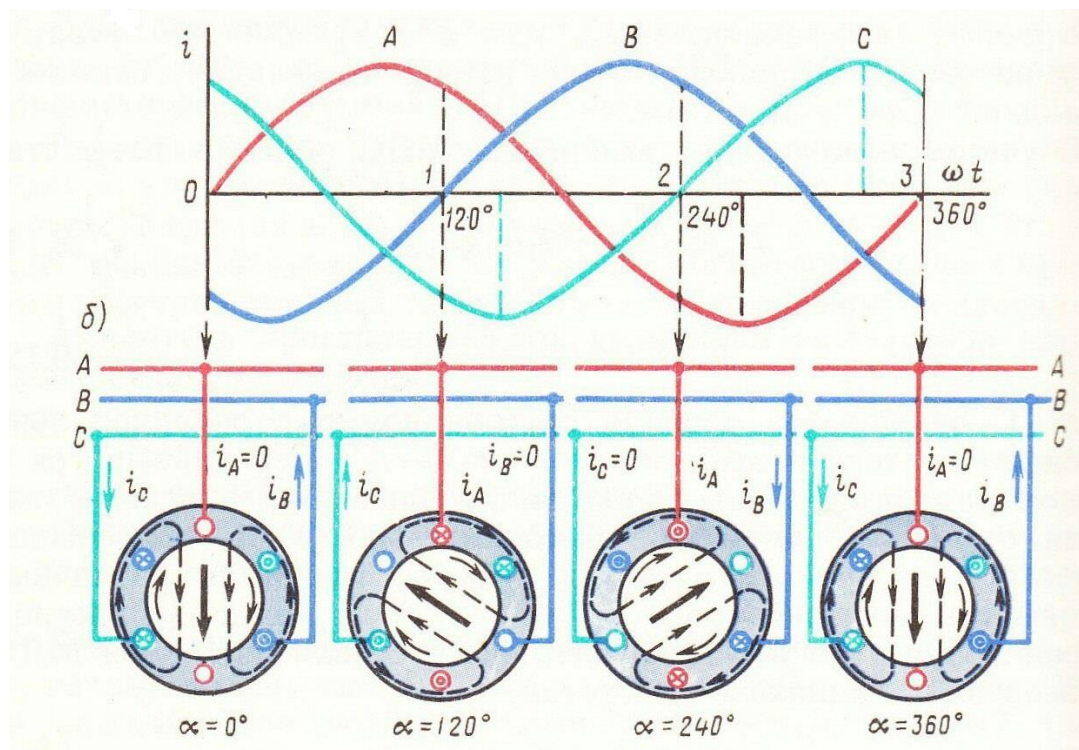


Рисунок 48

Мы видим, что вектор М.Д.С. F_1 повернулся относительно своего положения в момент времени «0» на 120° по часовой стрелке в момент времени «1».

В моменты времени «2» и «3» вектор каждый раз поворачивается на 120° и за один период переменного тока делает полный оборот (360°).

Если частота тока в обмотке статора $f_1=50\text{Гц}$,

то вектор М.Д.С. вращается с частотой 50 об/с.

В общем случае частота вращения вектора М.Д.С. n_1 – синхронная частота вращения – прямо пропорциональна частоте тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p обмотки статора: $n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ [об/мин].

Значение синхронных частот вращения для промышленной частоты $f_1=50\text{Гц}$ в зависимости от числа пар полюсов.

Число пар полюсов, p	1	2	3	4	5	6
Синхронная частота вращения n_1 , об/мин.	3000	1500	1000	750	600	500

Вращающаяся М.Д.С. создает в расточке статора вращающееся магнитное поле. При необходимости изменить направление вращения М.Д.С. нужно изменить порядок следования токов в обмотке (порядок следования фаз).

2. Асинхронные машины

Асинхронной называется машина переменного тока, частота вращения ротора которой не находится в строгом соответствии с частотой тока сети и изменяется в зависимости от нагрузки.

Асинхронная машина обратима, но в основном применяется в качестве двигателя.

Асинхронные двигатели составляют 90...95% от всех электрических машин, применяемых в установках и механизмах.

Их преимущества:

- 1) Простота конструкции;
- 2) Надежность в эксплуатации;
- 3) Относительная дешевизна.

К недостаткам можно отнести:

- 1) Трудность регулировки частоты вращения;
- 2) Зависимость частоты вращения от нагрузки.

Устройство асинхронных двигателей.

Асинхронный двигатель состоит из неподвижной части – статора и подвижной – ротора.

По конструкции ротора асинхронные двигатели подразделяются на:

- 1) АД с короткозамкнутой обмоткой ротора;
- 2) АД с фазной обмоткой ротора.

Статор состоит из корпуса (чугун, сталь, алюминий) во внутрь которого запрессован сердечник статора (ярмо), который имеет форму цилиндра, набранного из отдельных листов электротехнической стали. На внутренней поверхности располагаются пазы, в которые укладывается обмотка трехфазного или однофазного тока. Для получения вращающегося магнитного поля используется трехфазная обмотка. Число катушечных групп должна быть всегда кратным трем.

Концы обмоток выводятся на клеммный щиток.

Обмотки могут соединяться в «звезду» или «треугольник».

Ротор асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой состоит из вала, на который запрессовывается сердечник ротора, набранный из отдельных пластин электротехнической стали.

На внешней поверхности сердечника ротора имеются пазы, в которые укладывается обмотка, которая состоит из толстых металлических стержней (медь, алюминий). С концов эти стержни замыкаются кольцами, поэтому обмотка называется короткозамкнутой. На валу двигателя расположена вентиляторная крыльчатка.

У АД с фазной обмоткой ротора роторная обмотка, выполняется наподобие обмотки статора.

Обмотки соединяются в «глухую звезду». Три свободных конца присоединяются к контактными кольцам, расположенным на валу двигателя.

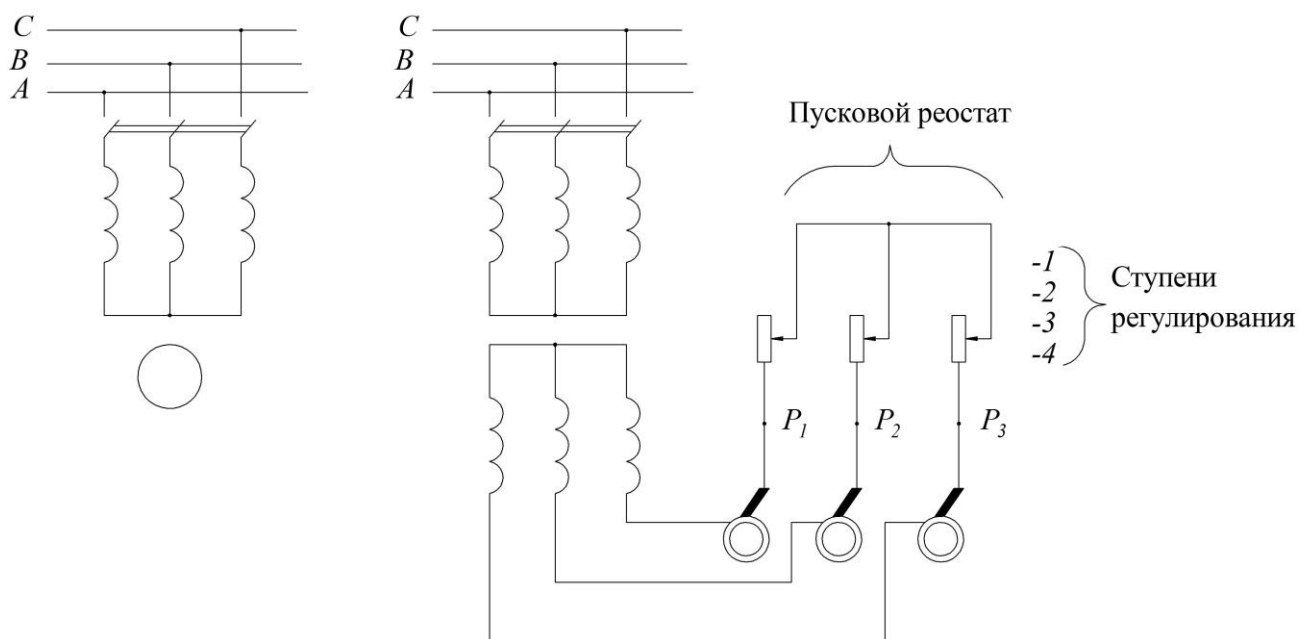


Рисунок 49

Подшипниковые щиты, устанавливаются в крышках электродвигателя, служат для центрирования ротора относительно статора.

Принцип работы асинхронного двигателя.

К обмотке статора подводится трехфазный ток, который создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения магнитного поля равна $n_1 = \frac{60f_1}{p}$.

Этим полем пересекаются проводники обмотки ротора, в которых индуцируется Э.Д.С. Так как обмотка ротора замкнута сама на себя, то в ней под действием Э.Д.С. протекает ток. Взаимодействие тока обмотки ротора с вращающимся полем статора вызывает действие электромагнитных сил, которые воздействуют на каждый проводник с током обмотки ротора. В результате создается вращающий момент, ротор приходит во вращение и движется в ту же сторону, что и вращающееся магнитное поле, с частотой вращения n_2 . Вращение ротора через вал передается рабочему механизму (машине).

Частота вращения ротора n_2 всегда меньше частоты вращения поля n_1 , т.к. только при таких условиях возможна работа асинхронного двигателя.

Разность частот вращения вращающегося магнитного поля и ротора выражается в относительных единицах или % и называется скольжением s .

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ или } S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$$

Скольжение АД зависит от режима работы электродвигателя:

1) Режим ХХ, при этом режиме $n_2 = n_1$; $S = 0$;

Режим ХХ может быть только теоретически.

2) Режим КЗ, при этом режиме $n_2 = 0$; $S = 1$ (100%);

3) При режиме номинальной нагрузки скольжение равно: $S = 0,01 \dots 0,06$ (1...6%).

Физический процесс, происходящий при работе в асинхронном двигателе.

Обмотка ротора не имеет электрической связи с обмоткой статора. Энергия из одной обмотки в другую передается при помощи магнитного поля (аналогично трансформатору).

В процессе работы асинхронного двигателя по обмоткам статора и ротора протекают токи, которые создают намагничивающие силы в соответствующих обмотках F_1 и F_2 .

Совместным действием этих МДС создается результирующий поток, который замыкается через сердечник статора, через воздушный зазор и через сердечник ротора.

Кроме основного потока имеются потоки рассеивания Φ_{p1} и Φ_{p2} .

Основным потоком в обмотке статора наводится ЭДС самоиндукции:

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi_{\max} \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot K_{o61}$$

Потоком рассеяния наводится ЭДС рассеяния: $E_{p1} = -j \cdot I_1 \cdot X_1$

Кроме того, на обмотке статора создается активное падение напряжения: $I_1 \cdot r_1$

Уравнение напряжения для обмотки статора: $U_1 = -E_1 + j \cdot I_1 \cdot X_1 + I_1 \cdot r_1$

В процессе работы двигателя ротор вращается со скоростью n_2 , скорость вращения магнитного поля относительно ротора будет равна $n_1 - n_2$, тогда частота наведенной ЭДС в роторе будет равна:

$$f_2 = \frac{(n_1 - n_2)p}{60} \cdot \frac{n_1}{n_2} = f_1 \cdot S$$

Величина наведенной ЭДС основным потоком в обмотке ротора равна:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot \Phi_{\max} \cdot f_2 \cdot \omega_2 \cdot K_{o62} = 4,44 \cdot \Phi_{\max} \cdot f_1 \cdot S \cdot \omega_2 \cdot K_{o62} = E_2 \cdot S,$$

Где E_2 - ЭДС неподвижной машины при $n_2 = 0$;

E_{2s} - ЭДС работающей машины.

Индуктивное сопротивление подвижного ротора меняется, т.е. зависит от скольжения:

$$X_{2s} = \omega_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot S \cdot L_2 = X_2 \cdot S,$$

Где X_2 – реактивное сопротивление при неподвижном роторе,

X_{2s} – реактивное сопротивление при любом скольжении.

Активное сопротивление ротора от частоты не зависит. Поскольку обмотка ротора замкнута накоротко, то напряжение $U_2=0$, тогда уравнение напряжения и ЭДС для обмотки ротора: $0 = E_{2s} - j \cdot I_2 \cdot X_{2s} + I_2 \cdot r_2$,

$$E_{2s} = j \cdot I_2 \cdot X_{2s} + I_2 \cdot r_2$$

Потери мощности и КПД асинхронного двигателя.

В асинхронном двигателе имеют место следующие потери:

- 1) Электрические - в обмотках статора и ротора
- 2) Магнитные – потери в стали (на гистерезис и вихревые токи)
- 3) Механические – от трения
- 4) Добавочные

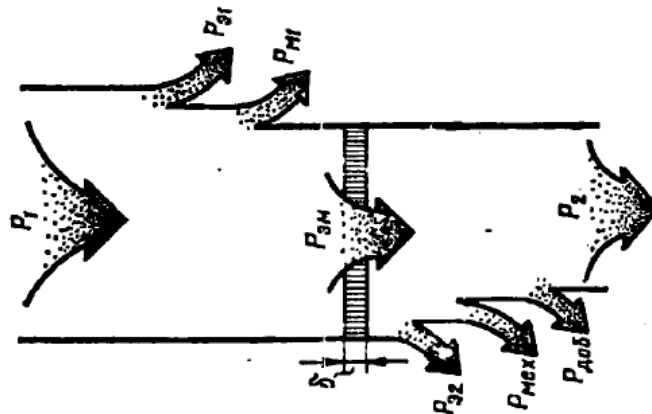


Рисунок 50

Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя:

$P_{эм}$ – электромагнитная мощность;

$P_{2\text{полн}}$ - полная механическая мощность;

P_2 - чисто механическая мощность

Суммарные потери: $\Sigma \Delta P = P_{\text{ст}} + P_{\text{эл1}} + P_{\text{эл2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$

Чем больше мощность электродвигателя, тем выше будет его КПД.

КПД асинхронных двигателей достигает 83...95%

2.5. Вращающий момент асинхронного двигателя.

Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от магнитного потока и активной составляющей тока ротора.

$$M_{вр} = C_m \cdot \Phi \cdot I'_2 \cdot \cos \psi_2,$$

где C_m – коэффициент конструкции машины.

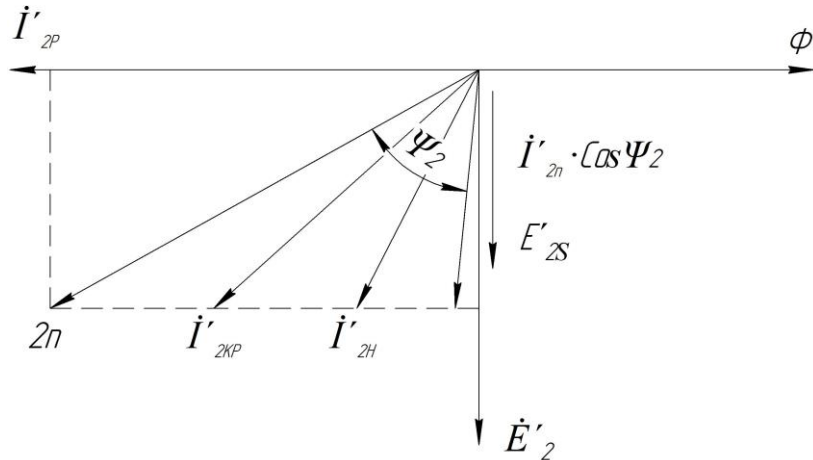


Рисунок 51

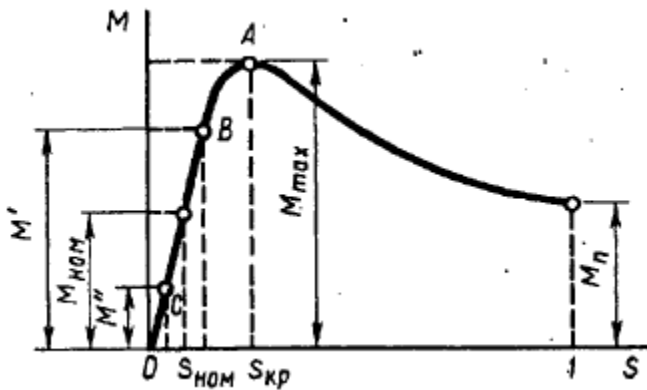


Рисунок 52

В начальный момент пуска двигателя скольжения $S=1$. В обмотке ротора индуцируется большая ЭДС E'_2 , которая вызывает наибольший пусковой ток $I'_{2п}$. Реактивное сопротивление X_{2s} также наибольшее, поэтому ток $I'_{2п}$ будет сдвинут относительно ЭДС на угол ψ_2 , который близок к $\pi/2$.

Активная составляющая тока при этом имеет небольшую величину, поэтому и вращающий момент будет небольшим $I_{2п} > I_n$ в 5...7 раз.

Зависимость момента вращающего (электромагнитного) от скольжения называется механической характеристикой двигателя.

Увеличение скорости вращения ротора приводит к уменьшению скольжения, при этом уменьшаются E'_{2s} , I'_2 , угол ψ_2 , а вращающий момент увеличивается. Наибольшего значения вращающий момент достигнет, когда реактивное сопротивление ротора будет равно активному сопротивлению: $X_{2s} = r_2$. Максимальному значению момента соответствует критическое значение скольжения $S_{кр}$. При дальнейшем увеличении скорости вращения ротора происходит резкое уменьшение на валу двигателя скольжения, уменьшение реактивного сопротивления X_{2s} , уменьшение тока I'_2 , следовательно, уменьшится и $M_{вр}$ до значения номинального момента вращения M_n , который равен сумме моментов холостого хода двигателя M_0 и полезного момента M_2 :

$$M_n = M_0 + M_2.$$

Отношение максимального момента к номинальному называется перегрузочной способностью двигателя и составляет значение: $\frac{M_{MAX}}{M_n} = 1,7 \div 2,5$

Устойчивая работа двигателя возможна только на участке ОА, когда скольжение лежит в пределах от 0 до $S_{кр}$.

Если двигатель несет какую-то, статическую нагрузку равную номинальной, то всякое изменение нагрузочного момента M_2 до значения M_2' ведет к нарушению равенства моментов, т.е. $M_n < M_0 + M_2'$ и частота вращения ротора начнет убывать (скольжение будет увеличиваться). Это приведет к росту электрического момента до значения $M' = M_0 + M_2'$ (точка В), после чего режим работы двигателя станет установившемся.

При изменении момента M_2 до значения M_2'' частота вращения ротора увеличится (скольжение уменьшается), что приведет к уменьшению вращающегося момента (точка С) и режим работы двигателя станет установившимся.

Работа асинхронного двигателя становится неустойчивой при скольжении $S \geq S_{кр}$. Так, если $M_{вр} = M_{max}$, а $S \geq S_{кр}$, то даже незначительное увеличение

скольжение, что приведет к уменьшению вращающего момента, после чего произойдет дальнейшее увеличение скольжения и т.д., пока скольжение не достигнет значения $S=1$, т.е. пока ротор двигателя не остановится.

Влияние напряжения сети на вращающий момент асинхронного двигателя

$$M_{BP} = C_M \cdot I_2' \cdot \cos \Psi_2$$

Поскольку магнитный поток пропорционален напряжению питающей сети $\Phi=U_1$, а $I_2' \cdot \cos \psi_2$ пропорционален E_2 , которая пропорционально магнитному потоку: $I_2' \cos \psi_2 = E_2 = \Phi = U_1$, то вращающий момент пропорционален квадрату напряжения U_1 : $M_{BP} \propto U_1^2$.

Таким образом, незначительное изменение напряжения сети вызывает значительное изменение электромагнитного вращающего момента.

При этом критическое скольжение остается постоянным, а начинает изменяться максимальный вращающий момент, пусковой момент и перегрузочная способность.

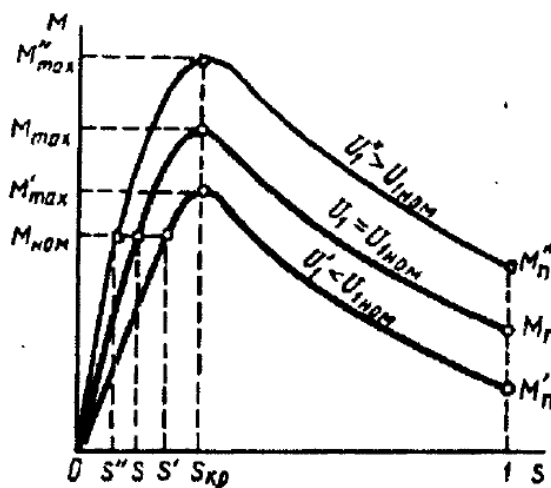


Рисунок 53

Пример:

U_1 понизилось по сравнению с U_{1H} на 30% ($U_1=0,7U_H$) тогда $M'_{max}=0,7^2 \cdot M_{max}=0,49 \cdot M_{max}$.

Если перегрузочная способность асинхронного двигателя при номинальном напряжении была равна 2, то при пониженном напряжении она будет равна:

$$\frac{M'_{max}}{M_H} = \frac{0,49M_{max}}{M_H} = 0,49 \cdot 2 = 0,98$$

Из полученного результата видно, что двигатель при понижении напряжения сети на 30% не в состоянии нести даже номинальную нагрузку.

Влияние активного сопротивления обмотки ротора асинхронного двигателя на вращающий момент

С увеличением активного сопротивления в цепи ротора величина максимального электромагнитного момента будет оставаться постоянной, а величина критического скольжения и пускового момента увеличиваются.

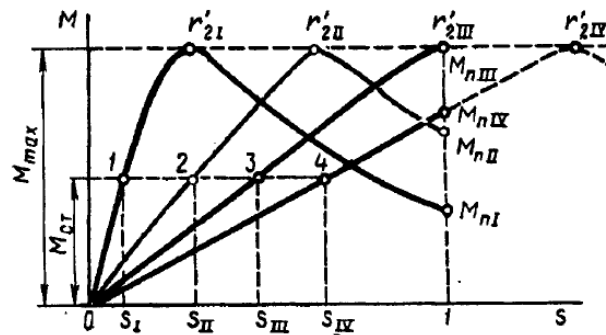


Рисунок 54

Момент пусковой с увеличением сопротивления ротора r'_2 увеличивается до некоторого значения, пока активное сопротивление ротора не сравняется с реактивным: $r'_2 = x'_2$.

Дальнейшее увеличение активного сопротивления приводит к уменьшению M_{π} ($M_{\pi 5}$).

Изменение активного сопротивления ротора асинхронного двигателя также влияет на скорость вращения двигателя – с увеличением r'_2 скорость вращения уменьшается.

Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора.

1. Пуск непосредственным включением статорной обмотки в сеть.

Данный способ является самым простым и дешевым. Обмотка статора при помощи выключателя или магнитного пускателя включается непосредственно в сеть под полное напряжение.

Недостаток этого способа в том, что в момент пуска двигателя возникают большие пусковые токи в 5...7 раз превышающие номинальное значение тока.

Для самого двигателя пусковой ток является не опасным, т.к. время пуска мало, но является нежелательным для питающей сети, т.к. в сети происходит резкое изменение напряжения, что отрицательно сказывается на работе других потребителей. Обычно этим способом осуществляется пуск двигателей мощностью до 30 кВт.

При значительно мощной питающей сети возможен запуск двигателей мощностью до 2000 кВт, но так чтобы при этом не было «провала» напряжения в сети.

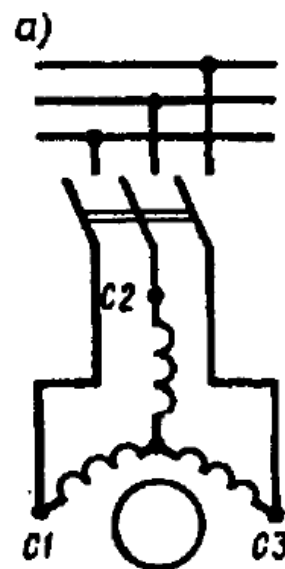


Рисунок 55

2. Пуск на пониженном напряжении.

Для ограничения пускового тока двигатели большой мощности пускаются на пониженном напряжении.

Существуют несколько способов пуска на пониженном напряжении:

1) Переключением статорной обмотки с соединения «звездой» на «треугольник».

Перед пуском двигателя с помощью специального переключателя статорную обмотку соединяют в «звезду». Этим самым снижают фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз, соответственно и фазный ток уменьшится в $\sqrt{3}$.

Линейный ток при соединении обмотки в «звезду» уменьшается в 3 раза, т.о. бросок пускового тока уменьшается в 3 раза.

По мере разгона двигателя обмотку статора переключают со «звезды» на «треугольник», после чего на каждую фазу подается полное напряжение сети ($U_{\phi} = U_{л}$).

Недостаток данного способа в том, что он имеет ограниченное применение, т.к. применим только для двигателей с нормальным включением обмоток статора в «треугольник». Кроме того, в результате снижения напряжения в $\sqrt{3}$ раз пусковой момент уменьшается в 3 раза, поэтому таким способом двигатели запускаются вхолостую или при неполной нагрузке.

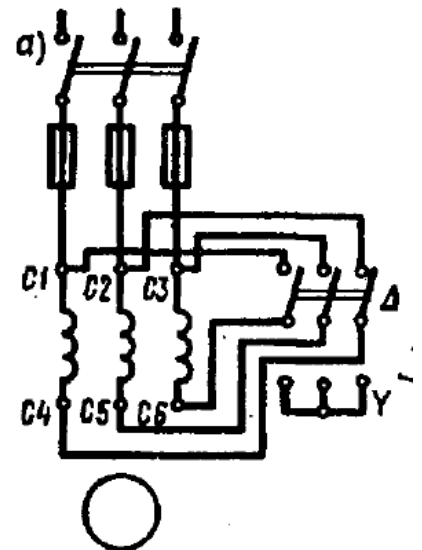


Рисунок 56

2) Реакторный пуск двигателя.

При разомкнутом рубильнике SB2 замыкается рубильник SB1. Напряжение на обмотку статора подается через реакторы, двигатель запускается при пониженном напряжении:

$$U'_1 = U_1 - jI_1 x_p$$

По мере разгона двигателя пусковой ток уменьшается, падение напряжения на реакторе уменьшится, а на обмотке статора увеличится.

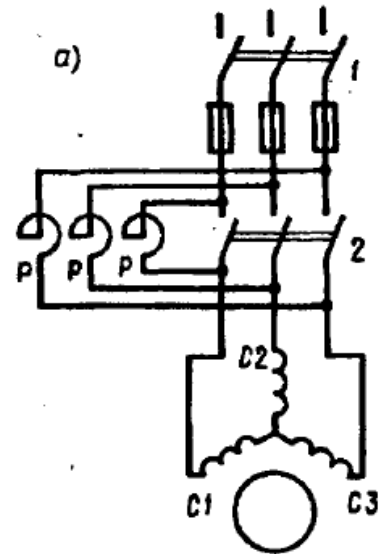


Рисунок 57

К концу пуска на статорную обмотку подается полное напряжение, после чего включается рубильник 2.

Благодаря снижению напряжения происходит резкое уменьшение пускового момента, поэтому запуск производят вхолостую или при неполной нагрузке, что является недостатком данного способа запуска.

К достоинству можно отнести то, что соединение обмоток статора может быть, как в «звезду», так и в «треугольник».

3) Автотрансформаторный пуск асинхронного двигателя.

Порядок запуска двигателя:

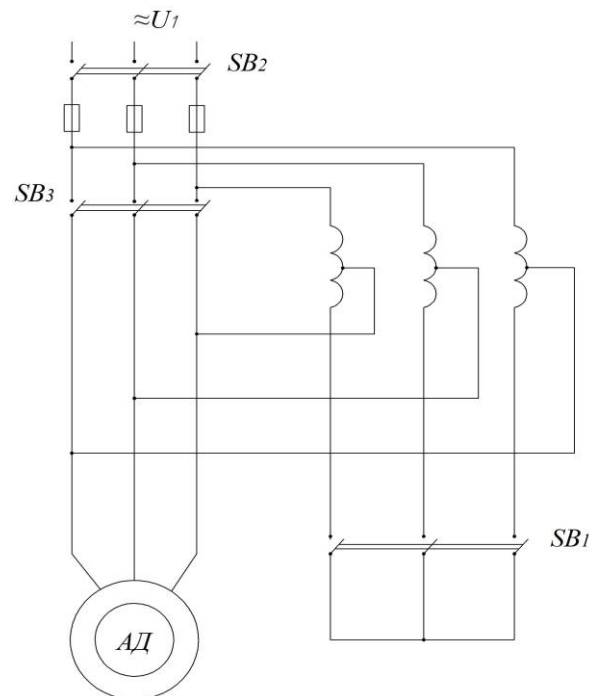


Рисунок 58

Перед запуском двигателя замыкается рубильник SB1. Этим самым обмотки автотрансформатора включаются по схеме «звезда». Затем включается рубильник SB2, при этом на обмотку статора подается пониженное напряжение, а пусковой ток на выходе автотрансформатора уменьшается пропорционально уменьшению напряжения. Ток на выходе автотрансформатора уменьшится в

K^2 раз (где K -коэффициент трансформации трансформатора) по сравнению с пусковым током при непосредственном включении статорной обмотки в сеть.

После того, как ротор придет во вращение и пусковой ток уменьшается, рубильник SB1 размыкают, автотрансформатор преобразуется в реактор, напряжение на статорной обмотке повышается.

При включении рубильника SB3 на обмотку статора подается полное напряжение. Таким образом, запуск осуществляется тремя ступенями.

На первой ступени к двигателю подводится напряжение 50...70% от U_{1H} .

На второй ступени к двигателю подводится 70...80% от U_{1H} .

На третьей ступени к двигателю подводится полное напряжение U_{1H} .

Этот способ основан на уменьшении подводимого напряжения, а, следовательно, и пускового тока.

С точки зрения снижения пускового тока, этот способ выгоднее реакторного способа пуска, но из-за сложности пусковой операции и высокой стоимости аппаратуры имеет ограниченное применение. Данный способ применяется только для запуска мощных асинхронных двигателей.

Однофазный асинхронный двигатель.

У однофазного асинхронного двигателя на статоре уложена только одна обмотка, которая занимает $2/3$ пазов статора. Ротор этого двигателя имеет короткозамкнутую обмотку.

В таком двигателе создается пульсирующее однофазное магнитное поле и развернуться самостоятельно он не может, но, будучи развернутым внешней силой, он начнёт вращаться в ту сторону, куда была приложена внешняя сила.

Однофазное пульсирующее поле изменяется от $+\Phi_{\max}$ до $-\Phi_{\max}$.

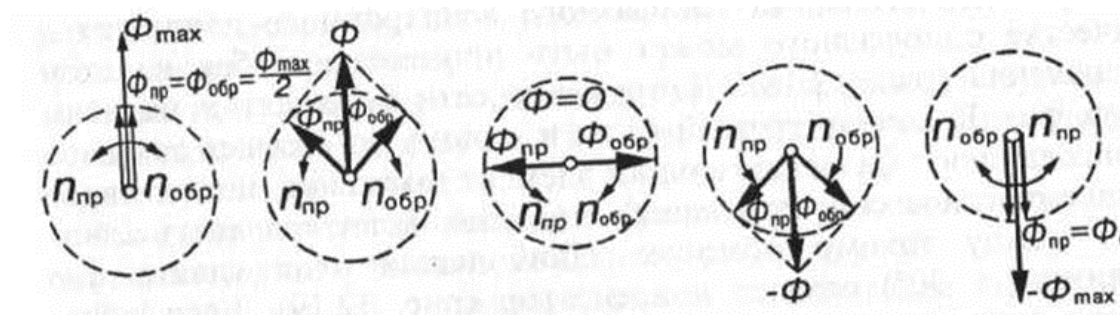


Рисунок 59 – Разложение пульсирующего магнитного потока Φ на два вращающихся

Теоретически это магнитное поле может быть разложено на два вращающихся магнитных поля Φ_I и Φ_{II} : $\Phi_I = \Phi_{II} = \Phi_{\max}/2$, которые вращаются в разные стороны с одинаковой скоростью. Магнитными потоками Φ_I и Φ_{II} в обмотке ротора будут индуцироваться ЭДС E_{2I} и E_{2II} , этими ЭДС создаются токи I_{2I} и I_{2II} , каждый из которых взаимодействует с соответствующими магнитными потоками обмотки статора. В результате на валу двигателя создаются два равных противоположно направленных момента и результирующий момент будет равен 0. Таким образом, однофазный асинхронный двигатель сам по себе запуститься не может.

Для запуска однофазного асинхронного двигателя его ротору необходимо дать первоначальный толчок с тем, чтобы скольжение S стало меньше 1, после чего на валу двигателя появляется вращающий момент, за счет которого ротор двигателя приводится в движение.

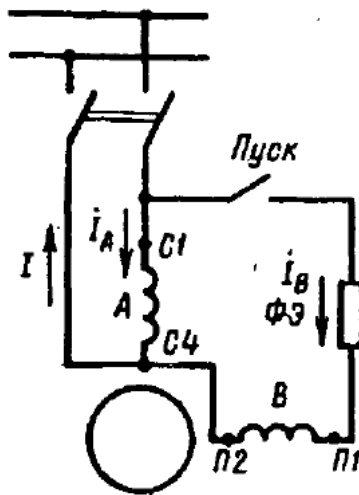
Тот магнитный поток, который совпадает с направлением вращения ротора, называется прямым, другой поток называется обратным. Скольжение двигателя относительно прямого потока стремится к нулю: $S_I = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Скольжение двигателя относительно обратного потока: $S_n = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1}$, стремиться к двум ($S_{II} > S_I$).

Частота тока, наведенного в обмотке ротора, пропорциональна скольжению, поэтому ток I_{2II} , будет иметь большую частоту, чем ток I_{2I} . Индуктивное сопротивление току I_{2II} будет так же больше, чем току I_{2I} , поэтому ток I_{2II} может рассматриваться как чисто реактивный ток, который оказывает сильное размагничивающее действие на поток Φ_{II} , поэтому обратное магнитное поле будет сильно ослаблено, а вращающий момент, созданный действием прямого магнитного поля будет больше, чем момент, созданный обратным полем. Результирующий момент будет равен: $M = M_I - M_{II}$ и будет направлен в сторону большего момента, за счет которого и происходит вращение двигателя.

1. Пуск однофазного асинхронного двигателя

Для создания пускового момента однофазный асинхронный двигатель снабжается пусковой обмоткой. Эта обмотка заполняет оставшуюся 1/3 пазов статора, и располагается всегда так, чтобы намагничивающая сила этой обмотки была бы сдвинута на $90^\circ_{\text{эл}}$ относительно намагничивающей силы рабочей обмотки, кроме того, ток в пусковой обмотке должен быть сдвинут относительно тока рабочей обмотки так же на $90^\circ_{\text{эл}}$, для чего последовательно с пусковой обмоткой включают фазосдвигающий элемент, в качестве которого может быть использовано активное сопротивление R , индуктивность L или



емкость C .

Рисунок 61

Наилучшим фазосдвигающим элементом является емкость.

После пуска двигателя пусковая обмотка должна быть отключена, после чего двигатель начинает работать на пульсирующем поле.

Работа трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме (от однофазной сети)

Трехфазный асинхронный двигатель без каких-либо изменений в конструкции может быть включен в работу на однофазную сеть. При этом используются одна из нижеприведенных схем включения:

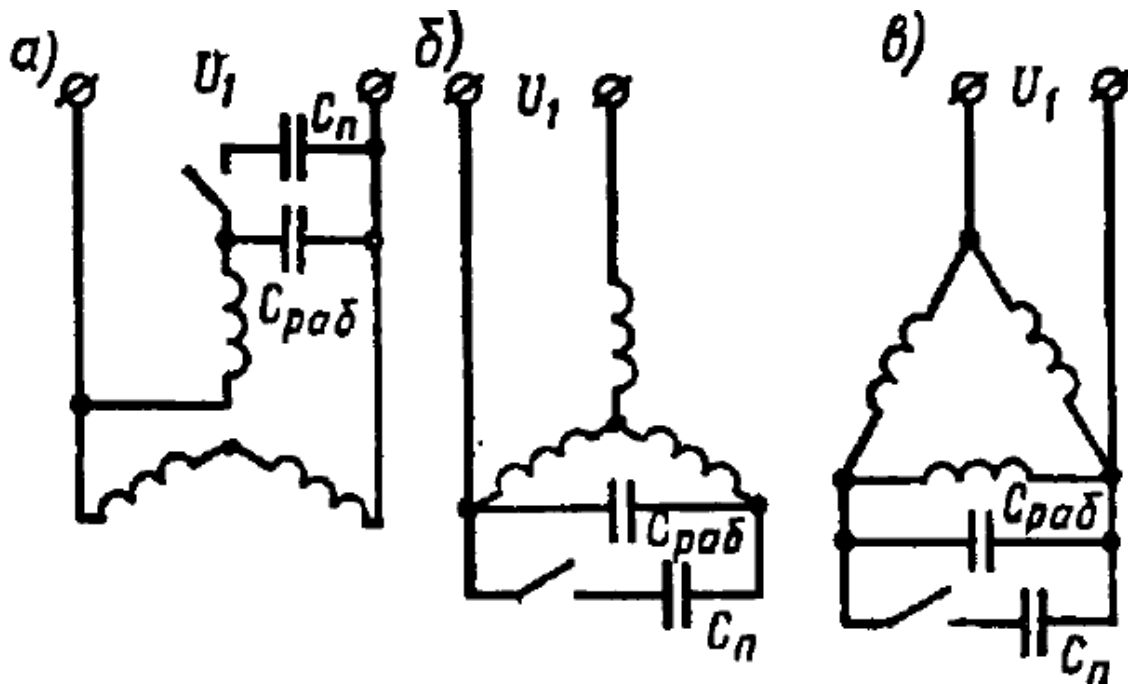


Рисунок 62

Рабочая емкость C_p рассчитывается на номинальную мощность двигателя, поэтому при колебании нагрузки рабочие характеристики двигателя ухудшаются как при перегрузке, так и при недогрузке обмотка двигателя может сгореть.

Мощность двигателя при переводе ее с трехфазного режима на однофазный несколько снижается.

Рабочая емкость определяется по формуле:

- для схемы №1: $C_p = 2740 I_{1н} / U_{1н}$;
- для схемы №2: $C_p = 2800 I_{1н} / U_{1н}$;

- для схемы №3: $C_p = 4800 I_{1н} / U_{1н}$;

где $I_{1н}$ и $U_{1н}$ – линейные значения трехфазного соединения.

Если запуск двигателя производится вхолостую или при небольшой нагрузке, то пусковая емкость не нужна. При запуске двигателя под нагрузкой пусковая емкость обязательно нужна для того, чтобы момент M был близок к номинальному значению M_n значение пусковой емкости выбирается $C_p = (2,5 \dots 3) C_p$

Если пусковой момент M_p необходимо приблизить к M_{max} , то $C_p = (6 \dots 8) C_p$

При использовании трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме его мощность составляет 75...80% от номинальной.

3. Синхронные машины

Синхронной электрической машиной называется бесколлекторная машина переменного тока у которой частота вращения ротора находится в строго постоянной зависимости по отношению к частоте питающей сети и определяется выражением: $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$, где p – число пар полюсов.

Синхронная машина обратима и может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Переменный ток на электрических станциях вырабатывается с помощью синхронных генераторов.

Отличительной особенностью синхронных электрических машин является то, что частота их вращения не зависит от нагрузки и при постоянной частоте питающего тока f_1 остается постоянной.

С помощью синхронных двигателей можно регулировать коэффициент мощности электрической сети, такие машины называются синхронными компенсаторами.

3.1. Устройство и принцип работы синхронной машины

Принцип работы синхронной машины основан на явлении электромагнитной индукции. Если машину постоянного тока лишить коллектора и снабдить контактными кольцами, то машина постоянного тока преобразуется в синхронный генератор однофазного тока. При вращении ротора в обмотке статора индуцируется переменная синусоидальная ЭДС, мгновенное значение которой определяется: $e = E_{\max} \cdot \sin \omega t$

Обмотку якоря располагают на неподвижной части, т.е. на статоре, а обмотку ротора (индуктора) на вращающейся части, т.е. на роторе.

При таких условиях более надежна работа генератора, т.к. при высоких напряжениях при возникновении искрения на кольцах возможно появление короткого замыкания за счет перекрытия колец электрической дугой.

Синхронные генераторы трехфазного тока имеют три обмотки статора, которые сдвинуты друг относительно друга на 120° . Обмотки соединяются «звездой» или «треугольником». При вращении ротора в обмотках статора индуцируются трехфазные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга на $120_{эл}^\circ$.

На электростанциях электроэнергия вырабатывается в виде трехфазного тока частотой 50Гц.

3.2 Типы синхронных генераторов.

В качестве первичных двигателей синхронных генераторов применяются паровые турбины, гидравлические турбины, двигатели внутреннего сгорания. В соответствии с этим генераторы подразделяются на:

- 1) турбогенераторы;
- 2) гидрогенераторы;
- 3) дизельгенераторы.

3.3 Способы возбуждения синхронных машин.

В зависимости от способа возбуждения синхронные генераторы подразделяются на:

- 1) Генераторы независимого возбуждения, когда обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока – возбудителя.
- 2) Генераторы с самовозбуждением, когда возбудитель монтируется на одном валу с генератором;

- 3) Генератор с возбуждением при помощи постоянных магнитов, такое возбуждение применяется для машин небольшой мощности.

3.4 Требования к ЭДС синхронного генератора

К наведенной ЭДС в синхронных генераторах предъявляются следующие требования:

- 1) Величина наведенной ЭДС должна быть равна заданному значению;
- 2) Частота наведенной ЭДС должна быть равна заданному значению;
- 3) Форма кривой наведенной ЭДС должна максимально приближаться к синусоиде.

Необходимая величина ЭДС обеспечивается путем изменения тока возбуждения при помощи регулирования реостата.

Необходимая частота обеспечивается постоянством скорости вращения генератора, т.к. $f = \frac{p \cdot n}{60}$

3.5 Принцип действия синхронного двигателя.

Синхронная машина обладает свойством обратимости. Если вал синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, отсоединить от первичного двигателя, не отключая цепей статора и ротора, то синхронная машина переходит в режим двигателя. Трехфазным током, потребляемым из сети, в обмотке статора будет создаваться вращающееся магнитное поле, которое будет взаимодействовать с магнитным полем ротора, в результате чего ротор начнет вращаться с синхронной скоростью.

3.6 Способы пуска синхронных двигателей

Существуют следующие способы пуска синхронных двигателей в работу:

1) Разгон ротора первичным двигателем.

Первичный двигатель разгоняет синхронный двигатель до скорости близкой к синхронной после чего синхронный двигатель втягивается в синхронизм.

Мощность первичного двигателя составляет 5...15% от мощности синхронного двигателя.

2) Асинхронный пуск синхронного двигателя.

У синхронных машин с асинхронным пуском помимо обмотки ротора имеется еще короткозамкнутая обмотка («беличья клетка»). Синхронный двигатель сначала запускается в асинхронном режиме и при достижении скорости вращения ротора максимального значения для асинхронного режима на обмотку ротора подается постоянный ток и двигатель втягивается в синхронизм.

Тема: Трансформаторы

1. Назначение, область применения и классификация трансформаторов.

Трансформатором называется статичное электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения той же самой частоты.

Трансформаторы широко применяются в энергосистемах при передаче и распределении энергии, такие трансформаторы называются силовыми трансформаторами.

В зависимости от назначения трансформаторы разделяются на:

- силовые трансформаторы общего назначения, применяющиеся в линиях электропередачи и для распределения электроэнергии;
- трансформаторы специального назначения, характеризующиеся разнообразием рабочих свойств, к этим трансформаторам относятся сварочные трансформаторы, измерительные трансформаторы, трансформаторы для устройств автоматики и т.д.)

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам.

В зависимости от преобразования напряжения трансформаторы разделяются на:

- понижающие;
- повышающие.

По числу фаз трансформаторы разделяются на:

- однофазные;
- многофазные.

По числу обмоток на фазу трансформаторы разделяются на:

- двухобмоточные;
- многообмоточные.

Обмотка трансформатора, подключённая к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения; обмотку, подключённую к сети меньшего напряжения называют обмоткой низшего напряжения.

По виду охлаждения трансформаторы разделяются на:

- трансформаторы с воздушным охлаждением (сухие трансформаторы);
- трансформаторы с масляным охлаждением (масляные трансформаторы).

Как те, так и другие могут быть с естественным или принудительным охлаждением.

По форме магнитопровода трансформаторы бывают:

- стержневые;
- броневые;
- бронестержневые;
- тороидальные.

2. Принцип действия трансформаторов

Конструктивная схема простейшего однофазного трансформатора состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода. Одна из обмоток подсоединена к источнику переменного тока и называется первичной, другая обмотка называется вторичной, к ней подключен потребитель.

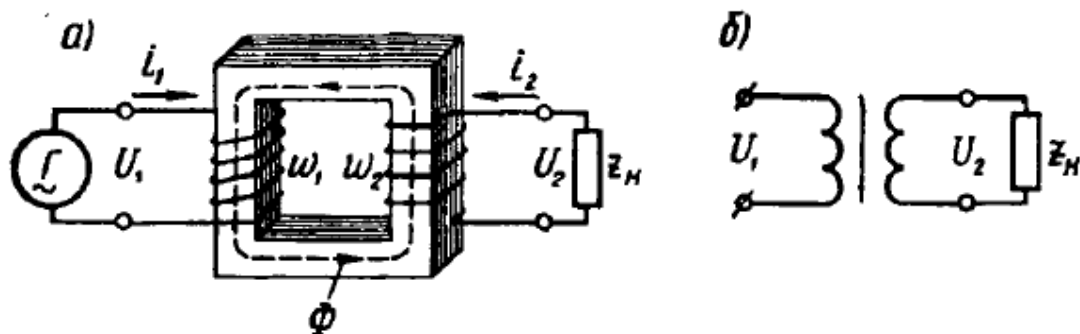


Рисунок 63

Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками и индуцирует в них ЭДС:

- в первичной обмотке ЭДС самоиндукции: $e_1 = -\omega_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}; (1)$

- во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции: $e_2 = -\omega_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}; (2)$

где ω_1 и ω_2 - число витков, в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Из выражений (1) и (2) видно, что e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков ω_1 и ω_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

При подключении к выводам вторичной обмотки трансформатора нагрузки Z_H , под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки начинает протекать ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 .

В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$.

3. Устройство трансформаторов

Трансформатор состоит из следующих основных частей:

- магнитопровода (или сердечника);
- обмоток;
- бака с маслом, если трансформатор масляный;
- выводных изоляторов.

Магнитопровод с насаженными на его стрежни обмотками составляет активную часть трансформатора, остальные элементы называют неактивными (вспомогательными).

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции:

Во – первых, он составляет магнитную цепь по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а, во – вторых, он является основой для установки и крепления обмоток.

Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т.е. состоит из листов отдельных пластин, набранных в пакет. Пластины изготовлены из электротехнической стали (обычно толщиной 0.5 мм). Пластины изолированы друг от друга. Такая конструкция позволяет ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а, следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Магнитопроводы бывают четырёх типов:

- стержневого;
- броневого;
- бронестержневого;
- тороидального.

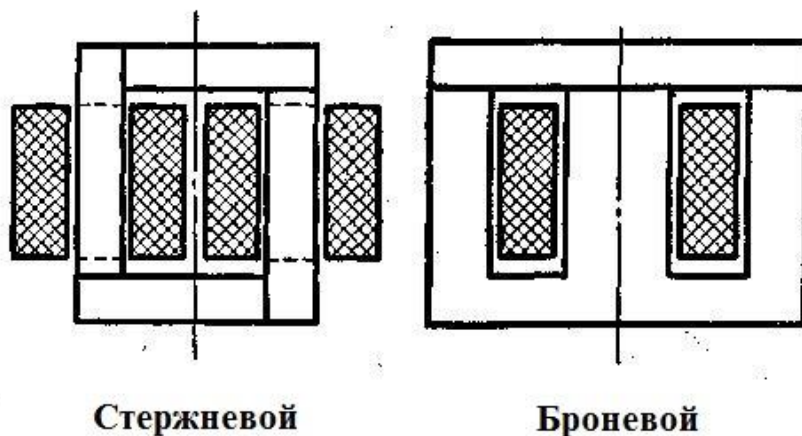


Рисунок 64

У стержневых трансформаторов обмотка охватывает стержень. Стержень сверху и снизу замкнуты ярами.

У броневых трансформаторов обмотка частичного охватывается сталью. («бронируют»).

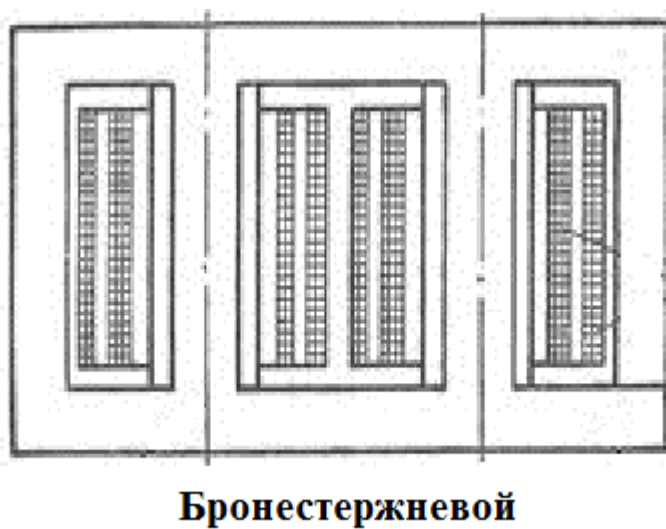


Рисунок 65

Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневого типа применяются лишь в силовых трансформаторах малой мощности.

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода.

Сечение магнитопровода может быть прямоугольное или ступенчатое:



Рисунок 66

Конструкция магнитопровода может быть стыковая (а) или выполненная впереплет (б).

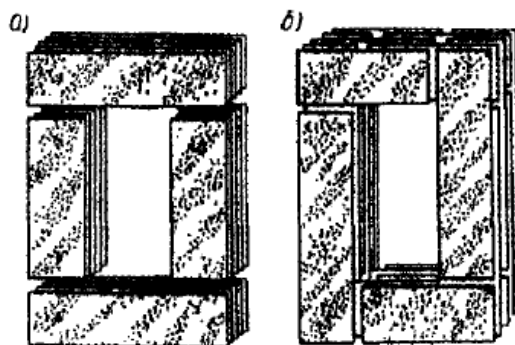


Рисунок 67

При стыковой конструкции стержни и ярма собирают отдельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее ярма, после чего всю конструкцию стягивают шпильками.

У шихтованных магнитопроводов, собранных впереплет уменьшаются воздушные зазоры и магнитное сопротивление магнитопровода.

Ленточные магнитопроводы применяют у трансформаторов малой мощности (до 1кВА).

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных х/б пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки является бумажно-бакелитовый цилиндр. Витки изолируют друг от друга прессшпановыми кольцами. По взаимному расположению на стержне обмотки бывают:

1). Концентрические – выполняются в виде цилиндров, размещенных на стержне концентрически. Ближе к стержню располагают обмотку НН (требующей меньшей изоляции от стержня).

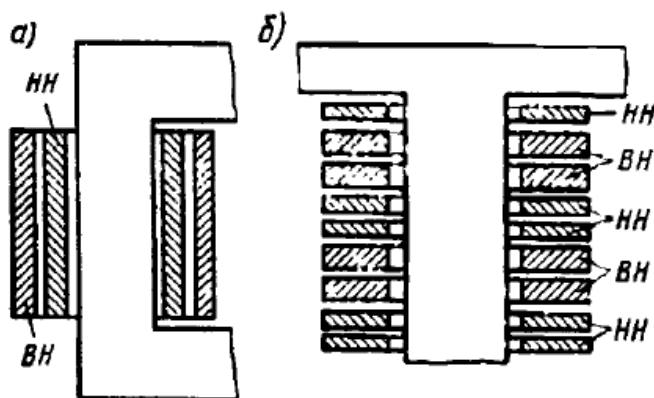


Рисунок 68

2). Дисковые (чередующиеся) выполняются в виде отдельных секций (дисков) и

располагают на стержне в чередующемся порядке. Такие обмотки применяются реже.

Концентрические обмотки бывают:

- цилиндрические;
- винтовые;
- дисковые (непрерывные)

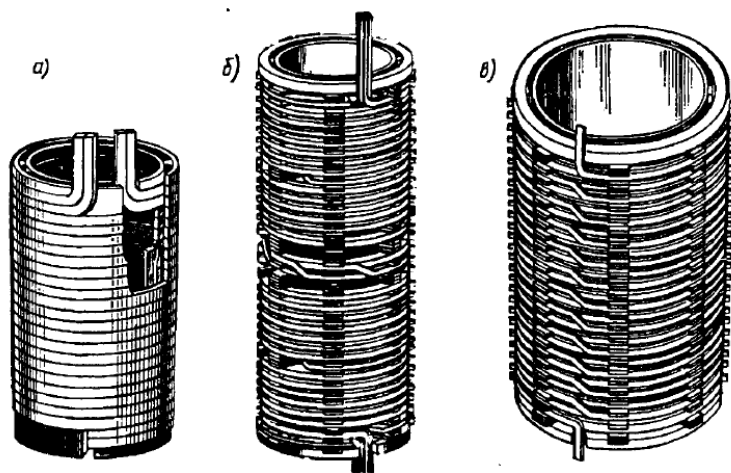


Рисунок 69

Охлаждение. Конструкция трансформатора зависит от способа его охлаждения.

По этому признаку трансформаторы делятся на:

- 1) сухие с естественным охлаждением;
- 2) масляные с естественным охлаждением;
- 3) масляные с принудительным воздушным охлаждением;
- 4) масляные с принудительной циркуляцией масла.

В сухих трансформаторах с естественным охлаждением теплоотдача от трансформатора происходит непосредственно окружающему воздуху. Т.к. коэффициент теплоотдачи в воздух невелик, то сухие трансформаторы обычно выполняются небольшой мощности для напряжений не выше $6 \div 10$ кВ.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак-кожух сварной конструкции, наполненный трансформаторным маслом. Трансформаторное масло, омывая обмотки и магнитопровод, отбирает от них тепло и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака отдает ее в окружающую среду. Наличие масла обеспечивает более

надежную работу трансформатора, т.к. электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха.

Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и вес масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

В трансформаторах мощностью до 20...30кВА применяют баки с гладкими стенками, у более мощных трансформаторов для увеличения поверхности теплоотдачи стенки бака делают ребристыми или в них вваривают трубы для естественной циркуляции масла.

Для компенсации объема масла при изменении температуры в трансформаторах применяют расширительные баки. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходит не в баке-кожухе, а в расширительном баке, имеющем сообщение с атмосферой.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения явлений, сопровождающихся бурным выделением газов при сильном разогреве масла. Это ведет к повышению давления внутри бака трансформатора и во избежание его повреждения трансформаторы мощностью 1000кВА и выше снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака. Нижний конец трубы сообщается с баком, а верхний конец заканчивается фланцем, на котором закреплен стеклянный диск (мембрана). При давлении, превышающем безопасное, стеклянный диск ломается и газы выходят в атмосферу.

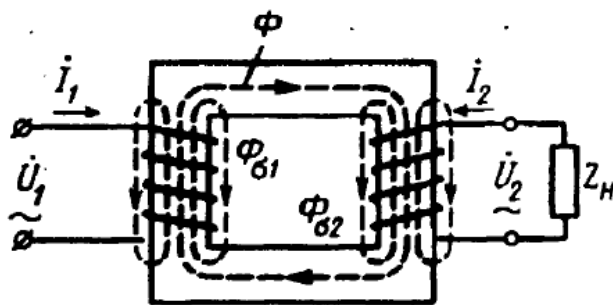
В трубопровод, соединяющий расширительный бак с баком-кожухом, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе аварийного режима, газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. На крышке бака-кожуха трансформатора так же устанавливаются проходные изоляторы высшего

и низшего напряжения, переключатель напряжения вторичной обмотки ($\pm 5\%$). На кожухе трансформатора укреплен паспорт, в котором указываются следующие данные:

- 1) номинальное первичное линейное напряжение $U_{1\text{ном}}$, В или кВ;
- 2) номинальное вторичное линейное напряжение $U_{2\text{ном}}$, В или кВ;
- 3) номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$, кВА (для однофазного трансформатора $S_{\text{ном}}=U_{1\text{ном}} \times I_{1\text{ном}}$, для трехфазного $S_{\text{ном}}= \sqrt{3} U_{1\text{ном}} \times I_{1\text{ном}}$);
- 4) номинальные линейные токи в первичной $I_{1\text{ном}}$ и вторичной $I_{2\text{ном}}$ обмотках;
- 5) частота переменного тока;
- 6) схема и группа соединения обмоток;
- 7) напряжение короткого замыкания $U_{\text{кз}}$;
- 8) тип (марка) трансформатора;
- 9) завод-изготовитель, год выпуска, серийный номер.

Уравнение напряжений трансформатора.

Принцип трансформатора основана явлении самоиндукции и взаимной индукции. За счет подводимого напряжения U_1 в первичной обмотке протекает ток I_1 , этим током создается магнитодвижущая сила $F_1=I_1 \cdot w_1$, за счет которой создается магнитный поток Φ_1 . Основная часть потока замыкается по



сердечнику и небольшая часть по воздуху. Поток Φ_1 называют основным магнитным потоком, часть потока, замыкаемая по воздуху Φ_{61} называют потоком рассеяния.

Рисунок 70

Под действием основного магнитного потока в первичной обмотке индуцируется ЭДС самоиндукции $e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} w_1$, во вторичной обмотке индуцируется ЭДС взаимной индукции $e_2 = -\frac{d\Phi_1}{dt} w_2$

Магнитный поток является синусоидальной функцией времени: $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$, где Φ_{max} – максимальное (амплитудное) значение потока.

$$e_1 = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_{1max} \cdot \cos \omega t = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_{1max} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$\cos \omega t = -\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ или } 90^\circ$$

$$\text{По аналогии: } e_2 = \omega \cdot w_2 \cdot \Phi_{1max} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$\text{Максимальные значения ЭДС: } E_{1max} = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_{max}$$

$$E_{2max} = \omega \cdot w_2 \cdot \Phi_{max}$$

Действующее значения в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального, круговая частота $\omega = 2\pi f$

$$\text{Тогда действующее значение: } E_1 = \frac{2\pi f \cdot w_1 \cdot \Phi_{1max}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot \Phi_{1max} \cdot f \cdot w_1$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi_{1max} \cdot f \cdot w_2$$

Наведенные ЭДС E_1 и E_2 изменяются по синусоидальному закону и отстают от магнитного потока на $\frac{\pi}{2}$ или 90° .

Отношение ЭДС обмотки ВН к ЭДС обмотки НН называется коэффициентом трансформации: $K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$

При практических расчетах с некоторым допущением считают $E_1 = U_1$, а $E_2 = U_2$, тогда: $K = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{w_1}{w_2}$

Во вторичной обмотке под действием наведенной ЭДС E_2 протекает ток I_2 под действием которого создается МДС $F_2 = I_2 \cdot w_2$, которая создает поток Φ_2 основная часть по воздуху, создавая поток рассеяния Φ_2 .

Результирующий поток Φ в сердечнике трансформатора создается путем совместных действий Φ_1 и Φ_2 , этим результирующим потоком в первичной обмотке наводится E_1 , а во вторичной E_2 .

Потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, сцеплены каждый с витками лишь собственной обмотки и индуцируют в них ЭДС рассеяния: $e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$; $e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$

Поскольку потоки рассеяния замыкаются через немагнитную среду (воздух, масло, медь), магнитная проницаемость которой постоянна, то и индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными.

Действующие значения ЭДС рассеяния пропорциональны током соответствующих обмоток: $E_{\sigma 1} = -j \cdot I_1 \cdot x_1$; $E_{\sigma 2} = -j \cdot I_2 \cdot x_2$, где x_1 и x_2 – индуктивность сопротивления.

Т.е. в каждой из обмоток трансформатора индуцируется по две ЭДС: ЭДС от основного потока Φ и от потока рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$. Каждая из обмоток обладает активным сопротивлением на котором создается активное падение напряжения: $I_1 r_1$; $I_2 r_2$.

Для первичной цепи трансформатора, включенной в сеть на напряжение U_1 можно записать уравнения ЭДС и падений напряжения по второму закону Кирхгофа: $U_1 + E_1 + E_{\sigma 1} = I_1 \cdot r_1$

Обычно индуктивное и активное сопротивления первичной обмотки невелики, поэтому с некоторым приближением можно считать, что: $U_1 \approx -E_1$

Для вторичной цепи трансформатора, замкнутой на нагрузку с сопротивлением z_H , уравнения напряжений имеет вид:

$$E_2 + E_{\sigma 2} = I_2 r_2 + I_2 z_H$$

$$I_2 z_H = U_2$$

$$E_{\sigma 2} = -j \cdot I_2 \cdot x_2$$

$$U_2 = E_2 - j \cdot I_2 \cdot x_2 - I_2 \cdot r_2$$

$$U_2 < E_2$$

4. Уравнение магнитодвижущих сил и токов

Если трансформатор работает в режиме х.х. (к зажимам первичной обмотки подведено U_1 , а вторичная обмотка разомкнута $I_2=0$ по первичной обмотке проходит ток Х.Х. I_0 , этим током создается МДС Х.Х.: $F_0=I_0\omega_0$, которая создает основной магнитный поток трансформатора:

$$\Phi \sqrt{2} \frac{F_0}{R_m} \sqrt{2} \frac{I_0 w_1}{R_m \max}, \text{ где } R_m - \text{магнитное сопротивление магнитопровода.}$$

Если вторичная обмотка будет замкнута на нагрузку z_n , то во вторичной обмотке ток I_2 , которым создается МДС: $F_2=I_2\omega_2$. Эта МДС создаст магнитный поток Φ_2 , при этом ток в первичной обмотке увеличится до значения I_1 . Таким образом, теоретически, в сердечнике трансформатора существуют два магнитных потока, которые воздействуют один на другой и создают результирующий магнитный поток Φ , который будет определяться:

$$\Phi \sqrt{2} \frac{F_1 + F_2}{R_m} \sqrt{2} \frac{I \cdot w_1 + I_2 w_2}{R_m \max}$$

$$\text{Из формулы ЭДС этот поток будет равен: } \Phi \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1} \frac{U_1}{4,44 f \cdot w_1 \max}$$

Т.к. $U_1 = \text{const}$, то значение основного потока Φ практически не зависит от нагрузки трансформатора (работает трансформатор в режиме х.х. или нагрузки). Магнитный поток в сердечнике трансформатора будет оставаться неизменным.

$$\text{Тогда можно записать: } \sqrt{2} \frac{I_0 \cdot w_1}{R_m} = \sqrt{2} \frac{I_1 \cdot w_1 + I_2 \cdot w_2}{R_m}$$

$I_0 \cdot w_1 = I_1 \cdot w_1 + I_2 \cdot w_2$ - уравнение магнитодвижущих сил трансформатора.

$$\text{Или } I_1 \cdot w_1 = I_0 \cdot w_1 + (-I_2 \cdot w_2)$$

Т.о., $\dot{I}_0 W_1$ наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток Φ , а составляющая $(- \dot{I}_2 W_2)$ уравнивает МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 W_2$: $\underline{- \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_0 W_1}$

Графически это можно изобразить так:

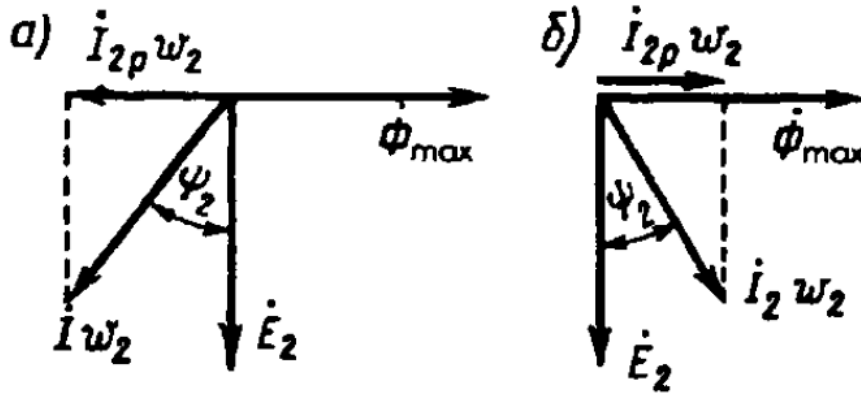


Рисунок 71

Приведенный ток – это такой ток, который в обмотке с числом витков W_1 создает такую же м.д.с., что и ток I_2 в обмотке с числом витков W_2

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2' \rightarrow \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$$

Из этого уравнения следует, что i_1 представляет собой сумму двух составляющих: i_0 – ток, который создает основной магнитный поток в сердечнике трансформатора и $-i_2$ – ток, который компенсирует размагничивающее действие потока вторичной обмотки.

Основной магнитный поток Φ является переменным, а поэтому магнитопровод трансформатора постоянно перемагничивается. Поэтому в магнитопроводе трансформатора существуют магнитные потери от гистерезиса и вихревых токов, наводимых переменным магнитным потоком.

Мощность активных потерь эквивалентна активной составляющей тока Х.Х. I_{0a} . Т.е. ток Х.Х. имеет две составляющие: реактивную I_{0p} , представляющую собой намагничивающий ток, и активную I_{0a} , обусловленную магнитными потерями.

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}$$

Обычно активная составляющая не превышает 10% от I_0 .

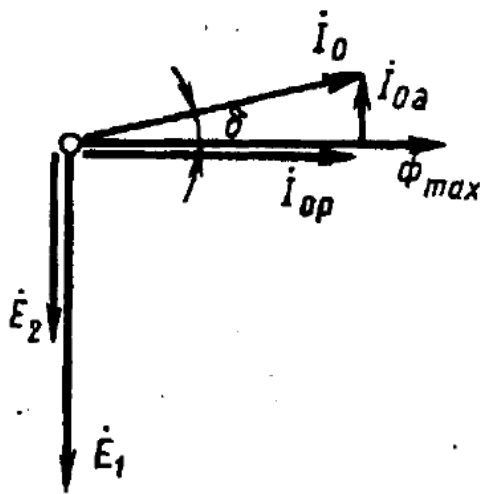


Рисунок 72

Угол Δ на который вектор основного магнитного потока Φ_{max} отстает по фазе от тока $\dot{I}_0$ называют углом магнитных потерь.

Сила тока Х.Х. I_0 в трансформаторах большой и средней мощности составляет 2...10% от номинального первичного тока, поэтому при нагрузке близкой к номинальной можно пренебречь I_0 .

Тогда: $(-I_2 w_2) = I_1 w_1 - I_0 w_1 \rightarrow -I_2 w_2 = I_1 w_1 \rightarrow I_2 w_2 = I_1 w_1 \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}$ т.е.

токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток. Ток больше в обмотках с меньшим количеством витков, поэтому обмотки НН выполняют проводом большего сечения.

5. Приведение параметров вторичной обмотки и схема замещения приведенного трансформатора

В большинстве случаев параметры первичной обмотки трансформатора отличаются от параметров вторичной обмотки. Особенно эта разница ощутима при больших коэффициентах трансформации, что затрудняет расчеты и построение векторных диаграмм, т.к. векторы электрических величин первичной обмотки резко отличается по длине от одноименных векторов вторичной обмотки.

Эти затруднения устраняются приведением всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, обычно все величины, характеризующие вторичную цепь трансформатора: ЭДС, напряжение, ток и сопротивление пересчитывают на число витков первичной обмотки ω_1 .

Таким образом, вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $K = \frac{\omega_1}{\omega_2}$, получают эквивалентный трансформатор с $K = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ где $\omega_1 = \omega_2'$, т.е. $K=1$. Такой трансформатор называют приведенным. Приведение вторичных параметров трансформатора не должно отражаться на его энергетических показателях: все мощности и фазовые сдвиги электрических величин у приведенного трансформатора должны остаться такими же, как и в реальном трансформаторе.

Электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора должна равняться электромагнитной мощности приведенного трансформатора.

$$E_2 I_2 = E_2' I_2' \rightarrow E_2' = \frac{E_2 \cdot I_2}{I_2'} = \frac{E_2 I_2 \omega_1}{I_2 \omega_2} = E_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = E_2 \cdot K$$
$$(I_2' = I_2 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1})$$

Аналогично: $U_2' = U_2 \cdot W_1/W_2 = U_2 \cdot K^2$

Приведенное сопротивление активное определяется из условия равенства потерь мощности:

$$I_2^2 \cdot r_2 = I_2'^2 \cdot r_2' \rightarrow r_2' = \frac{I_2^2 \cdot r_2}{I_2'^2} = \frac{I_2^2 \cdot r_2 \cdot w_1^2}{I_2'^2 \cdot w_2^2} = r_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = r_2 k^2$$

Аналогично реактивное сопротивление:

$$X_2' = X_2 \cdot (W_1/W_2)^2 = X_2 \cdot K^2$$

Приведенное полное сопротивление вторичной обмотки:

$$Z_2' = r_2' + jX_2' = (r_2 + jX_2) (W_1/W_2)^2 = Z_2 (W_1/W_2)^2 = Z_2 K^2$$

Приведенное полное сопротивление нагрузки, подключенной на выводы вторичной обмотки: $Z_n' = Z_n \cdot (W_1/W_2)^2 = Z_n \cdot K^2$

Тогда уравнения напряжений и токов для приведенного трансформатора будут иметь вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 \cdot r_1$$

$$\dot{U}_2' = -\dot{E}_2' - j \dot{I}_2' X_1' - \dot{I}_2' \cdot r_2'$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$$

Эти уравнения устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузок от х.х. до номинальной.

Для облегчения исследования электромагнитных процессов и удобства расчетов так же применяют схему замещения приведенного трансформатора. В этой схеме магнитная связь между обмотками заменяется электрической связью.

Представим эквивалентную схему приведенного трансформатора:

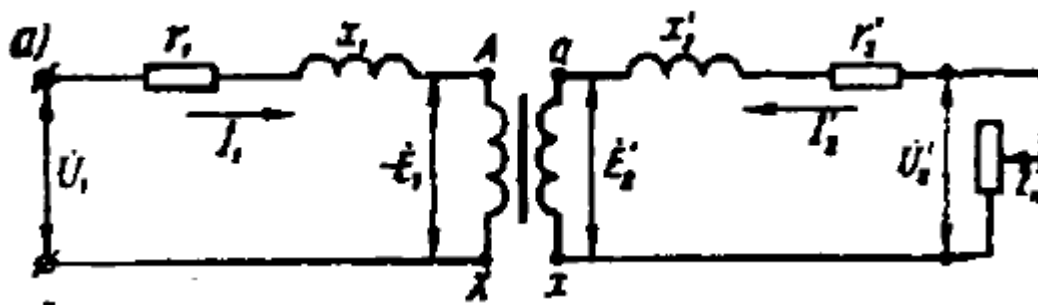


Рисунок 73

Поскольку в приведенном трансформаторе $-\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$, т.к. $K=1$, то точки **A** и **a**, а так же **X** и **x** на схеме имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему замещения приведенного трансформатора. В электрической схеме замещения трансформатора магнитная связь между цепями заменена электрической.

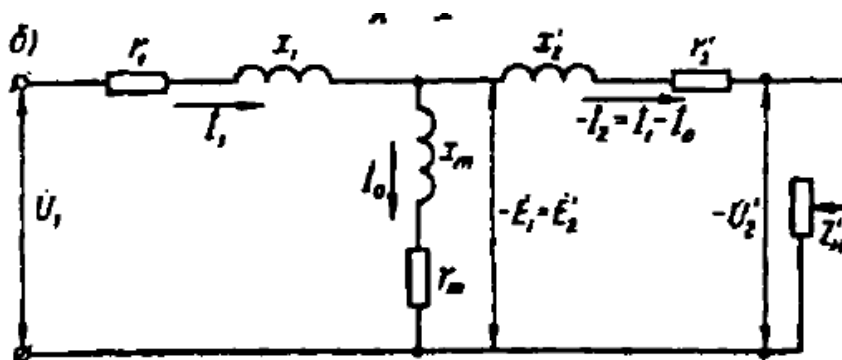


Рисунок 74

Схема замещения приведенного трансформатора удовлетворяет всем уравнениям эдс и токов приведенного трансформатора.

Схема состоит из трех ветвей:

- 1) Первичная с сопротивлением $Z_1 = r_1 + jX_1$ и током I_1 ;
- 2) Вторичная с сопротивлением $Z_2' = r_2' + jX_2'$ и сопротивлением нагрузки $Z_{н'}$
 $= r_{н'} \pm j X_{н'}$ и током $-\dot{I}_2'$;

3) Намагничивания с сопротивлением $Z_0 = r_0 + jX_0$ и током $\dot{I}_0$.

Изменением сопротивления нагрузки Z_n' на схеме замещения могут быть воспроизведены все режимы работы трансформатора.

6. Векторная диаграмма трансформатора

Векторная диаграмма строится на основе основных уравнений напряжений и токов трансформатора и схемы замещения. Она позволяет графически установить соответствие между основными электрическими величинами и фазовыми сдвигами между ними у приведенного трансформатора.

Построение диаграммы начинают с вектора максимального значения основного

магнитного потока: $\Phi \frac{E_1}{4,44 \cdot a \cdot w_{1max}}$

Вектор тока I_0 опережает по фазе вектор потока Φ_{max} на угол Δ_1 а E_1 и E_2 отстает от этого вектора на угол 90° . Далее строим вектор I_2 (если вторичная обмотка замкнута на нагрузку). При этом следует знать характер нагрузки: активно-индуктивная или активно-емкостная.

Если нагрузка активно-индуктивная, то вектор I_2 отстает по фазе от E_2 на угол

Ψ_2 . ($tg\phi_2 = \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H} \rightarrow \psi_2 = arctg \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}$), определяемый как родом внешней

нагрузки, так и собственным сопротивлением вторичной обмотки: $I'_2 =$

$$\frac{E'_2}{\sqrt{(r'_2 + x'_2)^2 + (r'_2 + r'_H)^2}}$$

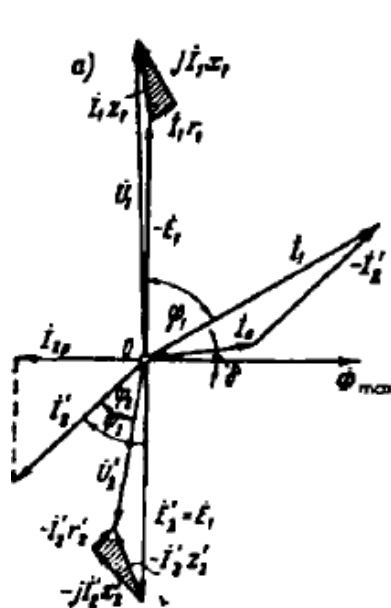
Для построения вектора вторичного напряжения U_2 необходимо из вектора ЭДС

E_2 вычесть векторы падений напряжения $jI'_2 x'_2$ и $I'_2 r'_2$.

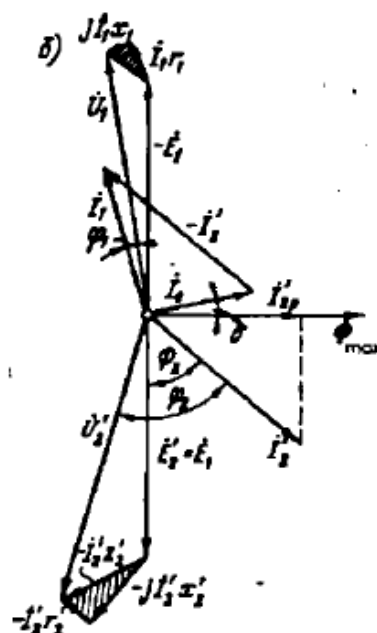
Ток первичной обмотки определяется: $I_1 = I_0 + (-I_2)$

Напряжение первичной обмотки: $U_1 = -E_1 + I_1 x_1 + I_1 r_1$

Напряжение U_1 определяет ток I_1 на угол ϕ_1 .



При активно-индуктивной нагрузке



При активно-емкостной нагрузке

Рисунок 75

В случае активно-емкостной нагрузки ток I_2 определяет по фазе ЭДС E_2 на угол

$$\phi_2 = \arctg \frac{x'_2 - x'_n}{x'_2 + r'_n}$$

При значительной емкости составляющей нагрузки падение напряжения в емкостной составляющей сопротивления нагрузки и индуктивное падение напряжения рассеяния во вторичной обмотке частично компенсируют друг друга, в результате напряжение U_2 может оказаться больше E_2 .

Кроме того, реактивная составляющая тока $I'_{2p} = I'_2 \cdot \sin \psi_2$ совпадает по фазе с реактивной составляющей тока Х.Х. I_{0p} , т.е. оказывает на магнитопровод трансформатора подмагничивающее действие. Это ведет к уменьшению первичного тока I_1 по сравнению с его значением при активно-индуктивной нагрузке, когда составляющая I_{2p} оказывает размагничивающее действие.

7. Трансформирование трехфазного тока

Трансформирование трехфазного тока можно осуществить тремя однофазными трансформаторами, соединенные в трансформаторную группу.

Однако относительная громоздкость, большой вес и повышенная стоимость – недостаток трансформаторной группы, поэтому она применяется только в установках большой мощности с целью уменьшения веса и габаритов единицы оборудования, что важно при монтаже и транспортировке трансформаторов.

Группа трех трансформаторов применяется при мощностях установок свыше 60 МВА.

В установках мощностью до 60 МВА применяют трехфазные трансформаторы, у которых обмотки расположены на трех стержнях объединённых в общий магнитопровод двумя ярусами.

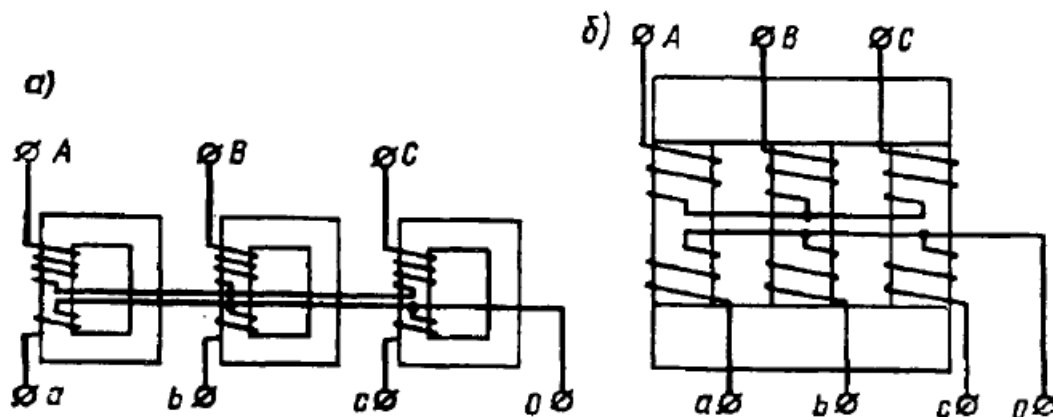


Рисунок 76

При симметричном питающем напряжении и равномерной трехфазной нагрузке все физические процессы, происходящие в трехфазном трансформаторе в каждой фазе почти ничем не отличаются от физических процессов протекающие в однофазном трансформаторе, поэтому уравнения напряжений,

МДС и токов справедливы для каждой фазы трехфазного трансформатора и все расчеты производятся для одной фазы.

Обмотки трехфазного трансформатора могут быть соединены по схемам: Звезда, звезда с нулевым выводом, треугольник (у спецтрансформаторов может быть применена схема соединений «зигзаг с нулевым выводом», но у силовых трансформаторов эта схема соединения не применяется).

Схемы соединения обмоток трансформатора обозначаются дробью в числителе которой указана схема соединения обмоток ВН, а в знаменателе – обмоток НН.

Возможные схемы соединения: Y/Y; Y/ Δ ; Δ / Δ

Схема соединения обмоток	Y/Y	Δ /Y	Δ / Δ	Y/ Δ
Отношение линейных напряжений	w_1/w_2	$w_1/(\sqrt{3}w_2)$	w_1/w_2	$\sqrt{3} w_1/w_2$

Угол сдвига фаз может изменяться в пределах от 0 до 360°.

Величина угла сдвига фаз будет зависеть от:

- 1) Способа намотки обмоток (в одном направлении или в разно)
- 2) От маркировки выводов, а в трехфазном трансформаторе от способа соединения обмотки.

При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Обычно это делается методом фазометра или методом вольтметра.

Метод фазометра основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (ЭДС) обмоток ВН и НН с помощью фазометра.

Параллельную обмотку U-U подключают к обмотке ВН, а последовательную обмотку I-I к стороне НН.

Для ограничения тока в последовательной обмотке ее подключают через добавочное сопротивление.

Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением.

Метод вольтметра непосредственного изменения угла фазового сдвига между линейными напряжениями (ЭДС) этот метод не дает. Это косвенный метод и основан на измерении вольтметром напряжений (ЭДС) между одноименными выводами обмоток ВН и НН.

Если проверяют группу Y/Y-0, то, соединив проводом выводы А и а, измеряют напряжение $U_{в-в}$ и $U_{с-с}$. Если предназначаемая группа соединения Y/Y-0 соответствует фактической, то напряжения (В): $U_{B-B} = U_{C-C} = U_{ав}(\kappa_{л} - 1)$,

$$\text{Где } K_{л} = \frac{U_{AB}}{U_{ав}}$$

Если проверяют группы соединений 6,11 или 5, то пользуются формулами:

$$Y/Y-6 \quad U_{в-в}=U_{с-с}=U_{xy}(\kappa_{л}-1)$$

$$Y/\Delta-11 \quad U_{в-в} = U_{с-с} = U_{ав} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_{л} + K_{л}^2}$$

$$Y/\Delta-5 \quad U_{в-в} = U_{с-с} = U_{ав} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_{л} + K_{л}^2}, \quad \text{где } U_{ав} \text{ и } U_{xy} - \text{минимальные напряжения на выводах обмоток НН, В.}$$

8. Режим холостого хода трансформатора

Режимом холостого хода (Х.Х.) называется такой режим, при котором вторичная обмотка трансформатора разомкнута: $z_{н}=\infty$, $I_2=0$

Уравнения токов и напряжений в этом случае имеют вид: $U_{10} = -E_1 + jI_0x_1 + I_0r_1$

$$U_2' = E_2'$$

$$I_1 = I_0$$

Схема замещения:

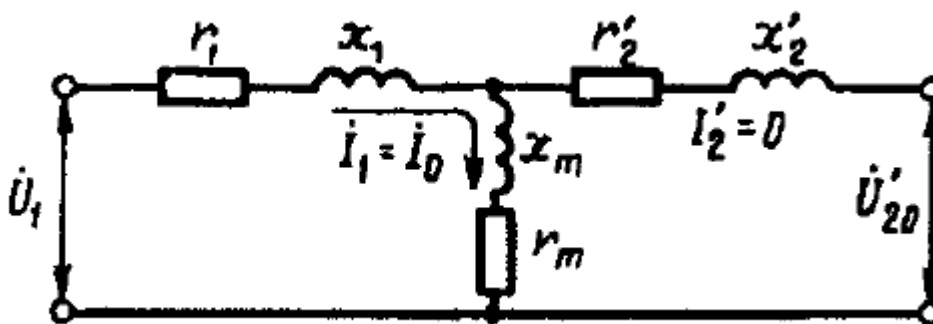


Рисунок 77

Т.к. полезная мощность при работе трансформатора вхолостую равна нулю, то мощность на входе трансформатора в режиме х.х. P_0 расходуется на магнитные потери в магнитопроводе P_m (потери на перемагничивание магнитопровода и вихревые токи) и электрические потери $I_0^2 r_1$ (потери на нагрев обмотки при прохождении по ней тока) одной лишь первичной обмотки. Однако, ввиду небольшого значения тока I_0 , который обычно не превышает 8...10% от $I_{1н}$, электрическими потерями можно пренебречь и считать, что вся мощность Х.Х. представляет собой мощность магнитных потерь в стали магнитопровода. Поэтому магнитные потери в трансформаторе принято называть потерями холостого хода.

9. Опыт короткого замыкания трансформатора

Короткое замыкание трансформатора – это такой режим, когда вторичная обмотка замкнута накоротко: $z_n=0$, $U_2=0$.

В условиях нормальной работы трансформатора, когда к первичной обмотке подведено номинально напряжение $U_{1н}$, короткое замыкание является аварийным режимом, т.к. при этом по обмоткам будут протекать токи во много раз превышающие номинальные.

При опыте К.З. вторичную обмотку замыкают накоротко, а к первичной обмотке подводят пониженное напряжение, которое с помощью регулятора напряжения изменяется от нуля до такого значения, при котором токи в обмотках трансформатора примут номинальные значения: $I_{1к}=I_{1н}$; $I_{2к}=I_{2н}$.

Опыт проводится по следующим схемам:

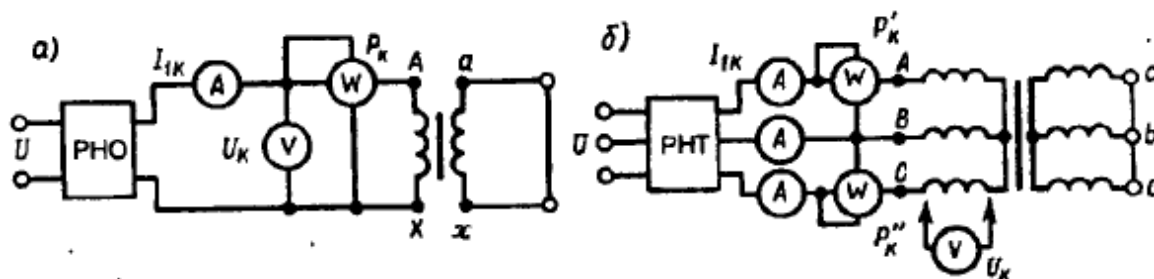


Рисунок 78

А) для однофазного трансформатора

Б) для трехфазного трансформатора

При проведении опыта снижают показания приборов и строят характеристики К.З. которые выражают зависимости $I_{1к}$; P_K ; $\cos \phi_K = f(U_K)$

U_K (напряжение К.З.) – это такое напряжение, при котором в короткозамкнутом трансформаторе токи в первичной и вторичной обмотках примут номинальные значения.

При исследовании трехфазного трансформатора берется среднее значение фазных напряжений и токов:

$$U_K = \frac{U_{AK} + U_{BK} + U_{CK}}{3};$$

$$I_K = \frac{I_{AK} + I_{BK} + I_{CK}}{3};$$

$$\cos \phi_K = \frac{P'_K + P''_K}{3 \cdot U_K \cdot I_K} = \frac{P_K}{3 \cdot U_K \cdot I_K}.$$

Обычно U_K выражается в % и определяется:

$$U_K = \frac{U_K}{U_{1H}} \cdot 100 [\%]$$

Для трансформаторов напряжение U_K составляет 5-10% от U_{1H}

Т.к. U_K составляет небольшую величину, такую же величину и основной магнитный поток Φ_{max} при опыте К.З, т.к. Φ_{max} всегда изменяется пропорционально приложенному напряжению; поскольку магнитный поток в сердечнике трансформатора небольшой, то и намагничивающая сила и I_0 будут тоже небольшими, поэтому током Х.Х. можно пренебречь магнитными потерями.

Следовательно, можно считать, что мощность P_K , потребляемое трансформатором при опыте К.З., идет полностью на покрытие электрических потерь в Обмотках трансформатора: $P_K = I_{1K}^2 \cdot r_1 + I_{1K}^2 \cdot r_2' = I_{1K}^2 \cdot r_K$

10. Внешняя характеристика трансформатора

Вторичное напряжение U_2' при изменении нагрузки не остается постоянным. Величина изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора при переходе от режима Х.Х. до номинальной нагрузки является основной характеристикой трансформатора.

Это изменение напряжения может быть выражено как в абсолютных, так и относительных единицах:

$$\Delta U_H = \frac{U_{2o}' - U_{2H}'}{U_{2H}'} \cdot 100\% = \frac{U_{1H} - U_{2H}'}{U_{1H}} \cdot 100[\%]$$

При режиме Х.Х. ток I_1 равен $-I_2$ равен нулю, поэтому отсутствует падение напряжения на активных и реактивных сопротивлениях трансформатора и можно считать, что $U_{2o}' = U_{1H}$. Так же ΔU_H можно выразить формулой:

$$\Delta U_H = \frac{u_{ka} \cdot \cos \phi_2 + u_{kp} \cdot \sin \phi_2}{U_{2H}'} \cdot 100[\%]$$

В абсолютных единицах: $\Delta U_n = u_{ка} \cdot \cos \phi_2 + u_{кр} \cdot \sin \phi_2$

Где ϕ_2 – угол между I'_2 и U'_2

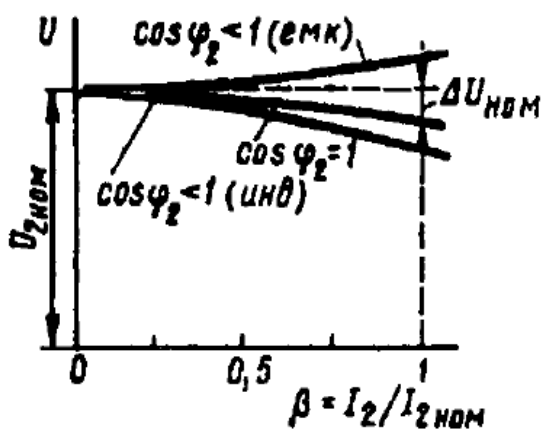
Данная формула характеризует изменение напряжения при номинальной нагрузке.

Для определения изменения напряжения при любой нагрузке вводится коэффициент нагрузки $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$

Тогда $\Delta U = (u_{ка} \cdot \cos \phi_2 + u_{кр} \cdot \sin \phi_2) \beta$

Изменение напряжения зависит не только величины нагрузки, а также и от характера нагрузки: индуктивная нагрузка или емкостная.

Внешняя характеристика трансформатора представляет собой зависимость



$U_2 = f(I_2)$

Рисунок 79

11.К.П.Д. и потери трансформатора

При работе трансформатора в нем имеют место следующие потери:

- 1) Магнитные (потери в стали или потери Х.Х.)

$$P_c = P_\Gamma + P_{\text{вх}} = P_0$$

P_Γ - потери от гистерезиса (перемагничивание)

$P_{\text{вх}}$ – потери от вихревых токов

Эти потери не зависят от нагрузки и при $U_1 = \text{const}$ так же будут постоянны.

- 2) Электрические $P_{\text{эН}}$ – электрические потери при номинальном токе

$P_{\text{эН}} = P_{\text{кН}}$, где $P_{\text{кН}}$ – потери КЗ при номинальном токе

$$P_{\text{э}} = \beta^2 \cdot P_{\text{кН}}, \text{ т.к. } P_{\text{э}} = I_2^2 \cdot r_k = \beta^2 \cdot I_{2\text{Н}}^2 \cdot r_k = \beta^2 \cdot P_{\text{кН}}$$

Если $U_1 = \text{const}$ тогда магнитные потери постоянны, потери электрические тоже постоянны, $S_{\text{Н}}$ постоянна, $\cos \varphi_2$ постоянен. В формуле только одна переменная: коэффициент нагрузки β .

Условие максимального К.П.Д. трансформатора: $P_0 = \beta^2 P_{\text{к}}$,

Из формулы видно, что К.П.Д. трансформатора зависит от нагрузки тем больше, чем больше $\cos \varphi_2$

Наибольшего значения К.П.Д. достигает при нагрузке 0,5...0,6 от номинальной.

12.Параллельная работа трансформаторов

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах.

При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети.

Параллельная работа трансформаторов необходима в случае:

- 1) Резервированные потребности в случае аварии или ремонте;
- 2) В случае переменных нагрузок (в течение суток, недели и т.д.)

Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо выполнить следующие условия:

- 1) Должны быть одинаковы группы соединения обмоток, т.к. нарушение этого условия ведет к появлению уравнивающих токов, превышающих в десятки раз значение номинального тока, что равнозначно К.З.;
- 2) Должны быть равны первичные и вторичные напряжения трансформаторов, т.е. коэффициенты трансформации нарушение условия ведет к неравномерной нагрузке трансформаторов: трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации будет перегружен, а с большим коэффициентом трансформации – недогружен;
- 3) Должны быть равны напряжения К.З. трансформаторов, т.к. при неравенстве u_k трансформатор с наименьшим u_k будет загружаться быстрее.

ГОСТ предусматривает, что отклонения u_k трансформаторов при параллельной работе не должны превышать 10%;

- 4) Отклонения номинальных мощностей трансформаторов не должно превышать 3:1;
- 5) Должна совпадать фазировка трансформаторов (для трехфазных трансформаторов).

13. Специальные трансформаторы

Трехобмоточный трансформатор

В практике широко используются в мощных энергосистемах трехобмоточные трансформаторы. Их применение дает экономию на капитальные затраты.

Трехобмоточный трансформатор имеет три электрически несвязанные обмотки, одна из которых является первичной, две другие – вторичными.

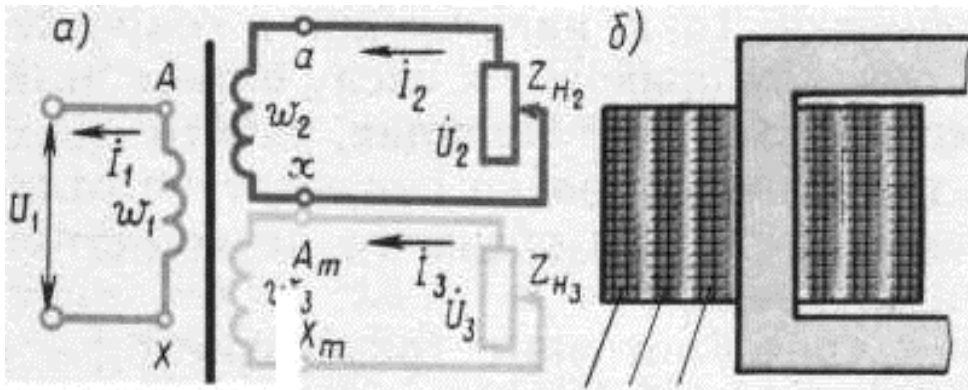


Рисунок 80 –Трёхобмоточный трансформатор

Одна из обмоток ($A_m X_m$) выполняется на промежуточные напряжения.

Принцип работы не отличается от двухобмоточного трансформатора.

Первичная обмотка является намагничивающей с помощью которой создается магнитный поток, а во вторичных обмотках наводится ЭДС E_2 и E_3 .

Если пренебречь током Х.Х.: $I_1 = I_0 - (I_2 + I_3)$

Благодаря разной по характеру нагрузке во вторичных обмотках ток I_1 равен не алгебраической, а геометрической сумме токов I_2 и I_3 , кроме того, мощности вторичных обмоток достигают своих номинальных значений неодновременно, а это позволяет первичную обмотку рассчитывать на номинальную мощность меньшую, чем сумма номинальных мощностей вторичных обмоток, что является одним из достоинств, кроме того такой трансформатор заменяет собой как бы два двухобмоточных трансформатора.

К недостатку трехобмоточных трансформаторов: можно отнести то, что изменение нагрузки в одной из вторичных обмоток вызывает изменение напряжения не только в этой обмотке, но и во второй вторичной обмотке, благодаря электромагнитной связи.

Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора считается мощность обмотки ВН.

Автотрансформатор

Автотрансформатором называется трансформатор, у которого первичная и вторичная обмотки имеют не только электромагнитную связь, но и электрическую.

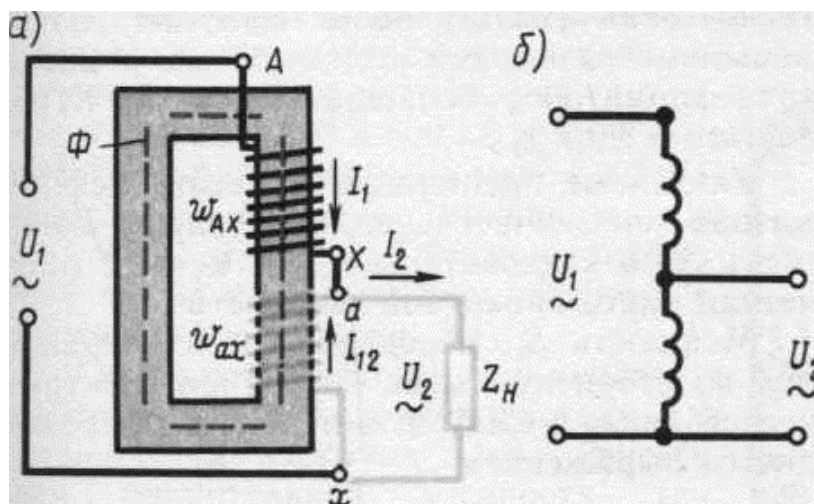


Рисунок 81 – а) электромагнитная схема автотрансформатора;

б) принципиальная схема автотрансформатора

Автотрансформатор имеет одну обмотку часть которой является общей, как для первичной цепи, так и для вторичной цепи. Принцип работы заключается в следующем: ток, проходящий по обмотке AX создает мдс F_1 , которая создает магнитный поток Φ_1 , которым в этой обмотке индуцируется эдс

самоиндукции, которая снимается с участка обмотки a_x и во вторичной цепи создается ток I_2 .

Т.к. токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ находятся в противофазе, то ток на участке a_x будет равен $\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1$

Автотрансформаторы могут быть как понижающие, так и повышающие. При коэффициентах трансформации близких к единице ток I_1 и I_2 приблизительно равны, а ток I_{12} будет небольшим и стремиться к нулю, поэтому участок a_x можно выполнять проводом небольшого сечения. Если пренебречь потерями, то мощность на входе трансформатора $S_1 = U_1 \cdot I_1$ приблизительно равна мощности на выходе $S_2 = U_2 \cdot I_2$. Эта мощность называется проходной.

В обычном разделительном трансформаторе мощность с первичной обмотки на вторичную передается магнитным путем, поэтому вся проходная мощность является расчетной мощностью (расчетной мощностью называется та мощность, на которую рассчитан сердечник трансформатора). У автотрансформатора между первичной и вторичной цепью кроме магнитной имеется электрическая связь, поэтому во вторичную цепь мощность передается не только электромагнитным, но и электрическим путем. Таким образом расчетная мощность составляет часть проходной, поэтому сердечник автотрансформатора по сравнению с сердечником разделительного трансформатора той же мощности будет меньше, поэтому уменьшается средняя длина витка, следовательно, уменьшается расход меди. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, увеличивается КПД, уменьшается вес и габаритные размеры автотрансформатора.

Указанные преимущества будут тем значительнее, чем меньше проходная мощность.

Недостатки автотрансформаторов:

- 1) Большие токи КЗ в случае понижающего трансформатора. Напряжение U_1 при этом будет подведено к небольшому количеству витков Аа, которые обладают малым сопротивлением.
- 2) Благодаря электрической связи стороны ВН и НН необходимо делать усиленную изоляцию всей обмотки.
- 3) Случайный разрыв обмотки на участке аХ вызывает возникновение ВН у потребителя, что является крайне опасным.
- 4) В схемах понижения напряжения между проводами НН и землей возникает напряжение приблизительно такое же, как и между проводами со стороны ВН и землей, что является недопустимым по условиям безопасности эксплуатации установок.

Автотрансформаторы могут снабжаться специальным устройством, которое позволяет изменять коэффициент трансформации (например с помощью скользящего контакта), а следовательно и напряжение на выходе автотрансформатора. Такие автотрансформаторы называются регуляторами напряжения.

Автотрансформаторы малой мощности применяются в устройствах радиосвязи и автоматики.

Автотрансформаторы силовые применяются в линиях передачи и распределения электроэнергии, в электроприводе переменного тока для уменьшения пусковых токов.

Трансформаторы для дуговой сварки

Сварочный трансформатор представляет собой понижающий трансформатор с крутопадающей внешней характеристикой, который преобразует напряжение 220 или 380В в напряжение 60...90В. При таком напряжении обеспечивается

устойчивое горение дуги, т.к. сопротивление дуги ничтожно мало, то трансформатор работает в режиме близком к КЗ. Для ограничения тока во вторичную цепь последовательно с дугой включают реактивную катушку – дроссель с раздвижным сердечником. Путем изменения воздушного зазора δ изменяется индуктивность дросселя (магнитное сопротивление), а, следовательно, изменяется и ток в сварочной цепи. Большому зазору соответствует больший ток.

14.Электромашинные преобразователи

1. Электрические машины синхронной связи

В современной технике часто возникает необходимость в синхронизации вращения или поворота осей механизмов. Эта задача успешно решается с помощью системы синхронной связи.

Синхронной связью называют электрическую связь, которая обеспечивает одновременное вращение или одновременный поворот двух (или более) находящихся на расстоянии друг от друга и механически не связанных валов. Распространены два вида систем синхронной связи: система «электрического вала» (синхронного вращения) и система «передачи угла» (синхронного поворота).

Системы электрического вала применяют для синхронного (одновременного) вращения нескольких механизмов, имеющих значительные нагрузочные моменты на валу. Для привода таких механизмов применяют обычные асинхронные двигатели с фазным ротором. При этом обмотки роторов электрически соединяют и друг с другом, а обмотки статоров включают в общую сеть трех фазного тока.

Системы передачи угла (синхронного поворота) применяют для дистанционного управления или контроля положения в пространстве каких-

либо устройств. Обычно такая система выполняется на небольших асинхронных машинах (однофазных или трехфазных), называемых сельсинами.

Наибольшее применение получили однофазные сельсины. Такой сельсин имеет однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации, соединенную звездой. Одна из обмоток располагается на роторе, а другая — на статоре.

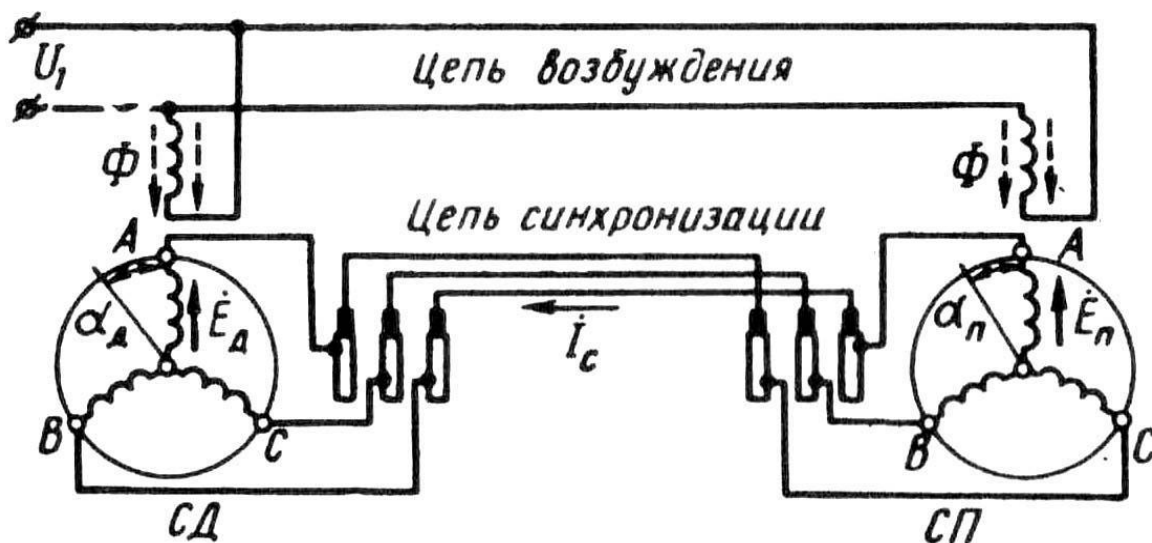


Рисунок 80. Схема синхронной передачи

Простейшая синхронная передача, называемая индикаторной, содержит два сельсина: сельсин-датчик (СД) и сельсин-приемник (СП) (рис. 17.4). При включении обмоток возбуждения в сеть на напряжение U_1 в каждом из сельсинов создается магнитный поток возбуждения Φ . В обмотке синхронизации СД этот поток наводит ЭДС E_d , а в обмотке синхронизации СП - ЭДС E_n . Эти ЭДС направлены встречно. Если роторы СД и СП занимают одинаковые положения относительно своих статоров, то $E_d = E_n$ и система находится в равновесии. Если же ротор СД повернуть на некоторый угол α_d , то ЭДС в обмотке синхронизации СД изменится, равенство ЭДС нарушится ($E_d \neq E_n$) и в цепи синхронизации появится результирующая ЭДС

$$\Delta \dot{E} = E_d + E_n \quad (17.2)$$

которая создаст ток синхронизации.

$$I_c = \Delta E / (Z_d + Z_n + Z_l) \quad (17.3)$$

где Z_d , Z_n и Z_l — сопротивления обмоток синхронизации СД и СП и сопротивление линейных проводов, Ом.

Ток синхронизации датчика взаимодействует с потоком возбуждения и создает на роторе СД электромагнитный момент, направленный встречно повороту ротора датчика, т. е. момент, противодействующий механизму, поворачивающему ротор СД на заданный угол α_d .

Ток синхронизации СП также взаимодействует с магнитным потоком возбуждения и создает электромагнитный момент, направленный в сторону поворота ротора СД. Под действием этого момента, называемого синхронизирующим, ротор приемника совершает поворот на угол $\alpha_n \approx \alpha_d$. После этого ротор СП займет такое же положение относительно статора, что и ротор СД, и в системе восстановится равновесие, так как ЭДС E_n и E_d станут одинаковыми. Если ротор СД вновь повернуть на некоторый угол, то этот же угол поворота будет воспроизведен приемником. При вращении ротора датчика ротор приемника также будет вращаться с такой же частотой. Однако угол поворота, установленный СД, воспроизводится ротором СП с некоторой ошибкой — рассогласованием. Для поворота ротора приемника необходимо, чтобы синхронизирующий момент, действующий на этот ротор, преодолел противодействующий момент, обусловленный силами трения в подшипниках и на контактных кольцах, а иногда еще и полезной нагрузкой на валу приемника. Ошибка в воспроизведении угла поворота оценивается углом рассогласования

$$\Theta = \alpha_d - \alpha_n \quad (17.4)$$

Ротор СП синхронно следует за ротором СД, но угол рассогласования между роторами сельсинов всегда имеется и тем больше, чем больше

противодействующий момент на валу СП. Угол рассогласования обычно не превышает $2,5^\circ$, а у сельсинов высокой точности он не более $0,75^\circ$.

Значение синхронизирующего момента на роторе приемника

$$M_c = M_{c \max} \sin \Theta \quad (17.5)$$

где $M_{c \max}$ — максимальное значение синхронизирующего момента, соответствующее углу рассогласования 90° .

По конструкции сельсины разделяют на контактные, у которых обмотка на роторе соединена с внешней цепью через контактные кольца и щетки, и бесконтактные, не имеющие на роторе обмоток.

Контактные сельсины в принципе не отличаются от асинхронных двигателей с фазным ротором. На рис. 17.5 показано устройство контактного сельсина. Статор 7 и ротор 2 этого сельсина неявнополюсные, и поэтому обе обмотки сельсина распределенные. Наличие на роторе двух контактных колец 3 указывает на расположение на роторе обмотки возбуждения.

В некоторых конструкциях статор или ротор делают с явно выраженными полюсами, что способствует повышению синхронизирующего момента. Наличие контактных колец — основной недостаток контактных сельсинов, так как это ведет к неустойчивости параметров сельсина и снижению его надежности.

Бесконтактные сельсины получили широкое применение в системах синхронного поворота благодаря своей высокой надежности. Эти сельсины не имеют скользящих контактов, так как их обе обмотки расположены на статоре (рис. 17.6). Ротор бесконтактного сельсина представляет собой цилиндр из ферромагнитного материала, разделенный немагнитной прослойкой на две магнитноизолированные части, образующие полюсы. Алюминий, который заливают в ротор, является магнитной изоляцией и одновременно материалом, скрепляющим части ротора. С торцовых сторон сельсина расположены

тороидальные сердечники 1, выполненные из тонколистовой электротехнической стали.

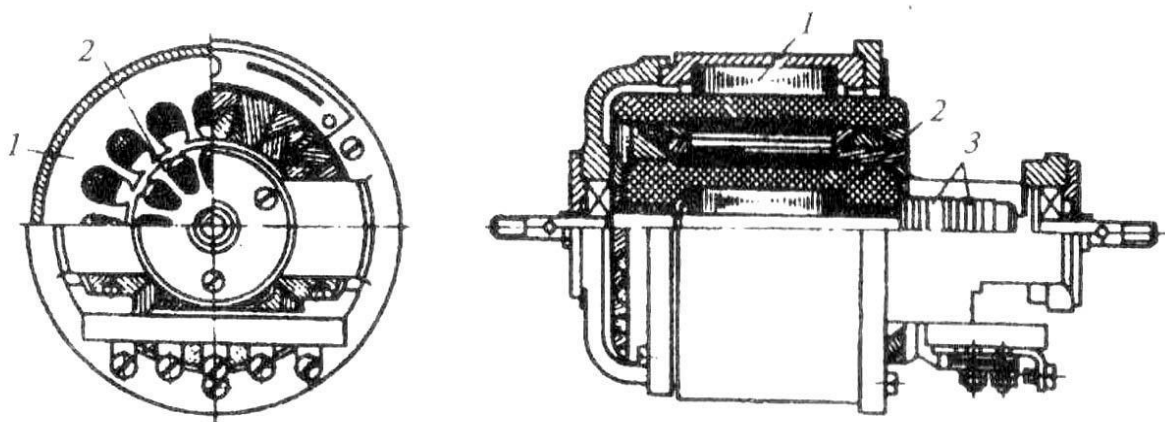


Рисунок 81. Устройство контактного сельсина

Внутренняя поверхность этих сердечников расположена над ротором, а к их внешней поверхности примыкают стержни внешнего магнитопровода 4. Однофазную обмотку возбуждения сельсина выполняют в виде двух дисковых катушек 2, расположенных с противоположных сторон статора по оси сельсина между обмоткой синхронизации 3 и тороидальными сердечниками.

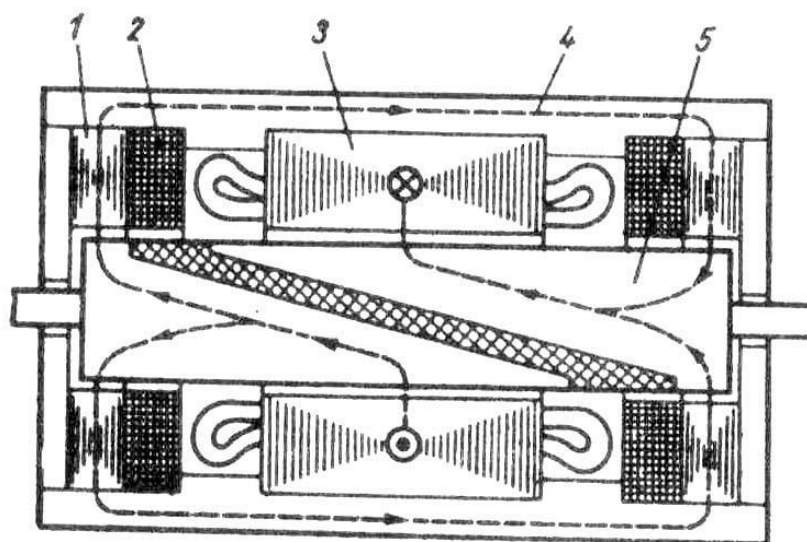


Рисунок 82. Конструктивная схема бесконтактного сельсина

В процессе работы сельсина пульсирующий магнитный поток возбуждения замыкается в магнитной системе сельсина, сцепляясь с трехфазной обмоткой синхронизации на статоре. Путь замыкания потока показан на рисунке пунктирной линией. Как видно из этого рисунка, магнитный поток, замыкаясь в магнитопроводе, проходит через воздушный зазор четыре раза. По этой причине для создания требуемого магнитного потока в бесконтактном сельсине необходима значительная МДС. Это является причиной повышенных габаритов бесконтактного сельсина по сравнению с контактным.