

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**В. Н. ГАЛУШКО, В. А. ПАЦКЕВИЧ**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Кафедра электротехники

В. Н. ГАЛУШКО, В. А. ПАЦКЕВИЧ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Содержит теоретическую часть и учебно-методические материалы, необходимые для самостоятельной проработки курса студентами. Отмеченные материалы обеспечивают самоконтроль усвоения информации и исправление возможных ошибок.

Предназначено для студентов электрических и электромеханических специальностей дневной и безотрывной форм обучения.

## **СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АД – асинхронный двигатель  
ВИД – вентильно-индукторный двигатель  
ГПТ – генератор постоянного тока  
ДПТ – двигатель постоянного тока  
ДПР – датчик положения ротора  
ИМ – индукторная машина  
КЗ – короткое замыкание  
КПД – коэффициент полезного действия  
МДС – магнитодвижущая сила  
МПТ – машина постоянного тока  
ОВ – обмотка возбуждения  
СГ – синхронный генератор  
СД – синхронный двигатель  
СМ – синхронная машина  
ХХ – холостой ход  
ЭДС – электродвижущая сила

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие содержит основы теории, описание конструкции и анализ эксплуатационных свойств трансформаторов и электрических машин, а также необходимое количество примеров решения задач, что должно способствовать лучшему пониманию учебного материала.

Пособие состоит из пяти основных разделов: трансформаторы, асинхронные машины, синхронные машины, машины постоянного тока, вентильно-индукторные двигатели.

Первый раздел касается трансформаторов, которые применяются в энергосистемах при передаче электроэнергии от электростанции к потребителям, в различных электроустановках (нагревательных, сварочных, выпрямительных), в системах автоматики и телемеханики и т. п. Материалы второго раздела касаются асинхронных двигателей – основных потребителей электрической энергии на промышленных предприятиях. В третьем разделе рассматриваются синхронные машины, широко применяемые в качестве генераторов на электростанциях. Четвертый раздел касается машин постоянного тока, которые используют в генераторном и двигательном режимах. Наибольшее применение двигатели постоянного тока получили в качестве тяговых двигателей транспортных средств, привода устройств автоматики, обрабатывающих станков и пр. В пятом разделе один из внедряемых в настоящее время интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии – вентильно-индукторный двигатель.

При изложении материала учебного пособия основной акцент сделан на раскрытие физической сущности явлений и процессов определяющих работу трансформаторов и электрических машин.

Авторы благодарны к.т.н. доценту В.М. Збодыге и С.В. Константиновой за проделанную работу по анализу и рецензированию материала пособия.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ

Достижения науки и техники, обусловленные ускорением научно-технического прогресса, способствуют совершенствованию всех отраслей промышленности и транспорта. В первую очередь, это относится к электрическим машинам, составляющим основу электроэнергетики, как в процессе производства электроэнергии, так и в процессе ее потребления.

Развитие электрических машин ведется по нескольким направлениям:

- совершенствование технологии изготовления электрических машин, с целью увеличения их производства и снижения стоимости;
- применение в электрических машинах более качественных магнитных и электроизоляционных материалов, с целью повышения технико-экономических показателей электрических машин;
- создание новых видов электрических машин нетрадиционной конструкции, с использованием новейших достижений науки.

*Электрическая машина* – это устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую и наоборот.

Работа всех электрических машин базируется на явлении электромагнитной индукции и на силовом действии электрического тока.

В процессе работы электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую. Природа этого процесса объясняется *законом электромагнитной индукции*: если внешней силой  $F$  воздействовать на помещенный в магнитное поле проводник длиной  $l$  и перемещать его (рисунок 1), например, слева направо перпендикулярно вектору индукции  $B$  магнитного поля со скоростью  $v$ , то в проводнике будет наводиться электродвижущая сила

$$E = Blv.$$

Для определения направления ЭДС следует воспользоваться правилом «правой руки» (рисунок 2). Применив это правило определим направление ЭДС в проводнике (от нас). Если концы проводника замкнуты на внешнее сопротивление  $R$  (потребитель) то под действием ЭДС в проводнике возникнет ток

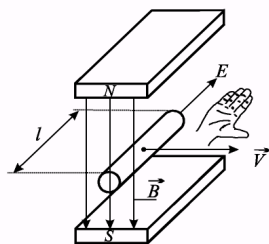


Рисунок 1 – Правило правой руки для определения направления ЭДС

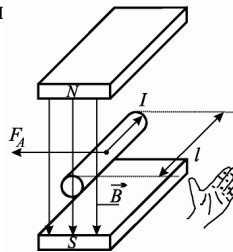


Рисунок 2 – Правило левой руки для определения направления силы

такого же направления. Таким образом движущийся проводник в магнитном поле можно рассматривать в этом случае как *элементарный генератор*.

В результате взаимодействия тока  $I$  с магнитным полем возникает действующая на проводник электромагнитная сила

$$F = BIl.$$

Направление этой силы можно определить по правилу «левой руки» (рисунок 2). В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево, т.е. противоположно движению проводника. Таким образом, в рассматриваемом элементарном генераторе сила  $F$  является тормозящей по отношению к движущей силе.

Умножив обе части равенства для электромагнитной силы на скорость движения проводника, получим

$$Fv = BIlv = EI.$$

Левая часть равенства определяет значение механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле, правая часть – значение электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре током. Знак равенства между этими частями показывает, что в генераторе механическая мощность, затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую.

Если внешнюю силу к проводнику не прикладывать, а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение  $U$  так, чтобы ток  $I$  в проводнике имел направление, указанное на рис. 2, то на проводник будет действовать только электромагнитная сила. Под действием этой силы проводник начнет двигаться в магнитном поле. При этом в проводнике индуцируется ЭДС с направлением противоположным напряжению. Таким образом, часть напряжения  $U$ , приложенного к проводнику сопротивлением  $r$ , уравновешивается наведенной в этом проводнике ЭДС  $E$ , а другая часть составляет падение напряжения в проводнике

$$U = E + Ir,$$

Умножим обе части равенства на ток  $I$

$$UI = EI + I^2r.$$

С учетом формулы для ЭДС и электромагнитной силы, получим

$$UI = Fv + I^2r.$$

Из этого равенства следует, что электрическая мощность ( $UI$ ), поступающая в проводник, частично преобразуется в механическую ( $Fv$ ), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике ( $I^2r$ ). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитном поле, можно рассматривать как *элементарный электродвигатель*.

Рассмотренные явления позволяют сделать следующие выводы:

а) для любой электрической машины обязательно наличие электропроводящей среды (проводников) и магнитного поля, имеющих возможность взаимного перемещения;

б) при работе электрической машины, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя одновременно наблюдаются создание ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле, и возникновение силы, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по нему электрического тока;

в) взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом направлении, т. е. одна и та же электрическая машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора, это свойство электрических машин называют *обратимостью*.

#### *Классификация электрических машин*

Выделяют следующие виды электрических машин:

- трансформаторы;
- машины постоянного тока;
- машины переменного тока (асинхронные и синхронные).

Кроме того, электрические машины классифицируются по роду тока, назначению, мощности, напряжению.

По роду тока электрические машины принято разделять на машины постоянного и переменного тока.

По назначению их подразделяют на генераторы, двигатели и преобразователи (преобразуют переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяют напряжение, частоту переменного тока, число фаз, преобразуют активную мощность в реактивную и т. д.).

Кроме того, электрические машины бывают общего и специального назначения. Машины общего назначения – это такие машины, которые выполнены без учета специальных требований потребителей и являются общими для большинства случаев применения. Специального назначения с учетом специальных требований потребителей.

Классификация по мощности:

- микромашины (менее 0,5 кВт);
- малой мощности (от 0,5 до 10 кВт);
- средней мощности (более 10 кВт);
- машины большой мощности (более нескольких сотен МВт);

Добавим, что четких границ по мощности нет.

По напряжению:

- низковольтные (менее 100 В);
- среднего напряжения (от 100 до 1000 В);
- высоковольтные (более 1000 В).

У каждой электрической машины имеется табличка, выбитая на металлической пластинке и прикрепленная к корпусу. На табличке указаны



паспортные данные, в том числе характеризующие ее работу в номинальном режиме. Номинальный режим – это такой режим, для работы в котором машина предназначена заводом-изготовителем. Его рассчитывают так, чтобы мощность машины в нем была максимальной, но температура обмоток не превышала допустимую. Основным параметром, влияющим на степень загрузки машины, является температура ее обмоток, если точнее – изоляции, потому что температура, при которой изоляция выходит из строя (95-180 °С), зависит от класса нагревостойкости изоляции.

Паспортная табличка обычно информирует о режиме работы электрической машины ( $S1 \div S8$ ).

$S1$  – *продолжительный режим*. Машина работает длительное время с постоянной нагрузкой, и нагрев обмоток достигает установившейся температуры (количество тепла, получаемого машиной в виде потерь энергии, равно количеству тепла, теряемого машиной в результате охлаждения).

$S2$  – *кратковременный режим*. Машина включается на короткое время, нагрев не успевает достигнуть установившейся температуры и отключается на длительное время, достаточное, чтобы машина охладилась до температуры окружающей среды.

$S3, S4, S5$  – *повторно-кратковременные режимы*. Нагрев не успевает достигнуть установившейся температуры, но и не охлаждается до температуры окружающей среды.  $S4$  – с частыми пусками,  $S5$  – с электрическим торможением.

$S6, S7, S8$  – *переключающиеся режимы*. То же самое, что и повторно-кратковременные режимы, только двигатель не отключается, а работает вхолостую.

*Требования, предъявляемые к электрическим машинам*

**Общие технические требования.** Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели (КПД, а для машин переменного тока и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость: они должны быть простыми по конструкции, несложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации. Общие технические требования для машин общепромышленного применения сформулированы в ГОСТ 52776 – 2007 (МЭК 60034-1 – 2004).

Термин *надежность* можно определить, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (ГОСТ 27.002 – 2015).

Каждая электрическая машина рассчитана на работу при вполне определенных условиях эксплуатации: режиме нагрузки, допускаемых перегрузках, напряжении, частоте переменного тока, частоте вращения,

температуре охлаждающей среды, влажности и др. При этом машина должна развивать номинальную мощность и работать без аварий и повреждений в течение установленного времени (обычно в течение времени между периодическими ремонтами).

*Надежность* работы машины обеспечивается путем закладки достаточных запасов при проектировании, применения высококачественной технологии изготовления и правильной эксплуатации (работы в режимах, для которых она спроектирована, и своевременного выполнения профилактических ремонтов).

При проектировании должны быть обеспечены:

– *механическая прочность* всех элементов машины (вала, станины, ротора, статора, деталей крепления обмоток и пр.). В частности, машины должны без повреждений и деформаций выдерживать кратковременные перегрузки по току и превышения номинальной частоты вращения;

– *электрическая прочность* изоляции обмоток, которая не должна терять своих качеств при длительной эксплуатации машины. Изоляция обмоток относительно корпуса, изоляция между обмотками и изоляция между витками обмоток должна выдерживать повышенное по сравнению с номинальным испытательное напряжение. Сопротивление изоляции обмоток должно соответствовать значениям, указанным в ГОСТ 11828-86;

– достаточное *охлаждение* элементов машины, в которых при работе выделяется теплота (магнитопровода, скользящих контактов, обмоток, подшипников). Наиболее чувствительными к нагреванию являются электроизоляционные материалы обмоток, от качества которых зависит допустимый уровень нагрева электрической машины. Максимальные температуры частей машины не должны превышать значений, указанных в ГОСТах;

– выбор электромагнитных нагрузок (плотности тока в обмотках и индукции в элементах магнитопровода), при которых выделяемая в обмотках и магнитопроводе теплота успевает отводиться из машины системой ее охлаждения и не вызывает недопустимого нагрева машины;

– применение в машинах постоянного тока ряда конструктивных мер (введение добавочных полюсов и компенсационной обмотки, выбор соответствующих марок щеток), которые предотвращают недопустимое искрение на коллекторе.

**Защита от внешних воздействий.** Конструктивное выполнение электрической машины во многом определяют требования, предъявляемые к защите ее от внешних воздействий. В зависимости от этого устанавливается буквенно-цифровое обозначение исполнений электрических машин, состоящее из двух букв IP (International Protection) и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины и от попадания внутрь ее твердых

посторонних предметов. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты от проникновения в нее влаги (рисунок 3).

Различают следующие виды исполнения электрических машин: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное, взрывозащищенное.

*Климатические условия и условия размещения.* При эксплуатации электрических машин в нормальных климатических условиях температура окружающей среды составляет  $(25 \pm 10)^\circ \text{C}$ , относительная влажность воздуха

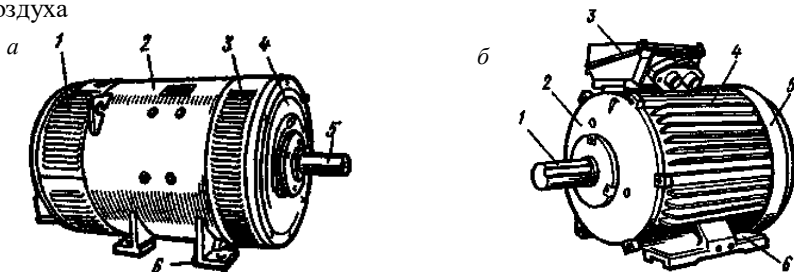


Рисунок 3 – Двигатель защищенного исполнения со степенью защиты IP22 (а):

1, 3 – вентиляционные окна; 2 – станина; 4 – подшипниковый щит; 5 – вал; 6 – лапы.

Асинхронный двигатель закрытого исполнения со степенью защиты IP44 (б):

1 – вал; 2, 5 – подшипниковые щиты; 3 – клеммная коробка;

4 – охлаждающие ребра станины; 6 – лапы

35–80% и атмосферное давление 84–106 кПа. Электрические двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках и озерах в районах с умеренным климатом, имеют обозначение – У; с холодным – ХЛ; с влажным тропическим – ТВ; с сухим тропическим – ТС; с сухим и с влажным тропическим – Т.

В зависимости от условий размещения предусматриваются следующие обозначения: при эксплуатации на открытом воздухе – 1; в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от наружного воздуха, – 2; в закрытых помещениях, в которых колебания температуры и влажности, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе, – 3; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых помещениях) – 4; в помещениях с повышенной влажностью – 5. Например, двигатели, которые могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях – УЗ или У4.

**Способ охлаждения.** Для предотвращения чрезмерного нагрева частей машины применяют различные способы охлаждения электрических машин. Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности.

Для большинства электрических машин охлаждающей средой служит воздух. Такие машины называют *вентилируемыми*. Вентилируемые машины, у которых охлаждающий воздух или иной газ проходит через внутреннее пространство машины, называют *продуваемыми*; если же они обдувают только наружную поверхность машины – *обдуваемыми*.

Обозначение способа охлаждения состоит из букв IC (International Cooling) и двух цифр: первая (от 0 до 6) условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая (от 0 до 7) – способ его перемещения.

Вращающиеся электрические машины малой и средней мощности обычно выполняют с самовентиляцией. В этом случае охлаждение нагретых частей осуществляется вентилятором, который насаживают на вал ротора. Машины закрытого исполнения обычно выполняют обдуваемыми.

Различные *марки электротехнической стали* обозначаются четырехзначными числами (например, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416 и т. п.). Первая цифра означает принадлежность стали к тому или иному классу (1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой). Вторая цифра означает содержание кремния (от 0,4 до 4,8 %); третья цифра – группа по основной нормируемой характеристике (удельным магнитным потерям, при определенной индукции и частоте перемагничивания); четвертая цифра – порядковый номер типа стали.

Для изготовления магнитопроводов современных асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 180 мм используют сталь марки 2013, при больших высотах вращения – марок 2212, 2312 и 2421.

В машинах постоянного тока для сердечников якорей машин с высотой оси вращения до 200 мм применяют сталь марок 2013. Для снятия наклепа после штамповки сталь отжигают, а затем изолируют. При больших высотах вращения используют стали марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При изготовлении магнитопроводов трансформаторов используют холоднокатаные анизотропные стали марок 3412 и 3413 с изоляционным покрытием; после штамповки сталь отжигают.

Корпуса машин постоянного тока изготавливают путем сварки из листовой низколегированной магнитномягкой стали или стального литья, так как они являются частью магнитопровода. Стальное литье применяют также для изготовления станин и роторов синхронных машин. Валы выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т. п.

*Проводниковые материалы.* В электромашиностроении применяют медь и алюминий. Медь значительно дороже алюминия, однако ее используют для изготовления обмоток чаще, чем алюминий, так как она обладает более высокой электропроводностью (примерно в 1,6 раза), что позволяет сократить габариты машин.

В качестве токопроводящего материала контактных колец и коллектора кроме меди применяют бронзу и даже сталь (для контактных колец), так как для этих деталей важна не только электропроводность, но и высокая механическая прочность.

*Изоляционные материалы.* Основные требования, предъявляемые к изоляции, – нагревостойкость, высокая электрическая прочность, влагостойкость, хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность и эластичность.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который нормально составляет 15–20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, в зависимости от нагревостойкости подразделяют на семь классов: *У, А, Е, В, F, H, С*, предельная допустимая температура которых приведена в таблице 1.

**Таблица 1– Предельная допустимая температура классов нагревостойкости**

Класс изоляции	<i>У</i>	<i>А</i>	<i>Е</i>	<i>В</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>С</i>
Предельная допустимая температура при длительной работе, °С	80	105	120	130	155	180	Более 180

Стоимость изоляции составляет 30–70% от стоимости всех материалов, идущих на изготовление электрической машины.

В настоящее время электрические машины применяют в основном изоляцию классов *В* и *F*, а в специальных машинах, работающих в тяжелых условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), – класса *H*. В трансформаторах с масляным охлаждением широко используют провода с изоляцией класса *A*; применение в них изоляционных материалов с большой нагревостойкостью нецелесообразно, так как допустимая температура обмоток определяется температурой трансформаторного масла (105 °С), относящегося к классу *A*. В трансформаторах с воздушным охлаждением широко используют обмоточные провода более высоких классов нагревостойкости *В, F*.

В электрических машинах различают межвитковую и корпусную изоляцию. *Межвитковая изоляция* (между витками обмотки) обеспечивается изоляцией самого проводника, наносимой на него в процессе изготовления на кабельных заводах или при изготовлении

электрической машины. *Корпусная изоляция* отделяет проводники обмотки от корпуса электрической машины.

# 1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1 Назначение трансформаторов и их применение

**Трансформатор** – это статический электромагнитный аппарат, преобразующий посредством электромагнитной индукции переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте и мощности.

В трансформаторе нет вращающихся частей, поэтому он не является машиной в обычном смысле этого слова. Однако преобразование электроэнергии в нем происходит на основе тех же законов, что и в электрических машинах.

На электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6, 10, 20 кВ, передавать же ее на дальние расстояния, с целью уменьшения потерь, выгодно при значительно больших напряжениях (110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ). Поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения.

Распределение электрической энергии между промышленными предприятиями, населенными пунктами, в городах, а также внутри промышленных предприятий производится по воздушным и кабельным линиям при напряжении 35, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены понижающие трансформаторы. На самом предприятии в сети и на приемниках потребление электроэнергии производится при напряжениях 380/220 или 660/380 В, напряжение источников электроэнергии соответственно 400/230 или 690/400 В (ГОСТ 721-78), что также требует использование понижающих трансформаторов.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3–5 раз).

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

- назначению – на силовые и специальные (измерительные, согласующие, сварочные, автотрансформаторы, импульсные и т. д.);
- способу охлаждения – на сухие и масляные. В сухих трансформаторах охлаждение осуществляется при естественной или искусственной конвекции воздуха, а в масляных – при естественной или принудительной циркуляции трансформаторного масла;
- по числу фаз питающей сети – на одно-, трех- и многофазные;

– количеству обмоток на одну фазу;  
– соотношению напряжений первичной и вторичной обмоток (коэффициент трансформации, представленный далее в формуле (1.3)) – на повышающие  $U_2 > U_1$  и на понижающие  $U_2 < U_1$ , где  $U_1$  – напряжение питания первичной обмотки,  $U_2$  – напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора.

Трансформатор характеризуется номинальными данными, которые указаны на его заводском щитке.

1 Номинальная мощность трансформатора  $S_n$  – полная мощность на зажимах вторичной обмотки, указываемая на щитке и выраженная в вольтамперах (ВА) или киловольт-амперах (кВА).

2 Номинальное первичное напряжение  $U_{1н}$  – напряжение сети, на которое рассчитан трансформатор.

3 Номинальное вторичное напряжение  $U_{2н}$  – напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и номинальном первичном напряжении.

4 Номинальные токи обмоток – первичный  $I_{1н}$  и вторичный  $I_{2н}$  – токи, соответствующие номинальным значениям напряжений и мощности.

Для трехфазных трансформаторов в качестве номинальных значений напряжений и токов указывают линейные величины.

Современный трансформатор состоит из следующих элементов: магнитопровода (сердечника), обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет активную часть трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют неактивными (вспомогательными) частями.

Магнитопровод выполняет две функции – он является магнитной цепью, по которой замыкается основной магнитный поток, а также служит для крепления обмоток, отводов, переключателей. Изготавливается он из ферромагнитного материала, который позволяет усилить магнитный поток и увеличить магнитную связь между обмотками.

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, в силовых трансформаторах магнитопровод и детали его крепления *обязательно заземляют*.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопровод собирают из листов специальной электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. Листы перед сборкой сердечника покрывают с обеих сторон лаком. Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Магнитопроводы силовых трансформаторов собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм марок 1511, 1512, 1513 или 3411, 3412, 3413. Межлистовая изоляция осуществляется путем



односторонней оклейки листов стали изоляционной бумагой толщиной 0,03 мм или двустороннего покрытия изоляционным масляным лаком.

По конструкции магнитопроводы бывают двух видов: стержневые и броневые (рисунок 1.1 [20]).

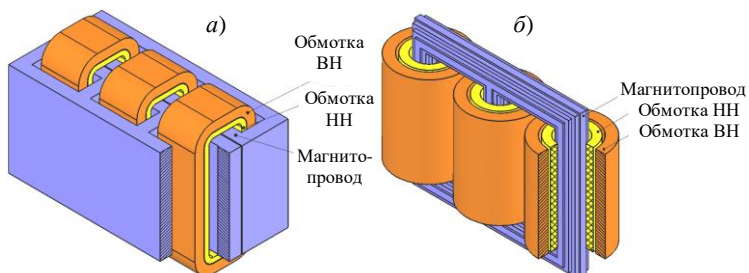


Рисунок 1.1 – Виды магнитопроводов трансформатора:  
а – броневой вид; б – стержневой вид

Индукции в стержнях трансформаторов мощностью 5 кВ·А и выше находится в пределах 1,2 – 1,45 Тл для горячекатаных сталей и 1,5 – 1,7 Тл для холоднокатаных сталей у масляных трансформаторов и соответственно 1,0 – 1,2 Тл и 1,1 – 1,5 Тл у сухих трансформаторов.

Медные или алюминиевые обмотки трансформаторов выполняют из проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой.

При правильной эксплуатации масляных трансформаторов температура изоляции в наиболее нагретом месте не превышает 105°C, трансформатор может служить 20–25 лет. Повышение температуры на 8°C приводит к сокращению срока службы трансформатора примерно в 2 раза.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рисунок 1.2 [14]). Трансформаторное масло омывает обмотки и магнитопровод и отбирает от них теплоту, а затем через стенки бака и трубы радиатора отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха.

Для компенсации объема масла при изменении температуры в контакте с воздухом применяют расширитель, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. В процессе работы трансформаторов не исключена возможность выделения газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков мощные трансформаторы снабжают выхлопной трубой которую устанавливают на крышке бака.

Модели трансформаторов ТМГ и ТМ чаще всего применяются для использования в составе комплектных трансформаторных подстанций, питающих электроэнергией городские и производственные объекты и составляющих основу распределительных сетей среднего напряжения.

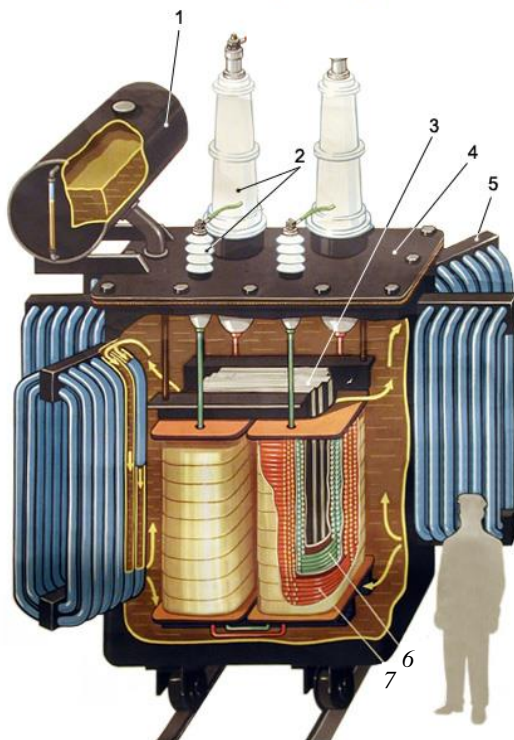


Рисунок 1.2 – Устройство силового трансформатора с масляным охлаждением:  
1 – расширительный бак; 2 – изолятор; 3 – сердечник трансформатора; 4 – крышка бака;  
5 – радиаторы; 6 – обмотка низкого напряжения; 7 – обмотка высокого напряжения

## 1.2 Принцип действия трансформатора

Работа трансформаторов основана на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим ее на примере однофазного двухобмоточного трансформатора (рисунок 1.3).

Первичная обмотка трансформатора, имеющая  $w_1$  витков, подключается к источнику синусоидального напряжения  $u_1$ . К вторичной обмотке с числом витков  $w_2$  присоединяют нагрузку с сопротивлением  $z_n$ . Начало и конец обмотки высшего напряжения (ВН) обозначают буквами  $A$  и  $X$ , обмотки низшего напряжения (НН) – буквами  $a$  и  $x$ . Первичная и вторичная обмотки однофазного трансформатора не имеют электрической связи друг с

другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем.

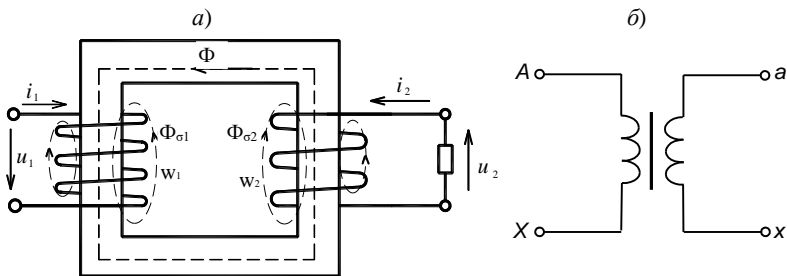


Рисунок 1.3 – Схема однофазного трансформатора (а) и его условное графическое обозначение (б)

**Принцип действия.** При подключении к сети переменного тока первичной обмотки в ней возникает ток, который создает переменный магнитный поток. Большая часть этого потока замыкается по ферромагнитному сердечнику и пронизывает как первичную, так и вторичную обмотки. Эта часть потока называется основным потоком  $\Phi$ . Меньшая часть потока первичной обмотки замыкается вокруг нее по воздуху и не проникает в сердечник. Этот поток называется потоком рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{\sigma 1}$ .

Основной поток  $\Phi$ , пронизывая первичную и вторичную обмотки, индуцирует в них переменные ЭДС –  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числу витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ . Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,  $e_1 = - w_1 d\Phi/dt$ ;  $e_2 = - w_2 d\Phi/dt$ .

При синусоидальном изменении этого потока для действующих значений этих ЭДС можно записать следующие выражения:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 B_m Q_{ст}; \quad (1.1)$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 B_m Q_{ст}; \quad (1.2)$$

где  $f$  – частота тока в сети;

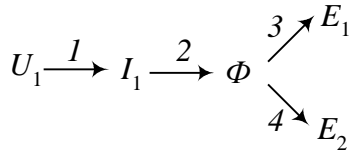
$w_1$  и  $w_2$  – число витков в первичной и вторичной обмотках;

$\Phi_m$  – амплитудное значение основного магнитного потока в сердечнике;

$B_m$  – амплитудное значение индукции в сердечнике магнитопровода;

$Q_{ст}$  – площадь поперечного сечения сердечника.

Обмотка, подключенная к сети, называется первичной; к другой обмотке (вторичной) подключена нагрузка. Принцип действия трансформатора можно описать следующей схемой:



На первичную обмотку подается переменное напряжение  $U_1$  (1), под действием которого возникает переменный ток  $I_1$ , создающий переменный магнитный поток  $\Phi$  (2). Замыкаясь по магнитопроводу (путь с малым магнитным сопротивлением), магнитный поток пронизывает витки обмоток и по закону электромагнитной индукции наводит противоЭДС в первичной обмотке (3) и ЭДС вторичной обмотки (4).

Отношение ЭДС в первичной и вторичной обмотках называется коэффициентом трансформации трансформатора

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2. \quad (1.3)$$

Поток рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{\sigma 1}$  создает в ней ЭДС рассеяния, которая отстает от потока рассеяния на угол  $90^\circ$ . Так как поток рассеяния замыкается по воздуху, то его значение прямо пропорционально току, создающему этот поток. Значит для ЭДС рассеяния первичной обмотки можно записать следующее выражение в комплексной форме записи

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -jx_1 I_1,$$

где  $x_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки;

$I_1$  – ток первичной обмотки.

Если к вторичной обмотке подключить нагрузку, то под воздействием ЭДС  $E_2$  в ней протекает ток  $I_2$ . Этот ток создает магнитный поток вторичной обмотки, который также состоит из двух частей. Большая его часть замыкается по сердечнику и направлена навстречу потоку, создаваемому в сердечнике первичной обмоткой, пытаясь его уменьшить. Меньшая часть потока вторичной обмотки, поток рассеяния этой обмотки  $\Phi_{\sigma 2}$ , замыкается вокруг нее по воздуху. Этот поток создает ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 2}$  вторичной обмотки

$$\underline{E}_{\sigma 2} = -jx_2 I_2,$$

где  $x_2$  – индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

$I_2$  – ток этой обмотки.

По второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепей трансформатора можно записать следующие уравнения электрического состояния:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{\sigma 1} + I_1 r_1; \quad (1.4)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 + \underline{E}_{\sigma 2} - I_2 r_2, \quad (1.5)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – активное сопротивление первичной и вторичной обмотки.

Уравнения 1.4 и 1.5 можно переписать в следующем виде:

$$U_1 = -E_1 + I_1(r_1 + jx_1) = -E_1 + I_1 z_1; \quad (1.6)$$

$$U_2 = E_2 - I_2(r_2 + jx_2) = E_2 - I_2 z_2, \quad (1.7)$$

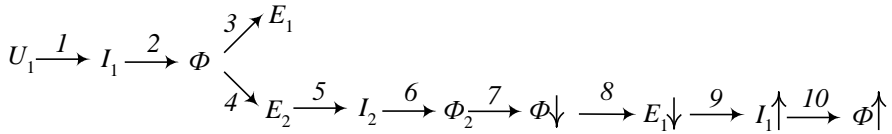
где  $z_1$  и  $z_2$  – полное сопротивление первичной и вторичной обмотки.

Если пренебречь падениями напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора ( $I_1 z_1$  и  $I_2 z_2$ ), которые обычно не превышают 3...5 % от номинальных значений напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , то можно считать, что

$$U_1 \approx E_1 \text{ и } U_2 \approx E_2 \quad (1.8)$$

Анализируя выражения (1.1) и (1.8) можно отметить, что, при постоянном значении напряжения на первичной обмотке, постоянным остается и значение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора. Следовательно, можно считать, что изменение тока нагрузки практически не вызывает изменение магнитного потока в трансформаторе.

Режим нагрузки трансформатора можно описать следующей логической схемой:



1–4 – описаны выше;

5 – так как к вторичной обмотке подключена нагрузка, ее ЭДС  $E_2$  вызовет ток нагрузки ;

6 – протекая по вторичной обмотке, ток нагрузки  $I_2$ , создает магнитный поток  $\Phi_2$ ;

7 – магнитный поток  $\Phi_2$  от вторичной обмоткой, направлен встречно основному магнитному потоку  $\Phi$  и уменьшает его;

8 – уменьшение основного магнитного потока  $\Phi$  приведет к уменьшению ЭДС первичной обмотки  $E_1$ ;

9 – согласно уравнению равновесия напряжений первичной стороны трансформатора (1.6), уменьшение ЭДС  $E_1$ , приведет к увеличению тока первичной обмотки  $I_1$ ;

10 – увеличение тока  $I_1$  приведет к возрастанию основного магнитного потока  $\Phi$ .

Таким образом любое изменение нагрузки  $I_2$  вызовет такое изменение первичного тока  $I_1$ , чтобы магнитный поток остался неизменным.

Для магнитной цепи трансформатора можно записать уравнение магнитодвижущих сил (МДС) в следующем виде

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1, \quad (1.9)$$

где  $I_0$  – намагничивающий ток, часть тока первичной обмотки, которая создает магнитный поток.

Уравнения (1.6, 1.7, 1.9) образуют систему, с помощью которой можно анализировать процессы в трансформаторе, возникающие в различных режимах его работы.

### 1.3 Приведенный трансформатор и его схема замещения

На практике чаще всего у трансформатора число витков первичной обмотки  $w_1$  не равно числу витков вторичной обмотки  $w_2$  и, как следствие, различны ЭДС, токи и сопротивления обмоток. Это затрудняет непосредственное сопоставление и количественный учет процессов.

Чтобы устранить отмеченные выше трудности, теория трансформатора разработана для трансформатора с коэффициентом трансформации  $k$  равным единице, т. е. для трансформатора, у которого  $w_1 = w_2$ , а все многообразие реальных трансформаторов приводится к виду с  $k = 1$ . Таким образом *приведенный трансформатор – это трансформатор, который оказывает на цепь такое же влияние, как реальный трансформатор, но коэффициент трансформации его равен единице*. Приведение осуществляется путем перерасчета параметров вторичной обмотки и приведения их к параметрам первичной. Трансформатор с пересчитанными параметрами вторичной обмотки называется приведенным трансформатором. На практике, приведенные параметры вторичной обмотки обозначаются буквами со штрихами. Чтобы процессы в приведенном и реальном трансформаторах были одинаковыми, процесс пересчета осуществляется по следующим формулам:

$$E'_2 = kE_2 = E_1; \quad (1.10)$$

$$U'_2 = kU_2; \quad (1.11)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{k}; \quad (1.12)$$

$$r'_2 = k^2 r_2; \quad (1.13)$$

$$x'_2 = k^2 x_2. \quad (1.14)$$

Аналогично для приведенного значения полного сопротивления нагрузки можно записать

$$z'_H = k^2 z_H. \quad (1.15)$$

Для приведенного трансформатора уравнения (1.6, 1.7 и 1.9) приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{z}_1; \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2; \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

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

Так как у приведенного трансформатора ЭДС во вторичной обмотке равна ЭДС в первичной, то в этом случае электрические цепи первичной и вторичной обмоток можно объединить, заменив магнитную связь между обмотками электрической. Трансформатор, в этом случае, заменяется электрической цепью, называемой *схемой замещения трансформатора*.

На рисунке 1.4 приведена Т-образная (полная) схема замещения трансформатора. С помощью элементов  $r_1$ ,  $r_2'$ , и  $x_1$ ,  $x_2'$  учитываются активные и реактивные сопротивления провода первичной и вторичной обмоток, а значение элементов  $r_0$  и  $x_0$ , образующих намагничивающую ветвь, зависят от параметров магнитопровода.

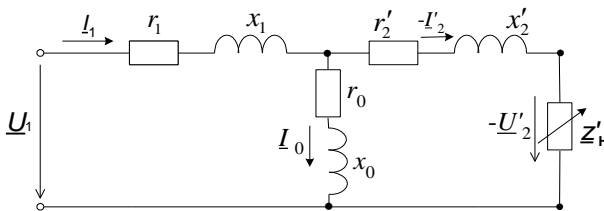


Рисунок 1.4 – Т-образная схема замещения трансформатора

Для Т-образной схемы замещения с целью приближенных расчетов, принимают

$$r_1 = r_2' \ll r_0; \quad (1.17)$$

$$x_1 = x_2' \ll x_0. \quad (1.18)$$

В некоторых случаях, из-за большого значения  $r_0$  и  $x_0$  намагничивающую ветвь схемы замещения, можно исключить. В этом случае схема замещения упрощается. Упрощенная схема замещения однофазного трансформатора приведена на рисунке 1.5. На данном рисунке  $r_k = r_1 + r_2'$  и  $x_k = x_1 + x_2'$ .

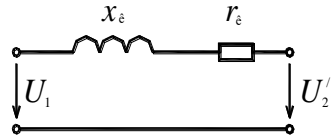


Рисунок 1.5 – Упрощенная схема замещения

Сопротивление нагрузки  $z_{н}$ , подключаемой к вторичной обмотке трансформатора, может находиться в пределах от нуля до бесконечности. В соответствии с этим трансформатор может работать в трех режимах:

- 1 Режим холостого хода, который получается при  $z_{н} = \infty$ ;
- 2 Режим короткого замыкания, возникающий при  $z_{н} = 0$ ;
- 3 Нагрузочный режим, в котором  $0 < z_{н} < \infty$ .

#### 1.4 Режим холостого хода



Холостым ходом называется такой режим, при котором к первичной обмотке трансформатора подведено напряжение сети  $U_1$ , а вторичная обмотка разомкнута ( $I_2 = 0$ ). В таком режиме трансформатор потребляет из сети очень малый ток  $I_0$ , значение которого может быть в десятки раз меньше номинального тока первичной обмотки  $I_{1н}$ . Ток холостого хода состоит из активной  $I_{0а}$  и реактивной  $I_{0р}$  составляющих.

Активная составляющая тока холостого хода (небольшая часть этого тока) идет на покрытие потерь в магнитопроводе, которые зависят от марки электротехнической стали, толщины ее листа, значения магнитной индукции и частоты перемагничивания. Реактивная составляющая (большая часть тока холостого хода) идет на создание магнитного потока в трансформаторе. Зависит она от марки стали, количества витков первичной обмотки, подводимого к этой обмотке напряжения, геометрии сердечника а также от количества и величины воздушных зазоров на пути магнитной силовой линии.

При холостом ходе, когда ток вторичной обмотки  $I_2 = 0$ , напряжение на ее зажимах  $U_{20} = E_2$ .

В данном режиме ток холостого хода  $I_0$  первичной обмотки создает МДС  $I_0 w_1$ , а та, в свою очередь, – магнитный поток, большая часть которого замыкается по стальному сердечнику и сцепляется с обеими обмотками трансформатора. Эта часть потока является основным потоком и обозначается  $\Phi$ . Небольшая часть магнитного потока замыкается частично по воздуху и сцепляется с первичной обмоткой, не принимая участия в индуктировании ЭДС во вторичной обмотке. Данная часть потока является потоком рассеяния и обозначается как  $\Phi_{\sigma 1}$ .

Потоки  $\Phi$  и  $\Phi_{\sigma 1}$  являются переменными, создают ЭДС. Основной поток  $\Phi$  индуктирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $E_1$ , а во вторичной – ЭДС взаимной индукции  $E_2$ . Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  наводит в первичной обмотке ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$ , при этом  $E_{\sigma 1} \equiv \Phi_{\sigma 1}$ . Поскольку  $\Phi_{\sigma 1}$  замыкается частично по воздуху, то  $\Phi_{\sigma 1} \equiv I_0$ . С учетом отмеченного,  $E_{\sigma 1} \equiv I_0$ , а именно  $E_{\sigma 1} = x_1 I_0$ , где  $x_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

Так как ЭДС  $E_{\sigma 1}$  отстает от своего потока  $\Phi_{\sigma 1}$  на  $90^\circ$ , а ток  $I_0$  и поток  $\Phi_{\sigma 1}$  практически совпадают по фазе, то можно написать

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -jx_1 \underline{I}_0. \quad (1.8)$$

Уравнение электрического состояния первичной цепи трансформатора в режиме холостого хода имеет вид

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = \underline{I}_0 r_1, \quad (1.9)$$

или

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 (r_1 + jx_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 \underline{z}_1, \quad (1.10)$$

где  $\underline{z}_1$  – комплекс полного сопротивления первичной обмотки трансформатора.

При холостом ходе  $I_0 z_1 \ll E_1$ , поэтому, не делая большой погрешности, можно считать, что

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1. \quad (1.11)$$

Исходя из этого равенства, с учетом выражения (1.3), модуль напряжения  $U_1$  можно выразить, как

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m, \quad (1.12)$$

откуда амплитуда основного магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 f w_1} \approx \frac{U_1}{4,44 f w_1}. \quad (1.13)$$

Анализ (1.13) показывает, что основной магнитный поток прямо пропорционален напряжению  $U_1$  и обратно пропорционален частоте сети  $f$  и числу витков первичной обмотки  $w_1$ :

$$\Phi_m \equiv U_1; \quad \Phi_m \equiv \frac{1}{f}; \quad \Phi_m \equiv \frac{1}{w_1}. \quad (1.14)$$

Отмеченный вывод справедлив не только для трансформаторов, но и для всех магнитных цепей переменного тока.

Из выражения (1.13) видно, что величина основного магнитного потока не зависит от сопротивления магнитной цепи  $R_\mu$ , т. е. от длины и сечения магнитопровода. Однако  $R_\mu$  сильно влияет на величину тока холостого хода  $I_0$ , который по существу является намагничивающим током.

Действительно, так как

$$\Phi_m = \frac{I_0 w_1}{R_\mu}, \quad (1.15)$$

то

$$I_0 = \frac{\Phi_m R_\mu}{w_1}. \quad (1.16)$$

При постоянных  $U_1, f, w_1$  магнитный поток, как это следует из (1.13), практически постоянен, а это значит, что всякое изменение  $R_\mu$  ведет к пропорциональному изменению  $I_0$ .

При холостом ходе, когда  $I_2 = 0, E_2 = U_{20}$ .

Векторная диаграмма XX трансформатора приведена на рисунке 1.6. Представлена она для понижающего трансформатора, у которого  $E_1 > E_2$ .

Ток холостого хода  $I_0$  опережает  $\Phi_m$  на угол магнитного запаздывания  $\alpha$ , который равен 5–7%. Из векторной диаграммы угол сдвига по фазе ЭДС  $\underline{E}_1$  и  $\underline{E}_2$  по отношению к  $\underline{\Phi}_m$  составляет  $90^\circ$ .

Полная мощность однофазного трансформатора в режиме холостого хода  $S = U_1 I_0$ . Ее реактивная

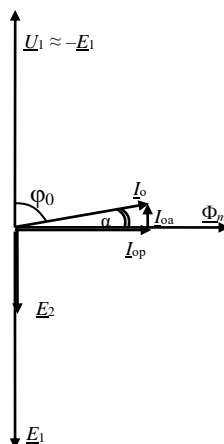


Рисунок 1.6 – Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

составляющая  $Q_0 = U_1 I_o \sin \varphi_0 = U_1 I_{op}$  расходуется на создание основного потока  $\Phi$ , а активная составляющая  $P_o = U_1 I_o \cos \varphi_0 = U_1 I_{oa}$  покрывает потери при холостом ходе:

$$P_o = \Delta P_{эл1} + \Delta P_M = I_o^2 r_1 + \Delta P_M,$$

где  $\Delta P_{эл1}$  – потери в меди первичной обмотки при холостом ходе трансформатора;

$\Delta P_M$  – магнитные потери в стали сердечника в режиме холостого хода.

Величина  $\Delta P_{эл1} \ll P_o$ , поэтому  $P_o \approx \Delta P_M$ .

Ток холостого хода  $I_o$  состоит из двух составляющих:

а) активной  $I_{oa}$ , совпадающей по направлению с вектором  $\underline{U}_1$ ;  $I_{oa} = P_o / U_1$ ;

б) реактивной (намагничивающей)  $I_{op}$ , которая совпадает с вектором  $\underline{\Phi}_m$ .

Действующее значение тока холостого хода

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}. \quad (1.17)$$

Обычно соотношение между активной составляющей тока и самим током холостого хода  $I_{oa} / I_o \leq 0,1$ .

В силовых трансформаторах ток  $I_o$  невелик и составляет (2,5–10) % от  $I_{ин}$ . Большие значения относятся к трансформаторам малой мощности.

Потери в стали трансформатора  $\Delta P_M$  (потери на вихревые токи и гистерезис) не зависят от его нагрузки. Они пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции ( $B_m^2$ ) и могут быть определены по формуле

$$\Delta P_M = k_{уд} \left( \frac{B_m}{B_{m\text{табл}}} \right)^2 \left( \frac{f}{f_{\text{табл}}} \right)^{1,5} m, \quad (1.18)$$

где  $k_{уд}$  – удельные потери для данной марки стали при заданных табличных значениях индукции ( $B_{m\text{табл}}$ ) и частоты ( $f_{\text{табл}}$ ), величина  $k_{уд}$  указывается в справочниках;

$B_m$  – действительное амплитудное значение индукции в трансформаторе, Тл;

$f$  – действительная частота, Гц;

$m$  – масса стали сердечника, кг.

В приведенной формуле обычно  $B_{m\text{табл}} = 1$  Тл,  $f_{\text{табл}} = 50$  Гц, поэтому формула позволяет определить потери в стали при значениях отличных от табличных. Потери энергии в стали на вихревые токи и гистерезис нагревают сердечник.

Схема электрической цепи для проведения опыта ХХ представлена на рисунке 1.7, а схема замещения трансформатора для данного режима – на рисунке 1.8. Экспериментально коэффициент трансформации (1.3) можно определить только по результатам измерения напряжений в режиме ХХ.

Это объясняется тем, что только при холостом ходе, когда ток  $I_2$  вторичной обмотки отсутствует, напряжение на выходе трансформатора в соответствии с (1.7) равно ЭДС во вторичной обмотке  $E_2$ .

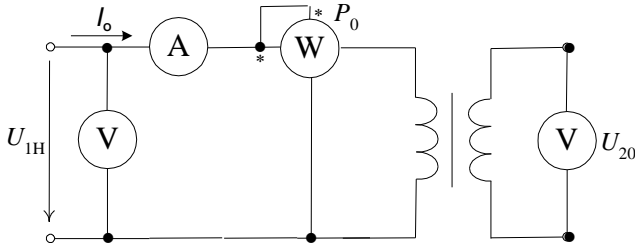


Рисунок 1.7 – Схема опыта холостого хода

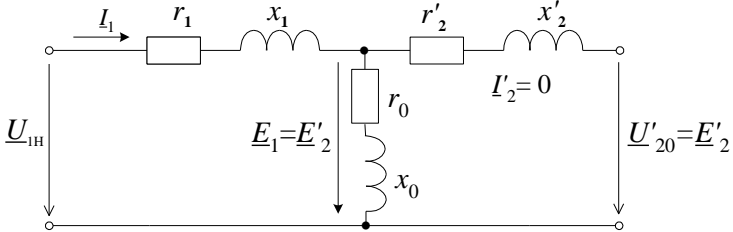


Рисунок 1.8 – Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

По первичной обмотке в режиме холостого хода протекает очень малый ток  $I_1 = I_0$ , вызывающий незначительное падение напряжения  $I_1 z_1$  на сопротивлении первичной обмотки трансформатора. Поэтому, в соответствии с (1.6), можно считать, что  $U_1 \approx E_1$ .

На основании вышеизложенного, коэффициент трансформации трансформатора, определяемый в ходе проведения опыта холостого хода,

$$k = E_1 / E_2 \approx U_{1H} / U_{20}.$$

Так как в режиме холостого хода во вторичной обмотке тока нет, а по первичной протекает незначительный ток, то потерями в обмотках можно пренебречь. Эти потери зависят от квадрата тока и сопротивления обмоток. Следовательно, можно считать, что вся активная мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, идет на покрытие потерь в магнитопроводе.

При определении параметров намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора учитывается тот факт, что у реальных трансформаторов  $r_1 \ll r_0$  и  $x_1 \ll x_0$ . Приведенные неравенства позволяют пренебречь влиянием  $r_1$  и  $x_1$  на значение тока холостого хода, протекающего в левом контуре схемы замещения трансформатора и определить *приблизительные* значения параметров намагничивающей ветви (рисунок 1.4).

Активное сопротивление намагничивающей ветви

$$r_0 = mP_0 / I_0^2,$$

где  $m$  – число фаз (для однофазного трансформатора  $m = 1$ ).

Полное сопротивление намагничивающей ветви  $z_0$

$$z_0 = U_{1н} / I_0.$$

Реактивное сопротивление намагничивающей ветви  $x_0$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

### 1.5 Короткое замыкание трансформатора

При коротком замыкании трансформатора начала и концы вторичной обмотки закорачиваются между собой. Это значит что сопротивление нагрузки равно нулю. Различают эксплуатационное замыкание и замыкание в опыте короткого замыкания. В первом случае к первичной обмотке трансформатора приложено все сетевое напряжение. В таком режиме по обмоткам трансформатора протекают значительные токи, которые в десятки раз могут быть больше номинальных значений. Большие токи быстро разогревают обмотки до температуры, при которой изоляция обмоток сгорает. Следовательно, эксплуатационное короткое замыкание является аварийным режимом для трансформатора. Для защиты трансформатора в этом режиме необходимо использовать плавкие предохранители или автоматические выключатели.

Для новых и отремонтированных трансформаторов проводят опыт короткого замыкания. В этом опыте, при замкнутых выводах вторичной обмотки, на первичную подают такое пониженное напряжение  $U_k$ , при котором по первичной обмотке трансформатора начинает протекать номинальный ток  $I_{1н}$ . Такое напряжение называется напряжением короткого замыкания трансформатора. При напряжении  $U_k$  измеряется активная мощность  $P_k$ , потребляемая из сети. В силовых трансформаторах величина  $U_k$  обычно составляет 5–10 % от  $U_{1н}$ , при этом, чем больше мощность трансформатора, тем меньше процент. На практике напряжение короткого замыкания приводится в процентах,

$$u_k \% = (U_k / U_{1н}) \cdot 100 \%.$$

Схема проведения опыта короткого замыкания представлена на рисунке 1.9.

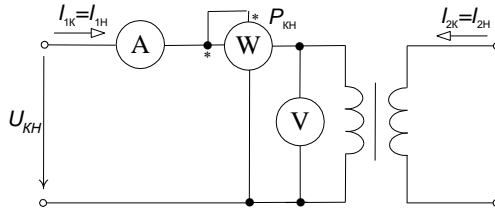


Рисунок 1.9 – Схема включения трансформатора для проведения опыта короткого замыкания

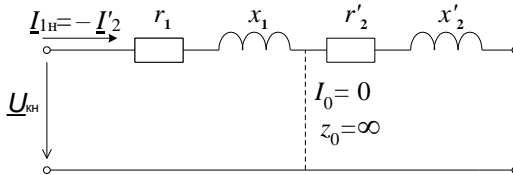


Рисунок 1.10 – Схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания

Опыт короткого замыкания позволяет определить потери в обмотках трансформатора при номинальных токах и рассчитать их сопротивления в схеме замещения ( $r_1$ ,  $r'_2$  и  $x_1$ ,  $x'_2$ ). При определении  $r_1$ ,  $r'_2$  и  $x_1$ ,  $x'_2$  учитывается тот факт, что у реальных трансформаторов  $r_1 = r'_2 \ll r_0$  и  $x_1 = x'_2 \ll x_0$ . В опыте КЗ приведенные неравенства позволяют пренебречь током  $I_0$ , протекающим в намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора (рисунок 1.10) и перейти к упрощенной схеме (рисунок 1.5). В этом случае можно считать что ток  $I_{1H}$ , потребляемый из сети в опыте КЗ определяется только подводимым напряжением  $U_K$  и значениями  $r_K$  и  $x_K$ .

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_K = P_K / m I_{1H}^2.$$

Полное сопротивление короткого замыкания  $z_K$

$$z_K = U_K / I_{1H}.$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

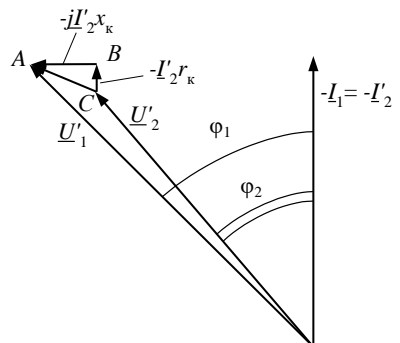
Активное сопротивление обмоток

$$r_1 = r'_2 = r_K / 2.$$

Реактивное сопротивление обмоток

$$x_1 = x'_2 = x_K / 2.$$

Векторная диаграмма для активно-индуктивной нагрузки трансформатора, соответствующая упрощенной схеме и



формулам (1.16), приведена на рисунке 1.11. Порядок ее построения:

1. Откладываем вектор тока  $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$ .

2. Так как на активно-индуктивной нагрузке вектор напряжения опережает вектор тока, откладываем вектор напряжения  $\underline{U}_1$ , под углом  $\varphi_1$  к вектору тока  $\underline{I}_1$ .

3. Находим вектор напряжения  $\underline{U}'_2$  по формуле  $-\underline{U}'_2 = \underline{U}'_1 + \underline{I}'_2 (r'_2 + x'_2)$ .

Рисунок 1.11 – Векторная диаграмма для упрощенной схемы замещения

*Треугольник ABC называется характеристическим: его стороны показывают падения напряжения в трансформаторе.*

При определении потерь в обмотках трансформатора учитывается тот факт, что в опыте короткого замыкания  $U_k \ll U_{1н}$ . Малое значение напряжения на первичной обмотке создает пропорционально низкое значение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора.

Так как потери в магнитопроводе очень сильно зависят от значения магнитной индукции в нем, то в опыте короткого замыкания они настолько малы, что ими можно пренебречь. Следовательно, вся мощность  $P_k$ , потребляемая из сети в опыте короткого замыкания и измеряемая ваттметром, идет на покрытие потерь в обмотках трансформатора при номинальном токе. Потери в обмотках пропорциональны квадрату тока и сопротивлению обмоток.

## 1.6 Работа трансформатора под нагрузкой

При работе под нагрузкой сопротивление потребителя энергии, подключаемого к вторичной обмотке трансформатора, больше нуля, но меньше бесконечности. Работа трансформатора под нагрузкой подчиняется тем же закономерностям, что и работа в режимах холостого хода и короткого замыкания. Эти зависимости выражаются в виде уравнений ЭДС (1.6, 1.7) и МДС (1.9).

Потребители энергии, подключаемые к вторичной обмотке, создают в ней ток  $I_2$ . Являясь индуктированным, ток вторичной обмотки по правилу Ленца противодействует причине, его вызывающей. В результате магнитный поток, создаваемый этим током, стремится уменьшить поток в сердечнике, образованный первичной обмоткой. Ранее было отмечено, что магнитный поток в сердечнике трансформатора практически не зависит от значения тока нагрузки, а, следовательно, и значение намагничивающего тока  $I_0$  не изменяется. Поэтому, в соответствии с уравнением МДС (1.9), размагничивающее действие тока вторичной обмотки компенсируется увеличением тока в первичной обмотке. Ток первичной обмотки увеличится настолько по сравнению с током холостого хода, что создаваемый им дополнительный магнитный поток полностью скомпенсирует собой поток вторичной обмотки и результирующий поток в сердечнике трансформатора

практически не изменится. Строго говоря, он несколько уменьшится, так как с увеличением тока первичной обмотки возрастает падение напряжения на ее сопротивлении и противоэлектродвижущая сила в ней уменьшается.

Таким образом, в трансформаторе автоматически изменяется величина тока, поступающего из сети в соответствии с изменением нагрузки. Вследствие такого изменения тока первичной обмотки и осуществляется переход энергии из первичной цепи во вторичную электромагнитным путем. Вторичная обмотка является источником энергии для потребителей, подключаемых к ней.

Как следует из уравнений (1.6, 1.7, 1.9), изменение тока нагрузки вызывает изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Данное изменение объясняется падением напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора. Для оценки степени изменения вторичного напряжения трансформатора при изменении параметров нагрузки вводится специальный показатель, называемый процентным изменением напряжения.

Процентное изменение напряжения равно:

$$\Delta u_{\%} = \left( \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \right) \cdot 100 \% . \quad (1.19)$$

Однако определять процентное изменение напряжения экспериментально с помощью выражения (1.19) не всегда рационально. Объясняется это тем, что для определения  $\Delta u_{\%}$  с помощью выражения (1.19) необходимо нагружать трансформатор с целью получения значения  $U_2$ . Из сети, в процессе эксперимента, потребляется значительная мощность. Поэтому  $\Delta u_{\%}$  определяют на основании анализа векторной диаграммы, соответствующей упрощенной схеме замещения (рисунок 1.11), по формулы

$$\Delta u_{\%} \approx \beta \left( \frac{I_{1н} r_k \cos \varphi_2 + I_{1н} x_k \sin \varphi_2}{U_{1н}} \right) 100 = \beta (u_{ка\%} \cos \varphi_2 + u_{кр\%} \sin \varphi_2) , \quad (1.20)$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки трансформатора равный отношению реального тока вторичной обмотки к номинальному значению тока в ней

$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} \approx \frac{I_1}{I_{1н}}$ ;  $u_{ка\%}$  – активная составляющая напряжения короткого

замыкания  $u_{ка\%} = \frac{I_{1н} r_k}{U_{1н}} \cdot 100 \%$ ;  $u_{кр\%}$  – реактивная составляющая напряжения

короткого замыкания,  $u_{кр\%} = \frac{I_{1н} x_k}{U_{1н}} \cdot 100 \% .$

Анализ уравнения (1.20) показывает, что  $\Delta u_{\%}$  зависит как от величины нагрузки ( $\beta$ ), так и от ее характера ( $\cos \varphi_2$ ).



При заданном значении  $\beta$  относительное изменение  $\Delta u_{\%}$  зависит от величины угла  $\varphi_2$ . В силовых трансформаторах при чисто активной нагрузке ( $\varphi_2 = 0$ ) величина  $\Delta u_{\%}$  невелика; при активно-индуктивной нагрузке ( $\varphi_2 > 0$ ) – возрастает; при активно-емкостной нагрузке ( $\varphi_2 < 0$ ) – может стать отрицательной. При некотором значении угла  $\varphi_2$  изменение тока нагрузки не вызывает изменение напряжения на выходе трансформатора. Для определения значения этого угла достаточно приравнять к нулю выражение (1.20).

Для иллюстрации влияния нагрузки на вторичное напряжение трансформатора используется его внешняя характеристика. Под внешней характеристикой подразумевается зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$ , снятая при неизменном напряжении сети и постоянном значении коэффициента мощности в нагрузке. Как правило, внешняя характеристика строится по расчетным данным, которые можно получить, используя выражения (1.19) и (1.20).

На рисунке 1.12 приведена внешняя характеристика трансформатора, полученная для различных значений коэффициента мощности нагрузки.

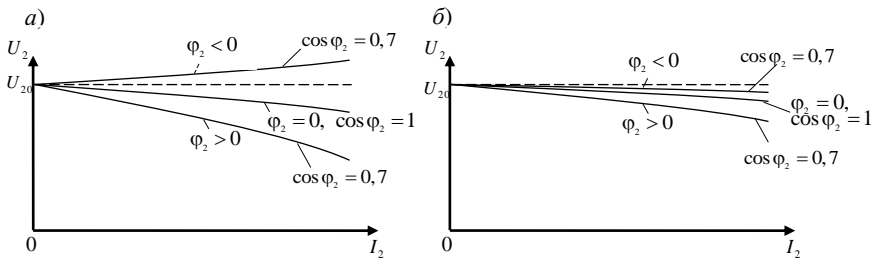


Рисунок 1.12 Внешние характеристики трансформаторов:  
*a* – большой (десятки МВ·А и более) и *б* – малой (до 10 кВ·А) мощности

Используя основные уравнения приведенного трансформатора (1.16) можно для нагрузочного режима построить векторную диаграмму. Вид этой диаграммы зависит от характера нагрузки.

Построим диаграмму для случая активно-индуктивной нагрузки, когда ток  $I'_2$  отстает по фазе от напряжения  $U'_2$  (рисунок 1.13, *a*).

Порядок построения.

Вначале вычерчивается вектор магнитного потока  $\Phi$ . Затем, используя значения  $I_{op}$  и  $I_{oa}$ , строится вектор тока холостого хода  $I_0$ . При построении, следует учитывать, что реактивная составляющая тока холостого хода  $I_{op}$  совпадает по фазе с потоком  $\Phi$ , а активная  $I_{oa}$  – опережает поток на  $90^\circ$ .

Векторы ЭДС  $E_1$  и  $E'_2$  для приведенного трансформатора равны по величине и отстают по фазе от потока  $\Phi$  на  $90^\circ$ . С отставанием от вектора

ЭДС  $E'_2$  на угол  $\psi_2$  (нагрузка активно-индуктивная), строится вектор тока  $I'_2$ , где

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_n}{r'_2 + r'_n}, \quad (1.21)$$

а  $r'_n$  и  $x'_n$  – приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений нагрузки.

Согласно второго уравнения системы (1.16), прибавив к  $\underline{E}'_2$  векторы  $(-j\underline{I}'_2 x'_2)$  и  $(-j\underline{I}'_2 r'_2)$ , можно получить вектор вторичного напряжения  $\underline{U}'_2$  и угол  $\varphi_2$ , на который он опережает по фазе ток  $I'_2$  (угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке). Далее, используя третье уравнение системы (1.16), к вектору  $\underline{I}_0$  прибавим вектор  $(-I'_2)$  и находим  $\underline{I}_1$ .

Затем в соответствии с первым уравнением системы (1.16) определим вектор  $\underline{U}_1$ . Построив  $\underline{U}_1$ , найдем угол  $\varphi_1$  между векторами  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$ .

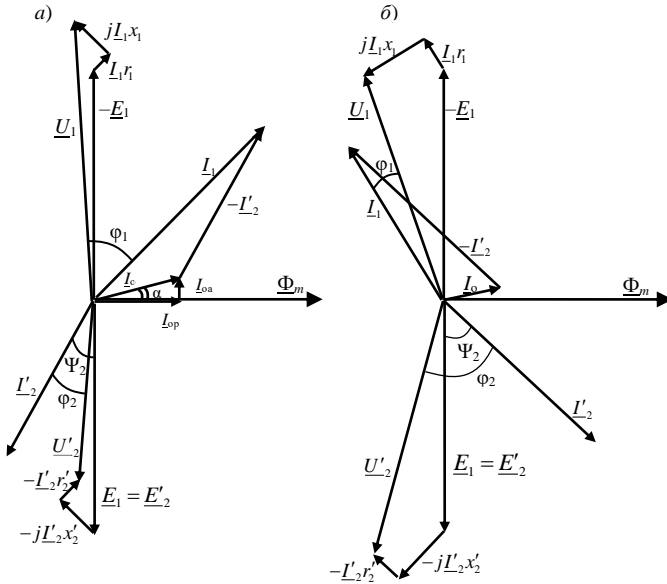


Рисунок 1.13 – Векторная диаграмма приведенного трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

Аналогично можно построить векторную диаграмму трансформатора при активно-емкостной нагрузке (рисунок 1.13, б). Сравнивая диаграммы при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках, нетрудно заметить, что при  $rL$ -нагрузке напряжение  $\underline{U}'_2$  меньше  $\underline{E}'_2$ , а при  $rC$ -нагрузке может быть, наоборот,  $\underline{U}'_2 > \underline{E}'_2$ .

Векторные диаграммы весьма удобны при исследовании трансформаторов. По ним легко судить о соотношениях величин и о фазовых сдвигах между векторными величинами. Они позволяют решить целый ряд задач. Например, определить величину и фазу вторичного напряжения при различных нагрузках.

*Регулирование напряжения трансформаторов.*

Регулирование напряжения в трансформаторах необходимо:

1) для стабилизации вторичного напряжения. Согласно ГОСТ 13109-97 отклонения напряжения у потребителей не должны превышать  $\pm 5\%$  от номинального;

2) для реализации особенностей технологического процесса (плавное регулирование напряжения в широком диапазоне).

Переключать ответвления обмоток можно при отключенном от сети трансформаторе (переключение без возбуждения – ПБВ) или же без отключения трансформатора (регулирование под нагрузкой – РПН). Наиболее простой способ – переключение без возбуждения. Он применяется во всех трансформаторах потребительских подстанций 10/0,4 кВ. Напряжение регулируют в пределах  $\pm 5\%$ , ступенями по 2,5 %, то есть, если на трансформатор подано 10 кВ, на вторичной стороне можно получить 380, 390, 400, 410 и 420 В. Такое регулирование на практике называют *надбавками трансформатора*. Ответвления обычно выполняют на обмотке высшего напряжения, потому что: 1) она имеет большее количество витков, что повышает точность регулирования; 2) ее ток и сечение провода меньше, поэтому легче выполнить отпайки для регулирования.

Переключение без возбуждения осуществляется редко, один или два раза в году, при подключении новых потребителей или при сезонных изменениях нагрузки.

Регулирование под нагрузкой применяется у трансформаторов на районных подстанциях. Как правило, это трансформаторы большой мощности. Переключение необходимо производить без перерыва в электроснабжении потребителей (рисунок 1.14).

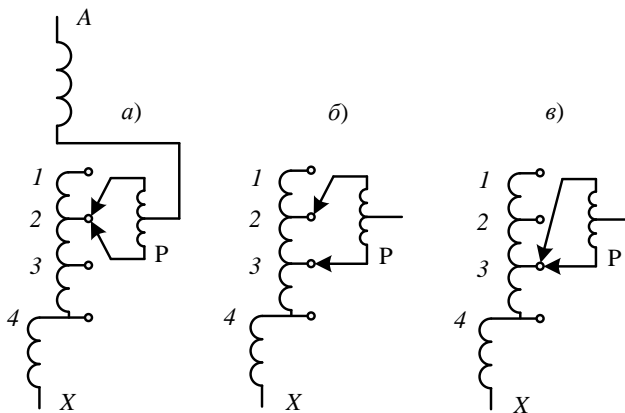


Рисунок 1.14 – Переключение контактов при регулировании под нагрузкой

Регулирование под нагрузкой осуществляется постоянно [19]. Предположим, при нормальной работе трансформатора оба контакта находились в положении 2. Произошло уменьшение первичного напряжения. Возникла необходимость снизить вторичное напряжение путем увеличения числа витков первичной обмотки, то есть переключить контакты с положения 2 в положение 3. Переключение будет проводиться в два этапа: сначала вторым контактом, при этом первый контакт будет осуществлять связь, чтобы не было разрыва цепи (рисунок 1.14, б). В момент положения 3 второго контакта, первый контакт будет еще в положении 2 и ток будет ограничиваться реактором P. Затем первый контакт переключается с 2 на 3 (рисунок 1.14, в).

Плавное регулирование напряжения в широком диапазоне используется в трансформаторах малой и средней мощности. Наиболее распространены автотрансформаторы со скользящими контактами. Реже используются специальные трансформаторы, вторичное напряжение которых регулируется путем изменения магнитного потока, проходящего через стержень с вторичной обмоткой.

### 1.7 Потери и коэффициент полезного действия трансформатора

При работе трансформатора в нем имеют место два вида потерь: магнитные и электрические.

*Магнитные потери*  $\Delta P_m$  – это потери в магнитопроводе трансформатора (определяются по формуле 1.18). Они складываются из потерь на *перемагничивание* магнитопровода (гистерезис) и потерь на *вихревые токи*. Величина магнитных потерь зависит от значения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, частоты ее изменений, марки и толщины пластин электротехнической стали из которой набран магнитопровод.

Ввиду того, что магнитный поток при неизменных  $U_1$  и  $f$  практически постоянен, то величина магнитных потерь также практически *неизменна*, т. е. не зависит от нагрузки трансформатора и практически равна потерям мощности при холостом ходе,  $\Delta P_m = P_0$ .

Электрические потери  $\Delta P_{эл}$  – это потери на нагрев обмоток трансформатора протекающими по ним токами:

$$\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_k.$$

Величина электрических потерь зависит от нагрузки трансформатора.

В связи с вышеприведенным магнитные потери называют постоянными, электрические переменными.

Так как  $I_1 = \beta I_{1н}$ , то

$$\Delta P_{эл} = \beta^2 (I_{1н}^2 r_k) = \beta^2 P_{кн}, \quad (1.22)$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки;

$\Delta P_{кн}$  – мощность потерь в опыте короткого замыкания.

Суммарные потери в трансформаторе

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{эл} = P_0 + \beta^2 P_{кн}. \quad (1.23)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора представляет собой отношение активной мощности  $P_2$  на выходе трансформатора к активной мощности  $P_1$  на его входе

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + (\Delta P_m + \Delta P_{эл})}. \quad (1.24)$$

Учитывая, что  $P_2 = \beta S_n \cos \varphi_2$ , имеем

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + (P_0 + \beta^2 P_{кн})}. \quad (1.25)$$

Так как  $P_2 = P_1 - (\Delta P_m + \Delta P_{эл}) = P_1 - (P_0 + \beta^2 P_{кн})$ , то уравнение КПД можно представить в следующем виде

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{кн}}, \quad (1.26)$$

где  $S_n = U_{2н} I_{2н}$  – номинальная полная мощность однофазного трансформатора.

Значения  $P_0$  и  $P_{кн}$  для силовых трансформаторов приводятся в соответствующих каталогах.

Анализ уравнения (1.26) показывает, что  $\eta = f(\beta)$ . Оптимальный коэффициент нагрузки  $\beta_{опт}$ , при котором КПД имеет максимальное

значение, можно определить, взяв первую производную  $\frac{d\eta}{d\beta}$  и приравняв ее к нулю.

При этом

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\text{опт}}^2 P_{\text{кн}} &= P_0; \\ \Delta P_{\text{эл}} &= \Delta P_{\text{м}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

или

Следовательно, КПД имеет максимум при такой нагрузке, когда электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали.

Из (1.27) имеем

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}}. \quad (1.28)$$

Для большинства трансформаторов

$$\beta_{\text{опт}} = 0,5 \dots 0,7.$$

Зависимость  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  представлена на рисунке 1.15. В мощных трансформаторах максимальное значение КПД может достигать весьма высоких значений (0,98–0,99). В трансформаторах малой мощности  $\eta_{\text{max}}$  может снижаться до 0,6 при  $S_{\text{н}}$  до 10 ВА.

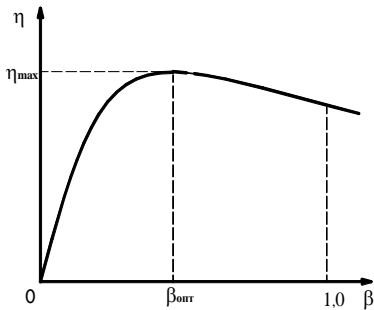


Рисунок 1.15 – Зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$

## 1.8 Трехфазные трансформаторы

Если взять три одинаковых трансформатора, магнитные системы которых соединить, как показано на рисунке 1.16, *a*, и подать на первичные обмотки трехфазную систему напряжений, то суммарный поток  $\Phi_{\Sigma}$ , проходящий по общему стержню, будет равен нулю (рисунок 1.16, *б*).

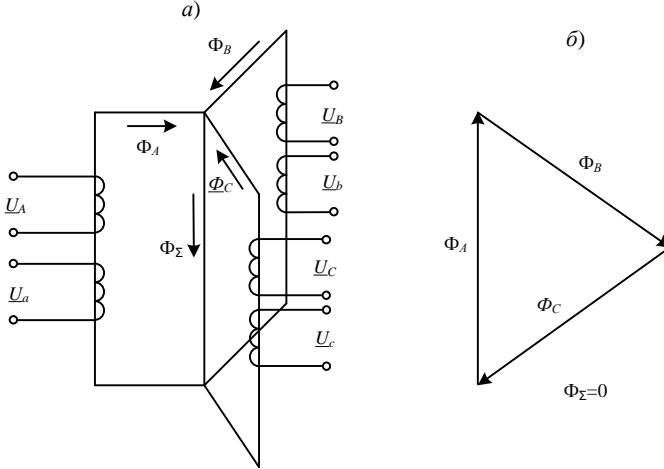


Рисунок 1.16 – Трехфазный трансформатор:

*a* – однофазные трансформаторы для трехфазной системы;

*б* – графическое определение значения магнитного потока в общем стержне

Следовательно, от общего стержня можно отказаться. Поэтому трехфазный ток обычно преобразуют с помощью трехстержневых трехфазных трансформаторов (рисунок 1.17).

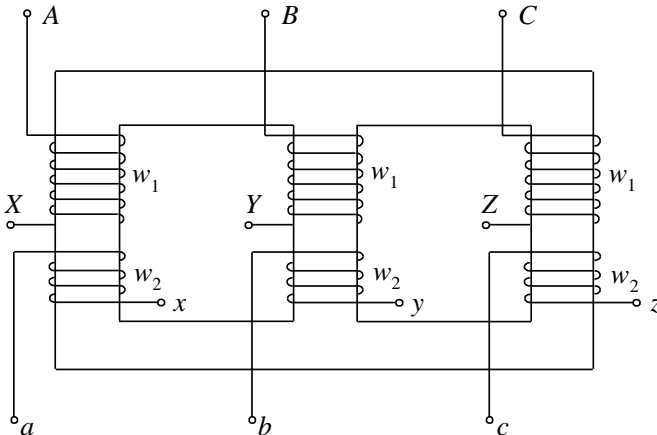


Рисунок 1.17 – Трехфазный трехстержневой трансформатор

В трехфазном трехстержневом трансформаторе первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне. Недостатком указанного трансформатора является то, что ток холостого хода фазы  $B$ , обмотка которой лежит на среднем стержне, меньше, чем в фазах  $A$  и  $C$  [21]. Это объясняется тем, что путь магнитного потока в фазе  $B$  короче, и МДС для нее требуется меньшая, чем для фаз  $A$  и  $C$ .

При очень больших мощностях (более 10 МВА в фазе) применяют наряду с трехстержневыми трансформаторами групповое соединение трех однофазных трансформаторов, имеющих некоторые преимущества при транспортировке, монтаже и работе.

Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены “в звезду”, “в звезду с выведенной нулевой точкой”, “в треугольник” и, в специальных случаях, в “зигзаг” (рисунок 1.18).

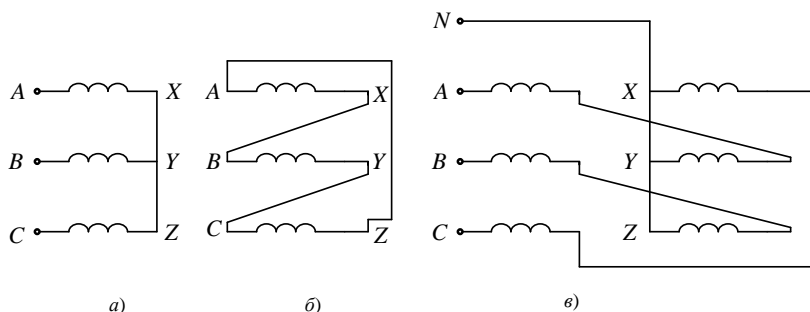


Рисунок 1.18 – Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора:  
 $a$  – звезда ( $Y$ );  $b$  – треугольник ( $\Delta$ );  $c$  – зигзаг ( $Z$ )

Схема соединений обозначается дробью (например,  $Y/\Delta$ ), при этом в числителе – схема соединения обмотки высшего напряжения (ВН), в знаменателе – схема обмотки низшего напряжения (НН). Принято начала фаз обмоток ВН обозначать  $A, B, C$ , а их концы –  $X, Y, Z$ ; начала фаз обмоток НН обозначают  $a, b, c$ , а концы –  $x, y, z$ .

У обмоток низшего напряжения, соединенных по схеме «звезда», нейтральный провод, как правило, выведен наружу –  $Y_n$ . Наиболее употребительны схемы  $Y/Y_n, \Delta/Y_n, Y/\Delta, Y/Z_n$ .

Схема  $Y/Y_n$  наиболее распространена в трансформаторах малой и средней мощности для питания электрических сетей 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью. Достоинства трансформаторов с указанной схемой: экономичны в изготовлении; имеют наименьшие потери электрической энергии при работе на равномерную по фазам нагрузку; имеют фазное и линейное напряжения. Недостаток: при несимметричной нагрузке резко увеличиваются потери электрической энергии и отклонения напряжений от номинального.



Поэтому трансформаторы  $Y/Y_n$  применяются при работе на симметричную нагрузку в низковольтных электрических сетях с глухозаземленной нейтралью.

Схема  $\Delta/Y_n$ . Достоинства: лучше, чем трансформаторы  $Y/Y_n$ , работают на несимметричную нагрузку; имеют фазное и линейное напряжения. Недостаток: количество витков первичной обмотки увеличивается в  $\sqrt{3}$  раз, поэтому данный трансформатор дороже, чем  $Y/Y_n$ . Трансформатор  $\Delta/Y_n$  используется для питания низковольтных электрических сетей при мощности его 400 кВ·А и выше.

Схема  $Y/\Delta$  находит применение для питания электрических сетей с изолированной нейтралью.

Трехфазные трансформаторы имеют два коэффициента трансформации:

а) фазный коэффициент трансформации, равный отношению числа витков фазы обмотки ВН к числу витков фазы обмотки НН или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = w_{\text{вн}} / w_{\text{нн}} = U_{\text{оф вн}} / U_{\text{оф нн}}; \quad (1.29)$$

б) линейный коэффициент трансформации, равный отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$k_{\text{л}} = U_{\text{ол вн}} / U_{\text{ол нн}}. \quad (1.30)$$

Для схем  $Y/Y$  и  $\Delta/\Delta$  коэффициенты трансформации равны  $k_{\phi} = k_{\text{л}}$ ; для схемы  $Y/\Delta$  –  $k_{\text{л}} = \sqrt{3} k_{\phi}$ , а для  $\Delta/Y$  –  $k_{\text{л}} = k_{\phi} / \sqrt{3}$ .

При симметричной нагрузке схемы замещения и векторные диаграммы каждой фазы трехфазного трансформатора одинаковы, имеют тот же вид, что и у однофазного трансформатора. Поэтому, полученные ранее формулы могут быть применены как к однофазным, так и к трехфазным трансформаторам. Однако в последнем случае в формулы необходимо подставлять фазные токи, напряжения и мощности.

На щитке трансформатора кроме схемы соединения обмоток обычно указывается еще и группа соединения.

Группу соединения обмоток необходимо знать только при включении трансформаторов на параллельную работу. Группа соединений обмоток трансформатора характеризует взаимную ориентацию напряжений первичной и вторичной обмоток. Она определяется углом между векторами линейных напряжений первичной и вторичной обмоток. Для однофазных трансформаторов возможны две группы соединений, для трехфазных – 12. Количество групп, которые может иметь трансформатор, зависит от числа фаз. Согласно ГОСТ 11677-65 группа соединения обмоток у трансформатора  $Y/Y_n$  должна быть нулевая, а у трансформатора  $Y/\Delta$ ,  $\Delta/Y_n$  и  $Y/Z_n$  – одиннадцатая (рисунок 1.19 и 1.20).

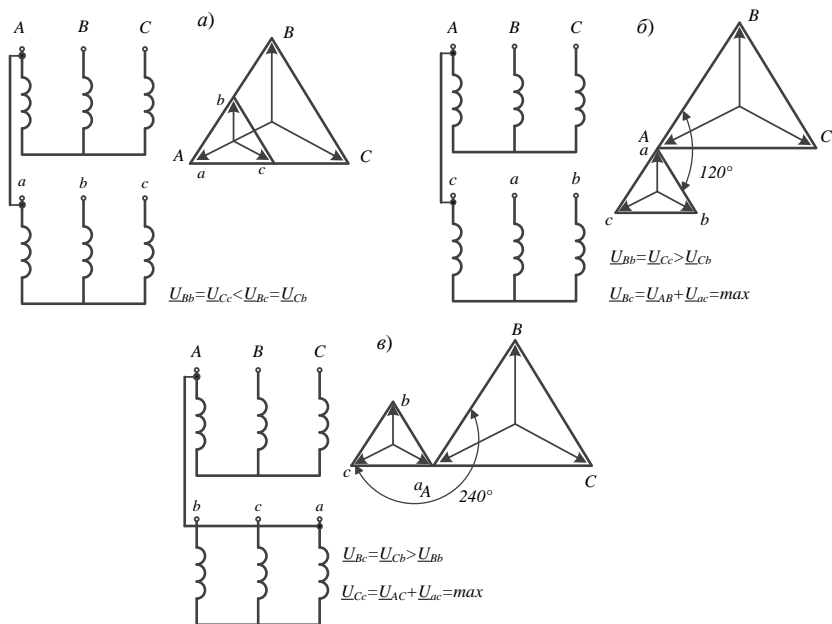


Рисунок 1.19 – Определение группы соединения обмоток трансформатора с помощью вольтметра:  $a - Y/Y_H - 0$ ,  $b - Y/Y_H - 4$ ,  $c - Y/Y_H - 8$

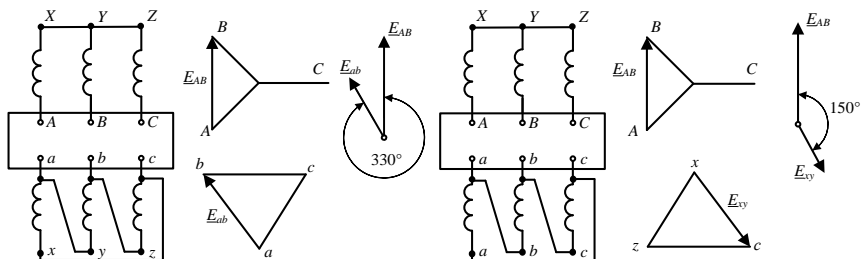


Рисунок 1.20 – Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы:  $a -$  для группы  $Y/\Delta - 11$ ;  $b -$  для группы  $Y/\Delta - 5$

Группа соединения трансформатора определяется по векторной диаграмме напряжений, построенной для первичной и для вторичной обмоток по так называемому правилу часов. Суть правила: если вектор линейного напряжения первичной обмотки совместить с минутной стрелкой часов и стрелку поставить на цифру 12 циферблата, то положение часовой стрелки, совмещенной с одноименным вектором линейного напряжения вторичной обмотки, покажет номер группы. Всего на циферблате 12 цифр и

принципиально возможны 12 групп с учетом направлений намоток обмоток и с учетом соединений обмоток в звезду или треугольник.

Имеются два способа, чтобы определить группу соединения обмоток трансформатора: с помощью вольтметра и фазометра [19].

Самый простой способ – это изменение угла между векторами линейных напряжений  $\underline{U}_{AB}$  и  $\underline{U}_{ab}$ . Но прибора, у которого на две обмотки подаются напряжения, нет, а есть фазометр, у которого одна обмотка токовая, а вторая – напряжения. Известно также, что на активном сопротивлении векторы тока и напряжения совпадают. Поэтому, если включить фазометр по схеме, приведенной на рисунке 1.21, то прибор покажет угол между вектором линейного напряжения  $\underline{U}_{ab}$  и вектором тока  $\underline{I}_{AB}$  и вектором напряжения  $\underline{U}_{AB}$ .

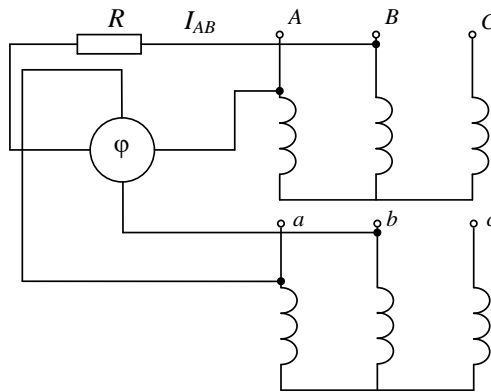


Рисунок 1.21 – Определение группы соединений обмоток фазометром

В реальности наиболее распространена практическая проверка правильности включения трансформаторов на параллельную работу. Соединяют пару одноименных вводов трансформатора, подают напряжение на первичные обмотки и проверяют наличие напряжения между другими одноименными вводами. Если напряжения нет – соединение правильное.

### 1.9 Параллельная работа трансформаторов

На практике трансформаторы могут включаться на параллельную работу, что позволяет:

- решить проблему резервирования электроснабжения потребителей;
- отключить часть трансформаторов при уменьшении нагрузки;
- упростить организацию профилактического ремонта и пр.

Для включения трансформаторов на параллельную работу (рисунок 1.22) необходимо выполнение следующих условий:

- а) равенство коэффициентов трансформации,  $k_I = k_{II}$ ;
- б) равенство напряжений короткого замыкания,  $u_{кI} = u_{кII}$ ;

в) равенство групп соединения трансформаторов.

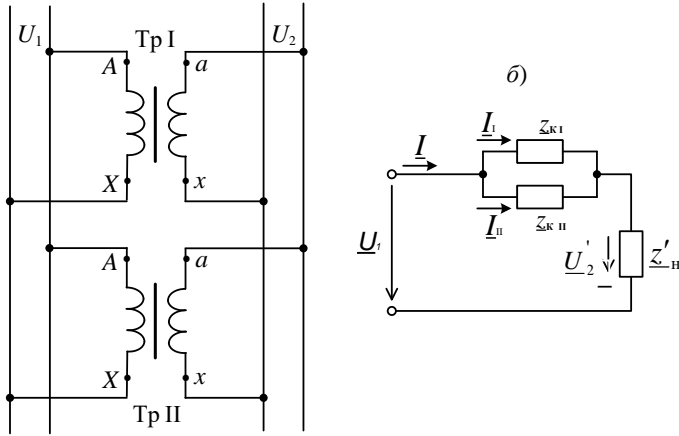


Рисунок 1.22 – Схема включения трансформаторов при параллельной работе (а) и схема их замещения (б)

Рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включаемых на параллельную работу, не превышало 3:1.

Включение в сеть трансформаторов следует производить только при согласованном порядке чередования фаз.

Рассмотрим, к чему приводит невыполнение каждого из условий:

1. Пусть  $k_1 \neq k_{II}$ , а именно  $k_1 < k_{II}$ , при прочих равных условиях. Тогда ЭДС вторичной обмотки первого трансформатора в режиме холостого хода  $E_{20I}$  будет больше аналогичной ЭДС второго трансформатора, т. е.  $E_{20II}$ , т.е. между параллельно включенными трансформаторами возникает разность потенциалов  $\Delta U$  (рисунок 1.23). Под действием разности  $(E_{20I} - E_{20II})$  в замкнутом контуре, образованном вторичными обмотками, начинает протекать уравнивающий ток  $I_{уп2}$ ,

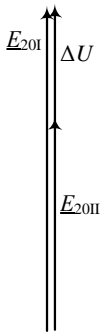


Рисунок 1.23 – Появление  $\Delta U$  при  $k_1 \neq k_{II}$

$$I_{уп2} = (E_{20I} - E_{20II}) / (\underline{z}_{кI} + \underline{z}_{кII}), \quad (1.31)$$

где  $\underline{z}_{к I}$  и  $\underline{z}_{к II}$  – сопротивления короткого замыкания первого и второго трансформаторов.

Уравнивающий ток  $I_{уп2}$  изменяет значение тока, формируемого нагрузкой в обмотках трансформатора. В одном трансформаторе ток обмоток уменьшается, а в другом он возрастает. Возникает неравномерная нагрузка трансформаторов, сопровождающаяся увеличением потерь, а, следовательно, и перегревом, в перегруженном трансформаторе. При этом

всегда будет нагружен больше тот трансформатор (нагружен больше как по вторичной, так и по первичной цепи), у которого коэффициент трансформации меньше. Наличие уравнивающего тока  $I_{\text{уп2}}$  за счет разных падений напряжений на обмотках приводит к выравниванию выходных напряжений трансформаторов, т. е.  $U_{2\text{ I}} = U_{2\text{ II}}$ , несмотря на различие их ЭДС  $E_{20\text{ I}}$  и  $E_{20\text{ II}}$ .

На практике допускается параллельная работа трансформаторов, имеющих различие в коэффициентах трансформации не более 0,5 %, т. е.

$$\Delta k_{\%} = \frac{k_{\text{I}} - k_{\text{II}}}{k_{\text{cp}}} \cdot 100 \% < \pm 0,5 \%, \quad (1.32)$$

где  $k_{\text{cp}} = \frac{k_{\text{I}} + k_{\text{II}}}{2}$  – среднее арифметическое значение коэффициентов трансформации.

2. При неравенстве напряжений короткого замыкания  $u_{\text{к}}$  будет иметь место также неравенство сопротивлений короткого замыкания, т. е.  $z_{\text{к I}} \neq z_{\text{к II}}$ . При этом, как следует из рисунка 1.17, б, при параллельном включении имеем

$$I_{\text{I}} z_{\text{к I}} = I_{\text{II}} z_{\text{к II}},$$

Пренебрегая различием в фазе токов, которое зависит от активных и реактивных сопротивлений короткого замыкания и обычно невелико, и, заменяя комплексные величины их модулями, получим

$$\frac{I_{\text{I}}}{I_{\text{II}}} = \frac{z_{\text{к II}}}{z_{\text{к I}}}, \quad (1.33)$$

т. е. токи нагрузки параллельно включенных трансформаторов обратно пропорциональны их сопротивлениям короткого замыкания.

Трансформатор, имеющий меньшее значение  $u_{\text{к}}$ , будет иметь и меньшую величину  $z_{\text{к}}$ , а, следовательно, его внешняя характеристика (рисунок 1.24) будет более пологой, чем у трансформатора с большим  $u_{\text{к}}$ .

На рисунке 1.24 у первого трансформатора  $u_{\text{к I}}$  больше, чем у второго, поэтому при параллельной работе он будет меньше загружен ( $I_{2\text{ I}} < I_{2\text{ II}}$ ). На практике допускается разница в  $u_{\text{к}}$  для параллельно работающих трансфор-

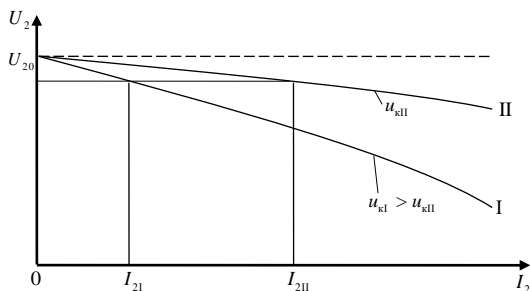


Рисунок 1.24 – Внешние характеристики трансформаторов с различными значениями  $u_{\text{к}}$

маторов не более чем на  $\pm 10\%$  от их среднеарифметического значения.

3. Если трансформаторы принадлежат к разным группам соединения обмоток, то параллельная работа их вообще невозможна, так как между обмотками трансформаторов появляется разность потенциалов, вызывающая очень большие уравнивающие токи.

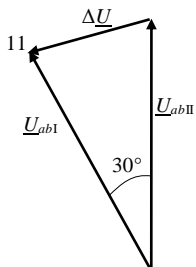


Рисунок 1.25 – Векторная диаграмма напряжений для параллельного включения трансформаторов с 11-й и 0-й группами соединений

Например, при включении на параллельную работу трансформаторов 11-й и 0-й (рисунок 1.25) вторичные линейные напряжения сдвинуты на  $30^\circ$  и между обмотками трансформаторов возникает разность потенциалов  $\Delta U$ , под действием которой будет протекать уравнивающий ток, в несколько раз превышающий номинальный. При равенстве вторичных напряжений величина  $\Delta U$  определяется из равнобедренного треугольника, как  $\Delta U = 2 U_{ab} \sin 15^\circ$ .

## 1.10 Специальные типы трансформаторов

### 1.10.1 Автотрансформаторы

*Автотрансформатор* – это трансформатор, у которого вторичная обмотка является частью первичной, служит он для получения нескольких вторичных напряжений или для плавного регулирования вторичного напряжения. В первом случае от первичной обмотки делают отводы, поэтому вторичные напряжения – дискретные, нерегулируемые величины (рисунок 1.26, а, [15]).

Во втором случае напряжение  $U_2$  регулируется от 0 до  $U_1$  (рисунок 1.26, б).

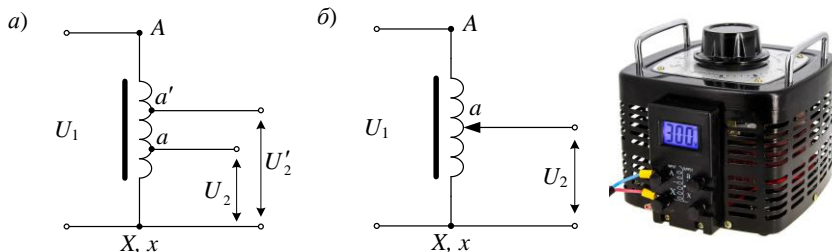


Рисунок 1.26 – Автотрансформаторы с нерегулируемым выходным (а) и регулируемым (б) напряжениями

На рисунке 1.26  $AX$  – первичная обмотка автотрансформатора,  $ax$  и  $a'x$  – вторичные.

Автотрансформатор, плавно регулирующий вторичное напряжение, называют ЛАТР – лабораторным автотрансформатором. Конструктивно он выполняется в виде цилиндрического сердечника, навитого из ленты электротехнической стали. Сердечник представляет собой пустотелый цилиндр. На изолированную поверхность цилиндра наматывается первичная обмотка  $AХ$ . Движок ЛАТРа выполняется в виде ролика, перемещающегося по виткам обмотки. В некоторых случаях автотрансформатор имеет ряд преимуществ, в том числе по габаритам, в сравнении с обычным трансформатором.

Рассмотрим электрическую схему автотрансформатора, нагруженного на нагрузку (рисунок 1.27). Если к первичной обмотке  $AХ$  с числом витков  $w_1$  подвести напряжение  $U_1$ , а вторичную обмотку  $ax$  оставить разомкнутой, то ток, проходя по первичной обмотке, создаст магнитный поток  $\Phi$ , который будет индуцировать в каждом витке обмотки ЭДС  $E_n$ . Тогда ЭДС в обмотке  $AХ$   $E_1 = E_n w_1$ , а в части обмотки  $ax$   $E_2 = E_n w_2$ . Отношение данных ЭДС есть коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При подключении нагрузки  $z_n$  появится ток  $I_2$ . Пренебрегая потерями в автотрансформаторе, можно записать, что  $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ , т. е. мощность, подведенная к автотрансформатору, равна мощности, полученной от него. Тогда  $U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1$ , т. е. имеем такое же соотношение, что и у обычного трансформатора. Электрические потери в обмотках автотрансформатора значительно меньше, чем в обмотках соответствующего по мощности обычного трансформатора, поскольку в первом только одна обмотка, а не две, и во вторичной обмотке протекает разность токов ( $I_{xa} = I_2 - I_1$ ), что дает возможность выполнить обмотку  $ax$  из провода небольшого сечения.

По первому закону Кирхгофа

$$I_2 = I_1 + I_{xa}. \quad (1.34)$$

Если пренебречь влиянием углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , то можно записать приближительное равенство:

$$I_2 \approx I_1 + I_{xa}. \quad (1.35)$$

Тогда, умножив обе части уравнения на  $U_2$ , получим

$$\left. \begin{aligned} U_2 I_2 &= U_2 I_1 + U_2 I_{xa}, \end{aligned} \right\}$$

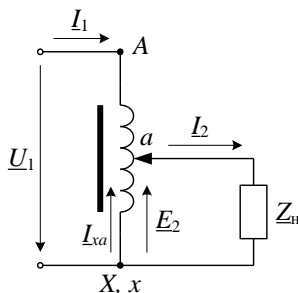


Рисунок 1.27 –  
Электрическая схема  
нагруженного

или

$$S_2 = S_{эл} + S_{эм},$$

т. е. мощность вторичной обмотки состоит из двух составляющих – электрической  $S_{эл}$ , поступающей из сети, и электромагнитной  $S_{эм}$ , поступающей из вторичной обмотки  $ax$ , куда она передается электромагнитным путем при помощи потока  $\Phi$ . Так как электромагнитным путем во вторичную обмотку передается только часть всей мощности, то это позволяет уменьшить сечение магнитопровода, что даст экономию стали и снижает потери в ней. При уменьшении сечения магнитопровода сокращается средняя длина одного витка и общее количество меди, расходуемой на обмотку. Электрические потери в обмотках автотрансформатора значительно меньше, чем в обмотках соответствующего по мощности обычного трансформатора, поскольку в первом только одна обмотка, а не две, и во вторичной обмотке протекает разность токов ( $I_{xa} = I_2 - I_1$ ), что дает возможность выполнить обмотку  $ax$  из провода меньшего сечения.

Учитывая, что коэффициент трансформации  $k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$ , а  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ ,

имеем

$$I_{xa} = I_2 - I_1 = I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (1.37)$$

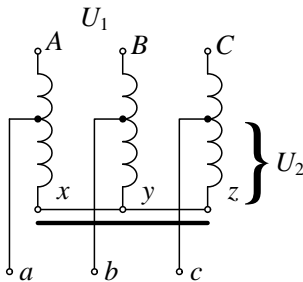


Рисунок 1.28 – Схема трехфазного автотрансформатора

Оптимальная величина коэффициента трансформации  $k \approx 1,25 - 2$

Автотрансформаторы могут быть трехфазными, в этом случае обмотки их соединяют в звезду (рисунок 1.28). Используются трехфазные автотрансформаторы при пуске мощных синхронных и асинхронных двигателей. С помощью их осуществляется при пуске уменьшение пускового тока.

Автотрансформаторы могут быть и для повышения напряжения. В этом случае они оборудованы переключателями, которые позволяют изменять число витков вторичной обмотки  $w_2$  и ступенчато регулировать напряжение  $U_2$  на выходе, при этом  $w_2 > w_1$ .

В автотрансформаторах часть электрической мощности передается непосредственно (без трансформации) путем контактной связи между последовательной и общей обмотками. И эта мощность называется электрической. *Прходной мощностью* называют полную мощность, передаваемую с первичной обмотки автотрансформатора на вторичную.



Трансформаторной мощностью или типовой мощностью называют мощность, передаваемую магнитным полем. Полная мощность равна сумме трансформаторной и электрической мощностей. Под *номинальной мощностью* автотрансформатора понимают его проходную мощность при номинальных условиях.

Наряду с уже отмеченными преимуществами у автотрансформатора по сравнению с трансформатором имеются следующие недостатки:

1) между первичной и вторичной обмотками существует электрическая связь. Поэтому вторичная обмотка и подключенные к ней потребители должны иметь такую же изоляцию по отношению к земле, как и первичная. По этой же причине при питании цепей низкого напряжения от сети высокого напряжения следует соблюдать особые меры предосторожности.

2) незначительные коэффициенты трансформации (не выше 2), поскольку при  $k > 2$  автотрансформаторы невыгодны. Более того, при  $k > 2$  в автотрансформаторах большой мощности возможны перенапряжения во вторичной цепи при появлении атмосферных и коммутационных перенапряжений в первичной;

3) малое значение напряжения короткого замыкания и соответственно большие токи короткого замыкания, например, при замыкании точек  $aX$  (см. рисунок 1.21) напряжение сети  $U_1$  подводится к небольшой части витков  $Aa$ , которые обладают малым сопротивлением короткого замыкания.

### 1.10.2 Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы используют главным образом для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом они оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные трансформаторы дают возможность расширять пределы измерения приборов, т. е. измерять большие токи и напряжения с помощью сравнительно несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. В ряде случаев они служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле, обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов.

Измерительные трансформаторы подразделяют на два типа: *трансформаторы напряжения* и *трансформаторы тока*. Первые служат для включения вольтметров, а также других приборов, реагирующих на величину напряжения (например, обмоток напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле). Вторые служат для включения амперметров и токовых обмоток указанных приборов. Измерительные трансформаторы рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и 173 В).

Трансформатор напряжения (ТН). Его выполняют двухобмоточным, понижающим,  $w_1 > w_2$  (рисунок 1.29).

Так как сопротивления обмоток вольтметра и других приборов, подключаемых к ТН, велики, то он практически работает в режиме ХХ

$$U_1 = U'_2 = k_U U_2, \quad (1.38)$$

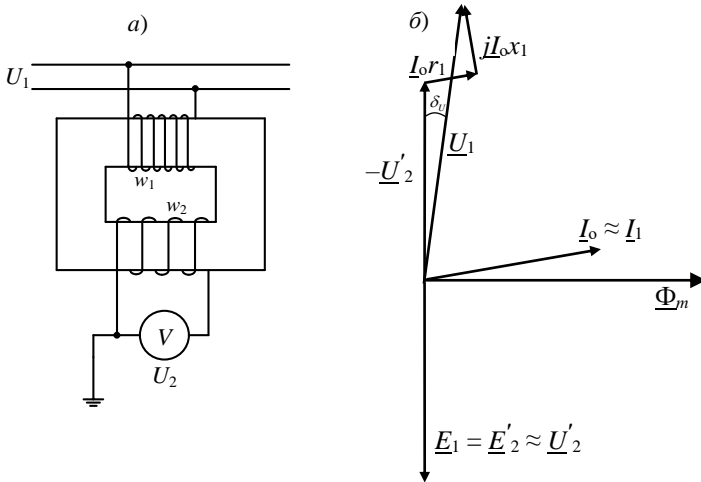


Рисунок 1.29 – Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора напряжения

где  $k_u$  – коэффициент трансформации,  $k_U = w_1 / w_2$ .

В действительности ток холостого хода  $I_0$  создает в трансформаторе падение напряжения, поэтому  $U'_2 \neq U_1$ , и между векторами этих напряжений имеется сдвиг по фазе  $\delta_U$ . В результате этого при измерениях образуются погрешности, которые существуют двух видов:

а) относительная погрешность напряжения:

$$\Delta u \% = \frac{U_2 k_U - U_1}{U_1} \cdot 100 \% ; \quad (1.39)$$

б) угловая погрешность  $\delta_U$ ; за величину её принимают угол между векторами  $U_1$  и  $-U'_2$ . Последняя влияет на результаты измерений, выполненных с помощью ваттметров, счетчиков, фазометров и других приборов, показания которых зависят не только от величины тока и напряжения, но и от угла сдвига фаз между ними.

В зависимости от величины допускаемых погрешностей стационарные трансформаторы напряжения подразделяются на ряд классов точности.

Для уменьшения погрешностей  $\Delta u\%$  и  $\delta_U$  сопротивления обмоток трансформатора  $z_1$  и  $z_2$  делают по возможности малыми, а магнитопровод выполняют из высококачественной электротехнической стали достаточно большого поперечного сечения, чтобы было  $B = 0,6 \div 0,8$  Тл. Благодаря этому обеспечивается значительное уменьшение тока холостого хода.

С целью обеспечения безопасности обслуживающего персонала и приборов одна точка вторичной обмотки ТН заземляется.

ТН выполняются однофазными и трехфазными.

*Трансформатор тока* (ТТ). Его выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рисунок 1.30) или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода. Первичную обмотку трансформатора тока включают в линию последовательно с нагрузкой, а к его вторичной обмотке подключают измерительный прибор.

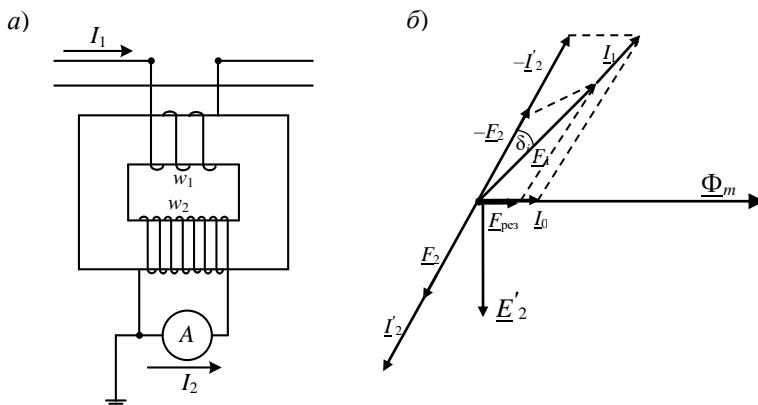


Рисунок 1.30 – Схема включения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора тока

Сопротивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому он практически работает в режиме короткого замыкания, для которого

$$I_1 \approx I_2' = I_2 / k_I, \quad (1.40)$$

где  $k_I$  – коэффициент трансформации,  $k_I = w_1 / w_2$ .

В действительности из-за наличия намагничивающего тока  $I_\mu$ ,  $I_\mu \approx I_0$ , в рассматриваемом трансформаторе  $I_1 \neq I_2'$  и между векторами этих токов имеется угол  $\delta_i$ . В результате возникает относительная токовая погрешность ( $\Delta i\%$ ) и угловая, измеряемая углом  $\delta_i$ .

$$\Delta i\% = \frac{I_2/k_1 - I_1}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.41)$$

В зависимости от величины допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяются на ряд классов точности.

Для уменьшения  $\Delta i\%$  и  $\delta_I$  магнитопроводы трансформаторов тока изготавливают из высококачественной электротехнической стали достаточно большого сечения так, чтобы было  $B = 0,06 \dots 0,1$  Тл. При этом отсутствует насыщение магнитопровода, намагничивающий ток будет очень мал и им можно пренебречь в расчетах.

Следует отметить, что размыкание цепи вторичной обмотки ТТ недопустимо. В этом случае трансформатор переходит в режим холостого хода и его результирующая МДС, которая в рабочем режиме была мала, становится равной  $\underline{F}_{\text{рез}} = \underline{F}_1$  (см. рисунок 1.30, б). В результате резко (в десятки раз) возрастает магнитный поток в магнитопроводе и индукция в стали достигает значения более 2 Тл. Соответственно с этим резко возрастают потери в стали, и трансформатор может сгореть.

Еще большую опасность представляет резкое повышение напряжения на зажимах вторичной обмотки до нескольких сот и даже тысяч вольт. Для предотвращения режима холостого хода нужно, при отключении измерительных приборов, замыкать вторичную обмотку трансформатора тока накоротко.

Трансформаторы тока широко применяются в виде токовых клещей. Замкнутый сердечник может размыкаться и внутрь клещей помещают провод с током, который надо измерить. Токоизмерительные клещи снабжены многопредельным амперметром и, таким образом, можно измерять силу тока без разрыва цепи.

*Применение измерительных трансформаторов для измерения больших мощностей или энергий.* При измерении больших мощностей токовую обмотку ваттметра подключают к вторичной обмотке трансформатора тока, а обмотку напряжения ваттметра к вторичной обмотке трансформатора напряжения. Тогда ваттметр показывает активную мощность  $P_2$ , пропорциональную активной мощности  $P_1$  первичной цепи:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (1.42)$$

где  $U_1$  – напряжение;

$I_1$  – ток первичной цепи;

$\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности первичной цепи.

После подстановки значений  $U_1$  и  $I_1$  имеем:

$$P_1 = k_U U_2 I_2 \frac{1}{k_I} \cos \varphi_2 = k_P P_2. \quad (1.43)$$

В (1.43) сделано допущение, что  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

Обычно  $k_U > 1$ , а  $k_I < 1$ , тогда коэффициент пропорциональности по мощности  $k_P = k_U / k_I \gg 1$ .

На результат измерения мощности  $P_1$  влияют не только погрешности трансформатора по напряжению и току, но и угловые погрешности, в результате чего  $\varphi_1 \neq \varphi_2$ .

## 1.12 Трехобмоточные трансформаторы

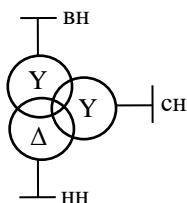


Рисунок 1.31 – Пример условного изображения трехобмоточного трансформатора

В силовой энергетике для питания сетей разным напряжением применяют трехобмоточные трансформаторы (рисунок 1.31). Экономическая целесообразность их применения объясняется тем, что один такой трансформатор заменяет два двухобмоточных трансформатора, вследствие чего капитальные затраты на сооружение подстанции уменьшаются и схема коммутации становится проще. В трехобмоточном трансформаторе *на каждую фазу приходится три обмотки*. Существуют трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками.

За номинальную мощность такого трансформатора принимают номинальную мощность наиболее нагружаемой его обмотки.

Токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводят к числу витков этой, наиболее мощной обмотки. Принцип работы трехобмоточного трансформатора по существу не отличается от принципа работы обычного двухобмоточного трансформатора. Рассмотрим основные уравнения трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой, имеющего наибольшее распространение. Первичная (наиболее мощная) обмотка этого трансформатора является намагничивающей и создает в магнитопроводе магнитный поток, который сцепляется с двумя вторичными обмотками и наводит в них ЭДС  $\underline{E}_2$  и  $\underline{E}_3$ . Аналогично двухобмоточному трансформатору, запишем уравнение МДС:

$$\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 + \underline{I}_3 w_3 = \underline{I}_0 w_1.$$

Разделив (3.1) на  $w_1$ , получим уравнения токов:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 = \underline{I}_0; \quad \underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / k_{12}; \quad \underline{I}'_3 = \underline{I}_3 / k_{13},$$

где  $k_{12}$  и  $k_{13}$  – коэффициенты трансформации соответственно между обмотками  $w_1, w_2$  и  $w_1, w_3$ .

Пренебрегая током холостого хода, получим упрощенное уравнение токов трехобмоточного трансформатора:

$$\underline{I}_1 \approx -(\underline{I}'_2 + \underline{I}'_3).$$

Из последнего выражения видно, что, первичный ток трехобмоточного трансформатора равен не арифметической, а геометрической сумме приведенных вторичных токов. Учитывая это, первичную обмотку трехобмоточного трансформатора рассчитывают на мощность, меньшую

арифметической суммы номинальных мощностей обеих вторичных обмоток.

### 1.12 Переходные процессы и перенапряжения в трансформаторах

При включении трансформатора или коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки амперметр в цепи первичной обмотки может зарегистрировать значительное превышение тока над номинальным.

*Включение трансформатора в сеть.* В этом случае результирующий магнитный поток можно рассматривать как сумму трех составляющих:

$$\Phi = \Phi_{уст} + \Phi_{пер} \pm \Phi_{ост},$$

где  $\Phi_{уст}$  – установившийся магнитный поток;  $\Phi_{пер}$  – магнитный поток переходного процесса;  $\Phi_{ост}$  – магнитный поток остаточного магнетизма, направленный согласно (знак «+») или встречно (знак «-») установившемуся потоку (рисунок 1.32).

Магнитный поток переходного процесса затухающий и постоянен по направлению.

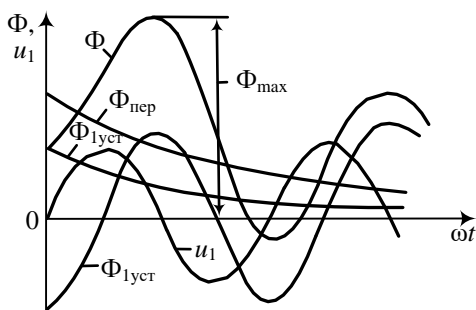


Рисунок 1.32 – Графики процессов при включении трансформатора

Наиболее неблагоприятный случай включения трансформатора в сеть будет при потоке остаточного магнетизма, направленном встречно установившемуся потоку, и мгновенном значении первичного напряжения  $u_1 = 0$ . При этом установившийся магнитный поток  $\Phi_{уст}$  будет максимальным, так как он отстает по фазе от напряжения на угол приблизительно  $90^\circ$ . Магнитный поток  $\Phi$  становится наибольшим приблизительно через половину периода после включения трансформатора. Если магнитопровод трансформатора не насыщен, то в момент включения трансформатора в первичной обмотке появится намагничивающий ток, пропорциональный магнитному потоку. Если же магнитопровод трансформатора насыщен, то при включении трансформатора намагничивающий ток включения достигает значительной силы, называемой *сверхтоком холостого хода*. При наиболее неблагоприятных

условиях сверхтока холостого хода может в 6–8 раз превысить номинальное значение первичного тока.

Так как длительность переходного процесса невелика и не превышает нескольких периодов переменного тока, то ток включения для трансформатора не опасен. Однако его следует учитывать при регулировке аппаратуры защиты, чтобы в момент включения трансформатора не произошло его неправильного отключения от сети. Бросок тока включения следует также учитывать при наличии в цепи первичной обмотки трансформатора чувствительных измерительных приборов. Во избежание поломки этих приборов нужно до включения трансформатора в сеть шунтировать его обмотки.

*Внезапное короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора.* Короткое замыкание – это аварийный режим который может привести к разрушению трансформатора. Оно возникает из-за различных неисправностей: механического повреждения изоляции или ее электрического пробоя при перенапряжениях, ошибочных действиях обслуживающего персонала и др.

При внезапном коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки в трансформаторе возникает переходный процесс, сопровождаемый возникновением большого мгновенного тока короткого замыкания  $i_k$ . Этот ток можно рассматривать как результирующий двух токов установившегося тока  $i_{k.уст}$  и тока переходного процесса  $i_{k.пер}$ , постоянного по направлению, но убывающего по экспоненциальному закону

$$i_k = i_{k.уст} + i_{k.пер}.$$

Наиболее неблагоприятные условия могут быть в момент когда мгновенное значение первичного напряжения равно нулю ( $u_1 = 0$ ). На рисунке 1.33 построена кривая тока  $i_k$  для этого условия. Ток внезапного короткого замыкания (*ударный ток*) может достигать двойного значения установившегося тока и в 20–40 раз превышать номинальное значение тока.

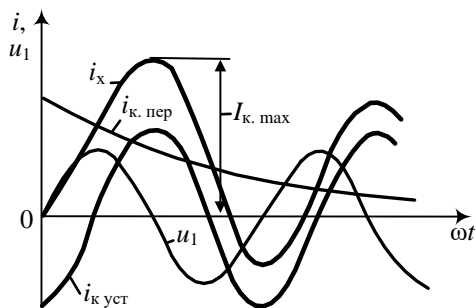


Рисунок 1.33 – Графики переходных процессов при коротком замыкании



Переходный процесс при коротком замыкании у трансформаторов малой мощности длится не более одного периода, а у трансформаторов большой мощности около 7 периодов. Затем трансформатор переходит в режим установившегося короткого замыкания, при этом в обмотках протекают токи  $i_{к.уст.}$ , значения которых хотя и меньше тока  $i_k$  при переходном процессе, но все же во много раз превышают номинальное значение тока. Через несколько секунд срабатывают защитные устройства, отключающие трансформатор от сети. Но несмотря на кратковременность процесса короткого замыкания, он представляет собой значительную опасность для обмоток трансформатора:

- чрезмерно большой ток резко повышает температуру обмотки, что может повредить ее изоляцию;

- резко увеличиваются электромагнитные силы в обмотках.

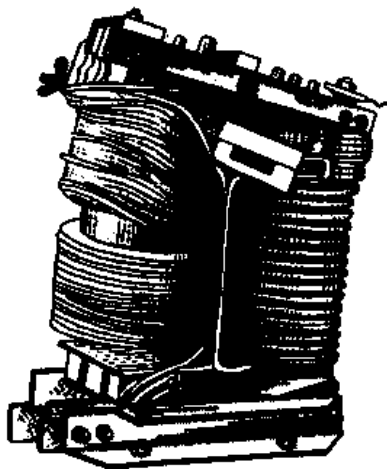


Рисунок 1.34 – Пример разрушения обмоток трансформатора при коротком замыкании

Все это необходимо учитывать при проектировании трансформаторов и создавать достаточно прочные конструкции обмоток и надежное их крепление на сердечниках (рисунок 1.34).

*Перенапряжения в трансформаторах.* В зависимости от причин, их порождающих, перенапряжения разделяются на два вида:

- внутренние перенапряжения, возникающие в процессе коммутационных операций, например отключения, включения трансформатора или в аварийных процессах (короткое замыкание, дуговые замыкания на землю и др.). Значение внутреннего перенапряжения обычно составляет  $(2,5 \div 3,5)U_n$ .

- внешние (атмосферные) перенапряжения, обусловленные прямыми ударами молний в провода,

опоры линий электропередач или грозowymi разрядами, создающими в проводах линии электромагнитные волны высокого напряжения. Значение перенапряжения в этом случае может достигать нескольких тысяч киловольт.

На процессы, происходящие в трансформаторе при перенапряжениях, существенное влияние оказывает скорость нарастания волны напряжения. При подходе волны напряжения к трансформатору напряжение между зажимом обмотки и землей нарастает весьма быстро.

К мерам по защите трансформаторов от перенапряжений относятся:

– внешняя защита: применение заземленных тросов и вентильных разрядников. Эти меры позволяют ограничить амплитуду волн напряжения, подходящих к трансформатору.

– внутренняя защита: усиление изоляции входных витков; установка емкостных колец и электростатических экранов (емкостная компенсация) и прочие мероприятия.

### Пример решения задачи 1

Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность  $S_n = 250$  ВА, первичное напряжение  $U_{1н} = 220$  В, вторичное напряжение  $U_{2н} = 24$  В, процентное значение тока холостого хода  $i_0 = 20$  %, мощность потерь в сердечнике трансформатора  $P_0 = 10$  Вт, процентное значение напряжения короткого замыкания  $u_k$  составляет 7%, мощность потерь короткого замыкания трансформатора  $P_{кн} = 15$  Вт

Определить:

1. Коэффициент трансформации трансформатора  $k$ , номинальные токи первичной  $I_{1н}$  и вторичной  $I_{2н}$  обмоток.

2. Начертить схему замещения трансформатора и определить параметры Т-образной схемы замещения.

3. КПД при коэффициенте нагрузки  $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$  и коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2 = 0,8$ . На основании расчетов построить зависимость  $\eta = f(\beta)$ .

4. Процентное изменение вторичного напряжения  $\Delta u\%$  и вторичное напряжение  $U_2$  при  $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$ . На основании расчетов построить зависимость  $U_2 = f(\beta)$ .

5. Характер нагрузки, при котором вторичное напряжение не зависит от коэффициента  $\beta$ .

*Решение.* 1. Коэффициент трансформации однофазного трансформатора

$$k = U_{1н} / U_{2н} = 220 / 24 = 9,17.$$

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1н} = S_n / U_{1н} = 250 / 220 = 1,14 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки

$$I_{2н} = S_n / U_{2н} = 250 / 24 = 10,42 \text{ А.}$$

2. Т-образная схема замещения однофазного трансформатора приведена на рисунке 1.35.

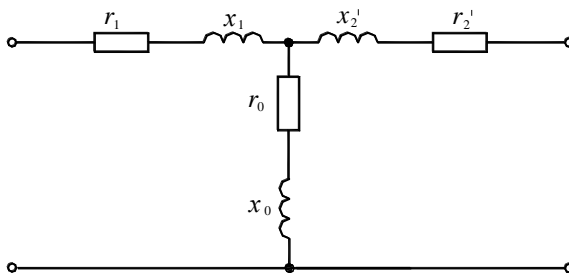


Рисунок 1.35 – Т-образная схема замещения однофазного трансформатора

Определение параметров схемы замещения начинаем с расчёта тока холостого хода

$$I_o = \frac{i_o \cdot I_{1н}}{100} = \frac{20}{100} \cdot 1,14 = 0,23 \text{ А,}$$

тогда полное сопротивление намагничивающей ветви:

$$z_o = U_{1н}/I_o = 220 / 0,23 = 956,5 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление намагничивающей ветви

$$r_o = \frac{P_o}{I_o^2} = \frac{10}{0,23^2} = 189,04 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви

$$x_o = \sqrt{z_o^2 - r_o^2} = \sqrt{956,5^2 - 189,04^2} = 937,63 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1н}^2}{S_n} = \frac{7}{100} \cdot \frac{220^2}{250} = 13,55 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k = P_{кн}/I_{1н}^2 = 15/1,14^2 = 11,62 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{13,55^2 - 11,62^2} = 6,98 \text{ Ом.}$$

Активные сопротивления обмоток приведенного трансформатора

$$r_1 = r_2' = r_k/2 = 11,62/2 = 5,81 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора

$$x_1 = x_2' = x_k/2 = 6,98/2 = 3,49 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки реального трансформатора

$$r_2 = r_2'/k^2, \quad x_2 = x_2'/k^2.$$

3. КПД при коэффициенте нагрузки  $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$  и коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2 = 0,8$  можно определить из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{P_o + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_n \cos\varphi_2 + P_o + \beta^2 P_{кн}}.$$

Результаты расчета КПД представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты расчета КПД

$\beta$	0	0,25	0,5	0,75	1
$\eta$	0	0,82	0,88	0,89	0,89

На основании результатов расчета, представленных в таблице 1.2, построим зависимость  $\eta = f(\beta)$ , представленную на рисунке 1.36.

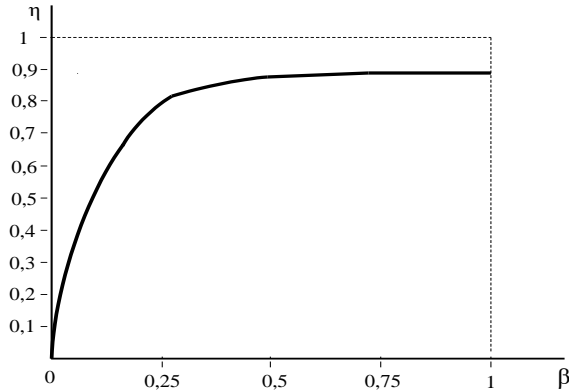


Рисунок 1.36 – Зависимость  $\eta = f(\beta)$

4. Процентное изменение вторичного напряжения  $\Delta u\%$  и вторичное напряжение  $U_2$  при  $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1)$  для активно-индуктивной нагрузки  $\cos\varphi_2 = 0,8$  определяем, используя выражение:

$$\Delta u\% = \beta \left( \frac{I_{\text{лн}} r_k \cos \varphi_2 + I_{\text{лн}} x_k \sin \varphi_2}{U_{\text{лн}}} \right) \cdot 100 \%, U_2 = \left( 1 - \frac{\Delta u\%}{100\%} \right) U_{2\text{н}}.$$

Результаты расчета  $\Delta u\%$  и  $U_2$  представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты расчета зависимости  $U_2 = f(\beta)$

$\beta$	0	0,25	0,5	0,75	1
$\Delta u\%$	0	1,74	3,48	5,22	6,96
$U_2, \text{В}$	24	23,58	23,16	22,75	22,33

На основании результатов расчета, представленных в таблице 1.3, построим зависимость  $U_2 = f(\beta)$ , представленную на рисунке 1.37.

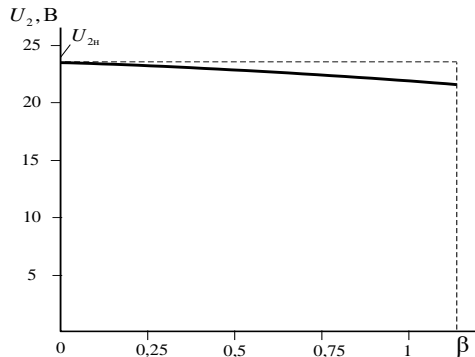


Рисунок 1.37 – Внешняя характеристика однофазного трансформатора

4. Напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки не будет зависеть от коэффициента нагрузки  $\beta$  при выполнении условия

$$I_{1н} r_k \cos \varphi_2 + I_{1н} x_k \sin \varphi_2 = 0,$$

значит

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = -r_k/x_k.$$

Отрицательный знак в правой части уравнения указывает на активно-емкостной характер нагрузки, а величина угла

$$\varphi_2 = -\operatorname{arctg}(r_k/x_k) = -\operatorname{arctg}(11,62/6,98) = -59^\circ.$$

### Пример решения задачи 2

Трёхфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность  $S_n = 63000$  ВА, номинальные напряжения  $U_{1н} = 10000$  В и  $U_{2н} = U_{20} = 400$  В, потери холостого хода  $P_0 = 265$  Вт, потери короткого замыкания  $P_{кн} = 1280$  Вт, напряжение короткого замыкания  $u_k$  составляет 5,5 % от номинального значения, ток холостого хода  $i_0$  составляет 2,8 % от номинальной величины. Определить: а) номинальные фазные напряжения первичной  $U_{1ф}$  и вторичной  $U_{2ф}$  обмоток при схеме соединения  $Y/\Delta$ ; б) фазный  $k_f$  и линейный  $k_l$  коэффициенты трансформации; в) номинальные токи первичной  $I_{1н}$  и вторичной  $I_{2н}$  обмоток; г) КПД при коэффициенте нагрузки  $\beta = 0,5$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ ; д) абсолютное значение напряжения короткого замыкания; е) параметры схемы замещения трансформатора; ж) процентное изменение напряжения на вторичной обмотке при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  ( $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$ ) и номинальном токе; рассчитать и построить внешнюю характеристику для указанных в предыдущем пункте видов нагрузки.

*Решение.* Так как первичная обмотка соединена звездой, то фазное напряжение первичной обмотки

$$U_{1ф} = U_{1н} / \sqrt{3} = 10000 / \sqrt{3} = 5780 \text{ В}.$$

При соединении вторичных обмоток треугольником имеем

$$U_{2ф} = U_{2н} = 400 \text{ В}.$$

Коэффициент трансформации фазных напряжений

$$k_f = U_{1ф} / U_{2ф} = 5780 / 400 = 14,45.$$

Коэффициент трансформации линейных напряжений

$$k_l = U_{1н} / U_{2н} = 10000 / 400 = 25.$$

Линейный номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1н} = S_n / (\sqrt{3} U_{1н}) = 63000 / (\sqrt{3} \cdot 10000) = 3,64 \text{ А}.$$

Линейный номинальный ток вторичной обмотки

$$I_{2н} = S_n / (\sqrt{3} U_{2н}) = 63000 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 91 \text{ А}.$$

КПД трансформатора при заданной нагрузке с  $\beta = 0,5$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  можно определить из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}} = 1 - \frac{265 + 0,5^2 \cdot 1280}{0,5 \cdot 63000 \cdot 265 + 0,5^2 \cdot 1280} = 0,81.$$

Абсолютное значение фазного напряжения короткого замыкания

$$U_{\text{фкн}} = u_{\text{к}} U_{1\text{нф}} / 100 = 5,5 \cdot 5780 / 100 = 317,9 \text{ В.}$$

Схема замещения трансформатора приведена на рисунке 1.38.

Определение параметров схемы замещения начинаем с расчёта полного сопротивления намагничивающей ветви:

$$z_0 = 100 U_{1\text{нф}} / (i_0 I_{1\text{н}}) = 100 \cdot 5780 / (2,8 \cdot 3,64) = 56711 \text{ Ом.}$$

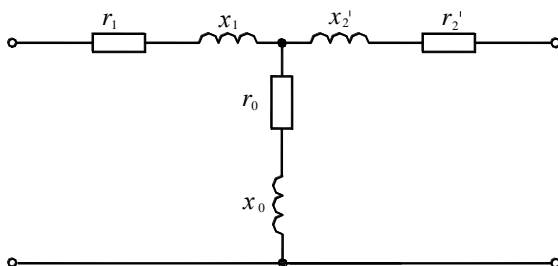


Рисунок 1.38 – Схема замещения одной фазы трёхфазного трансформатора

Активное сопротивление намагничивающей ветви

$$r_0 = P_0 / (3 I_0^2) = 10^4 P_0 / (3 i_0^2 I_{1\text{н}}^2) = 10^4 \cdot 265 / (3 \cdot 2,8^2 \cdot 3,64^2) = 8503 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{56711^2 - 8503^2} = 56070 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{\text{к}} = U_{\text{фкн}} / I_{1\text{н}} = 317,9 / 3,64 = 87,3 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_{\text{к}} = P_{\text{к}} / (3 I_{1\text{н}}^2) = 1280 / (3 \cdot 3,64^2) = 32,2 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2} = \sqrt{87,3^2 - 32,2^2} = 81,1 \text{ Ом.}$$

Активные сопротивления обмоток приведенного трансформатора

$$r_1 = r_2' = r_{\text{к}} / 2 = 32,2 / 2 = 16,1 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора

$$x_1 = x_2' = x_{\text{к}} / 2 = 81,1 / 2 = 40,5 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки реального трансформатора

$$r_2 = \frac{r_2'}{k_{\Phi}^2}, \quad x_2 = \frac{x_2'}{k_{\Phi}^2}.$$

Процентное изменение напряжения при номинальном токе ( $\beta = 1$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$ ) для активно-индуктивной нагрузки ( $\varphi_2 > 0$ )

$$\begin{aligned} \Delta u\% &= \beta \left( \frac{I_{1н} r_k \cos \varphi_2}{U_{1нф}} + \frac{I_{1н} x_k \sin \varphi_2}{U_{1нф}} \right) \cdot 100 \% = \\ &= 1 \cdot \sqrt{3} \left( \frac{3,64 \cdot 32,2 \cdot 0,8}{10000} + \frac{3,64 \cdot 81,1 \cdot 0,6}{10000} \right) \cdot 100 \% = 4,68 \%, \end{aligned}$$

для активно-ёмкостной нагрузки ( $\varphi_2 < 0$ )

$$\begin{aligned} \Delta u\% &= \beta \left( \frac{I_{1н} r_k \cos \varphi_2}{U_{1нф}} + \frac{I_{1н} x_k \sin \varphi_2}{U_{1нф}} \right) \cdot 100 \% = \\ &= 1 \cdot \sqrt{3} \left( \frac{3,64 \cdot 32,2 \cdot 0,8}{10000} - \frac{3,64 \cdot 81,1 \cdot 0,6}{10000} \right) \cdot 100 \% = -1,44 \% . \end{aligned}$$

Аналогично задаче 1 строим график  $U_2 = f(\beta)$ , представленный на рисунке 1.39. Напряжение на вторичной обмотке при активно-индуктивной нагрузке находим из выражения:

$$U_2 = \frac{U_{1нф}}{k_{\phi}} \left( 1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right) = \frac{5780}{14,45} \left( 1 - \frac{4,68}{100} \right) = 381,2 \text{ В},$$

при активно-ёмкостной нагрузке

$$U_2 = \frac{U_{1нф}}{k_{\phi}} \left( 1 + \frac{\Delta u\%}{100} \right) = \frac{5780}{14,45} \left( 1 + \frac{1,44}{100} \right) = 405,7 \text{ В}.$$

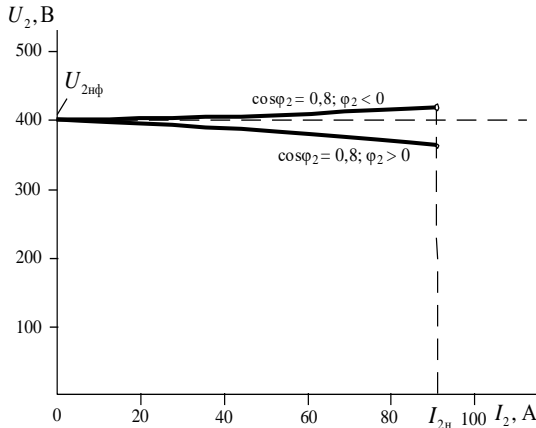


Рисунок 1.39 – Внешние характеристики трансформатора при различных характерах нагрузки



## Контрольные вопросы

1. Каковы условия проведения и назначение опыта ХХ трансформатора?
2. Напишите уравнение МДС трансформатора и объясните физический смысл его составляющих.
3. Что называют приведенными величинами вторичной обмотки? Как производится приведение параметров вторичной обмотки к параметрам первичной?
4. Какие величины определяются в опыте ХХ, по какой схеме он производится?
5. Начертите схему опыта КЗ трансформатора. Какие величины определяются в этом опыте?
6. Что называется напряжением КЗ? Каков его физический смысл?
7. Почему при подключении постоянного напряжения, равного номинальному это может привести к выходу из строя трансформатора?
8. На чем основан принцип действия трансформатора.
9. Какой магнитный поток называется основным, какой – потоком рассеяния?
10. Напишите уравнения напряжения для первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений.
11. Как изменится вторичное напряжение трансформатора, если его индуктивную нагрузку заменить емкостной?
12. Почему в качестве номинальной мощности трансформатора задается полная мощность в  $kV \cdot A$ ?
13. В каких случаях целесообразно применение автотрансформаторов?
14. Какие трансформаторы используются для расширения пределов измерительных приборов?
15. Почему в опыте холостого хода можно пренебречь потерями в меди, а опыте короткого замыкания – потерями в стали?
16. Какие потери называются постоянными, какие переменными?
17. Объясните, почему магнитный поток в трансформаторе практически не зависит от нагрузки.
18. Как устроены трехфазные трансформаторы и какие схемы соединения могут они иметь?
19. Для какой цели на электрических станциях в начале линии электропередачи устанавливают повышающие трансформаторы?
20. С какой целью в трансформаторе используется ферромагнитный сердечник? Почему сердечник трансформатора собирается из отдельных изолированных листов электротехнической стали?
21. Почему ток холостого хода имеет малую величину и как он определяется?
22. Какими элементами в схеме замещения учитываются первичная и вторичная обмотки, магнитопровод трансформатора?
23. Как рассчитываются параметры схемы замещения трансформатора?
24. При какой нагрузке (активной, активно-индуктивной или активно-емкостной) напряжение на зажимах потребителей – минимальное?
25. Каковы причины изменения вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки?
26. Что вызывает нагрев трансформатора и почему ограничивается температура нагрева?
29. В каком режиме работают измерительные трансформаторы напряжения и в каком – трансформаторы тока?

## 2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1 Общие сведения. Устройство

Асинхронная машина – это машина, в которой при работе возбуждается вращающееся магнитное поле, но ротор которой вращается асинхронно, т.е. со скоростью, отличной от скорости поля.

Асинхронные машины применяют главным образом в качестве электродвигателей. В зависимости от числа фаз статорной обмотки различают одно-, двух- и трехфазные асинхронные двигатели. Наибольшее распространение получили трехфазные электродвигатели: для привода колесных пар электровозов, станков, насосов, вентиляторов и т. д. Они потребляют около 50 % электрической энергии, вырабатываемой электрическими станциями. Двухфазные асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт применяют в системах автоматического управления в качестве исполнительных двигателей. Однофазные двигатели используют в бытовых приборах.

Трехфазные электродвигатели подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (их называют двигателями с контактными кольцами). Конструктивно статоры этих двигателей отличий не имеют. По степени защиты двигатели выполняют закрытыми обдуваемыми (исполнение IP44, IP54) и защищенными (исполнение IP23). В закрытых двигателях со степенями защиты IP44 и IP54 более 90 % тепла, обусловленного потерями мощности, отводится воздухом с поверхности корпуса.

Двигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее дешевыми, надежными и поэтому самыми распространенными из всех электрических двигателей; электропромышленность выпускает их десятки миллионов в год.

Появление трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей связано с именем М. О. Доливо-Добровольского, изобретены они были им в 1889 г. Предложенная М. О. Доливо-Добровольским конструкция асинхронных двигателей в основных чертах сохранилась до наших дней.

На рисунке 2.1 показан общий вид наиболее распространенного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения. В сердечнике статора 1 расположена трехфазная обмотка 2. Обмотка ротора 3 – короткозамкнутая, в виде «беличьего колеса» (общепринятое название «обмотка в виде беличьей клетки»).

Сердечник статора закрепляют в корпусе 4, а сердечник ротора 5 – на валу 6 (машины малой мощности) или на ободу с крестовиной и втулкой, надетой на вал (машины большой мощности). Вал ротора вращается в подшипниках 7, установленных в подшипниковых щитах 8, прикрепляемых к корпусу статора. Конструкция оболочки (корпус, щиты и т. д.) в значительной степени зависит от исполнения машины по степени защищенности и от выбранной системы охлаждения. В обдуваемой машине (см. рисунок 2.1) для лучшего охлаждения корпус снабжен ребрами 9.

Центробежный вентилятор 10, расположенный на валу двигателя снаружи оболочки машины, обдувает ребристый корпус двигателя. Вентилятор закрыт воздухонаправляющим кожухом 11.

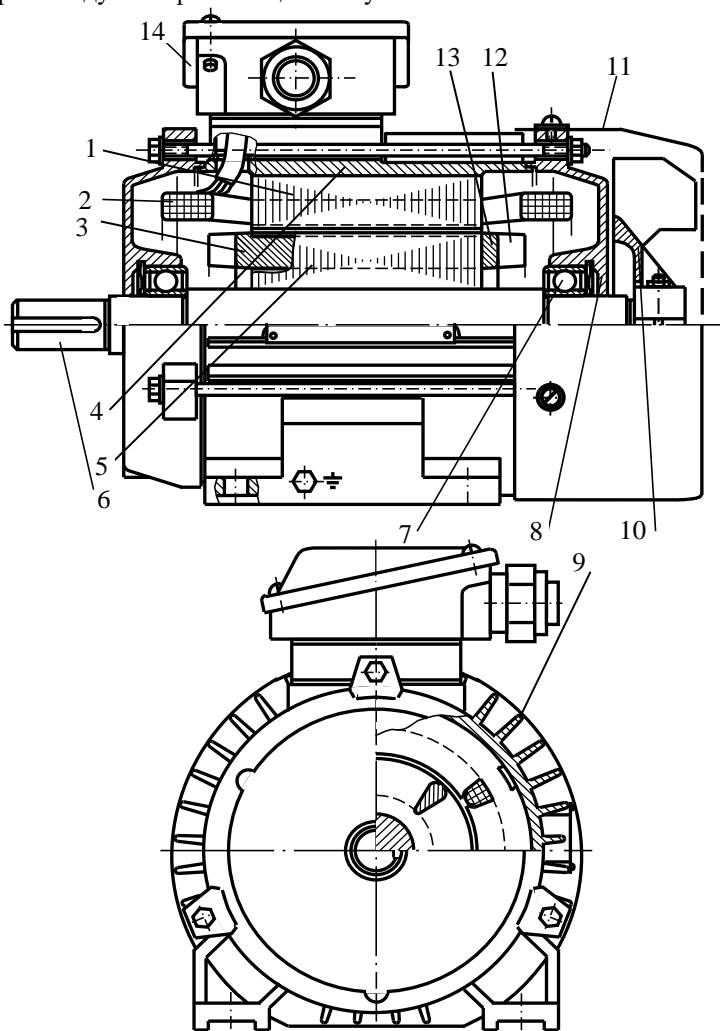


Рисунок 2.1 – Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Внутри машины воздух перемешивается вентиляционными лопатками 12, отлитыми вместе с короткозамыкающими кольцами 13 обмотки 3 ротора. В мощных двигателях для повышения интенсивности охлаждения воздух прогоняется через аксиальные каналы ротора, образованные

воздухопроводящими трубками и дисками, предотвращающими попадание наружного воздуха и влаги к обмоткам статора. На корпусе крепится коробка выводов 14, в которой установлена клеммная панель с выведенными концами обмотки статора. Количество выводов обмотки может быть шесть (начала и концы всех трех фаз обмотки, для возможности соединения обмотки статора по схеме «звезда» или «треугольник») или три, если в двигателе предусмотрена лишь одна схема соединения обмоток статора.

Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник статора (магнитопровод) набирают из отштампованных кольцеобразных листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. С внутренней стороны кольца выштампованы пазы для размещения обмотки. Листы изолируют оксидной пленкой или лаком и спрессовывают в сердечник, скрепляя его сваркой, скобками или шпильками. В машинах свыше 400 кВт в сердечниках для лучшего охлаждения выполняют радиальные каналы: разделяют сердечник на ряд пакетов с установкой между ними стальных прокладок.

В пазы магнитопровода статора укладывают обмотку, изготовленную из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Обмотки из провода прямоугольного сечения изготавливают в виде жестких секций и укладывают в открытые или полуоткрытые пазы. Обмотки из провода круглого сечения всыпают в полузакрытые пазы трапециoidalного сечения через шлиц в пазу. Концы фаз обмотки статора выводят на зажимы клеммной колодки машины.

Трехфазную обмотку статора можно соединять в «звезду» или «треугольник» в зависимости от напряжения сети. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения 220/380 В, то при напряжении сети 380 В обмотку статора соединяют в звезду, если же в сети напряжение 220 В, то обмотку статора соединяют в треугольник. В обоих случаях на фазу приходится напряжение 220 В.

В современных асинхронных машинах в качестве межвитковой и корпусной изоляции используют изоляционные материалы классов нагревостойкости *B* и *F*, а для специальных машин, работающих в тяжелых условиях, – материалы класса *H*.

Магнитопровод ротора также набирают из изолированных листов электротехнической стали с выштампованными пазами. Делается это для уменьшения потерь на вихревые токи. В короткозамкнутых роторах пазы заливают алюминием; при этом образуются стержни «беличьей клетки» (см. рисунок 2.1). Одновременно отливают короткозамыкающие торцевые кольца и вентиляционные лопасти. В более крупных машинах в пазы ротора вставляют медные (бронзовые, латунные) стержни, концы которых варивают (впаивают) в короткозамыкающие медные кольца.

Магнитопрод ротора вместе с короткозамкнутой обмоткой напрессовывают на вал.

Двигатели с фазным ротором находят меньшее применение, чем с короткозамкнутым ротором, и выпускаются промышленностью главным образом мощностью свыше 100 кВт. На рисунке 2.2 представлен общий вид асинхронного двигателя с фазным ротором защищенного исполнения.

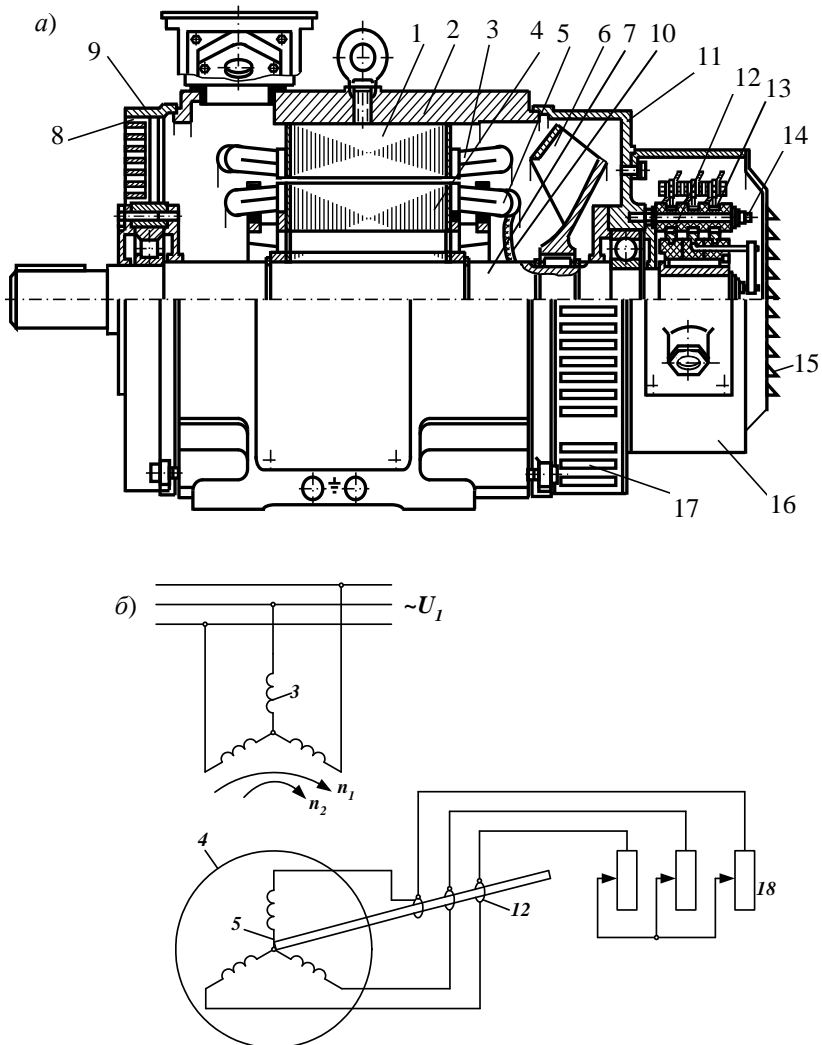


Рисунок 2.2 – Асинхронный двигатель с фазным ротором с аксиальной вентиляцией (а) и схема его включения (б)

Статор двигателя с фазным ротором конструктивно не отличается от статора двигателя с короткозамкнутым ротором. Контактные кольца 12 расположены вне оболочки машины. Выводные концы 10 обмотки ротора 5 проходят через центральное отверстие в валу 7 и подключаются к трем контактными кольцам 12 болтами. Щеткодержатели 13 со щетками прикрепляются щеточной траверсой 14 к подшипниковому щиту 11. Токосъемное устройство закрыто коробкой 16. В роторах этих двигателей применяют всыпную обмотку из провода круглого сечения или обмотку, состоящую из жестких секций, укладываемых в открытые пазы, в том числе из отдельных стержней, вкладываемых в полузакрытые пазы с торца. Обмотку ротора при изготовлении соединяют в звезду. Три конца от фазных обмоток присоединяют к контактными кольцам, установленным на вал двигателя. С помощью щеток, касающихся контактных колец, к обмотке ротора подключается трехфазный пусковой или регулировочный реостат.

Реостат называется пусковым, если служит только для пуска двигателя и работает короткое время, или регулировочным, если работает длительное время и служит для регулирования частоты вращения двигателя. Пусковой реостат выполняется проводом меньшего сечения и допускает большую плотность тока, чем регулировочный реостат.

#### *Серии асинхронных двигателей*

В настоящее время АД общего назначения выпускаются в виде серий. *Серия* – это ряд электрических машин, охватывающих определенные диапазоны мощностей, частот вращения и напряжения, имеющих однотипную конструкцию. В пределах серии характерны высокий уровень унификации деталей, узлов и их взаимозаменяемость. При серийном производстве удешевляется технология производства, уменьшается парк запасных частей.

В современных сериях размером, определяющим габарит машины, является высота оси вращения. За высоту оси вращения принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины. С этим параметром жестко связана мощность, установочные и присоединительные размеры.

В 1970-е гг. промышленность освоила выпуск двигателей серии 4А в 17 габаритах с высотой оси вращения от 50 до 355 мм при 34 ступенях мощности от 0,06 до 400 кВт. В настоящее время двигатели серии 4А широко распространены. Они предназначены для работы в сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 220, 380 и 660 В при продолжительном режиме работы S1 (ГОСТ 183–74). Двигатели изготавливаются на синхронные частоты вращения от 3000 до 500 об/мин. Например, АДМ100L6:

- АДМ (а может быть 5АИ, АИР, А и т.п.) – это серия электродвигателя;
- 100 – габарит АД – расстояние от центра вала до опорной поверхности лап в миллиметрах;

- $L$  – длина станины;
- $b$  – количество пар полюсов, этот двигатель имеет частоты вращения вала 1000 оборотов в минуту (2 – 3000 об/мин, 4 – 1500 об/мин и т. д.).

В двигателях с высотами оси вращения от 50 до 132 мм применяется изоляция класса нагревостойкости В (130 °С), в остальных- F (155 °С).

В конце 80-х гг. XX в. начал выпуск двигателей серии АИ, в которых применена более совершенная система вентиляции, широко используются более легкие и прочные алюминиевые сплавы и пластмассы, установлены подшипники с улучшенными виброакустическими характеристиками.

В сериях различают двигатели основного исполнения и с модификациями: повышенным скольжением, увеличенным пусковым моментом, многоскоростные.

## 2.2 Обмотки статора машин переменного тока

В машинах переменного тока статорная обмотка укладывается в пазы, находящиеся на внутренней поверхности магнитопровода статора. В машинах малой мощности применяют полузакрытую форму паза (рисунок 2.3, а), а у машин большей мощности – открытую (рисунок 2.3, б).

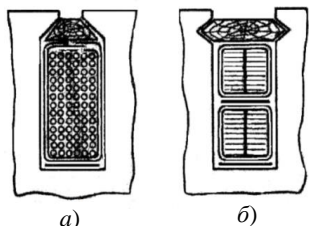


Рисунок 2.3 – Формы пазов магнитопровода статора

Виток – два последовательно соединенных между собой проводника, расположенных под соседними разноименными полюсами.

Катушка – несколько витков, уложенных в два паза и соединенных последовательно.

Части катушки, лежащие в пазах, называются пазовыми или активными, вне пазов – лобовыми.

Катушечная группа – несколько последовательно соединенных катушек одной фазы, их стороны лежат под двумя соседними полюсами.

Обмотка – несколько катушечных групп, уложенных в пазы и соединенных по определенной схеме.

Состоит обмотка из отдельных катушек, каждая из которых содержит большое количество витков. В катушке витки соединяются последовательно. Виток состоит из двух активных сторон и двух лобовых частей, с помощью которых активные стороны витка соединяются последовательно. Активной стороной называется та часть витка, которая находится в пазу магнитопровода.

Активные стороны витка размещаются в пазах на некотором расстоянии друг от друга. Это расстояние называется шагом обмотки  $y$ . Шаг обмотки – число зубцов, охватываемых сторонами обмотки, уложенной в пазы сердечника. Шаг называется диаметральным, если он равен полюсному делению  $\tau$  (шаг катушки может быть меньше диаметрального, т.е. укороченным).

$$y = \tau = \pi D / 2p,$$

где  $D$  – диаметр магнитопровода ротора;  
 $p$  – число пар полюсов.

### 2.2.1 Однофазные однослойные обмотки

Рассмотрим *сосредоточенную обмотку*. В такой обмотке витки катушки под одной парой полюсов помещены в двух пазах, один из которых находится под северным полюсом, а другой – под южным. Общий вид сосредоточенной обмотки при числе полюсов  $2p = 4$  и с последовательным соединением катушек показан на рисунке 2.4, *а*, а при параллельном – на рисунке 2.4, *б*. Для этой обмотки число пазов на плюс и фазу  $q = 1$ , а фазовый шаг обмотки  $y = \tau$ .

Формула ЭДС для сосредоточенной обмотки имеет следующий вид:

$$E_{\text{соср}} = E_{\text{витка}} w = 4,44 w f \Phi, \quad (2.1)$$

где  $w$  – число последовательно соединенных витков обмотки;

$\Phi$  – поток, приходящийся на фазу;

$f$  – частота тока в витках обмотки;

$E_{\text{витка}}$  – ЭДС витка.

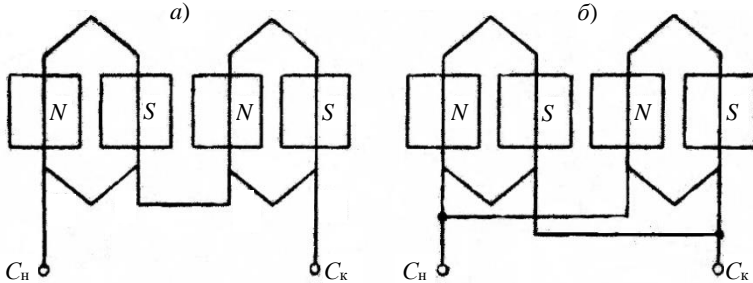


Рисунок 2.4 – Сосредоточенная однофазная однослойная обмотка:

*а* – последовательное соединение катушек; *б* – параллельное соединение катушек

Однако сосредоточенную обмотку не выполняют, так как это не позволяет полностью использовать сталь машины и увеличивает ее размеры. В действительности обмотку распределяют равномерно по пазам, выполненным в стальном сердечнике статора. Такую обмотку называют *распределенной*. Для нее  $q = 2, 3, 4$  и т. д.

В распределенной обмотке пазы сдвинуты относительно друг друга на угол  $\alpha$ , на такой же угол будут сдвинуты векторы ЭДС, которые индуцируются в катушках, расположенных в этих пазах.

Результирующая ЭДС группы катушек с  $q = 4$  равна векторной сумме ЭДС  $E_k$  отдельных катушек (рисунок 2.5, *а*):

$$\bar{E}_{\text{распр}} = \bar{E}_{k1} + \bar{E}_{k2} + \bar{E}_{k3} + \bar{E}_{k4}. \quad (2.2)$$

В сосредоточенной обмотке суммарная ЭДС группы катушек,



размещенных в одном пазу под полюсом, равна алгебраической сумме ЭДС катушек (рисунок 2.5, б):

$$E_{\text{соср}} = E_{k1} + E_{k2} + E_{k3} + E_{k4} = qE_k.$$

Отношение ЭДС распределенной обмотки к ЭДС сосредоточенной обмотки называют *коэффициентом распределения*:

$$k_p = E_{\text{соср}} / E_{\text{распр}} = (qE_k).$$

Практически коэффициент распределения определяют по формуле для ЭДС первой гармоники:

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (2.3)$$

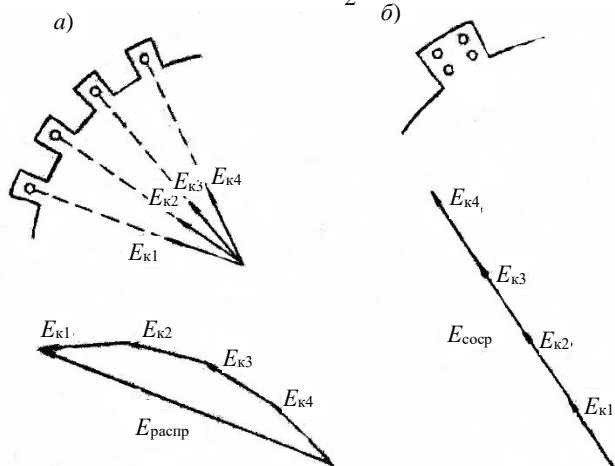


Рисунок 2.5 – ЭДС обмоток:  
а – распределенной; б – сосредоточенной

**Пример 2.1.** Найти коэффициент распределения обмотки, если  $q = 4$  и  $\alpha = 15^\circ$ .

*Решение.* Коэффициент распределения обмотки

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 15^\circ}{2}}{4 \sin \frac{15^\circ}{2}} \approx 0,96.$$

Поскольку коэффициент распределения меньше единицы, то ЭДС в фазе распределенной обмотки будет меньше, чем в сосредоточенной. Это уменьшение величины ЭДС отражает коэффициент распределения  $k_p$ , который необходимо ввести в формулу ЭДС обмотки:

$$E_{\text{распр}} = 4,44k_p w f \Phi. \quad (2.4)$$

**Пример 2.2.** Выполнить однофазную распределенную обмотку со следующими

данными:  $q = 4$ ;  $2p = 4$ ;  $z = 24$ ;  $y = \tau$ .

*Решение.* Шаг обмотки

$$y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

Выполняем обмотку с паза 1. Для определения номера паза, в который следует уложить конец первой секции, к номеру паза, где находится начало секции, прибавляем  $y$ :  $1 + y = 1 + 6 = 7$ .

Так как  $q = 4$ , то аналогично укладываем еще три секции в пазы 2–8; 3–9 и 4–10 (рисунок 2.6, *a*).

После намотки группы катушек под одной парой полюсов определяем начало второй группы катушек под второй парой полюсов. Для этого к номеру паза, в котором лежит начало первой секции, прибавляем  $2\tau$ :

$$1 + 2\tau = 1 + 2 \cdot 6 = 13.$$

Вторую группу катушек укладываем так же, как и первую.

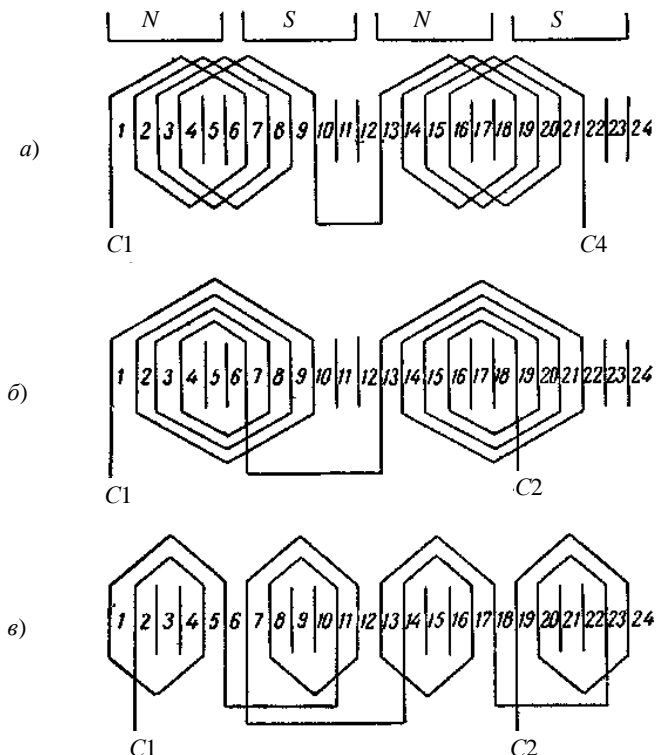


Рисунок 2.6 – Однофазная распределенная обмотка:

*a* – с перекрещиванием лобовых соединений; *b* – без перекрещивания лобовых соединений; *в* – с укорочением лобовых соединений

В данной обмотке перекрещиваются лобовые соединения, что создает

неудобство при ее выполнении. Этот недостаток можно устранить, укладывая в пазы следующим образом: 1–10, 2–9, 3–8 и 4–7 (рисунок 2.6, б).

Обмотку можно выполнить несколько иначе, не укорачивая ее шага. Для этого две катушки наматывают в одном направлении, а две другие – в противоположном, соединяя катушки так, чтобы их ЭДС складывались (рисунок 2.6, в).

### 2.2.2 Трехфазные однослойные обмотки

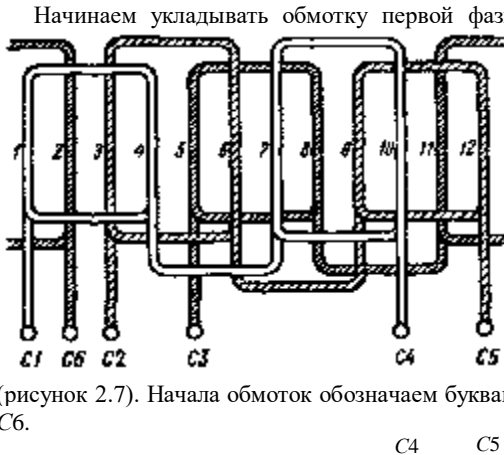
Трехфазная обмотка статора составлена из трех однофазных обмоток, начала которых смещены на 120 электрических градусов, или  $2\tau/3$ .

В самом простом случае для выполнения трехфазной сосредоточенной обмотки нужно иметь три катушки на каждую пару полюсов.

**Пример 2.3.** Выполнить трехфазную сосредоточенную обмотку, имеющую следующие данные:  $q = 1; m = 3; 2p = 4; z = 12$ .

*Решение.* Рассчитаем обмотку:

$$y = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{12}{4} = 3.$$



Начинаем укладывать обмотку первой фазы в первый паз и выполняем ее аналогично однофазной обмотке. Для

определения номера паза, в которой нужно уложить начало обмотки второй фазы, к номеру паза, где лежит начало обмотки первой фазы, прибавляем

$$\frac{2}{3} \tau = \frac{2}{3} \cdot 3 = 2 :$$

$$1 + y_\phi = 1 + 2 = 3.$$

Вторую и третью фазы выполняем аналогично первой

(рисунком 2.7). Начала обмоток обозначаем буквами C1, C2 и C3, а концы — C4, C5 и C6.

Рисунок 2.7 – Схема простейшей трехфазной однослойной обмотки статора

В действительности обмотки статоров синхронных генераторов выполняют распределенными двухслойными с укороченным шагом и с большим числом витков. В двухслойных обмотках одна сторона катушки занимает нижнюю часть паза, а вторая – верхнюю. Укорочение шага улучшает форму ЭДС и позволяет экономить медь в лобовых соединениях.

Вследствие укорочения шага обмотки величина ЭДС обмотки уменьшается, так как при укороченном шаге одна активная сторона катушки находится в магнитном поле с меньшим значением магнитной индукции  $B$ , а противоположная сторона находится в магнитном поле с максимальным значением индукции  $B_{\max}$  (рисунком 2.8).

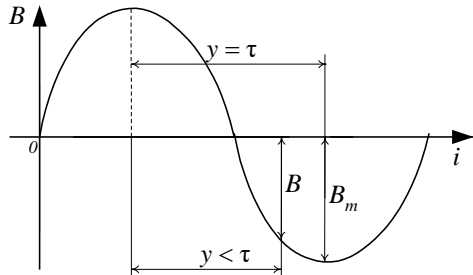


Рисунок 2.8 – Уменьшение ЭДС обмотки, вследствие укорочения шага

Число, показывающее уменьшение ЭДС обмотки из-за укорочения шага, называют коэффициентом укорочения  $k_y$ .

Произведение коэффициента распределения на коэффициент укорочения называют обмоточным коэффициентом:

$$k_{об} = k_y k_p. \quad (2.5)$$

Значение обмоточного коэффициента находится в пределах 0,90–0,95.

Формула фазной ЭДС обмотки с учётом обмоточного коэффициента примет вид

$$E_\phi = 4,44 k_{об} \omega f \Phi. \quad (2.6)$$

Высшие гармоники появляются в результате несинусоидального распределения МДС, наличия пазов на статоре и роторе, насыщения стали, а также других причин. Магнитное поле высших гармоник вращается с угловой частотой  $\omega_v$ , которая в  $v$  раз (порядок гармоники  $v = 3, 5, 7, \dots$ ) больше частоты первой гармоники.

Высшие гармоники являются причиной шумов и вибраций в электрических машинах, поэтому принимаются меры к подавлению высших гармоник. Первой из таких мер является улучшение формы кривой распределения самого поля. Однако получить строго синусоидальное поле не удастся. В связи с этим для улучшения формы ЭДС используют укорочение шага обмотки, распределение обмотки и скос пазов.

Если ЭДС обмотки содержит высшие гармоники ( $E_{\phi 1}, E_{\phi 3}, E_{\phi 5}, \dots$ ), то действующее значение рассчитывается по формуле

$$E_\phi = \sqrt{E_{\phi 1}^2 + E_{\phi 3}^2 + E_{\phi 5}^2 + \dots},$$

причем каждому порядку  $v$  гармоники и углу укорочения  $\gamma$  соответствуют коэффициенты укорочения и распределения, оцениваемые выражениями

$$k_y = 0,5 \cos \gamma v;$$

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha v}{2}}{q \sin \frac{\alpha v}{2}}.$$

Последние соотношения указывают на то, что амплитуда ЭДС высших гармоник ( $E_{\phi 3}, E_{\phi 5}, E_{\phi 7}, \dots$ ) намного меньше амплитуды первой (основной) гармоники  $E_{\phi 1}$ .

Укорочение шага обмотки позволяет подавить любую гармонику ЭДС.

Если принять укорочение шага  $\frac{1}{5}\tau$ , т. е.  $y = \frac{4}{5}\tau$ , то в фазной ЭДС будет отсутствовать пятая гармоника. В этом случае пятые гармоники ЭДС в активных сторонах катушки направлены встречно и взаимно уничтожаются.

Укорочением шага на  $\frac{1}{7}\tau$  наиболее ослабляется в ЭДС седьмая гармоника и т.д.

Гармоники ЭДС, кратные трем, в трехфазной обмотке совпадают по фазе, поэтому при соединении обмотки в звезду в линейных напряжениях эти гармоники отсутствуют. При соединении обмотки в треугольник линейное напряжение равно фазному, но гармоник, кратных трем, в них также не будет. Это связано с тем, что ЭДС третьих гармоник, складываясь, вызывают ток в контуре треугольника. Падение напряжения от этого тока полностью компенсирует ЭДС третьей гармоники. Однако соединения обмотки в треугольник стараются избежать, так как возникающие при этом токи вызывают дополнительные потери и нагрев обмотки.

**Пример 2.4.** Рассчитать и вычертить трехфазную двухслойную обмотку с укороченным шагом, для которой  $2p = 4$ ;  $z = 24$ ;  $y = \frac{5}{6}\tau$  (укорочение шага на  $\frac{1}{6}\tau$ ).

*Решение.* Число пазов на фазу

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2.$$

Для двухслойных обмоток одна сторона катушки занимает нижнюю часть паза, а вторая – верхнюю.

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6; y = \frac{5}{6}\tau = \frac{5}{6} \cdot 6 = 5; y_{\phi} = \frac{2}{3}\tau = \frac{2}{3} \cdot 6 = 4.$$

Начало первой фазы укладываем в паз 1 (рисунок 2.9), а конец первой секции – в паз 6. Поскольку число секций равно 4, то под этой парой полюсов наматываем еще

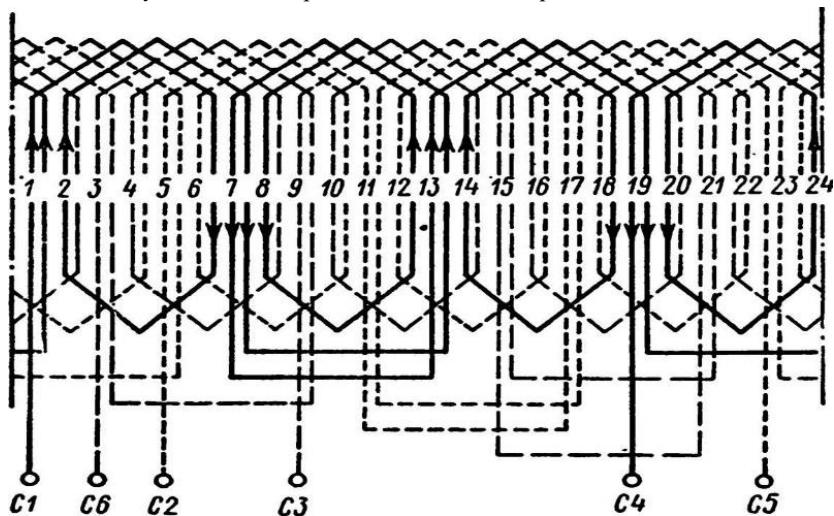


Рисунок 2.9 – Схема трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом

одну секцию 2–7. Чтобы определить начало следующей катушечной группы к началу первой фазы прибавляем  $2\tau$ :  $1 + 2 \cdot 6 = 1 + 12 = 13$ . Если первая катушечная группа намотана по направлению движения часовой стрелки, то вторую катушечную группу наматывают уже против направления движения часовой стрелки. Если начало катушек лежит в пазу 13, то для определения конца секции от номера этого паза отнимают значение  $\gamma$ :  $13 - 5 = 8$ : конец секции лежит в пазу 8. Так как число секций равно 4, то под этой парой полюсов наматывают ещё одну секцию 12–7.

Для определения начала третьей катушечной группы первой фазы под второй парой полюсов к концу второй катушечной группы прибавляем значение  $\tau$ :  $7 + 6 = 13$ . Третью катушечную группу начинаем укладывать в паз 13. В дальнейшем обмотку выполняют аналогичным образом. Для определения начала второй фазы к началу первой фазы прибавляем значение  $\gamma_{\phi}$ , получаем  $1 + \gamma_{\phi} = 1 + 2 \cdot 6/3 = 5$ . Вторую фазу начинаем укладывать в паз 5 и наматываем подобно первой.

Составляем обмоточную таблицу:

Фаза А	Фаза В	Фаза С
1–6; 2–7	5–10; 6–11	9–14; 10–15
13–8; 12–7	17–12; 16–11	21–16; 20–15
13–18; 14–19	17–22; 18–23	21–2; 22–3
1–20; 24 - 19	5–24; 4–23	9–4; 8–3

### 2.3 Принцип действия асинхронного двигателя

Принцип действия асинхронного двигателя основан на двух законах электротехники: электромагнитной индукции и электромагнитных сил.

Закон электромагнитной индукции: если проводник перемещается относительно магнитного потока или поток перемещается относительно проводника, то магнитные линии потока пересекают проводник и в нем индуцируется ЭДС:

$$e_{\text{пр}} = B l v, \quad (2.7)$$

где  $B$  – магнитная индукция в месте нахождения проводника;

$l$  – активная длина проводника, т. е. длина проводника, пересекаемого магнитным потоком;

$v$  – линейная скорость перемещения проводника относительно потока или потока относительно проводника.

Направление индуцируемой ЭДС определяется по правилу правой руки.

Закон электромагнитных сил: на проводник с током, находящийся в магнитном потоке, действует электромагнитная сила:

$$F_{\text{пр}} = B l i, \quad (2.8)$$

где  $B$  – магнитная индукция;

$l$  – активная длина проводника;

$i$  – сила тока.

Направление силы определяется по правилу левой руки.

Выводы обмоток статора обозначаются буквой "С" и цифрой, которой пронумерованы начала и концы фаз: первая фаза – С1 и С4, вторая – С2 и С5, третья – С3 и С6.

В соответствии с международными стандартами в настоящее время выводы обозначают латинскими буквами: первая фаза обмотки статора – U, вторая – V, третья – W. Начало и конец фазы различаются цифрами 1 и 2, следующими за буквами, (например, W1 и W2). На рисунке 2.10 приведен порядок соединения на клеммной панели двигателя выводов статорной обмотки при соединении фаз звездой и треугольником .

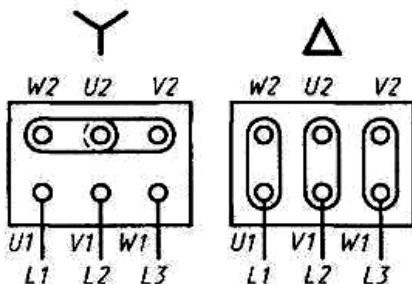


Рисунок 2.10 – Схема соединения статорной обмотки

Цветовые обозначения: первая фаза (A) – желтый (C1 или U1), вторая (B) – зеленый (C2 или V1), третья (C) – красный (C3 или W3).

*Создание вращающегося магнитного поля.* В пазах сердечника статора расположена трехфазная обмотка, каждая фаза которой в простейшем случае состоит из одного витка. Витки смещены в пространстве друг относительно друга на угол  $120^\circ$  (рисунок 2.11).



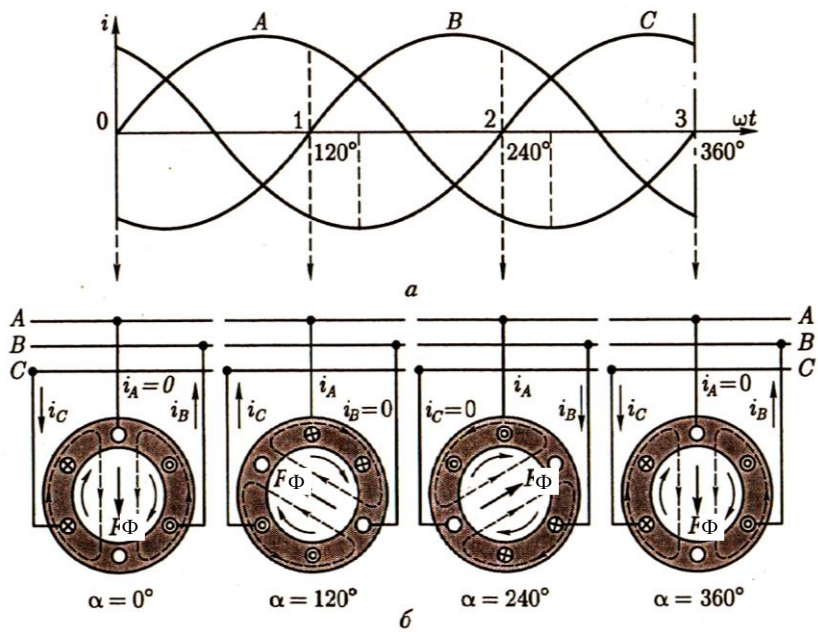


Рисунок 2.11 – Принцип получения вращающегося магнитного поля

При подключении обмотки статора в сеть трехфазного тока в ее фазах появятся токи, сдвинутые (во времени) относительно друг друга на 120 эл. град. Ток каждой обмотки создает пульсирующий магнитный поток определенного направления, а совокупное действие этих магнитных потоков создает результирующее магнитное поле, вектор магнитной индукции которого с течением времени поворачивается в пространстве. Это результирующее магнитное поле называется вращающимся. Результирующий поток является постоянным по значению, но изменяющимся по направлению. Частота вращения магнитного потока статора (синхронная), об/мин,

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (2.9)$$

где  $f_1$  – частота переменного тока в сети;

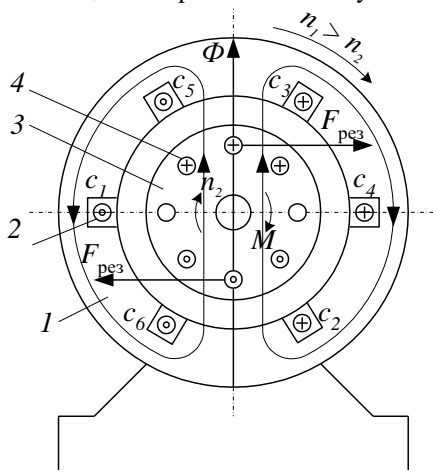
$p$  – количество пар полюсов статорной обмотки.

Таким образом, для создания вращающегося магнитного поля необходимо наличие двух условий: наличие, как минимум, трех намагничивающих катушек, оси которых сдвинуты в пространстве и питание этих катушек переменным током, сдвинутым во времени на некоторый угол.

Угловая скорость вращения магнитного поля

$$\omega_1 = \frac{2 \pi f_1}{p}. \quad (2.10)$$

Если частота тока в обмотке статора  $f_1 = 50$  Гц, то вектор магнитной индукции вращается с частотой 50 об/с или 3000 об/мин. Анализ (2.9) и (2.10) показывает, что  $n_1$  и  $\omega_1$  не зависят от нагрузки. Увеличение числа пар полюсов приводит к уменьшению  $n_1$  и  $\omega_1$ , а увеличение частоты питающего напряжения – к их увеличению.



Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в проводниках ротора ЭДС и по ним проходят токи, направление которых определяют по правилу правой руки (рисунок 2.12). При этом следует иметь в виду, что если магнитное поле вращается по часовой стрелке, то относительное направление вращения проводника ротора нужно принимать противоположным направлению движения часовой стрелки.

Взаимодействие магнитного поля статора и токов в роторе

Рисунок 2.12 – Электромагнитная 81  
схема асинхронного двигателя

создает электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Суммарное усилие  $F_{\text{рез}}$ , приложенное ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент  $M$ , увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент превышает тормозной, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения  $n_2$  соответствует равенству электромагнитного момента  $M$  тормозному, приложенному к валу от рабочего механизма и внутренних сил трения. Такой режим работы асинхронной машины является двигательным и при нем  $0 \leq n_2 < n_1$ .

Относительную разность частот вращения магнитного поля статора и ротора называют скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad (2.11)$$

скольжение часто выражают в процентах:

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (2.12)$$

Для двигательного режима  $0 \leq s \leq 1$ .

При номинальной нагрузке скольжение обычно находится в пределах 0,015–0,03 или 1,5–3 % (применение АД с повышенным скольжением рассмотрено в подразделе 2.6); при холостом ходе оно составляет доли процента. Поэтому частота вращения ротора близка к частоте вращения магнитного поля статора и мало изменяется при возрастании нагрузки.

При неподвижном роторе скольжение достигает максимального значения ( $s = 1$ ), так как  $n_2 = 0$ , а магнитное поле статора вращается с частотой  $n_1$ . Такой режим всегда возникает при включения машины. В первый момент, после подачи напряжения на статорную обмотку двигателя, магнитное поле статора, как практически безинерционная величина, начинает вращаться сразу с частотой  $n_1$ . Ротор двигателя, как механическая система, обладает определенным моментом инерции и не может мгновенно разогнаться до частоты вращения  $n_2$ . Поэтому, непосредственно после включения,  $n_2 = 0$ , а  $s = 1$ .

Как следует из (2.11), для частоты вращения ротора можно записать следующее выражение

$$n_2 = n_1 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s). \quad (2.13)$$

Асинхронная машина кроме двигательного режима может работать в генераторном режиме и в режиме электромагнитного тормоза. Генераторный режим возникает в том случае, когда ротор с помощью постороннего двигателя вращается в направлении вращения поля статора с

частотой  $n_2$ , большей чем  $n_1$ . Скольжение в этом режиме отрицательно. Теоретически можно как угодно увеличивать частоту вращения ротора  $n_2$  относительно вращающегося магнитного поля. Поэтому работа асинхронной машины в генераторном режиме соответствует скольжению в пределах от 0 до  $-\infty$ . Если ротор под действием посторонних сил начнет вращаться в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля, то возникнет режим электромагнитного тормоза. Так как частота вращения ротора в этом режиме отрицательна, то, согласно (2.11),  $s > 1$ . Режим электромагнитного тормоза начинается при  $n_2 = 0$  и может продолжаться теоретически до  $n_2 = -\infty$ , поэтому скольжение находится в пределах от 1 до  $+\infty$ .

Таким образом, скольжение асинхронной машины может изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ . На рисунке 2.13 даны пределы изменения скольжения, а также показаны направления вращения ротора и магнитного поля при различных режимах работы машины.

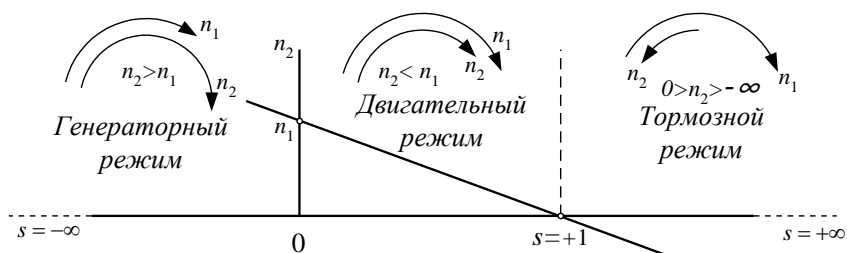


Рисунок 2.13 – Изменение частоты вращения ротора при работе асинхронной машины в различных режимах

Асинхронный двигатель имеет следующие номинальные данные, которые указаны на прикрепленной к корпусу двигателя табличке:

1 Номинальная мощность – это номинальная механическая мощность на валу.

2 Линейное напряжение обмотки статора. Обычно в виде дроби указываются два напряжения, отличающиеся друг от друга в  $\sqrt{3}$  раз. При большем напряжении сети обмотка соединяется по схеме звезда, а при меньшем – по схеме треугольник.

3 Линейные токи также указываются в виде дроби – при соединении обмотки по схеме звезда и по схеме треугольник.

4 Частота вращения ротора.

5 Коэффициент мощности.

6 Коэффициент полезного действия.

### 2.3.1 Асинхронный двигатель при неподвижном роторе

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе. Обмотку статора асинхронного двигателя можно рассматривать как первичную обмотку трансформатора, а обмотку ротора – как вторичную.

Если к обмотке статора двигателя подвести напряжение сети  $U_1$ , а обмотку ротора разомкнуть, что можно сделать в двигателе с фазным ротором путем подъема щеток, то вращающееся магнитное поле статора, пересекая неподвижные обмотки статора и ротора, будет индуцировать в них соответственно ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ :

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44 f_1 w_1 k_{o1} \Phi_m ; \\ E_2 &= 4,44 f_1 w_2 k_{o2} \Phi_m , \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

где  $E_1, E_2$  – ЭДС обмоток фаз статора и ротора, В;

$f_1$  – частота тока сети, Гц;

$w_1$  и  $w_2$  – числа витков обмоток фаз статора и ротора;

$k_{o1}$  и  $k_{o2}$  – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора;

$\Phi_m$  – максимальное значение основного магнитного потока, Вб.

Отношение ЭДС

$$E_1 / E_2 = w_1 k_{o1} / (w_2 k_{o2}) = k_e \quad (2.15)$$

называют коэффициентом трансформации ЭДС. В отличие от коэффициента трансформации обычного трансформатора коэффициент  $k_e$  асинхронного двигателя зависит и от обмоточных коэффициентов, которые учитывают пространственное распределение обмоток.

Режим работы асинхронного двигателя без нагрузки называют режимом холостого хода. Этот режим аналогичен режиму холостого хода трансформатора, но ток холостого хода  $I_o$  асинхронного двигателя из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором значительно больше, чем в трансформаторе (20–40 % от номинального по сравнению с 2–5 % у трансформатора), вследствие чего здесь нельзя уже пренебрегать падениями напряжения  $I_o r_1$  и  $j I_o x_1$  и пользоваться приближенным уравнением  $\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = 0$ , как это делают при построении векторной диаграммы трансформатора для режима холостого хода. А как и в трансформаторе активная составляющая тока холостого хода у асинхронного двигателя  $I_{oa} \ll I_o$ , поэтому  $I_o \approx I_\mu$ , где  $I_\mu$  – намагничивающий ток, создающий магнитный поток в двигателе.

Для неподвижного (заторможенного) короткозамкнутого ротора номинальном напряжении ЭДС вызывает большой ток, подобно короткому

замыканию трансформатора. Этот режим называют коротким замыканием асинхронного двигателя.

При коротком замыкании обычно можно пренебречь током намагничивания, так как он относительно мал. В этом случае с учетом МДС обмоток статора и ротора равны:

$$F_1 / F_2 = m_1 w_1 k_{o1} I_1 / m_2 w_2 k_{o2} I_2,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – число фаз обмоток статора и ротора.

Коэффициент трансформации токов

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 w_1 k_{o1}}{m_2 w_2 k_{o2}} = \frac{m_1}{m_2} k_e.$$

Относительно большой ток холостого хода в АД является одним из главных недостатков, так как вызывает увеличение потерь в обмотке статора (особенно в небольших машинах) и уменьшение коэффициента мощности, особенно при малых нагрузках двигателя. Для уменьшения тока холостого хода заводы-изготовители стремятся выполнить в асинхронных двигателях минимально возможные по соображениям конструкции и технологии зазоры. Так, например, у двигателей мощностью 5 кВт и менее зазор между статором и ротором обычно равен 0,2–0,3 мм.

### 2.3.2 Асинхронный двигатель при вращающемся роторе

Если к статорной обмотке ненагруженного двигателя подвести номинальное напряжение, то его ротор будет вращаться вхолостую.

Ротор вращается в сторону вращения магнитного поля статора с частотой  $n_2 < n_1$ . Поэтому частота вращения магнитного поля статора относительно ротора

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (2.16)$$

Вращающийся магнитный поток статора, обгоняя ротор, индуцирует в нем ЭДС и токи с частотой

$$f_{2s} = p n_s / 60 = p (n_1 - n_2) / 60. \quad (2.17)$$

Учитывая, что  $p n_1 / 60 = f_1$  и  $(n_1 - n_2) / n_1 = s$ , представим (2.17) в ином виде:

$$f_{2s} = p n_1 (n_1 - n_2) / 60 n_1 = f_1 s. \quad (2.18)$$

В связи с изменением частоты тока в роторе изменяются и все зависящие от частоты величины: ЭДС, индуктивное сопротивление, ток ЭДС фазы вращающегося ротора

$$E_{2s} = 4,44 f_{2s} w_2 k_{o2} \Phi_m = (4,44 f_1 w_2 k_{o2} \Phi_m) s = E_2 s, \quad (2.19)$$

где  $E_2$  – ЭДС фазы неподвижного ротора, когда  $s = 1$  и  $f_{2s} = f_1$ .

Индуктивное сопротивление фазы вращающегося ротора

$$x_{2S} = 2\pi f_{2S} L_2 = (2\pi f_1 L_2) s = x_2 s, \quad (2.20)$$

где  $x_2$  – индуктивное сопротивление фазы неподвижного ротора.

Ток вращающегося ротора

$$I_{2S} = \frac{E_{2S}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2S}^2}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s}}, \quad (2.21)$$

где  $r_2$  – активное сопротивление фазы ротора.

Величина  $r_2$  у обычных двигателей практически не зависит от частоты тока в роторе, поэтому у вращающегося ротора она такая же, что и у неподвижного.

Разделив числитель и знаменатель (2.21) на скольжение  $s$ , получим

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_2^2}}. \quad (2.22)$$

Токи, полученные по (2.21) и (2.22), имеют одинаковое значение. Однако между этими токами имеется принципиальное различие. Если ток  $I_{2S}$  обусловлен ЭДС  $E_{2S}$  и имеет частоту  $f_{2S} = f_1 s$ , то ток  $I_2$  обусловлен ЭДС  $E_2$  с частотой, равной  $f_1$ . Следовательно, ток  $I_{2S}$  является током во вращающемся роторе, а ток  $I_2$  – в эквивалентном неподвижном.

Таким образом, режим асинхронного двигателя с вращающимся ротором приводится к эквивалентному режиму при неподвижном роторе. В данном случае АД можно заменить неким трехфазным трансформатором и по аналогии с ним вторичную обмотку двигателя (роторную) можно привести к первичной, а все приведенные параметры обозначить штрихами. Тогда приведенный ток фазы ротора эквивалентного неподвижного двигателя

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\frac{r'_2}{s} + j x'_2}. \quad (2.23)$$

Приведение роторной обмотки осуществляется к числу витков и числу фаз статорной. При приведении магнитный поток машины и полная роторная МДС остаются без изменений. То есть

$$I'_2 = \frac{m_2 w_2 k_{o2}}{m_1 w_1 k_{o1}} I_2, \quad E'_2 = \frac{w_2 k_{o2}}{w_1 k_{o1}} E_2.$$

Процессы, протекающие в асинхронном двигателе с эквивалентным неподвижным ротором, описываются системой уравнений, подобной системе уравнений для трансформатора (см. разд. 1), если первичной обмоткой считать обмотку статора, а вторичной – обмотку ротора.

Уравнение равновесия напряжений в обмотке статора

$$\underline{U}_1 = (-E_1) + \underline{I}_1 \underline{z}_1, \quad (2.24)$$

где  $\underline{U}_1$  – напряжение, подводимое к фазной обмотке статора;  $E_1$  – ЭДС, наводимая в фазной обмотке статора;  $\underline{I}_1$  – фазный ток обмотки статора;  $\underline{z}_1 = r_1 + j x_1$  – комплексное сопротивление фазной обмотки статора.

Поскольку обмотка ротора при работе АД замкнута накоротко, то напряжение на зажимах ротора  $\underline{U}'_2 = 0$ , а ЭДС  $E'_2$ , согласно (2.23),

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_2 \left( \frac{r'_2}{s} + j x'_2 \right). \quad (2.25)$$

Величину  $r'_2/s$  можно представить, как

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.26)$$

Тогда (2.25) получит вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 (r'_2 + j x'_2) &= \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s} \\ \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2 &= \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

или

$$\underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2 = \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s},$$

где  $\underline{z}'_2$  – комплекс полного приведенного сопротивления фазной обмотки ротора.

Так же, как и для трансформатора, для асинхронного двигателя можно начертить диаграмму его МДС, которая подобна диаграмме МДС трансформатора, с той лишь разницей, что векторы МДС в двигателе вращаются в пространстве с частотой  $n_1$ .

Результирующая МДС асинхронного двигателя  $I_0 w_1$  и создаваемый ею результирующий магнитный поток  $\Phi$ , как и в трансформаторе, будут постоянными при любой нагрузке и неизменных напряжении  $U_1$  и частоте сети  $f_1$ .

По аналогии с трансформатором для приведенного асинхронного двигателя уравнение токов имеет вид:

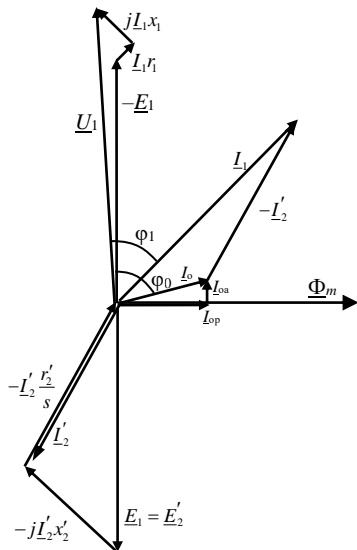
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \quad (2.28)$$

Основные уравнения приведенного асинхронного двигателя могут быть представлены в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= (-E_1) + \underline{I}_1 \underline{z}_1; \\ \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{z}'_2 &= \underline{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$



На основе (2.29) представлена векторная диаграмма асинхронного двигателя при нагрузке (рисунок 2.14). Методика ее построения такая же, как и у трансформатора.



На векторной диаграмме угол  $\varphi_1$  между векторами  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$  при нагрузке значительно меньше угла  $\varphi_0$  между соответствующими векторами при холостом ходе, а значит,  $\cos\varphi_1$  значительно выше  $\cos\varphi_0$ . Отсюда следует, что ненагруженные асинхронные двигатели значительно ухудшают коэффициент мощности в сети, поэтому нужно стремиться к полной их загрузке.

Реактивная составляющая тока  $I_0$  является намагничивающей, так как она создает поток  $\Phi$ . Другая составляющая  $I_{0a}$  вызывается магнитными потерями в стали статора, возникающими от магнитного потока  $\Phi$ .

## 2.4 Схемы замещения асинхронного двигателя

Для расчета характеристик асинхронного двигателя и исследования различных режимов его работы удобно использовать схемы замещения.

При этом реальная асинхронная машина с электромагнитными связями между обмотками заменяется относительно простой электрической цепью, что позволяет существенно упростить расчет характеристик.

С учетом того, что основные уравнения асинхронного двигателя (2.29) аналогичны таким же уравнениям трансформатора (1.23), схема замещения будет иметь вид, представленный она на рисунке 2.15.

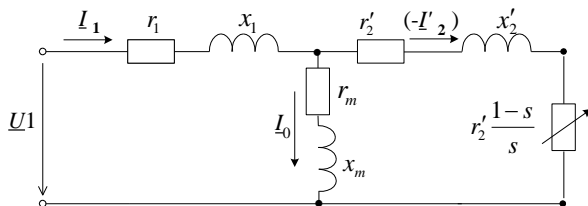
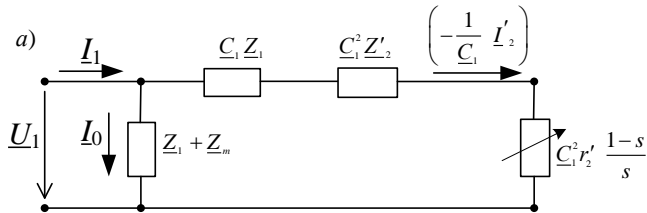


Рисунок 2.15 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Изображенная на рисунке 2.15 схема называется Т-образной схемой замещения, в ней:  $r_1$  и  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора;  $r'_2$  и  $x'_2$  – приведенные активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора.

Сопротивление  $z_m = r_m + jx_m$  определяет параметры намагничивающей ветви схемы. Индуктивная составляющая  $x_m$  является индуктивным сопротивлением взаимной индукции. Посредством сопротивления  $r_m$  учитываются магнитные потери в стали статора  $[r_m = \Delta P_M / (m_1 I_0^2)]$ . Как и в трансформаторе, сопротивление  $z_m$  зависит от подведенного напряжения  $U_1$ . С повышением  $U_1$  сопротивление  $z_m$  уменьшается.

При расчете характеристик асинхронного двигателя с использованием схемы замещения ее параметры должны быть известны. Схема рисунка 2.15 полностью отражает физические процессы, происходящие в двигателе, но имеет узловую точку между сопротивлениями  $x_1$  и  $r'_2$ , что усложняет расчет токов при различных значениях скольжения. Поэтому большое практическое применение для анализа режимов работы асинхронных машин находит другая схема замещения, в которой намагничивающая ветвь подключена непосредственно на входе схемы, куда подводится напряжение  $U_1$  (рисунок 2.17). Данная схема называется Г-образной схемой замещения.



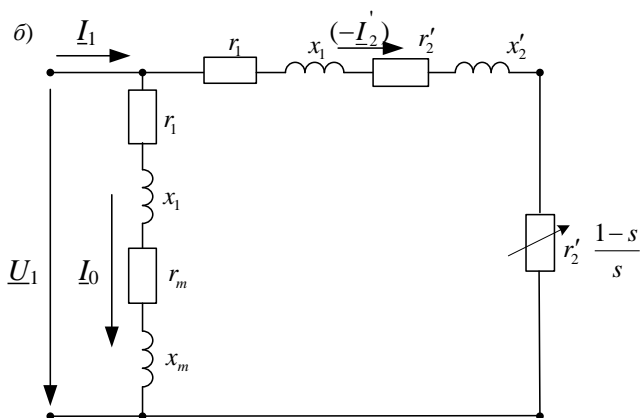


Рисунок 2.16 – Г-образная схема замещения асинхронного двигателя (а) и ее упрощенный вариант (б)

На рисунке 2.16, а комплексный коэффициент

$$\underline{C}_1 = 1 + \frac{z_1}{z_m} \text{ или } C_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}.$$

Так как  $x_1 \gg x_m$ , то  $C_1$  незначительно больше единицы ( $C_1 \approx 1,02 \dots 1,03$ ).

Если пренебречь коэффициентом  $\underline{C}_1$ , то получим упрощенную Г-образную схему замещения (рисунок 2.16, б), которую используют при практических расчетах асинхронных двигателей средних и больших мощностей. При этом погрешность в расчете не превышает 1–5 %. Коэффициент  $\underline{C}_1$  учитывается при расчете точных расчетов машин большой мощности.

Согласно (2.26) активное сопротивление обмотки ротора двигателя разбито на две части:  $r_2'$  и  $r_2' \frac{1-s}{s}$ . Первое сопротивление не зависит от режима работы, и потери в нем равны электрическим потерям реального ротора. Второе сопротивление зависит от скольжения, и мощность, выделяемая в нем, численно равна механической мощности двигателя  $P_{\text{мех}}$ . Следовательно, сопротивление  $r_2' \frac{1-s}{s}$  в схеме замещения выполняет роль нагрузки двигателя.

Из упрощенной Г-образной схемы замещения можно определить приведенный ток роторной обмотки

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (2.30)$$

В дальнейшем (2.30) используется при выводе уравнения электромагнитного момента асинхронного двигателя.

## 2.5 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Процесс преобразования электрической энергии, подведенной к двигателю из сети, в механическую, снимаемую с вала машины, сопровождается потерями. Наглядное представление о распределении подведенной к двигателю мощности дает энергетическая диаграмма (рисунок 2.17).

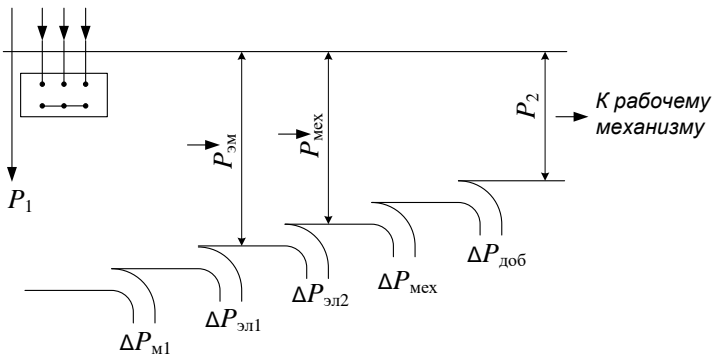


Рисунок 2.17 – Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

К асинхронному двигателю из сети подводится активная мощность

$$P_1 = \sqrt{3} U_{1л} I_{1л} \cos \varphi_1. \quad (2.31)$$

Часть этой мощности затрачивается на потери в статоре  $\Delta P_{м1}$  и  $\Delta P_{эл1}$ ,

где  $\Delta P_{м1}$  – магнитные потери в стали статора;

$\Delta P_{эл1}$  – электрические потери в обмотке статора,

$$\Delta P_{эл1} = 3 I_{1\phi}^2 r_1. \quad (2.32)$$

Остальная мощность электромагнитным путем передается на ротор и называется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{м1} - \Delta P_{эл1} = 3 I_{2\phi}'^2 \frac{r_2'}{s}. \quad (2.33)$$

Частично  $P_{эм}$  расходуется на потери в обмотке ротора  $\Delta P_{эл2}$ ,

$$\Delta P_{эл2} = 3 I_{2\phi}'^2 r_2'. \quad (2.34)$$

Магнитные потери в роторе из-за небольшой частоты перемагничивания стали [ $f_{2S} = f_1 s \approx (0,5...2) \text{ Гц}$ ] малы, и поэтому их обычно не учитывают.

Мощность  $P_{эм} - \Delta P_{эл2} = P_{мех}$  представляет собой полную механическую мощность.

Полезная механическая мощность  $P_2$ , снимаемая с вала двигателя, меньше  $P_{мех}$  на значение потерь внутри машины в виде механических потерь  $\Delta P_{мех}$  (трение в подшипниках, вентиляцию) и добавочных потерь  $\Delta P_{доб}$ , возникающих при нагрузке:

$$P_2 = P_{мех} - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}. \quad (2.35)$$

Добавочные потери являются следствием наличия высших гармоник в магнитном поле из-за зубчатого строения статора и ротора и из-за высших гармоник МДС. Данные потери трудно поддаются расчету и экспериментальному определению. Они обычно принимаются равными 0,5 % подводимой мощности при номинальной нагрузке. При других нагрузках эти потери пропорциональны квадрату тока статора.

КПД асинхронных двигателей достаточно высокий – от 0,7 до 0,95. Он рассчитывается по формулам

$$\eta = P_2 / P_1, \text{ или} \quad (2.36)$$

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma \Delta P}{P_1},$$

где  $\Sigma \Delta P$  – суммарные потери,  $\Sigma \Delta P = \Delta P_{м1} + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}$ .

## 2.6 Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Из энергетической диаграммы следует, что

$$P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{эл2}}. \quad (2.37)$$

Учитывая, что  $P_{\text{эм}} = M \omega_1$ ,  $P_{\text{мех}} = M \omega_2$ , а  $\Delta P_{\text{эл2}} = 3I_2'^2 r_2'$ , имеем

$$M (\omega_1 - \omega_2) = 3 I_2'^2 r_2', \quad (2.38)$$

где  $M$  – электромагнитный момент асинхронного двигателя;  
 $\omega_1$  – угловая скорость вращения магнитного поля статора;  
 $\omega_2$  – угловая скорость вращения ротора.

Умножив и разделив левую часть (2.38) на  $\omega_1$ , получим

$$M \omega_1 \left( \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \right) = M \omega_1 s = 3 I_2'^2 r_2'. \quad (2.39)$$

Из (2.39) определяем момент:

$$M = \frac{3 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 s}. \quad (2.40)$$

В (2.40) подставляем ток  $I_2'$  (2.26) из Г-образной схемы замещения. Окончательно уравнение электромагнитного момента получаем в следующем виде:

$$M = \frac{3 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \quad (2.41)$$

где  $U_1$  – фазное напряжение обмотки статора;

$$\omega_1 = 2 \pi f_1 / p.$$

Из (2.41) можно сделать основной вывод: электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети, подводимого к статорной обмотке:  $M \equiv U_1^2$ , т. е. асинхронные двигатели чувствительны к колебаниям напряжения в сети, что является их недостатком.

Если принять, что параметры машины являются постоянными, то момент, определяемый по (2.41), при  $U_1 = \text{const}$  является функцией только скольжения  $s$ . Поэтому эта формула удобна для построения механической характеристики машины  $M = f(s)$ .

Выявим характер изменения зависимости  $M = f(s)$  от скольжения.

Анализ (2.41) показывает, что при  $s = 0$   $M = 0$ , при  $s = \pm\infty$   $M = 0$ . Следовательно, функция имеет максимум, для нахождения которого берем

$$\frac{dM}{ds} = 0. \quad (2.42)$$

Из условия (2.42) определяется критическое скольжение  $s_{кр}$ , при котором момент будет максимальным  $M_{\max}$ .

Критическое скольжение

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}, \quad (2.43)$$

максимальный (критический) момент

$$M_{\max} = \pm \frac{3 U_1^2}{2\omega_1 (x_1 + x_2')}, \quad (2.44)$$

где знак плюс соответствует работе машины в двигательном или тормозном режиме, а знак минус – в режиме генератора.

Из (2.44) следует, что максимальный момент  $M_{\max}$  не зависит от активного сопротивления обмотки ротора  $r_2'$ , однако, согласно (2.43) это сопротивление оказывает влияние на скольжение  $s_{кр}$ , при котором асинхронная машина развивает максимальный момент.

Анализ (2.41) также показывает, что при малых скольжениях ( $s \ll 1$ ) можно пренебречь в знаменателе всеми слагаемыми, кроме  $(r_2'/s)^2$ . Тогда получим:

$$M \approx \frac{3 U_1^2}{\omega_1 r_2'} s, \quad (2.45)$$

т. е. момент пропорционален скольжению и зависимость  $M = f(s)$  имеет линейный характер. При скольжениях, близких к единице или больше единицы, можно пренебречь активными сопротивлениями обмоток  $r_1$  и  $r_2'$  по сравнению с их индуктивными сопротивлениями  $x_1$  и  $x_2'$ . Тогда

$$M \approx \frac{3 U_1^2 r_2'}{\omega_1 (x_1 + x_2')^2} \frac{1}{s}. \quad (2.46)$$

Отсюда следует, что при больших скольжениях момент обратно пропорционален скольжению и кривая  $M = f(s)$  имеет гиперболический

характер. При изменении скольжения в широких пределах и  $U_1 = \text{const}$  кривая  $M = f(s)$  имеет вид, изображенный на рисунке 2.9. Столь сложный характер кривой объясняется аналогичным характером изменения активной составляющей тока ротора. С увеличением скольжения активная составляющая тока ротора сначала растет, а затем вследствие увеличения частоты  $f_2s$ , которая равна  $f_2s = f_1 s$ , индуктивное сопротивление ротора возрастает, угол  $\psi_2$  увеличивается и активная составляющая тока начинает уменьшаться, несмотря на увеличение всего тока ротора.

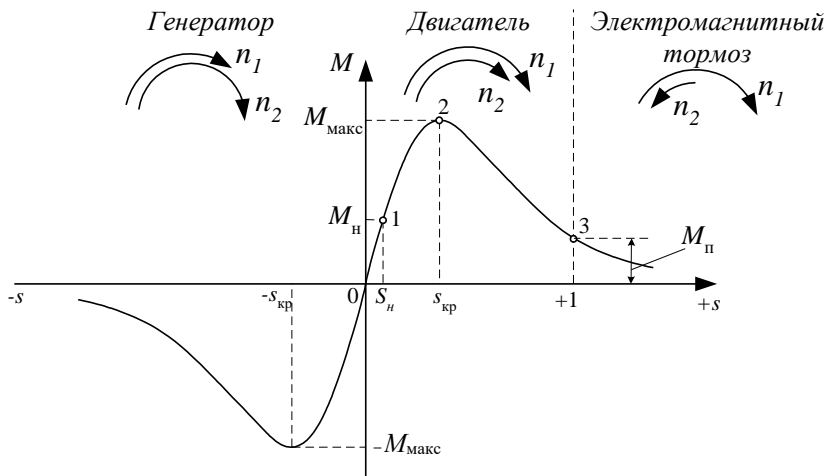


Рисунок 2.18 – Зависимость  $M = f(s)$  для асинхронной машины

На рисунке 2.18 зависимость  $M = f(s)$ , называемая механической характеристикой, построена для трех возможных режимов работы асинхронной машины. На механической характеристике показаны наиболее важные точки (0, 1, 2, 3), соответствующие двигательному режиму асинхронной машины. Нормальная работа двигателя протекает на прямолинейной части характеристики. Здесь находится точка 1, соответствующая номинальному моменту. Скольжение при этом моменте называется номинальным и составляет  $s_n = 0,015...0,05$ ,  $s_n < s_{kp}$ , обычно  $s_{kp} = 0,08...0,25$ . Участок 0–2 является участком устойчивой работы двигателя, но длительная работа двигателя должна быть только на участке

0–1. Для участка устойчивой работы 0–2 выполняется условие  $\frac{dM}{ds} > 0$ .

Покажем это. Пусть под действием возросшего момента сопротивления  $M_c$  частота вращения ротора  $n_2$  уменьшилась. Следовательно, скольжение  $s$



увеличится и рабочая точка окажется правее исходной, например, точки 1. Если внешнее воздействие исчезнет, то под действием увеличенного момента ротор увеличит частоту вращения, скольжение уменьшится и произойдет переход снова в точку 1.

Участок 2–3 является неустойчивым участком механической характеристики, для него выполняется условие  $\frac{dM}{ds} < 0$ .

Если под действием внешнего воздействия окажется  $M_c > M_{\text{макс}}$ , то рабочая точка будет правее точки 2, момент  $M$  уменьшится и произойдет лавинообразный спад  $n_2$  до полной остановки двигателя (точка 3,  $n_2 = 0$ ). При этом ток статорной обмотки  $I_1$  окажется намного больше номинального  $I_{1н}$ , поэтому двигатель необходимо срочно отключить от сети. С учетом отмеченного, участок 2–3 является неустойчивым участком механической характеристики.

Пуск двигателя возможен, если момент сопротивления на валу двигателя  $M_c$  будет меньше пускового момента  $M_{п}$ . При пуске  $n_2 = 0$ ,  $s = 1$ ,  $f_{2s} = f_1 = 50$  Гц (точка 3 характеристики), индуктивное сопротивление  $x_{2s}$  ротора имеет максимальное значение, угол  $\psi_2$  между векторами  $\underline{E}'_2$  и  $\underline{I}'_2$  наибольший, а  $\cos\psi_2$  наименьший, поэтому и пусковой момент  $M_{п}$  невелик, что видно из графика рисунка 2.18.

При разгоне двигателя частота тока в роторе  $f_{2s} = f_1 s$  уменьшается, вследствие чего снижается его индуктивное сопротивление, что приводит к уменьшению угла  $\psi_2$ , увеличению  $\cos\psi_2$  и возрастанию момента. Пусковые свойства двигателя характеризуются кратностью пускового момента:

$$k_{п} = \frac{M_{п}}{M_{н}}. \quad (2.47)$$

Для двигателей нормального исполнения мощностью до 100 кВт  $k_{п} = 0,9 \dots 1,5$ , причем для двигателей меньшей мощности это отношение больше.

Перегрузочная способность двигателя оценивается кратностью максимального момента:

$$k_{м} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{н}}. \quad (2.48)$$

Для асинхронных двигателей нормального исполнения  $k_m = 1, 7 \dots 3, 4$ .

Более высокие значения  $k_m$  соответствуют двигателям с меньшим числом полюсов.

Механическую характеристику асинхронной машины можно представить также в виде зависимости  $n_2 = f(M)$ , которую легко получить, определив по скольжению  $s$  частоту вращения ротора  $n_2 = n_1 (1 - s)$ . Зависимость  $n_2 = f(M)$  для всех трех режимов работы асинхронной машины представлена на рисунке 2.19, откуда видно, что асинхронные двигатели имеют на рабочем участке (до  $M_n$ ) жесткую механическую характеристику, т. е. такую, при которой частота вращения ротора мало изменяется при увеличении нагрузки.

В двигательном режиме асинхронной машины момент  $M$  положителен, в генераторном – отрицателен, является тормозным. В генераторном режиме асинхронная машина отдает в сеть активную энергию, беря из сети намагничивающую составляющую тока для создания вращающегося магнитного поля.

Как уже отмечалось,  $s_{кр}$  у асинхронного двигателя зависит от активного сопротивления фазы роторной обмотки, а  $M_{\max}$  от этого сопротивления не зависит [уравнения (2.43) и (2.44)]. Отмеченное имеет особое значение для двигателей с фазным ротором, когда при пуске в цепь ротора включается пусковой реостат. При этом можно добиться, чтобы при пуске двигатель развивал момент  $M_n$ , равный максимальному.

Тогда

$$s_{кр} = \frac{r'_2 + r'_{\text{пуск}}}{x_1 + x'_2} = 1, \quad (2.49)$$

откуда  $r'_{\text{пуск}} = x_1 + x'_2 - r'_2$ , (2.50)

где  $r'_{\text{пуск}}$  – приведенное сопротивление пускового реостата.

На рисунке 2.20 представлены зависимости  $M = f(s)$  при различных значениях активного сопротивления роторной цепи.

Из рисунка 2.20 видно, что с увеличением активного сопротивления роторной цепи  $r'_2 + r'_d$  ( $r'_d$  – приведенное добавочное сопротивление,

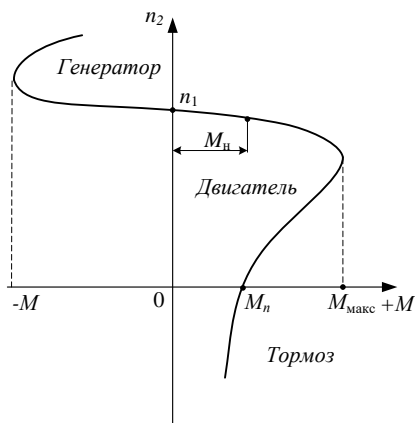


Рисунок 2.19 – Механическая характеристика  $n_2 = f(M)$  асинхронной машины

включаемое в роторную цепь) максимум момента смещается в область больших скольжений, сохраняя при этом свое значение. При  $r'_d = r'_{\text{пуск}} = (x_1 + x'_2) - r'_2$ , имеем  $M_{\text{п}} = M_{\text{макс}}$ .

Часто при проектировании электропривода известны только каталожные данные асинхронного двигателя. Но для решения ряда вопросов необходимо также иметь его механическую характеристику. Последнюю получают по упрощенным формулам М. Клосса:

$$M = \frac{2M_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}, \quad (2.51)$$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}} \left( k_{\text{м}} + \sqrt{k_{\text{м}}^2 - 1} \right). \quad (2.52)$$

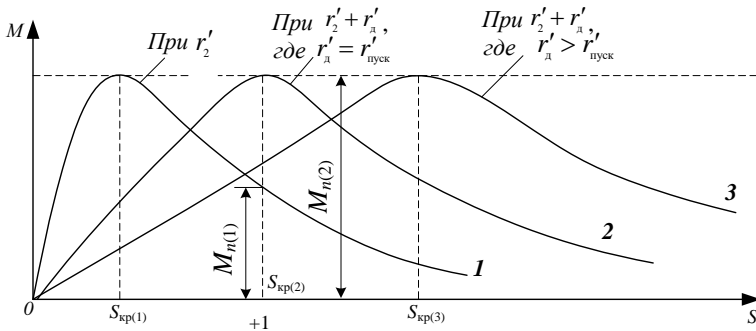


Рисунок 2.20 – Зависимости  $M = f(s)$  при различных значениях сопротивления пускового реостата

Подставляя в (2.51) различные значения скольжения  $s$ , можно получить соответствующие им значения моментов и построить кривую  $M = f(s)$ .

Данные формулы находят применение в расчетной практике, они справедливы при постоянных параметрах машины.

В соответствии с (2.44) максимальный момент пропорционален квадрату приложенного к статору напряжения. Поэтому снижение  $U_1$  приводит к значительному уменьшению  $k_{\text{м}}$ . Например, если  $U_1$  понизится на 25 %, т. е.  $U_1 = 0,75 U_{1\text{н}}$ , то при этом  $k_{\text{м}}$  будет составлять  $0,75^2 \approx 0,56$  кратности при  $U_1 = U_{1\text{н}}$ . Допустим, что при  $U_1 = U_{1\text{н}}$   $k_{\text{м}} = 1,7$ . Тогда при  $U_1 = 0,75 U_{1\text{н}}$  будем иметь  $k_{\text{м}} = 1,7 \cdot 0,56 = 0,95$ . Следовательно, при таком снижении напряжения двигатель не сможет работать с номинальным моментом, поэтому зависимость  $M \equiv U_1^2$  является недостатком АД.

Если при снижении напряжения  $U_1$  на зажимах клеммной коробки АД момент сопротивления на валу  $M_c$  остается прежним, то уменьшится

момент  $M$  и при  $M < M_c$  обороты двигателя начнут уменьшаться, скольжение  $s$  будет возрастать, будет увеличиваться и частота тока ротора ( $f_{2s} = f_1 s$ ). С уменьшением частоты вращения ротора начнет возрастать электромагнитный момент до такого положения, при котором наступит равенство  $M = M_c$ , но уже при пониженных оборотах.

## 2.7 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод. Метод непосредственной нагрузки заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров. Этот метод обычно применяется для двигателей малой и средней мощности. С ростом мощности двигателя усложняется задача его нагрузки, растут непроизводительный расход электроэнергии и загрузка электросети. Широкое применение получил метод, заключающийся в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания [21].

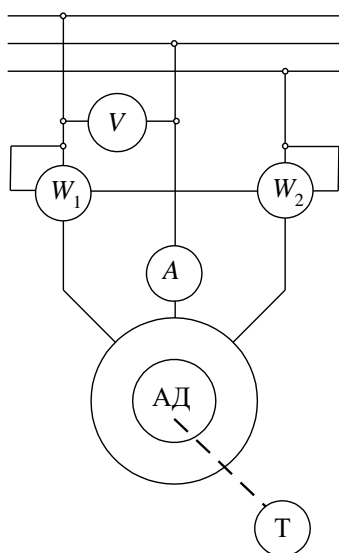


Рисунок 2.21 – Схема для определения экспериментальных

вала двигателя, так как

Схема для снятия рабочих характеристик АД приведена на рисунке 2.21.

На ней Т – тормозное устройство, назначение которого: создавать регулируемый тормозной момент и определять нагрузку на валу двигателя.

В качестве тормозного устройства используется генератор постоянного тока или электромагнитный тормоз. Частота вращения двигателя измеряется тахометром. Ток в фазе обмотки статора определяется по амперметру, а мощность – по ваттметру.

При увеличении нагрузочного момента соответственно увеличивается электромагнитный момент, создаваемый двигателем:

$$M = M_0 + M_2, \quad (2.53)$$

где  $M_0$  – момент, обусловленный механическими и добавочными потерями в двигателе;

$M_2$  – механический момент на валу, определяющий мощность  $P_2$ , снимаемую с

$$P_2 = M_2 \omega_2. \quad (2.54)$$

Момент  $M_0$  относительно мал, поэтому можно принять, что  $M \approx M_2$ .

Зависимости  $n_2$ ,  $s$ ,  $M_2$ ,  $I_1$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $\eta$  и  $P_1$  от  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$  называются рабочими характеристиками асинхронного двигателя. Их примерный вид показан на рисунке 2.22.

При холостом ходе, когда  $P_2 = 0$  и  $M_2 = 0$ , ток  $I_1$  равен току холостого хода  $I_0$ . Как и у трансформатора, этот ток фактически является намагничивающим и создает основное магнитное поле.

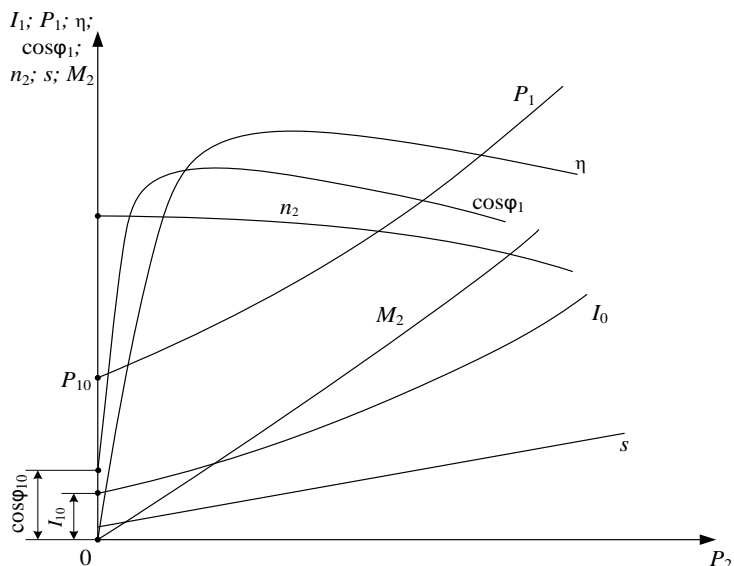


Рисунок 2.22 – Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя

Мощность  $P_{10}$ , потребляемая двигателем из сети при холостом ходе расходуется на потери внутри машины: механические потери  $\Delta P_{\text{мех}}$ , магнитные потери в стали статора  $\Delta P_{\text{м1}}$ , электрические потери в обмотке статора от тока  $I_0$ .

Увеличение момента  $M_2$  сопровождается увеличением тока ротора  $I_2$ , что связано с увеличением ЭДС  $E_{2S}$  вследствие снижения частоты вращения  $n_2$  и увеличения  $s$ . Поэтому зависимость  $n_2 = f(P_2)$  слабо наклоненную к оси абсцисс.

Из (2.54) имеем  $M_2 = 9,55 P_2 / n_2$ , а так как  $n_2$  с увеличением нагрузки изменяется незначительно, то зависимость  $M_2 = f(P_2)$  имеет практически линейный характер, причем с увеличением нагрузки  $P_2$  частота вращения ротора уменьшается, а поэтому полезный момент на валу  $M_2$  возрастает несколько быстрее нагрузки.

Зависимость  $\eta = f(P_2)$  имеет максимум при нагрузке, когда постоянные потери в двигателе равны переменным, пропорциональным квадрату тока.

Зависимость  $\cos\phi_1 = f(P_2)$ . В связи с тем что ток статора  $I_1$  имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности асинхронных

двигателей меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму холостого хода. Объясняется это тем, что ток холостого хода  $I_0$  при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ( $I_1 \approx I_0$ ). По мере увеличения нагрузки он возрастает, достигая наибольшего значения при нагрузке, близкой к номинальной. В целях повышения коэффициента мощности важно, чтобы АД работал значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя могут быть получены экспериментально на специальных тормозных стендах, либо расчетным путем по схеме замещения. Кроме того, для построения рабочих характеристик может быть использована круговая диаграмма.

## 2.8 Магнитная цепь асинхронной машины

Магнитодвижущая сила обмотки статора создает магнитный поток, который замыкается через элементы магнитной системы машины. Магнитную систему асинхронной машины называют неявнополюсной (рисунок 2,23), так как она не имеет явно выраженных магнитных полюсов. Магнитная система машины, состоящая из сердечников статора и ротора, представляет собой разветвленную симметричную магнитную цепь. Например, магнитная система четырехполюсной машины состоит из четырех одинаковых ветвей, в каждой из которых замыкается половина магнитного потока одного полюса. Каждая из таких ветвей образует неразветвленную магнитную цепь, которая и является предметом расчета. На рисунке 2.23 [21] видны участки магнитной цепи: воздушный зазор  $\delta$ , зубцовый слой статора  $h_{z1}$ , зубцовый слой ротора  $h_{z1}$ , спинка ротора  $L_{c2}$ , спинка статора  $L_{c1}$ . Замыкаясь в магнитной цепи, магнитный поток проходит воздушный зазор и зубцовые слои статора и ротора дважды.

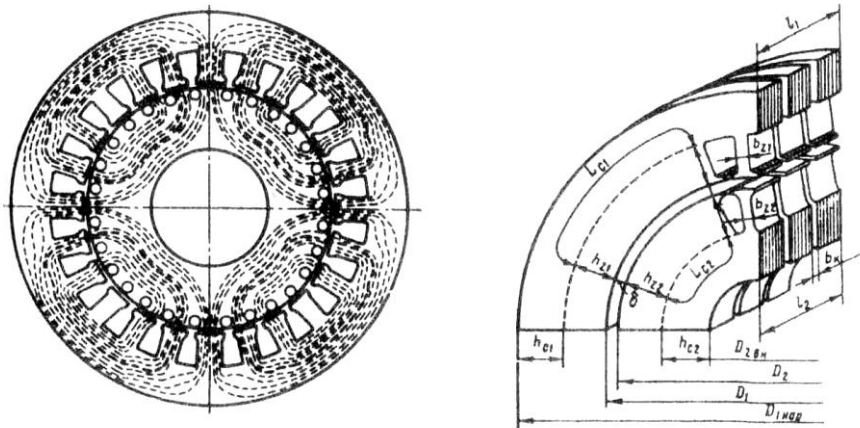


Рисунок 2.23 – Магнитное поле четырехполюсного АД (а) и часть магнитной цепи (б)

Каждый из перечисленных участков оказывает магнитному потоку некоторое магнитное сопротивление. Поэтому на каждом участке магнитной цепи затрачивается часть МДС обмотки статора, называемая магнитным напряжением:

$$\Sigma F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} + F_{c2},$$

где  $\Sigma F$  – МДС обмотки статора на пару полюсов в режиме холостого хода;  $F_{\delta}$ ,  $F_{z1}$ ,  $F_{z2}$ ,  $F_{c1}$  и  $F_{c2}$  – магнитные напряжения соответственно воздушного зазора, зубцовых слоев статора и ротора, спинки статора и ротора.

Таким образом, расчет МДС обмотки статора на пару полюсов сводится к расчету магнитных напряжений на всех участках магнитной цепи.

Полученное в результате расчета магнитной цепи значение МДС на пару полюсов  $\Sigma F$  позволяет определить намагничивающий ток обмотки статора:

$$I_{1н} = \frac{p \Sigma F}{0,9 m_1 \omega_1 k_{об1}}.$$

Исходным параметром при расчете магнитной цепи является максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta}$ . Величину  $B_{\delta}$  принимают по рекомендуемым значениям в зависимости от наружного диаметра сердечника статора  $D_{1н}$  и числа полюсов  $2p$ . Например при  $D_{1н} = 300 \div 800$  мм рекомендуемые значения  $B_{\delta} = 0,80 \div 1,1$  Тл соответственно.

Магнитная индукция  $B_{\delta}$  определяет магнитную нагрузку двигателя: при слишком малом  $B_{\delta}$  магнитная система двигателя недогружена, а поэтому габаритные размеры двигателя получаются неоправданно большими; если же задаться чрезмерно большим течением  $B_{\delta}$ , то резко возрастут магнитные напряжения на участках магнитной системы, особенно в зубцовых слоях



статора и ротора, в результате возрастет намагничивающий ток статора  $I_{1\mu}$  снизится КПД двигателя.

## 2.9 Пуск в ход асинхронных двигателей. Реверс

Основными показателями пусковых свойств асинхронных двигателей являются пусковой момент  $M_{\text{п}}$  и пусковой ток. При пуске необходимо, чтобы пусковой момент был больше момента сопротивления рабочей машины  $M_{\text{с}}$ . Чем больше будет это превышение, тем легче будет пуск.

При пуске  $n_2 = 0$  и  $s = 1$ , а номинальное скольжение примерно равно 0,02-0,07. Отсюда следует, что пусковой ток  $I_{\text{п}}$  будет в несколько раз больше номинального.

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}.$$

При пуске двигателя этот ток, проходя по сети, вызывает снижение напряжения, что отрицательно сказывается на работе потребителей электроэнергии. При прохождении по обмоткам самого двигателя пусковой ток вызывает значительные динамические усилия и их нагрев. Поэтому при пуске двигателя в ход по возможности должны удовлетворяться следующие основные требования: процесс пуска должен быть простым; пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи – по возможности малыми.

Практически используют следующие способы пуска:

- непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск);
- понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;
- подключение к обмотке ротора пускового реостата.

*Прямой пуск.* При прямом пуске двигатель подключается к сети без пусковых устройств. Благодаря своей простоте такой способ является одним из основных для пуска трехфазных АД с короткозамкнутым ротором.

Двигатели малой и средней мощности спроектированы на прямой пуск. Пусковой момент их составляет 100 % – 130 % от номинального, а пусковой ток превышает номинальный в 4–7 раз. Длительность пуска составляет доли секунд у двигателей небольшой мощности и несколько секунд у более мощных двигателей. Обмотки статора при этом не успевают нагреться, а их крепления рассчитаны на динамические усилия, возникающие при пуске.

Двигатели обычно пускаются с помощью электромагнитного выключателя  $K$  (магнитного пускателя) по схеме, изображенной на рисунке 2.24, а.

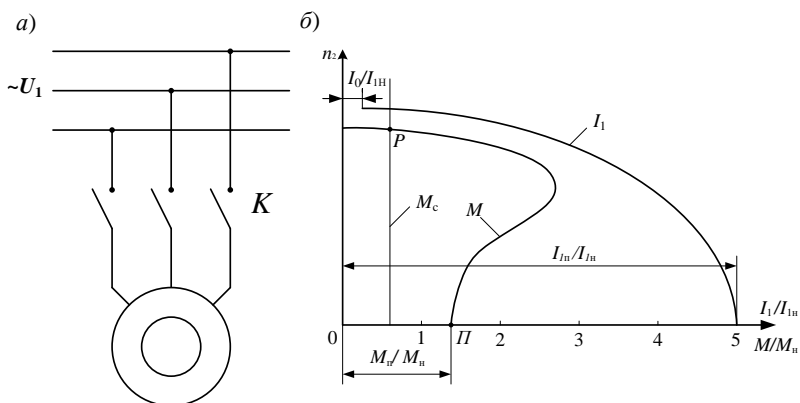


Рисунок 2.24 – Схема включения асинхронного двигателя при прямом пуске (а) и графики изменения момента двигателя, статического момента нагрузки  $M_c$  и тока  $I_1$  (б)

Разгон АД выполняется автоматически по естественной механической характеристике  $M$  (рисунок 2.24, б) от точки П, соответствующей начальному моменту пуска, до точки Р, соответствующей работе двигателя при  $M = M_c$ . Ускорение при любой частоте  $n_2$  определяется разностью абсцисс кривых  $M$  и  $M_c$ . Если в начальный момент пуска  $M_{пн} < M_c$ , то двигатель разогнаться не сможет.

Величину начального пускового момента можно получить из формулы (2.41), положив в ней  $s = 1$ :

$$M_{пн} = \frac{3 U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left[ (r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (2.55)$$

Для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6–100 кВт кратность пускового момента  $k_{пн} = M_{пн} / M_{н} = 1,0 \dots 2,0$ ; мощностью 100–1000 кВт –  $k_{пн} = 0,7 \dots 1,0$ .

Недостатком данного способа пуска является большой бросок пускового тока, кратность пускового тока  $k_{I1} = I_{1пн} / I_{1н} = 5 \dots 7$ .

*Пуск при пониженном напряжении.* Если запуск двигателя осуществляется на холостом ходу или с малым пусковым моментом и в то же время прямой пуск недопустим из-за большого падения напряжения в сети, то для уменьшения пускового тока применяют пуск асинхронного двигателя при пониженном напряжении.

Для снижения напряжения, подаваемого на двигатель, используют следующие способы:

- переключение со «звезды» на «треугольник»;
- пуск через реактор;
- пуск через автотрансформатор.

*Переключение со «звезды» на «треугольник».* Такой пуск применяется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения осуществляется путем переключения обмотки статора при пуске с рабочей схемы  $\Delta$  на пусковую схему  $Y$ , что можно выполнить с помощью трехполюсного переключателя  $\Pi$  (рисунок 2.25) или контактора.

При включении обмотки статора по схеме  $Y$  напряжение, подаваемое на фазы этой обмотки, уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, что обуславливает уменьшение фазных токов в  $\sqrt{3}$  раз и линейных токов в 3 раза по сравнению с пуском по схеме  $\Delta$ . По окончанию процесса пуска и разгона двигателя обмотку статора переключают обратно на схему  $\Delta$ .

Однако подобному способу пуска свойствен весьма серьезный недостаток: пусковой и вращающий моменты двигателя, пропорциональные квадрату напряжения сети, уменьшаются в 3 раза. Кроме того, при напряжении сети 380/220 В двигатели этого же напряжения подобным способом пускать в ход нельзя, так как обмотки их статора при работе должны быть соединены в звезду.

Таким образом, пуск двигателя переключением обмотки статора с треугольника на звезду применяется только в том случае, если при данном напряжении сети обмотка статора двигателя нормально должна быть соединена по схеме треугольник.

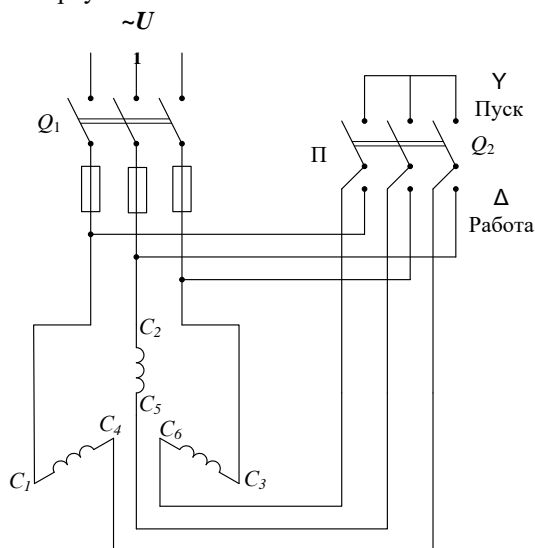


Рисунок 2.25 – Схема пуска в ход короткозамкнутого асинхронного двигателя переключением со звезды на треугольник

Значительное уменьшение моментов  $M_{п}$  и  $M_{макс}$  при отмеченном способе пуска приводит к тому, что данный способ можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки.

На рисунке 2.26 в качестве примера приведены механические характеристики двигателя при соединении обмотки статора по схемам Y и  $\Delta$ .

Пуск через автотрансформатор (рисунок 2.27, а) осуществляется при разомкнутом выключателе  $Q_2$  и замкнутых  $Q_1$  и  $Q_3$ . При этом на АД подается напряжение через понижающий автотрансформатор, и пусковой ток двигателя определяется по формуле

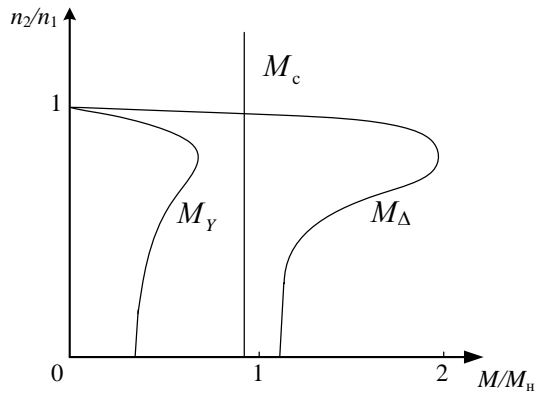


Рисунок 2.26 – Механические характеристики при включении обмотки статора двигателя по схемам Y и  $\Delta$

$$I_{па} = I_{пн} \frac{U_{2a}}{U_{1н}},$$

где  $U_{2a}$  – вторичное напряжение автотрансформатора.

Т.к. пусковой ток в линии  $I_{пл} = I_{па} \frac{U_{2a}}{U_{1н}}$ , то  $I_{пл} = I_{пн} \left( \frac{U_{2a}}{U_{1н}} \right)^2$ .

После разгона АД выключатель  $Q_3$  размыкается, а  $Q_2$  – замыкается.

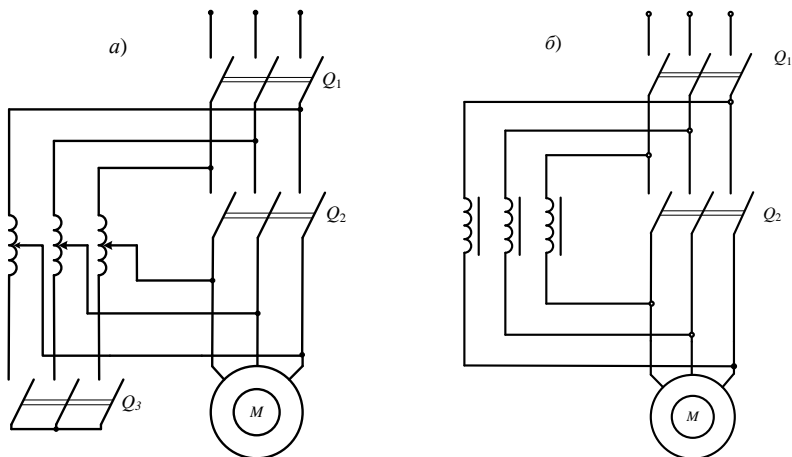


Рисунок 2.27 – Пуск АД с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении:  
 а – с помощью автотрансформатора ; б – с помощью реактора

При пуске через реактор (рисунок 2.27, б) в первый момент выключатель  $Q$  разомкнут, и пусковой ток идет через реактор. После разгона двигателя выключатель  $Q_2$  замыкается, тем самым шунтируя реакторы.

Из-за падения напряжения в реакторе напряжение на двигателе уменьшается. Пусковой ток линии уменьшается пропорционально отношению напряжений:

$$I_{\text{пл}} = I_{\text{пн}} \frac{U_1}{U_{1\text{н}}},$$

где  $I_{\text{пн}}$  – пусковой ток двигателя при номинальном напряжении;  $U_1$  – напряжение на двигателе;  $U_{1\text{н}}$  – номинальное напряжение.

При этом нужно помнить, что и пусковой момент снижается пропорционально квадрату питающего напряжения.

Предположим, что с помощью реактора или понижающего автотрансформатора подаваемое на АД напряжение снизилось на 40 %. Пусковой момент асинхронного двигателя будет снижен на 64 %. При пуске через реактор ток будет снижен на 40 %, а через автотрансформатор – на 64 %, поэтому пуск через автотрансформатор предпочтительнее, чем через реактор, однако он дороже.

Пуск с помощью реостата в цепи ротора. Рассматриваемый способ применяют только для пуска двигателей с фазным ротором. Схема включения двигателя при реостатном пуске и его пусковая диаграмма, графики  $I_1 = f(t)$ ,  $n_2 = f(t)$  представлены на рисунке 2.28.

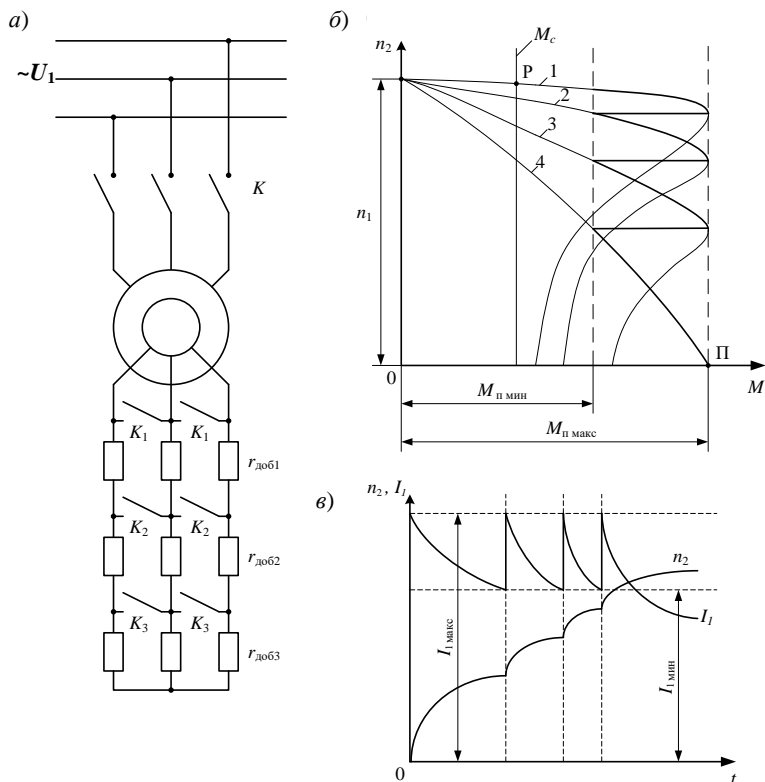


Рисунок 2.28 – Схема включения асинхронного двигателя при реостатном пуске (а), его пусковая диаграмма (б), графики изменения частоты вращения и тока при пуске (в)

Пусковой реостат обычно имеет три – шесть ступеней, что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение пускового момента в период разгона. В начале двигатель пускается по характеристике 4 (рисунок 2.28, б), соответствующей сопротивлению пускового реостата  $r_{пуск} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3}$ , и развивает вращающий момент  $M_{п макс} = M_{ макс}$  (точка  $\Pi$  на диаграмме). Величина  $r_{пуск}$  может быть определена с помощью (2.50), а приведенное

сопротивление пускового реостата  $r'_{\text{пуск}} = (x_1 + x'_2) - r'_2$ , реальное сопротивление пускового реостата:

$$r_{\text{пуск}} = \frac{r'_{\text{пуск}}}{k_e^2} = r'_{\text{пуск}} \left( \frac{w_2 k_{02}}{w_1 k_{01}} \right)^2. \quad (2.56)$$

Включение сопротивления  $r_{\text{пуск}}$  уменьшает также и пусковой ток двигателя, так как  $I'_2 = U_1 / \sqrt{(r_1 + r'_2 + r'_{\text{пуск}})^2 + (x_1 + x'_2)^2}$ , а  $I_1 = I_0 + (-I'_2)$ .

По мере увеличения частоты вращения  $n_2$  вращающий момент  $M$  уменьшается и может стать меньше момента  $M_{\text{п.мин}}$ . Поэтому при  $M = M_{\text{п.мин}}$  часть сопротивления пускового реостата ( $r_{\text{доб3}}$ ) выводят, замыкая контактор  $K_3$ . Вращающий момент при этом мгновенно возрастает до  $M_{\text{п.макс}}$ , а затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике 3, соответствующей сопротивлению реостата ( $r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}}$ ). При дальнейшем уменьшении момента  $M$  до  $M_{\text{п.мин}}$  сопротивление  $r_{\text{доб2}}$  выключается контактором  $K_2$  и двигатель переходит на характеристику 2, соответствующую сопротивлению  $r_{\text{доб1}}$ . Таким образом, при ступенчатом уменьшении  $r_{\text{пуск}}$  вращающий момент двигателя изменяется от  $M_{\text{п.макс}}$  до  $M_{\text{п.мин}}$ , а частота вращения  $n_2$  возрастает по ломанной кривой, показанной на рисунке 2.28, б.

Процесс пуска продолжается до точки Р на диаграмме, в которой наступает равенство  $M = M_c$ . Выключение отдельных ступеней пускового реостата в процессе разгона двигателя может осуществляться вручную или автоматически. Таким образом, включением  $r_{\text{пуск}}$  в цепь ротора можно

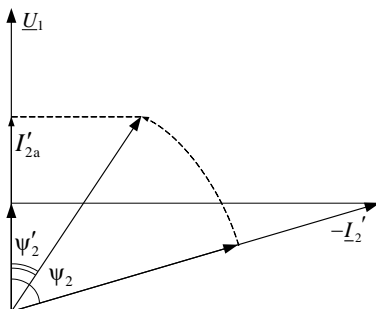


Рисунок 2.29 – Диаграмма пусковых токов АД при введении  $r_{\text{пуск}}$

осуществить пуск двигателя при  $M_{\text{п}} \approx M_{\text{макс}}$  и резко уменьшить при этом пусковой ток. На рисунке 2.28, в показан характер изменения тока  $I_1$  и частоты вращения  $n_2$  при пуске двигателя указанным способом. Ток также изменяется по ломанной кривой между двумя крайними значениями  $I_{1\text{макс}}$  и  $I_{1\text{мин}}$ .

Увеличение  $M_{\text{п}}$  за счет включения пускового реостата в цепь ротора при пуске двигателя может быть также объяснено рисунком 2.29: вращающий момент АД пропорционален амплитудному значению потока  $\Phi_m$ ,

приведенному току роторной обмотки  $I'_2$  и  $\cos\psi_2$ , где  $\psi_2$  – угол между ЭДС и током в роторной обмотке, т. е.

$$M = c_m \Phi_m I'_2 \cos\psi_2, \quad (2.57)$$

где  $c_m$  – коэффициент пропорциональности.

Из (2.57) следует, что вращающий момент зависит от активной составляющей приведенного тока  $I'_{2a}$  роторной обмотки ( $I'_{2a} = I'_2 \cos\psi_2$ ).

С включением  $r_{\text{пуск}}$  при пуске АД уменьшается угол  $\psi_2$  и величина  $I'_2$ , а следовательно, уменьшается и ток  $I_1$ , что приводит к возрастанию новых значений  $I'_{2a}$ , а значит и момента  $M$ .

Недостатком рассмотренного способа пуска асинхронных двигателей с фазным ротором является относительная его сложность. Кроме того, двигатели с фазным ротором имеют несколько худшие рабочие характеристики, чем двигатели с короткозамкнутым ротором такой же мощности (кривые  $\eta$  и  $\cos\phi_2$  проходят ниже). В связи с этим двигатели с фазным ротором применяют только при тяжелых условиях пуска (когда необходимо развивать максимально возможный пусковой момент), при малой мощности электрической сети.

Анализируя в целом данный способ пуска двигателей с фазным ротором, следует отметить, что введение в цепь ротора активного сопротивления целесообразно только до определенного предела. Если значение добавочного сопротивления превысит  $r_{\text{пуск}}$ , то пусковой момент  $M_{\text{п}}$  уменьшится.

*Частотный пуск.* При частотном пуске уменьшение пускового тока достигается за счет уменьшения ЭДС в роторной цепи. Это уменьшение происходит за счет снижения, на время разгона двигателя, частоты питающего трехфазного напряжения. Для реализации частотного пуска требуется специальный источник питания с регулируемой частотой. В настоящее время в качестве такого источника используется полупроводниковый преобразователь частоты. Он превращает переменное однофазное или трехфазное напряжение с частотой 50 Гц в переменное трехфазное с регулируемой частотой. В процессе частотного пуска включение двигателя происходит при минимальной частоте питающего напряжения (несколько герц), а затем, по мере разгона двигателя, частота подводимого к двигателю напряжения постепенно повышается до номинального значения. Данный пуск позволяет уменьшить пусковой ток при сохранении вращающего момента на приемлемом уровне. Недостатком



частотного пуска является необходимость иметь в наличии преобразователь частоты. Это сложное устройство силовой электроники, имеющее меньшее время наработки до отказа, чем асинхронный двигатель. Поэтому частотный пуск реализуется в тех случаях, когда непосредственный преобразователь частоты устанавливается для регулирования частоты вращения ротора двигателя.

Реверс – это изменение направления вращения ротора. Потребность в изменении направления движения или вращения в зависимости от устройства является иногда необходимой (краны, лебедки, лифты, привода задвижек, запирающих устройств), а в некоторых лишь как временная функция (конвейерные ленты, эскалаторы, насосы). Также реверс двигателя могут использовать в целях торможения, так при отключении двигателя от сети, ротор обладая инерцией продолжает свое вращение. При кратковременном включении реверса в этот момент вызовет затормаживание. Такой способ торможения реверсом называют противовключением.

Для смены направления вращения ротора двигателя, необходимо поменять местами две из трех фаз статорной обмотки. После этого вращающееся магнитное поле статора изменит свое направление вращения. Схемы реверса собираются в основном на магнитных пускателях (рисунок 2.30), как в прямом пуске АД, но при реверсе присутствует два магнитных пускателя или контактора, а еще две пусковые кнопки вместо одной.

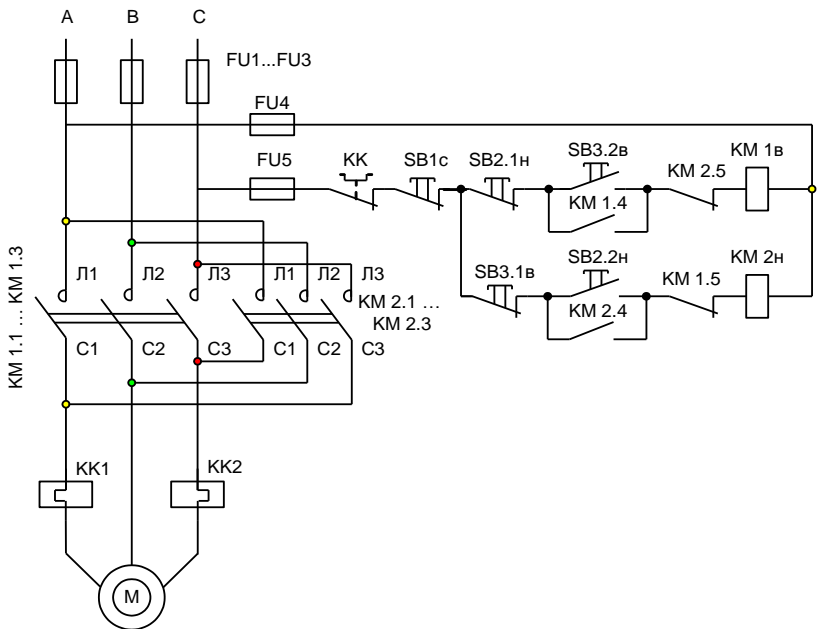


Рисунок 2.30 – Схема реверсивного включения АД с КЗР

Схема электропитания АД, состоит из двух магнитных пускателей с силовыми контактами КМ1 и КМ2. При включении катушки КМ1 и КМ2, включаются силовые контакты КМ1.1 – КМ1.3 или КМ2.1 – КМ2.3, которые подключены так, чтобы при коммутации они меняли фазировку подключения электродвигателя АД, меняя между собой фазы.

При нажатии кнопки SB3.2в (пуск в прямом направлении); через кнопку SB2.1н; контакт КМ2.5, катушку магнитного пускателя КМ1в цепь замкнулась. Катушка КМ1в втягивает якорь, замыкает контакт КМ1.4, тем самым схема не отключается при отпускании кнопки SB3.2в; размыкает контакт КМ1.5, для блокировки ошибочного включения катушки КМ2; электродвигатель АД работает. Кнопкой “Стоп”, можно воспользоваться в любой момент работы электродвигателя АД; для отключения цепи питания катушек КМ1 и КМ2 и размыкания контактов КМ1.4 и КМ2.4.

## 2.10 Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Из формулы для частоты вращения ротора асинхронного двигателя  $n_2 = \frac{60f_1}{p}(1-s)$  следует, что эту частоту можно регулировать следующими способами: изменением частоты  $f_1$  питающего напряжения, числа пар полюсов  $p$  и величины скольжения  $s$ .

*Частотное регулирование.* Этот способ позволяет плавно изменять частоту вращения в широком диапазоне. Для его осуществления требуется, чтобы двигатель получал питание от отдельного источника (преобразователь частоты (ПЧ) на рисунке 2.31).

В зависимости от требований к механическим характеристикам асинхронного двигателя при частотном регулировании одновременно с изменением частоты  $f_1$  приходится по определенному закону изменять и подводимое к обмотке статора напряжение  $U_1$ .

Максимальный момент двигателя приближенно (без учета сопротивления  $r_1$ ) определяется по (2.44),

$$M_{\text{макс}} = \frac{3 U_1^2}{2\omega_1 (x_1 + x_2')}$$

Учитывая, что  $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$ ,

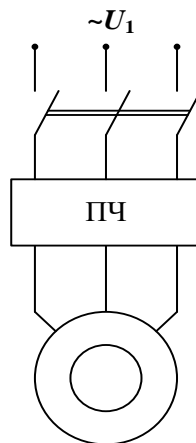


Рисунок 2.31 – Схема подключения АД при регулировании  $n_2$  преобразователем частоты

$x_1 = 2\pi f_1 L_1$ ,  $x_2' = 2\pi f_1 L_2'$ , получим

$$M_{\max} = k_1 \frac{U_1^2}{f_1^2}. \quad (2.58)$$

Если при регулировании частоты вращения требуется, чтобы при любой частоте  $f_1$  максимальный момент оставался неизменным (регулирование с  $M_{\max} = \text{const}$ ), то получим

$$U_{1(1)}/f_{1(1)} = U_{1(2)}/f_{1(2)} = \text{const}, \quad (2.59)$$

откуда следует, что для регулирования  $n_2$  при  $M_{\max} = \text{const}$  необходимо подводимое к обмотке статора напряжение  $U_1$  изменять пропорционально его частоте. При этом основной магнитный поток машины при различных значениях частоты  $f_1$  остается неизменным, т. е.

$$\Phi_m = \frac{1}{4,44 w_1 k_{01}} \frac{U_1}{f_1} = \text{const}. \quad (2.60)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании с  $M_{\max} = \text{const}$  показаны на рисунке 2.32.

Недостатком частотного регулирования является относительно высокая стоимость преобразовательных установок.

*Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов статорной обмотки.* Для осуществления данного регулирования на статоре в общих пазах размещают не одну, а две обмотки, имеющие различные шаги и, следовательно, различное число пар полюсов. В зависимости от необходимой частоты вращения в сеть подключается та или иная обмотка. Этот способ применяется сравнительно редко, так как имеет существенный недостаток – малое использование обмоточного провода (в работе находится только одна из обмоток).

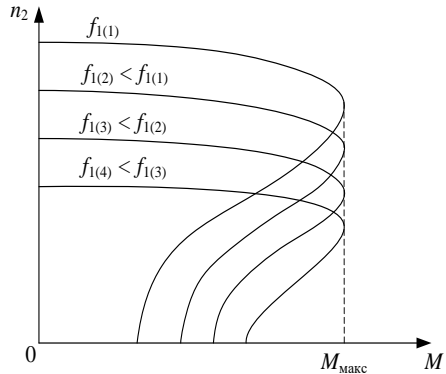


Рисунок 2.32 – Механические характеристики АД при частотном регулировании с  $M_{\max} = \text{const}$

Значительно чаще изменение числа пар полюсов достигается изменением (переключением) схемы соединений обмотки статора. Принцип такого переключения показан на рисунке 2.33.

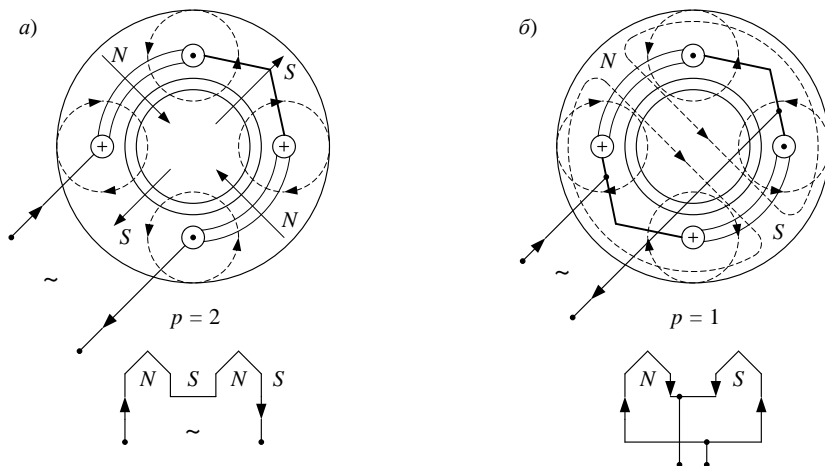


Рисунок 2.33 – Изменение числа пар полюсов переключением катушек обмотки:  
*а* – две пары полюсов; *б* – одна пара полюсов

При переходе с последовательного соединения двух катушек на параллельное число пар полюсов изменяется с 2 на 1. При наличии фазной обмотки на роторе, её также необходимо переключать одновременно с обмоткой статора, что является большим недостатком. Поэтому данный способ регулирования частоты вращения применяется только у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов называют многоскоростными. Они выпускаются на две, три и четыре частоты вращения. Известно большое число схем, позволяющее осуществлять переключение числа пар полюсов. Эти схемы разделяются на схемы регулирования с постоянным моментом и схемы регулирования с постоянной мощностью. Механические характеристики двухскоростных двигателей показаны на рисунке 2.34.

Из всех способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей способ переключения числа пар полюсов является наиболее экономичным, хотя и он имеет недостатки:

- двигатели имеют относительно большие габариты и массу по сравнению с двигателями нормального исполнения;
- регулирование частоты вращения ступенчатое.

Многоскоростные двигатели применяют для электропривода станков и различных механизмов, частоту вращения которых нужно регулировать в широких пределах (например, лифтовые асинхронные двигатели).

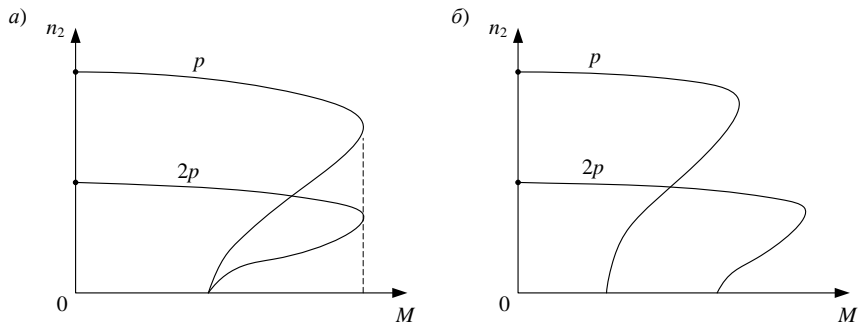


Рисунок 2.34 – Механические характеристики двухскоростного двигателя с переключением числа пар полюсов в отношении 2:1 при постоянном моменте (а) и при постоянной мощности (б)

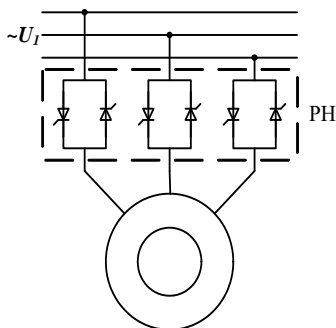


Рисунок 2.35 – Схема питания двигателя от тиристорного регулятора напряжения

Если момент сопротивления  $M_c$  остается постоянным, то, как следует из рисунка 2.36, при снижении напряжения скольжение АД увеличивается. Частота вращения ротора при этом уменьшается.

Регулирование скольжения этим способом возможно в пределах

$$0 < s < s_{кр.}$$

*Регулирование частоты вращения за счет изменения питающего напряжения.* Отмеченное регулирование можно осуществить посредством тиристорного регулятора напряжения РН (рисунок 2.35).

Так как вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален  $U_1^2$ , то механические характеристики при напряжениях, меньше номинального, пойдут ниже естественной (рисунок 2.36).

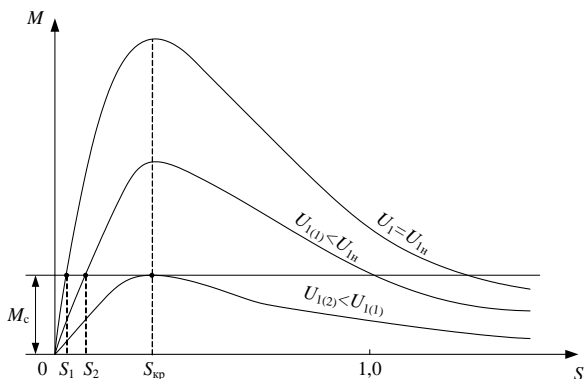


Рисунок 2.36 – Механические характеристики двигателя при различных  $U_1$

Дальнейшее снижение напряжения (ниже кривой  $U_{1(2)}$  на рисунке 2.36) недопустимо, так как при этом  $M_{\max} < M_c$  и двигатель остановится. Если его не отключить, то изоляция обмоток может расплавиться.

Регулирование частоты вращения двигателей изменением подводимого напряжения  $U_1$  имеет существенный недостаток: в этом случае увеличиваются потери и, таким образом, снижается КПД двигателя. При снижении напряжения пропорционально  $U_1$  уменьшается основной магнитный поток машины, вследствие чего при  $M = M_c = \text{const}$  возрастают ток в обмотке ротора и, следовательно, электрические потери в роторе. Магнитные потери в стали статора уменьшаются. Обычно при нагрузках двигателей, близких к номинальной, снижение  $U_1$  приводит к увеличению суммарных потерь и повышению нагрева двигателей. Поэтому рассматриваемый способ регулирования частоты вращения находит применение, главным образом, для машин небольшой мощности.

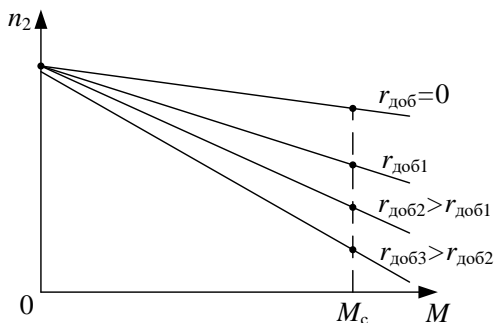
*Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей путем включения в цепь ротора добавочного активного сопротивления.*

Данный способ регулирования применяется только в двигателях с фазным ротором. Он позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах (рисунок 2.37). Недостатками его являются: большие потери энергии в добавочных сопротивлениях, чрезмерно «мягкая» механическая характеристика двигателя при большом сопротивлении в цепи ротора. В некоторых случаях последнее является недопустимым, так как небольшому изменению нагрузочного момента соответствует существенное изменение частоты вращения.

При данном способе регулирования частоты вращения двигателя регулировочный реостат (добавочное активное сопротивление), включаемый в цепь ротора, должен быть рассчитан на длительный режим работы. Поэтому пусковые реостаты, рассчитанные на кратковременное прохождение тока в период пуска, не могут использоваться как регулировочные.

На практике данный способ применяется, главным образом, для регулирования частоты вращения небольших двигателей, например, в подъемных устройствах.

Рисунок 2.37 – Механические характеристики АД при различных  $r_{\text{доб}}$



## 2.11 Асинхронная машина в режимах генератора и электромагнитного тормоза

Тормозные режимы возникают в машине естественно при определенных условиях работы или создаются искусственно с целью ускорения процесса остановки двигателя. Торможение может быть: генераторное (с отдачей энергии в сеть), торможение противовключением и динамическое.

**Генераторный режим.** Если обмотку статора включить в сеть, а ротор асинхронной машины посредством приводного двигателя ПД (двигатель внутреннего сгорания, турбина и т. п.), являющегося источником механической энергии, вращать в направлении вращения магнитного поля статора с частотой  $n_2 > n_1$ , то направление движения ротора относительно поля статора изменится на обратное (по сравнению с двигательным режимом работы этой машины), так как ротор будет обгонять поле статора. Скольжение  $s$  при этом принимает отрицательное значение, и машина переходит в генераторный режим. Следовательно, для работы в режиме генератора необходим источник переменного тока, который создает вращающееся магнитное поле.

При отрицательных значениях скольжения момент машины принимает отрицательное значение, то есть становится тормозящим. Согласно уравнению  $E_{2s} = sE_2$  значение ЭДС ротора  $E_{2s}$  станет отрицательным.

Для упрощения анализа работы машины в генераторном режиме рассмотрим векторную диаграмму (рисунок 2.38).

Из нее видно, что угол  $\varphi_1$  больше, чем  $90^\circ$ . Следовательно, потребляемая активная мощность имеет отрицательное значение и она отдается в сеть. Регулирование отдаваемой генератором активной мощности осуществляется изменением скольжения. Реактивная же мощность, необходимая для создания магнитного поля, потребляется из

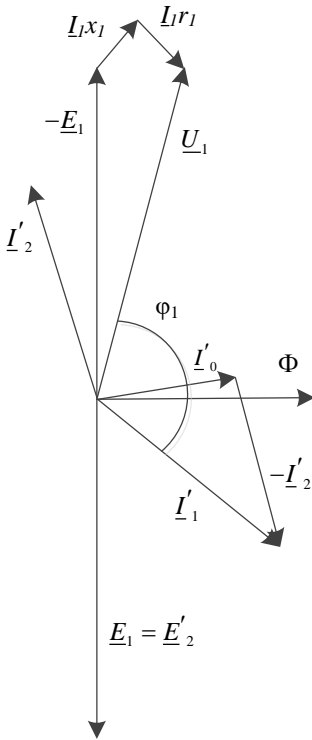


Рисунок 2.38 – Векторная диаграмма асинхронного генератора

сети всегда.

Для работы асинхронного генератора в автономном режиме необходимо его возбуждение. Для самовозбуждения генератора должны выполняться следующие условия: наличие остаточного магнитного потока  $\Phi_{ост}$  и наличие



конденсаторных батарей достаточной емкости. Схема подключения конденсаторов приведена на рисунок 2.39, а.

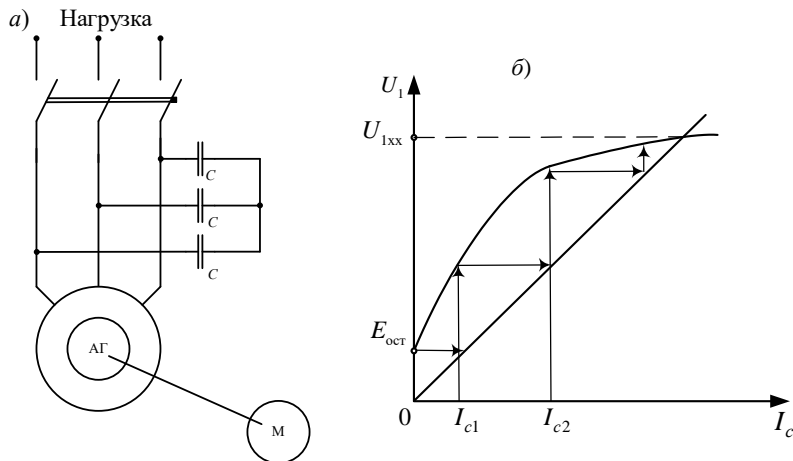


Рисунок 2.39 – Самовозбуждение асинхронного генератора:  
а – схема; б – процесс самовозбуждения

При вращении генератора с достаточной скоростью остаточный магнитный поток  $\Phi_{ост}$  наводит остаточную ЭДС  $E_{ост}$  (рисунок 2.39, б), которая подводится к конденсаторам. Под ее воздействием по конденсаторам пойдет ток  $I_c$ . Он будет проходить и по обмоткам статора, создавая магнитный поток  $\Phi_c$ . Создаваемый током конденсаторов  $\Phi_c$  совпадает по направлению с остаточным магнитным потоком  $\Phi_{ост}$ .

Остаточная ЭДС  $E_{ост}$  отстает от потока  $\Phi_{ост}$  на угол  $90^\circ$ . Ток конденсаторов  $I_c$  опережает ЭДС на  $90^\circ$  и созданный им магнитный поток  $\Phi_c$  по фазе совпадает с током  $I_c$ , следовательно,  $\Phi_{ост}$  совпадает с  $\Phi_c$ . Потоки  $\Phi_{ост}$  и  $\Phi_c$  суммируются в общий поток  $\Phi_0$ , который наводит ЭДС  $E_0$ . Так как  $E_0$  больше напряжения на конденсаторах  $U_{c1} = I_c x_c$ , где  $x_c$  – сопротивление конденсаторов, ток конденсаторов увеличивается до значения  $I_{c2}$ . Процесс повторяется до тех пор, пока напряжение на конденсаторах не будет равно ЭДС генератора.

Проведем сравнение асинхронного генератора с синхронным. Недостатки асинхронного генератора:

- требуется источник реактивной мощности – конденсаторные батареи, емкость которых зависит от нагрузки;
- проблемы при работе на индуктивную нагрузку;
- большие, чем у синхронных генераторов, зависимости напряжения и частоты тока от нагрузки.

Достоинства: дешевле, чем синхронный генератор; надежность его выше из-за отсутствия скользящих контактов.

Таким образом, из-за перечисленных выше недостатков асинхронные генераторы применяются значительно реже синхронных.

Асинхронный генератор используется на гидроэлектростанциях малой мощности, в ветроэнергетических и биогазовых установках.

*Режим электромагнитного торможения*

*Торможение противовключением.* Если у работающего трехфазного асинхронного двигателя поменять местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов (см. рисунок 2.30), то направление вращающегося поля статора изменится на обратное. При этом ротор асинхронной машины под действием сил инерции будет продолжать вращение в прежнем направлении. Другими словами, ротор и поле статора асинхронной машины будут вращаться в противоположных направлениях. В этих условиях электромагнитный момент машины, направленный в сторону вращения поля статора, будет оказывать на ротор тормозящее действие.

В режиме электромагнитного торможения частота вращения ротора является отрицательной, а поэтому скольжение  $s$  приобретает положительные значения больше единицы. Практически вся поступающая в машину мощность в виде тепловых потерь выделяется в обмотке ротора. В тепловом отношении данный режим является особенно тяжелым.

Режим электромагнитного торможения используется для быстрой остановки двигателя. Последний способ иногда называют торможением противовключением: для него изменяют порядок чередования фаз. Ротор при этом вращается против направления движения поля и постоянно замедляется. Когда скорость падает до нуля, двигатель должен быть отключен от сети, иначе его ротор будет вращаться в направлении.

При торможении противовключением токи в обмотке двигателя могут в несколько раз превышать соответствующие номинальные токи. С целью увеличения эффективности торможения двигателей с фазным ротором в цепи их роторов вводят добавочные сопротивления, что позволяет ограничить токи в обмотках и увеличить момент.

*Динамическое торможение* реализуется отключением обмотки статора от сети переменного тока и включением на постоянное напряжение (рисунок 2.40).

Этот тормозной режим используется для точной остановки двигателей. Во время торможения обмотка статора создаёт постоянное неподвижное магнитное поле. При вращении ротора относительно этого магнитного поля изменяется направление ЭДС ротора. При этом ток ротора будет зависеть от сопротивления в цепи ротора (если таковое имеется). Это приведет к изменению направления электромагнитного момента, то есть он станет тормозным и под действием этого момента происходит торможение.

Кинетическая энергия вращающихся частей переходит в теплоту, выделяющуюся в цепи ротора за счет токов, индуцированных в ней неподвижным полем статора. Изменяя величину подведенного к обмотке статора напряжения либо сопротивление в цепи ротора, можно регулировать величину тормозного момента. Основными достоинствами этого тормозного режима являются возможность регулировать момент торможения и возможность точной остановки. После остановки двигатель нужно отключить от сети постоянного тока.

Данный вид торможения асинхронного двигателя применяется, например, в подъёмно-транспортных машинах, в циркулярных пилах, в двухсистемных электровозах, в конвейерах для безопасной остановки механизмов при отключении электродвигателей и т. д.

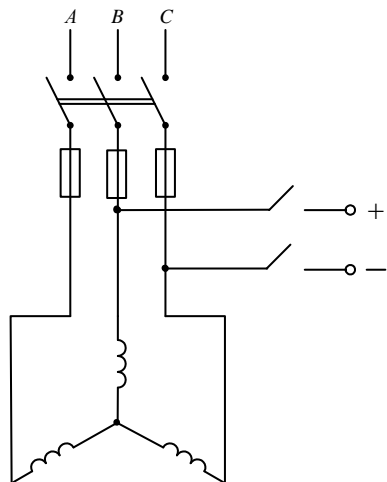


Рисунок 2.40 – Схема динамического торможения АД

## 2.12 Однофазные асинхронные двигатели

В отличие от трехфазного двигателя, который имеет три одинаковых обмотки статора, у однофазного их две, причем они могут отличаться друг от друга. Ротор обычной конструкции – короткозамкнутый. Одна из обмоток является рабочей, вторая может быть пусковой и использоваться только во время пуска, а может, как и первая, быть рабочей, включенной через конденсатор.

Однофазные асинхронные двигатели используются в электробытовых приборах и автоматических устройствах для привода вентиляторов, насосов и т. п., т. е. там, где не требуется регулирование частоты вращения.

Распределение МДС и индукции в воздушном зазоре машины близко к синусоидальному. Поскольку по обмотке проходит переменный ток, МДС пульсирует во времени с частотой сети. Индукция в произвольной точке воздушного зазора

$$B_x = B_m \sin \omega t \cos(\pi x / \tau). \quad (2.61)$$

Таким образом, в однофазном двигателе обмотка статора создает неподвижный поток, изменяющийся во времени, а не круговой вращающийся, как в трехфазных двигателях.

Для облегчения анализа свойств однофазного двигателя представим (2.61) в следующем виде:

$$B_x = 0,5 B_m \sin(\omega t - \pi x / \tau) + 0,5 B_m \sin(\omega t + \pi x / \tau), \quad (2.62)$$

т.е. заменим неподвижный пульсирующий поток суммой круговых вращающихся полей, совершенно идентичных, имеющих одинаковые частоты вращения  $n_{1пр} = n_{1обр} = n_1$ , но противоположных по направлению (рисунок 2.41).

Поле, направление вращения которого совпадает с действительным направлением вращения ротора, называется прямым, если не совпадает – обратным. Каждое из вращающихся полей, взаимодействуя с токами ротора, создает свой момент, т. е. имеем  $M_{пр}$  и  $M_{обр}$ .

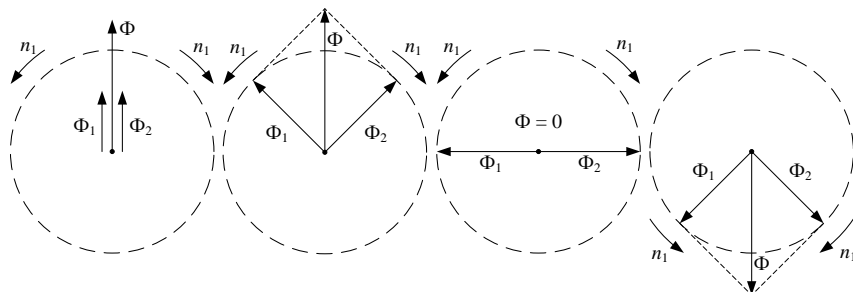


Рисунок 2.41 – Разложение пульсирующего поля на два вращающихся

Скольжение ротора относительно прямого потока  $\Phi_{пр}$

$$s_{пр} = (n_{1пр} - n_2) / n_{1пр} = (n_1 - n_2) / n_1 = 1 - n_2 / n_1. \quad (2.63)$$

Скольжение ротора относительно обратного потока  $\Phi_{обр}$

$$s_{обр} = (n_{1обр} + n_2) / n_{1обр} = (n_1 + n_2) / n_1 = 1 + n_2 / n_1. \quad (2.64)$$

Так как из (2.63)  $n_2 / n_1 = 1 - s_{пр}$ , то

$$s_{обр} = 1 + n_2 / n_1 = 2 - s_{пр}. \quad (2.65)$$

От каждого из вращающихся полей  $\Phi_{пр}$  и  $\Phi_{обр}$  в обмотке ротора индуцируются ЭДС и протекают токи с частотами

$$\left. \begin{aligned} f_{2S пр} &= f_1 s_{пр}; \\ f_{2S обр} &= f_1 s_{обр} = f_1 (2 - s_{пр}). \end{aligned} \right\} \quad (2.66)$$

При вращении ротора магнитное поле машины не остается пульсирующим, каким оно было при пуске ( $s = 1$ ), а становится вращающимся эллиптическим. Происходит это потому, что при  $s_{пр} < 1$

обратное поле сильно ослабляется вследствие размагничивающего действия тока, индуцированного в обмотке ротора обратным полем.

Моменты  $M_{пр}$  и  $M_{обр}$  направлены в противоположные стороны, а результирующий момент однофазного двигателя  $M_{рез}$  равен разности моментов, определенных при одной и той же частоте вращения ротора (рисунок 2.42).

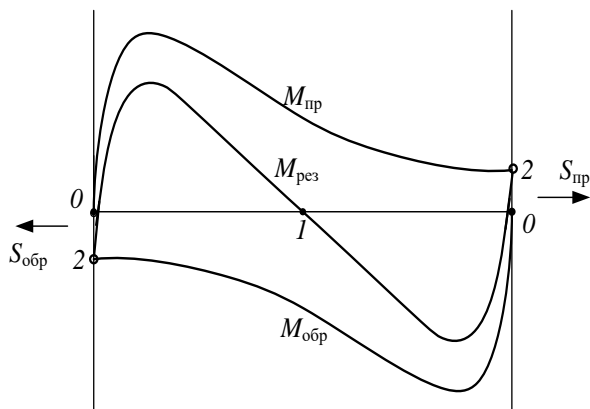


Рисунок 2.42 – Зависимости  $M = f(s)$  для двигателя от прямого и обратного вращающихся полей

Анализ рисунка 2.42 показывает:

- 1) однофазный двигатель не имеет пускового момента; он будет вращаться в ту сторону, в которую будет приведен внешней силой;
- 2) частота вращения однофазного двигателя при холостом ходе меньше частоты вращения трехфазного двигателя из-за наличия тормозящего момента, образуемого обратным полем;
- 3) рабочие характеристики однофазного двигателя хуже, чем трехфазного: он имеет повышенное скольжение при номинальной нагрузке, меньший КПД, меньшую перегрузочную способность, что также объясняется наличием обратного поля.

Кроме того, мощность однофазного двигателя составляет примерно 2/3 от мощности трехфазного двигателя того же габарита, так как в однофазном двигателе под размещение рабочей обмотки используется только 2/3 пазов статора. Заполнять же все пазы статора обмоткой нерационально, так как при этом обмоточный коэффициент получается малым, расход меди возрастет примерно в 1,5 раза, а мощность увеличивается только на 12 %.

Чтобы получить пусковой момент, однофазные двигатели снабжают пусковой обмоткой (ПО), расположенной со сдвигом на 90 эл. градусов относительно рабочей обмотки (РО). На период пуска пусковую обмотку

присоединяют к сети через фазосдвигающие элементы: емкость или активное сопротивление. После окончания разгона двигателя пусковую обмотку отключают, и двигатель продолжает работать как однофазный. Поскольку пусковая обмотка работает лишь короткое время, её изготавливают из провода меньшего сечения, чем рабочую, и укладывают в меньшее число пазов.

Процесс пуска двигателя при использовании в качестве фазосдвигающего элемента емкости представлен на рисунке 2.43.

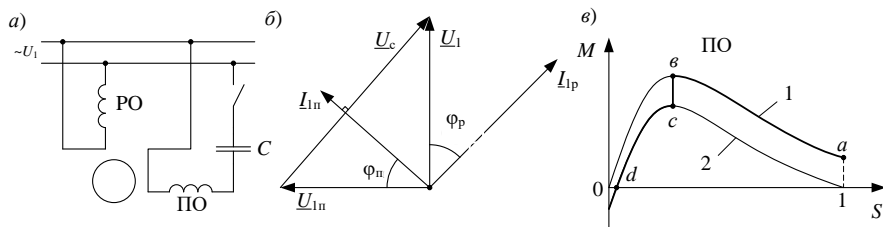


Рисунок 2.43 – Схема однофазного асинхронного двигателя с конденсаторным пуском (а), его векторная диаграмма (б) и механическая характеристика (в)

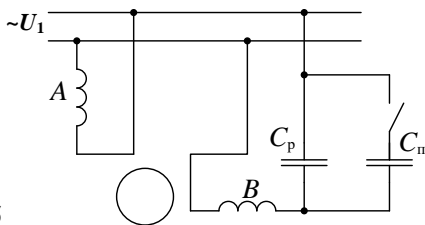
Напряжение на пусковой обмотке ПО

$$\underline{U}_{1п} = \underline{U}_1 - \underline{U}_c = \underline{U}_1 + jI_{1п}x_c,$$

т. е. сдвинуто по фазе относительно напряжения сети  $\underline{U}_1$ , приложенного к рабочей обмотке РО. Следовательно, между векторами токов  $\underline{I}_{1р}$  и  $\underline{I}_{1п}$  будет иметь место некоторый сдвиг по фазе. Выбирая определенным образом емкость фазосдвигающего конденсатора, можно получить круговое вращающееся магнитное поле, которому соответствует кривая 1 на рисунке 2.43, в. Пуск двигателя в ход осуществляется на части  $av$  кривой 1; в точке  $e$  происходит выключение пусковой обмотки и в дальнейшем двигатель работает на части  $cd$  характеристики 2.

Поскольку включение второй обмотки существенно улучшает механическую характеристику двигателя, в некоторых случаях применяют однофазные двигатели, в которых обе обмотки включены всё время (рисунок 2.44). Такие двигатели называют конденсаторными. В них обе обмотки (А и В) занимают, как правило, одинаковое число пазов и имеют одинаковую мощность.

При пуске конденсаторного двигателя для увеличения пускового момента рационально иметь увеличенную емкость  $C_p + C_n$ . После разгона



двигателя и уменьшения тока часть конденсаторов ( $C_n$ ) отключают.

Конденсаторный двигатель имеет высокий  $\cos\phi$ . Недостатком его является сравнительно большая масса и габариты конденсатора.

Рисунок 2.44 – Схема конденсаторного асинхронного двигателя

### 2.13 Использование трехфазного асинхронного двигателя в режиме однофазного

Если возникает необходимость использовать трехфазный асинхронный двигатель в однофазной сети, его включают по схемам, приведенным на рисунок 2.45 [19].

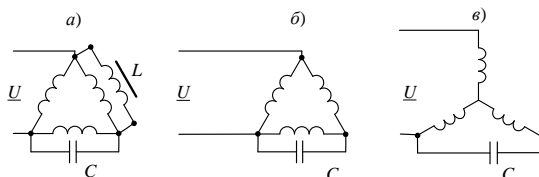


Рисунок 2.45 – Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя при питании его от однофазной сети

Так же как и в конденсаторном двигателе, емкость конденсаторов во всех схемах пропорциональна нагрузке. В двигателе, включенном по схеме, показанной на рисунке 2.45, а, при точном подборе емкости и индуктивности создается круговое вращающееся магнитное поле.

Это означает, что при расчетной нагрузке двигатель может развить такую же мощность как трехфазный. При использовании указанной схемы имеются технические трудности: если емкость конденсатора можно рассчитать по формуле:

$$C_p = \frac{4800I_1}{U_1},$$

то индуктивность подбирается экспериментально, так, чтобы напряжения на индуктивности и на емкости равнялись напряжению сети.

При использовании схемы, показанной на рисунке 2.46, б, можно получить 70-80 % мощности трехфазного двигателя. Снижение мощности происходит за счет того, что магнитное поле получается не круговое, а эллиптическое.

Иногда в клеммной коробке имеются только начала обмоток, а концы соединены в «звезду» внутри двигателя. При таком соединении требуется разборка для нахождения концов обмоток.

По схеме, приведенной на рисунке 2.45, в, значение тока будет в  $\sqrt{3}$  раз меньшим, чем в предыдущей схеме, поэтому мощность будет также в  $\sqrt{3}$

раз меньше и составит 40-46 % мощности трехфазного двигателя. Емкость конденсаторов в этом случае

$$C_p = \frac{2800I_1}{U_1}.$$

### Пример решения задачи 3

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими номинальными данными: мощность  $P_n = 10$  кВт, напряжение  $U_1 = 380$  В, частота вращения  $n_n = 1420$  об/мин, КПД  $\eta_n = 0,84$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_{1n} = 0,85$ . Кратность максимального момента (перегрузочная способность двигателя)  $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_n} = 1,8$ .

Определить:

- 1) потребляемую активную мощность из сети при номинальной нагрузке;
- 2) номинальный и максимальный вращающие моменты;
- 3) номинальный ток;
- 4) номинальное и критическое скольжение;
- 5) построить механические характеристики  $n = f(M)$  и  $M = f(s)$ ;
- 6) определить электромагнитную мощность и потери энергии в статоре при номинальной нагрузке;
- 7) общие потери в двигателе при номинальной нагрузке;
- 8) электрические потери в роторе при номинальной нагрузке;
- 9) установить возможность пуска двигателя при полной его нагрузке на валу, т. е. когда  $M_c = M_n$ ;
- 10) установить возможность работы двигателя при кратковременной перегрузке  $M_c = 110$  Нм;
- 11) определить кратность пускового момента  $k_n$ ;
- 12) используя график  $n = f(M)$ , определить полезную мощность на валу двигателя  $P_2$  при  $n = 1450$  об/мин.

*Решение.* Потребляемая активная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{1n} = \frac{P_n}{\eta} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{10 \cdot 10^3}{1420} = 67,3 \text{ Нм; } M_{кр} = \lambda M_n = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Нм.}$$

Номинальный ток

$$I_{1n} = \frac{P_{1n}}{\sqrt{3} U_1 \cos\varphi_{1n}} = \frac{11,9 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 21,3 \text{ А.}$$

Номинальное и критическое скольжения:



$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053,$$

$$s_{\text{кр}} = s_H \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,053 \left( 1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Механическую характеристику  $M = f(s)$  строим по уравнению Клосса, а для построения  $n = f(M)$  дополнительно используем зависимость  $n = n_1(1 - s)$ . Результаты расчёта заносим в таблицу 2.24.

Таблица 2.1 – Результаты расчёта характеристик асинхронного двигателя

$s$	0,033	0,053	0,1	0,175	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$n$ , об/мин	1450	1420	1350	1238	1200	1050	900	600	300	0
$M$ , Нм	44	67,3	104,3	121	120	105,3	88,38	65,2	50,5	41,2

Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм}} = M_H \omega_1 = M_H \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{M_H n_1}{9,55} = \frac{67,3 \cdot 1500}{9,55} = 10570 \text{ Вт.}$$

Потери энергии в статоре при номинальной нагрузке

$$\Delta P_c = P_{1H} - P_{\text{эм}} = 11900 - 10570 = 1330 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в роторе при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{\text{эл}} = P_{\text{эм}} s_H = 10570 \cdot 0,0533 = 560 \text{ Вт.}$$

Общие потери энергии в асинхронном двигателе при номинальной нагрузке на валу

$$P_{\Sigma} = P_{1H} - P_H = 11900 - 10000 = 1900 \text{ Вт.}$$

На основании табличных данных строим характеристики  $M = f(s)$  и  $n = f(M)$ , изображённые на рисунках 2.46 и 2.47.

Из расчетной таблицы имеем при пуске двигателя  $s = 1$  и  $M_H = 41,2$  Нм. Так как  $M_c = 67,3$  Нм  $>$   $M_H$ , то запустить двигатель нельзя. Работа двигателя при кратковременной перегрузке, равной 110 Нм, возможна, так как при этом  $M_{\text{кр}} > M_c$  ( $M_{\text{кр}} = 121$  Нм).

Кратность пускового момента

$$k_H = \frac{M_H}{M_H} = \frac{41,2}{67,3} = 0,61.$$

Полезная мощность  $P_2'$ , Вт, на валу двигателя при частоте вращения ротора  $n = 1450$  об/мин

$$P_2' = 0,104 M n = 0,104 \cdot 44 \cdot 1450 = 6635 \text{ Вт,}$$

где  $M$ , Нм, берётся из рассчитанной выше таблицы 2.1 для определенного значения частоты вращения ротора  $n$ .

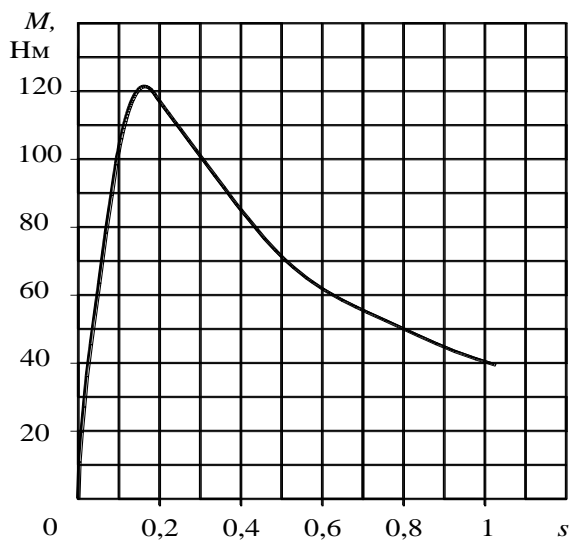


Рисунок 2.46 – Расчётная зависимость вращающего момента двигателя от скольжения

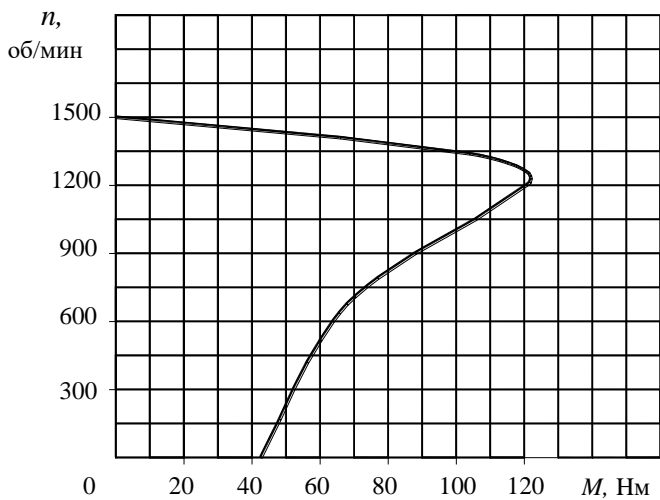


Рисунок 2.47 – Расчётная зависимость частоты вращения

двигателя от вращающего момента

## Контрольные вопросы

1. Как изменится ток холостого хода  $I_0$  и номинальный коэффициент мощности двигателя  $\cos\varphi_n$ , если увеличить воздушный зазор между ротором и статором?
2. Почему ток холостого хода двигателя меньше, чем ток номинального режима?
3. Почему в момент пуска двигателя ток статора имеет максимальное значение? Чему при этом равны скольжение  $s$  и частота тока ротора  $f_2$ ?
4. С какой целью вводится добавочное сопротивление реостата  $R_p$  в цепь ротора двигателя с фазным ротором?
5. Начертите искусственные механические характеристики при регулировании частоты вращения посредством изменения частоты питающей сети.
6. Почему намагничивающий ток АД составляет (25...50%)  $I_n$ , а у трансформатора он составляет (3...10%)  $I_n$ ?
7. В каком режиме ток обмотки короткозамкнутого ротора имеет максимальное значение? Чему при этом равно скольжение?
8. Чему равна частота тока ротора в момент пуска? Постройте зависимость  $f_2(s)$ .
9. Как влияет на процесс пуска двигателя момент нагрузки?
10. Как изменится величина  $M_n$  при переключении обмотки статора со  $\Delta$  на  $Y$ ?
11. Почему пусковые свойства двигателя с фазным ротором могут быть лучше, чем у двигателя с короткозамкнутым ротором той же мощности?
12. Каким образом можно уменьшить  $I_n$  двигателя с короткозамкнутым ротором?
13. Зависит ли пусковой момент АД от величины напряжения сети?
14. Как зависит ЭДС ротора  $E_2$  от частоты его вращения  $n_2$ ? Когда в роторе наводится максимальная ЭДС?
15. Во сколько раз изменится максимальное значение момента  $M_{\max}$ , если напряжение сети снизится на 10%?
16. Начертите рабочие характеристики АД и поясните их характер.
17. Поясните вид механической характеристики трехфазного АД.
18. Как изменяется величины максимального момента  $M_{\max}$  и критического скольжения  $s_{\text{кр}}$  при введении пускового реостата в цепь фазного ротора?
20. Как изменятся величина тока статора,  $\cos\varphi$  и частота тока ротора  $f_2$  при уменьшении противодействующего момента на валу двигателя?
21. Напишите уравнения намагничивающих сил и электрического состояния цепей ротора и статора АД.
22. Почему при введении реостата в цепь ротора АД с фазным ротором пусковой ток уменьшается, а пусковой момент увеличивается?
23. Начертите искусственные механические характеристики АД при регулировании частоты вращения изменением числа пар полюсов.
24. Как изменяется величина критического скольжения  $s_{\text{кр}}$  с изменением величины добавочного сопротивления, введенного в цепь ротора?
26. Перечислите способы регулирования частоты вращения АД и укажите наиболее экономичные из них.
27. Для чего последовательно с пусковой обмоткой однофазного АД включается конденсатор?
28. Почему на энергетической диаграмме асинхронного двигателя отсутствуют потери в магнитопроводе ротора?

## 3 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 3.1 Применение, классификация и устройство синхронных машин

**Синхронные машины (СМ)** – это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля статора  $n = 60f/p$ , где  $f$  – частота переменного тока,  $p$  – число пар полюсов. СМ, как и все электрические машины, обратимы, т. е. они могут работать как генераторами, так и двигателями.

Синхронные машины широко применяются в народном хозяйстве как электрические генераторы и двигатели преимущественно большой мощности. На современных электростанциях электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами (СГ), которые обычно соединяются с приводными двигателями без промежуточных редукторов. Приводными двигателями для мощных синхронных генераторов служат гидротурбины, паровые и газовые турбины и относительно редко – двигатели внутреннего сгорания. СГ также служат источниками автономного электропитания на транспорте, в передвижных электростанциях.

Синхронные двигатели (СД) применяются там, где требуется постоянная частота вращения. Мощные синхронные двигатели используются в качестве электроприводов на металлургических заводах, холодильных и компрессорных установках, нефтеперекачивающих станциях магистральных трубопроводов, для привода некоторых станков, насосов вентиляторов и т. д.

Весьма ценным свойством СД является их способность работать при токе, опережающем по фазе питающее напряжение. Это свойство используется для увеличения коэффициента мощности сети ( $\cos\varphi$ ). Специальные СД, предназначенные для увеличения  $\cos\varphi$ , называются *синхронными компенсаторами*. Они устанавливаются на крупных промышленных предприятиях и на трансформаторных подстанциях энергосистемы.

По назначению СМ можно разделить на генераторы, двигатели и специальные машины.

Синхронная машина состоит из неподвижной части – статора, и вращающейся части – ротора, которая представляет собой электромагнит. В обмотки возбуждения ротора через щетки и кольца подается постоянный ток от возбудителя – машины постоянного тока или выпрямителя.

Якорем называется часть электрической машины, в которой индуцируется ЭДС (в СМ якорь чаще всего располагается на статоре). Устройство статора СМ принципиально не отличается от устройства статора асинхронной машины; существенные отличия имеются только в машинах большой мощности. Статор СМ (рисунок 3.1) состоит из чугунной станины

– корпуса, внутри которого находится сердечник статора, собранный из отдельных, изолированных между собой листов электротехнической стали. В пазы сердечника укладывают обмотку статора из медного изолированного провода.

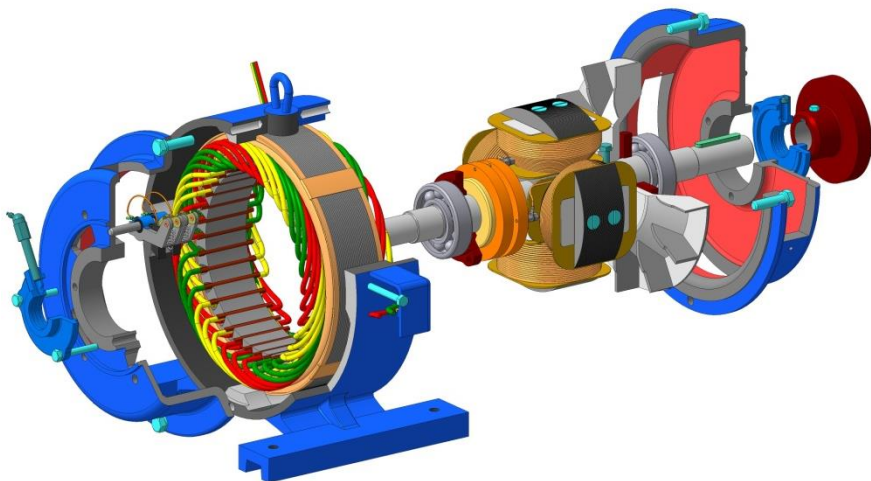


Рисунок 3.1 – Устройство синхронной машины

По способу возбуждения различают СМ с электромагнитным и магнитоэлектрическим (используются постоянные магниты) возбуждением.

По конструкции ротора существуют СМ с явнополюсным и неявнополюсным ротором. Конструкции различных роторов представлены на рисунке 3.2. *Явнополюсный* ротор, имеющий выступающие полюсы, применяется для тихоходных машин с частотами вращения значительно меньше 1000 об/мин. Для быстроходных мощных машин с частотами 1500 –

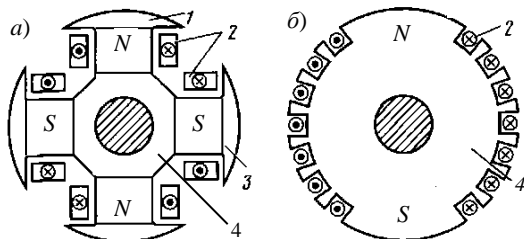


Рисунок 3.2 – Конструкции ротора явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины:

1 – полюсный наконечник; 2 – виток обмотки возбуждения; 3 – сердечник полюса; 4 – сердечник

При *электромагнитном возбуждении* ротор представляет собой электромагнит, обмотка которого питается постоянным током через два

3000 об/мин  
явнополюсный ротор конструктивно невыполним из-за сложности надежного крепления полюсов при больших центробежных силах. Поэтому для быстроходных машин применяется *неявнополюсный* ротор, имеющий вид цилиндра без выступающих полюсов.

изолированных контактных кольца, укрепленных на валу машины и вращающихся вместе с ротором. Этот ток подводится к ротору извне от дополнительного генератора постоянного тока небольшой мощности (возбудителя, рисунок 3.3 [9]). Питание цепи возбуждения также можно осуществить от промышленной сети, используя управляемый тиристорный выпрямитель. В последние годы выпускаются синхронные машины с бесщеточным возбуждением. Обмотка ротора таких машин питается от полупроводникового выпрямителя, вращающегося вместе с ротором. Выпрямитель, в свою очередь, получает питание от возбудителя, в качестве которого выступает синхронный генератор небольшой мощности с якорем, размещенным на роторе, вал которого является продолжением вала основного генератора. Наведенная во вращающемся якоре возбудителя ЭДС, по проводникам, проложенным внутри полого вала ротора, подается на выпрямитель и далее на обмотку возбуждения основного генератора.

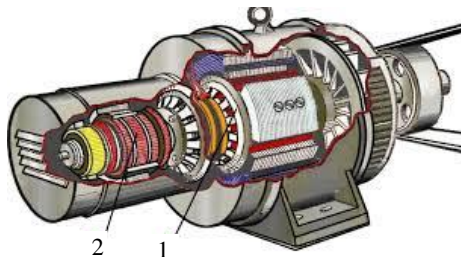


Рисунок 3.3– Расположение возбудителя (2) и генератора (1) в синхронной машине

Сердечники полюсов большей частью изготавливают из литой стали, а обмотку полюсов – из медных изолированных проводов. Для создания синусоидально изменяющейся ЭДС необходимо получить синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Это достигается неравномерностью воздушного зазора между наконечником полюса и стальной магнитопроводом статора: по краям полюсных наконечников воздушный зазор больше, чем под их серединой.

Существует прямое и обратное исполнение синхронной машины. Прямое исполнение – обмотка возбуждения расположена на роторе, а обмотка переменного тока – на статоре. Обратное исполнение – обмотка возбуждения расположена на статоре, а рабочая обмотка – на роторе.

### 3.2 Синхронный генератор

#### 3.2.1 Принцип действия синхронного генератора

Частота тока в роторе синхронного генератора (СГ)

$$f = p n / 60, \quad (3.1)$$

где  $n$  – частота вращения ротора;

$f$  – частота тока;

$p$  – число пар полюсов ротора.

СГ трехфазного тока изготавливают на следующие номинальные

напряжения: 230, 400, 690, 3150, 6300, 10500, 21000 В.

Работу синхронной машины рассмотрим на примере трехфазного СГ с явнополюсным ротором-электромагнитом (рисунок 3.4). Принцип действия СГ основан на двух законах электротехники: законе электромагнитной индукции и законе электромагнитных сил.

При холостом ходе ток якоря синхронной машины равен нулю. При вращении ротора приводным двигателем с моментом  $M_{вд}$  и частотой вращения  $n$  вместе с ним вращается и основной магнитный поток  $\Phi_0$ . Магнитный поток магнита  $\Phi_0$  идет по пути наименьшего магнитного сопротивления, замыкаясь по стали. Пересекая проводники каждой фазы статорной обмотки, магнитный поток индуцирует в них ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. Действующее значение синусоидальной ЭДС  $E_0$ , индуцируемой при холостом ходе в одной фазе статора синхронного генератора, равна

$$E_0 = 4,44k_{об}wf\Phi_0, \quad (3.2)$$

где  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент;

$w$  – число витков одной фазы статора, включенных последовательно;

$\Phi_0$  – магнитный поток полюса ротора при токе возбуждения  $I_{в}$ .

При вращении ротора частота ЭДС, индуцируемой в статорной обмотке, определяется выражением (3.1).

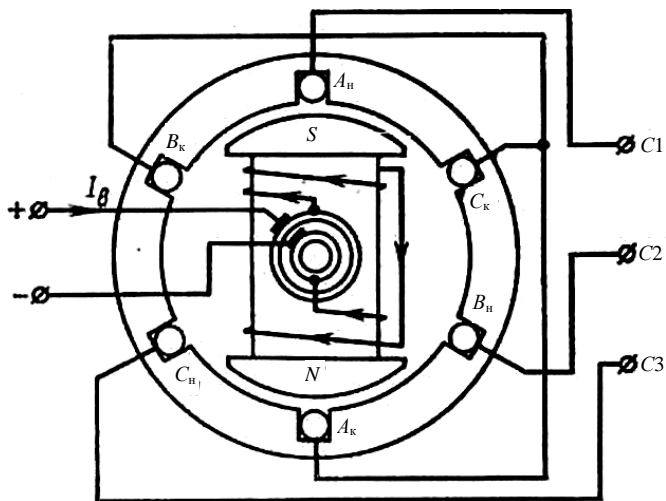


Рисунок 3.4– Конструктивная схема трехфазного синхронного генератора

Магнитный поток статора, который называется потоком якоря, вращается в ту же сторону и с той же частотой, что и ротор. Следовательно, вращающееся поле статора неподвижно относительно ротора. Магнитный



поток статора имеет две составляющие – основное магнитный поток якоря  $\Phi_a$  и магнитный поток рассеяния  $\Phi_\sigma$ , силовые линии которого замыкаются вокруг проводов обмотки якоря и в ротор не проходят.

При вращении ротора ЭДС трех обмоток статора будут образовывать симметричную трехфазную систему:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t ; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Присоединим к статорной обмотке трехфазную нагрузку. По фазам генератора и нагрузки потечет переменный ток. Сдвиг тока относительно ЭДС определяется характером нагрузки. При активной нагрузке ток в фазе совпадает с ЭДС, при активно-индуктивной – отстает от ЭДС, при активно-емкостной – опережает ЭДС.

Для активной нагрузки токи в фазах, т. е. обмотках статора, совпадают по направлению с ЭДС. В этом случае имеем симметричную трехфазную систему токов:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t ; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

По закону электромагнитных сил на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила. Направление этой силы определяется по правилу левой руки. Со стороны статора на ротор будет действовать такая же сила, но обратного направления, т. к. в этом случае будет соблюдаться равновесие сил.

Электромагнитная сила, действующая на ротор, создает электромагнитный момент, направленный против вращения ротора. Значит, электромагнитный момент в СГ является тормозным. Он тем больше, чем больше отбирается ток или электрическая мощность от генератора.

Под действием электромагнитного тормозного момента частота вращения ротора, а следовательно, и частота ЭДС, вырабатываемой генератором, начинает снижаться. Если изменение частоты недопустимо, то с возрастанием нагрузки на генератор необходимо увеличивать вращающий момент, создаваемый приводным двигателем.

#### *Уравнения напряжений синхронного генератора.*

Отличие напряжения на выводах СГ под нагрузкой от режима холостого хода вызвано следующими причинами: реакцией якоря, магнитным потоком рассеяния, падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора.

Поясним влияние магнитодвижущих сил на работу явнополюсного СГ.

1. МДС обмотки возбуждения  $F_{в0}$ , создает магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$ , который, сцепляясь с обмоткой статора, наводит в ней основную ЭДС генератора  $\underline{E}_0$ .

2. МДС реакции якоря по продольной оси создает магнитный поток  $\Phi_{1d}$  (рисунок 3.5), который наводит в обмотке статора ЭДС реакции якоря  $E_{1d}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению реакции якоря по продольной оси  $x_{ad}$ . Это сопротивление характеризует уровень

влияния реакции якоря по продольной оси на работу СГ. Так, при насыщенной магнитной системе машины магнитный поток реакции якоря  $\Phi_{1d}$  меньше, чем при ненасыщенной магнитной системе. Объясняется это тем, что поток  $\Phi_{1d}$  почти полностью проходит по стальным участкам магнитопровода, преодолевая небольшой воздушный зазор, а поэтому при магнитном насыщении сопротивление этому потоку заметно возрастает. При этом индуктивное сопротивление  $x_{1d}$  уменьшается.

3. МДС реакции якоря по поперечной оси  $F_{1q}$  создает магнитный поток  $\Phi_{1q}$ , который наводит в обмотке статора ЭДС  $E_{1q}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению реакции якоря по поперечной оси  $x_{aq}$ . Сопротивление  $x_{aq}$  не зависит от магнитного насыщения машины, так как при явнополюсном роторе поток  $\Phi_{1q}$  проходит в основном по воздуху межполюсного пространства.

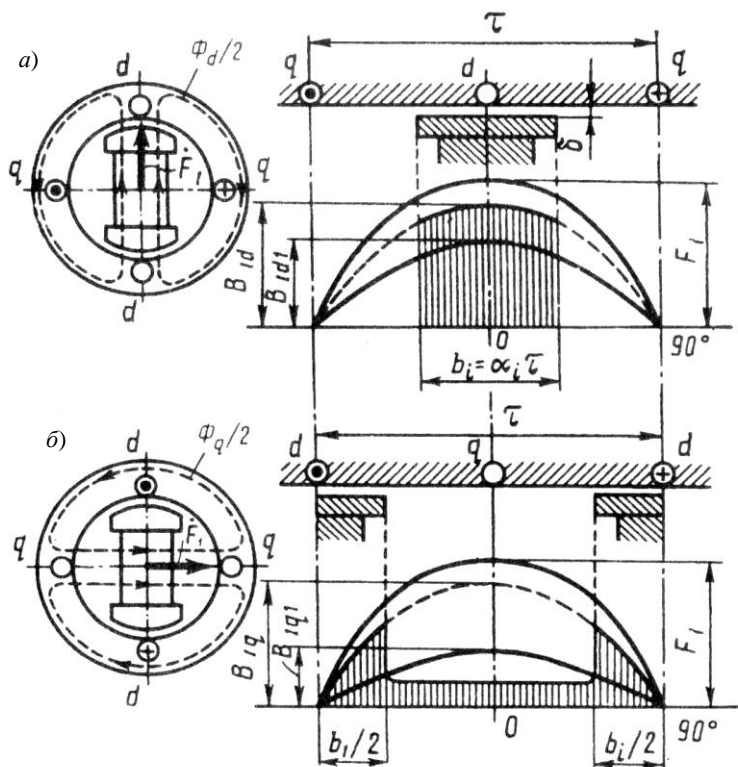


Рисунок 3.5 – Магнитные поля статора синхронной явнополюсной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

4. Магнитный поток рассеяния обмотки статора  $\Phi_{\sigma 1}$  наводит в обмотке статора ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению рассеяния фазы обмотки статора

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{I}_1 x_1.$$

5. Ток в обмотке статора  $\underline{I}_1$  создает активное падение напряжения в активном сопротивлении фазы обмотки статора  $\underline{U}_{r1} = \underline{I}_1 r_1$ .

Геометрическая сумма всех перечисленных ЭДС, наведенных в обмотке статора, определяет напряжение на выходе СГ

$$\underline{U}_1 = \sum \underline{E} - \underline{I}_1 r_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1q} + \underline{E}_{\sigma 1} - \underline{I}_1 r_1.$$

Здесь  $\sum \underline{E}$  – геометрическая сумма всех ЭДС, наведенных в обмотке статора результирующим магнитным полем машины, образованным совместным действием всех МДС ( $F_{в.0}$ ,  $F_{1d}$ ,  $F_{1q}$ ) и потоком рассеяния статора  $\Phi_{\sigma 1}$ .

Активное сопротивление фазы обмотки статора  $r_1$  у СГ средней и большой мощности невелико, и поэтому с некоторым допущением им можно пренебречь. Тогда уравнение напряжений *явнополюсного* СГ примет вид

$$\underline{U}_1 \approx \underline{E}_0 + \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1q} + \underline{E}_{\sigma 1}.$$

В неявнополюсных СГ реакция якоря характеризуется полной МДС статора  $F_1$  без разделения ее по осям, так как в этих машинах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковы. Поэтому ЭДС статора в неявнополюсных машинах  $\underline{E}_1$ , равная индуктивному падению напряжения в обмотке статора, пропорциональна индуктивному сопротивлению реакции якоря  $\underline{E}_1 = -j\underline{I}_1 x_a$ .

Поток реакции якоря  $\Phi_1$  и поток рассеяния статора  $\Phi_{\sigma 1}$  создаются одним током  $\underline{I}_1$ , поэтому индуктивные сопротивления  $x_a$  и  $x_1$  можно рассматривать как суммарное индуктивное сопротивление  $x_c = x_a + x_1$ , представляющее собой синхронное сопротивление неявнополюсной машины. С учетом этого ЭДС реакции якоря  $\underline{E}_1$  и ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$  следует рассматривать также как сумму  $\underline{E}_c = \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{I}_1 x_c$ , представляющую собой синхронную ЭДС неявнополюсной машины. С учетом изложенного уравнение напряжений *неявнополюсного* СГ имеет вид

$$\underline{U}_1 = \sum \underline{E} - \underline{I}_1 r_1 \approx \underline{E}_0 + \underline{E}_c.$$

Воспользовавшись уравнением ЭДС, построим векторную диаграмму для одной фазы *явнополюсного* синхронного генератора при симметричной нагрузке, работающего на активно-индуктивную нагрузку (ток  $\underline{I}_1$  отстает по фазе от ЭДС  $\underline{E}_0$ ). Векторную диаграмму (рисунок 3.6) строят на основании следующих данных: ЭДС генератора в режиме холостого хода  $\underline{E}_0$ ; тока нагрузки  $\underline{I}_1$  и его угла сдвига  $\psi_1$ , относительно ЭДС  $\underline{E}_0$ ; продольного  $x_{ad}$  и

поперечного  $x_{aq}$  индуктивных сопротивлений реакции якоря; активного сопротивления фазной обмотки статора  $r_1$ .

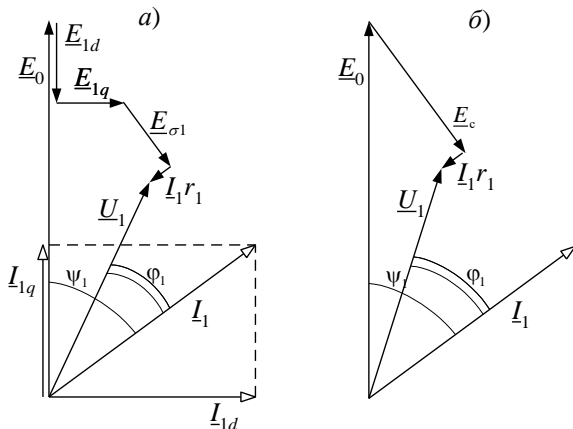


Рисунок 3.6 – Векторные диаграммы явнополюсного (а) и неявнополюсного (б) СГ при активно-индуктивной нагрузке

### 3.2.2 Реакция якоря синхронного генератора

При протекании по обмотке якоря тока нагрузки генератора создается собственное магнитное поле, которое воздействует на поле обмотки возбуждения. Влияние магнитного потока якоря  $\Phi_a$  на поле обмотки возбуждения  $\Phi_o$  называется *реакцией якоря*. Эти два потока вращаются с одинаковой частотой и создают результирующий вращающийся магнитный поток  $\Phi_{рез}$ .

Под воздействием потока  $\Phi_a$  результирующий поток  $\Phi_{рез}$  смещается относительно потока  $\Phi_o$  на угол  $\theta$  в сторону отставания. Этот угол называют *углом рассогласования* (рисунок 3.7).

Ведущим звеном при электромагнитном преобразовании энергии является ротор, т.е. полюс ротора идет впереди полюса результирующего магнитного потока СГ. При холостом ходе  $\theta = 0$ . При увеличении нагрузки растет электромагнитная сила, следовательно, растёт

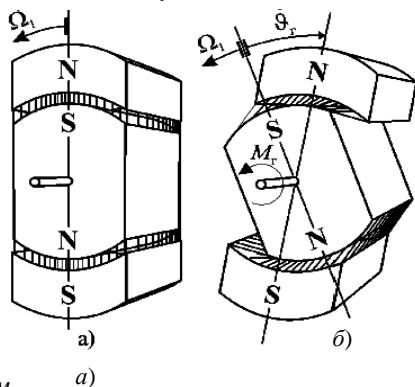


Рисунок 3.7 –  
Пространственный угол  $\theta$ :  
а – при холостом ходе; б – при нагрузке

и угол рассогласования  $\theta$ , но до некоторого предела, ограниченного мощностью приводного двигателя.

При чисто *активной нагрузке* реакция якоря поперечная, потому что магнитные линии потока  $\Phi_a$  якоря перпендикулярны магнитным линиям потока ротора  $\Phi_0$  (рисунок 3.8, а).

При *индуктивной нагрузке* ток  $I$  отстает от ЭДС на  $90^\circ$ , и реакция якоря будет продольной размагничивающей (рисунок 3.8, б), т. к.  $\Phi_a$  противоположен направлению основного потока ротора  $\Phi_0$ .

При *емкостной нагрузке* реакция якоря продольная подмагничивающая (рисунок 3.6, в), т. к.  $\Phi_a$  совпадает по направлению с основным потоком ротора  $\Phi_0$ .

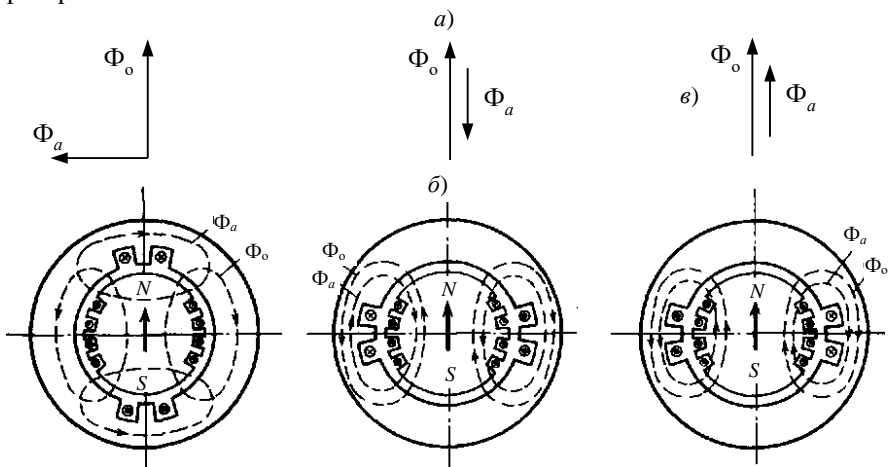


Рисунок 3.8 – Поперечная (а), продольная размагничивающая (б) и продольная намагничивающая (в) реакция якоря синхронной машины

В действительности на электростанциях имеет место смешанная, активно-индуктивная нагрузка, т. е. ток генератора включает в себя активную и индуктивную составляющие. Чем меньше составляющая активного тока, тем ниже значение коэффициента мощности.

Синхронные генераторы предназначены для работы в сети с коэффициентом мощности  $\cos\varphi = 0,8$ . Более низкое значение коэффициента мощности в сети свидетельствует об увеличении реактивной составляющей тока нагрузки, что приводит к усилению размагничивающего действия реакции якоря и снижению напряжения на зажимах генератора. Для того чтобы скомпенсировать размагничивающее действие реакции якоря при увеличении индуктивной нагрузки, нужно увеличить ток возбуждения в обмотке ротора. Этот ток может достигать значения, превышающего номинальное при номинальной нагрузке, что приводит к перегреву обмотки ротора СГ.

При низком коэффициенте мощности напряжение СГ будет неустойчиво, а при больших толчках индуктивной нагрузки, что бывает при пуске мощных двигателей, напряжение генератора может упасть до нуля.

### 3.2.3 Характеристики синхронного генератора

Свойства СГ определяются характеристиками холостого хода, короткого замыкания, внешними и регулировочными.

Характеристика холостого хода СГ представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода от тока в обмотке возбуждения  $I_B$ . Согласно формулам (3.2) и (3.3) ЭДС якоря при неизменной частоте  $n = \text{const}$  пропорциональна потоку, поэтому зависимость  $E_0$  от  $I_B$ , т. е. характеристика холостого хода (рисунок 3.9) СГ подобна зависимости магнитного потока в нем от тока возбуждения.

Прямолинейная часть характеристики указывает на пропорциональность между индуцированной ЭДС и током возбуждения. В дальнейшем магнитная система генератора насыщается и кривая изгибается. Нормальная работа машины имеет место в насыщенной части характеристики.

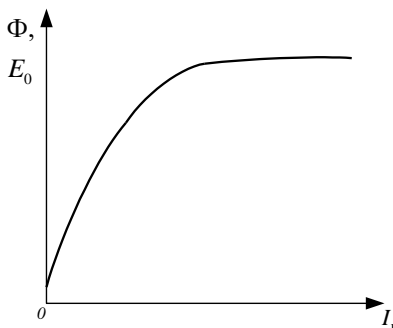


Рисунок 3.9 – Характеристика холостого хода СГ

*Характеристика короткого замыкания.* Характеристики трехфазного КЗ получают следующим образом: выводы обмотки статора замыкают накоротко (рисунок 3.10, а) и при вращении ротора с частотой вращения  $n_1$  постепенно увеличивают ток возбуждения до значения, при котором ток КЗ превышает номинальный рабочий ток статорной обмотки не более чем на 25% ( $I_{1к} = 1,25 I_{1н}$ ). Так как в этом случае ЭДС обмотки статора имеет значение, в несколько раз меньшее, чем в рабочем режиме генератора, и, следовательно, основной магнитный поток весьма мал, то магнитная цепь машины оказывается ненасыщенной. По этой причине характеристика КЗ представляет собой прямую линию (рисунок 3.10, б). Активное сопротивление обмотки статора невелико по сравнению с ее индуктивным сопротивлением, поэтому, принимая  $r_1 \approx 0$ , можно считать, что при опыте КЗ нагрузка СГ (его собственные обмотки) является чисто индуктивной, значит реакция якоря – продольно-размагничивающая.

Векторная диаграмма СГ при опыте трехфазного КЗ представлена на рисунке 3.10, в. Из нее видно, что ЭДС  $\underline{E}_k$ , индуцируемая в обмотке статора, уравновешивается ЭДС продольной реакции якоря  $\underline{E}_{1d}$  и ЭДС рассеяния  $\underline{E}_{\sigma 1}$ .

Один из важных параметров – отношение короткого замыкания (ОКЗ), которое представляет собой отношение тока возбуждения  $I_{в0}$ , соответствующего номинальному напряжению при ХХ, к току возбуждения  $I_{в.к}$  соответствующему номинальному току статора при опыте КЗ (рисунок 3.10, б):

$$\text{ОКЗ} = I_{в0} / I_{в.к}.$$

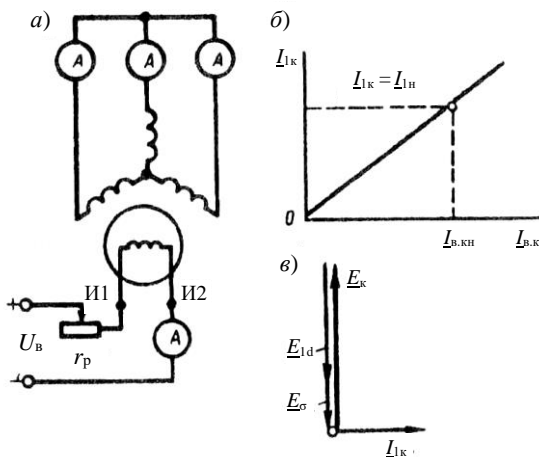


Рисунок 3.10 – Опыт короткого замыкания СГ

Для синхронных турбогенераторов  $\text{ОКЗ} = 0,4 \div 0,7$ ; для гидрогенераторов  $\text{ОКЗ} = 1,0 \div 1,4$ . ОКЗ имеет большое практическое значение при оценке свойств СГ: машины с малым ОКЗ менее устойчивы при параллельной работе (см. 3.2.4), имеют значительные колебания напряжения при изменениях нагрузки, но такие машины имеют меньшие габариты и, следовательно, дешевле [21].

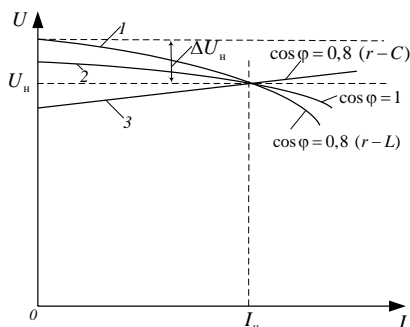


Рисунок 3.11 – Внешние характеристики СГ

*Внешняя характеристика* СГ определяет зависимость  $U = f(I)$  при  $I_{в} = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ,  $f = f_{н}$  и показывает, как изменяется напряжение на зажимах генератора  $U$  при изменении нагрузки и неизменном токе возбуждения. Вид внешних характеристик при разных характерах нагрузки показан на рисунке 3.11, причем предполагается, что в каждом случае ток возбуждения отрегулирован так, что  $I = I_{н}$  и  $U = U_{н}$ .

Вид внешних характеристик СГ



объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1 на рисунке 3.11) существует значительная продольная размагничивающая реакция якоря, которая растет с увеличением тока нагрузки  $I$ , и поэтому напряжение  $U$  с увеличением тока  $I$  уменьшается. При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рисунке 3.11) также имеется продольная размагничивающая реакция якоря, но угол  $\psi$  между  $E$  и  $I$  меньше, чем в предыдущем случае, поэтому продольная размагничивающая реакция якоря слабее, и уменьшение  $U$  с увеличением  $I$  происходит медленнее. При опережающем токе (кривая 3 на рисунке 3.11) возникает продольная намагничивающая реакция якоря, которая увеличивает результирующий магнитный поток машины. Поэтому с увеличением тока нагрузки  $I$  напряжение  $U$  на зажимах генератора возрастает.

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора  $\Delta U_n$  – это изменение напряжения на его зажимах при изменении нагрузки от нуля до номинального значения  $U_n$  при неизменном токе возбуждения.

Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной нагрузкой при отстающем токе и  $\cos \varphi = 0,8$ .

*Регулировочная характеристика* определяет зависимость  $I_b = f(I)$  при  $U = U_n = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным (рисунок 3.9).

Вид регулировочных характеристик также объясняется характером действия реакции якоря. При отстающем токе (кривая 1 на рисунке 3.12) продольная реакция якоря является размагничивающей и для компенсации ее влияния на

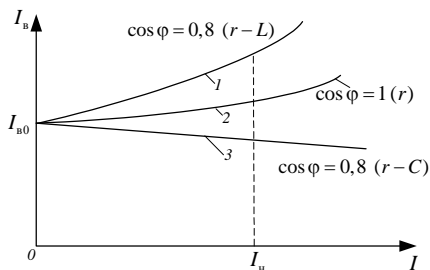


Рисунок 3.12 – Регулировочные характеристики синхронных генераторов

величины  $\Phi_0$  и  $U$  с увеличением  $I$  необходимо значительно увеличивать ток возбуждения  $I_b$ . При чисто активной нагрузке (кривая 2 на рисунке 3.12) размагничивающая реакция якоря слабее и требуется меньшее увеличение  $I_b$ . При опережающем токе (кривая 3 на рисунке 3.12) продольная реакция якоря стремится увеличивать  $\Phi_0$  и  $U$ , вследствие чего для сохранения  $U = \text{const}$  необходимо с увеличением  $I$  уменьшать  $I_b$ . Обычно  $\cos \varphi = 0,8 (r - L)$ , и поэтому при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке необходимо увеличить ток возбуждения.

### 3.2.4 Параллельная работа синхронных генераторов с сетью

**Условия включения на параллельную работу синхронных**

**генераторов.** На электрических станциях обычно устанавливают несколько генераторов, которые отдают электрическую энергию на общие шины, т. е. работают параллельно. Если станция оборудована одним генератором, то его нагрузка сильно колеблется в зависимости от времени года и от времени суток. Замена одного генератора несколькими дает возможность при необходимости часть генераторов останавливать, экономя тем самым расход топлива, воды и т. д. Для надежного снабжения потребителей на случай аварии станция должна иметь резервный генератор. Наконец, параллельная работа генераторов и станций диктуется необходимостью объединения в общую энергосистему нескольких электростанций, что позволяет наиболее рационально загружать станции в течение года и бесперебойно снабжать потребителей электроэнергией.

Для включения синхронных трехфазных генераторов на параллельную работу необходимо выполнить следующие условия:

1) равенство действующих значений напряжения сети  $U_c$  и напряжения (ЭДС) на зажимах генератора  $U_G$  включаемого в сеть;

2) напряжения сети  $U_c$  и генератора  $U_G$  в момент включения должны совпадать по фазе;

3) равенство частот генератора  $f_G$  и сети  $f_c$  которое достигается регулированием частоты вращения;

4) одинаковая последовательность чередования фаз сети и генератора.

То есть при подключении генератора к сети мгновенные значения напряжения (ЭДС) генератора должны соответствовать мгновенным значениям напряжения одноименных фаз сети .

При указанных условиях векторы напряжений генератора и сети совпадают и вращаются с одинаковой частотой (рисунок 3.13).

Разность напряжений сети и генератора одноименных фаз

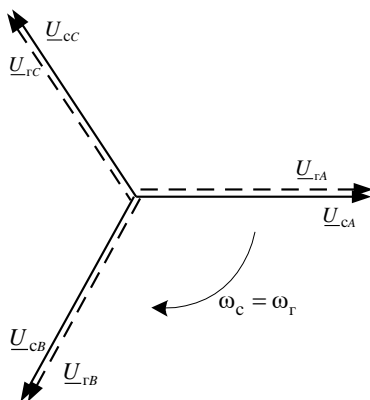
$$\underline{U}_{cA} - \underline{U}_{gA} = \underline{U}_{cB} - \underline{U}_{gB} = \underline{U}_{cC} - \underline{U}_{gC} = 0.$$

Рассмотрим, какие явления возникают в генераторах при несоблюдении этих условий.

Если действующее значение напряжения сети  $U_c$  не равно напряжению (ЭДС) на зажимах генератора  $U_G$ , включаемого в сеть, а остальные условия выдержаны, то в обмотке генератора возникает уравнивающий ток  $I_{ур}$ . Значение этого тока можно определить из выражения

$$I_{ур} = \frac{E_0 - U_c}{jx_c},$$

где  $E_0$  – ЭДС подключаемого СГ;



$U_c$  – напряжение сети;  
 $x_c$  – внутреннее индуктивное  
(синхронное) сопротивление  
СГ.

Рисунок 3.13 – Временные диаграммы  
напряжения сети и генератора при  
идеальных условиях включения  
на параллельную работу

Так как активное сопротивление обмоток генератора очень мало, то можно считать, что обмотки генератора обладают только индуктивным сопротивлением. Вследствие этого уравнительный ток в данном случае будет реактивным током. Уравнительный ток дополнительно нагружает обмотку якоря генератора, что не дает снимать с генератора номинальную мощность.

Неправильная синхронизация может вызвать серьезную аварию. Если, например, напряжения  $U_c$  и  $U_g$  будут в момент включения генератора в сеть сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , то это эквивалентно короткому замыканию при удвоенном напряжении. Зарегистрировано немало случаев, когда неправильная синхронизация вызывала серьезные повреждения оборудования: повреждение обмоток, поломка крепежных деталей сердечников и полюсов, поломка вала, разрушение всего генератора.

*Способы включения синхронных генераторов на параллельную работу.*

Для безаварийного подключения синхронного генератора на параллельную работу с сетью необходимо соблюсти ряд условий. На практике выполнение этих условий можно контролировать при помощи специальных синхронизирующих схем.

**Точная синхронизация.** Она может быть реализована путем включения между одноименными фазами генератора и сети ламп, рассчитанных на двойное фазное напряжение (рисунок 3.14, а).

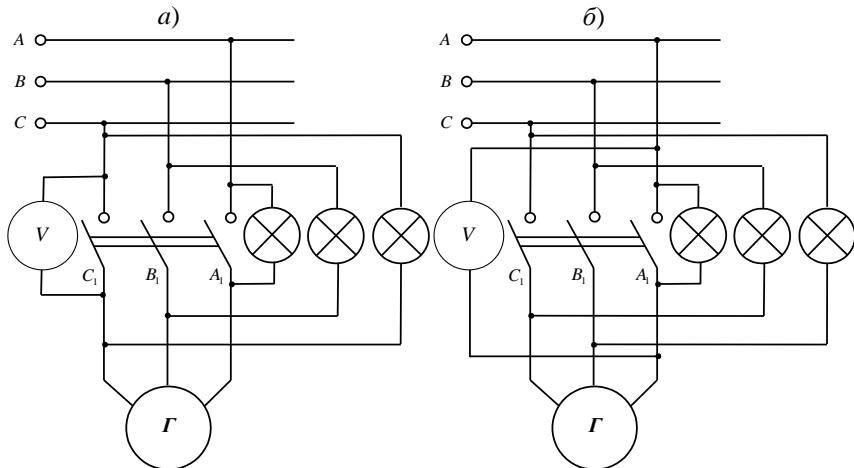


Рисунок 3.14 – Схема подключения синхронного генератора с помощью ламп:  
а – на погасание; б – на вращение света

В такой схеме лампы находятся под действием разности фазных напряжений  $\Delta U$  генератора и сети. При точной синхронизации, когда  $\Delta U$  всех фаз равны нулю, все лампы погаснут (схема на погасание). Для более точной фиксации нулевого значения  $\Delta U$  параллельно одной из ламп включается вольтметр, имеющий повышенную чувствительность на начальном участке шкалы. Если при этой схеме включения лампы будут гаснуть не одновременно, а по очереди, то это свидетельствует о том, что порядок чередования фаз неодинаков. Включать генератор на параллельную работу с сетью нужно при наименьшей частоте погасания ламп, когда лампы погаснут, а стрелка вольтметра подойдет к нулю.

Чаще для синхронизации применяют схему включения ламп «на вращение света» (рисунок 3.14, б). В этом случае одну лампу присоединяют к одноименным фазам генератора и сети, а две другие – к разноименным. Параллельно к лампе, присоединенной к одноименным фазам, включают нулевой вольтметр.

Генератор включают на параллельную работу в тот момент, когда вращение света прекратится, лампа, присоединенная к одноименным фазам, погаснет, стрелка нулевого вольтметра подходит к нулю, а две другие лампы горят одинаковым светом.

Нулевой вольтметр ставят для того, чтобы точнее определить разность напряжений между генератором и сетью, чего с помощью одних ламп сделать нельзя, так как при 15–20 % номинального напряжения на лампах их нити не накаливаются. Кроме ламповых, существуют также стрелочные синхроскопы.

Самосинхронизация – более простой способ синхронизации генератора, позволяющий включить генератор на параллельную работу за короткое время даже при значительных колебаниях напряжения в сети.

Сущность способа самосинхронизации состоит в том, что невозбужденный синхронный генератор, приводимый во вращении первичным двигателем с частотой, которая может отличаться на 2–5 % от номинальной, включают в сеть, после чего в обмотке ротора начинают увеличивать ток возбуждения, и генератор втягивается в синхронизм благодаря действию электромагнитного моментов.

При включении генератора в сеть его обмотка возбуждения должна быть замкнута на сопротивление (во избежание перенапряжения в обмотке ротора). Во время включения наблюдаются броски тока статора, в несколько раз превышающие номинальный; метод самосинхронизации можно применять тогда, когда их величина не превышает  $3,5I_n$ .

Важным условием успешной самосинхронизации является отсутствие избыточного момента на валу приводного двигателя. В противном случае ускорение ротора может стать значительным, в результате чего самосинхронизация затянется.

Частоту вращения генератора, включаемого в сеть без возбуждения, можно определить тахометром.

Перед самосинхронизацией необходимо при помощи *фазоуказателя* убедиться, что порядок чередования фаз обоих генераторов одинаков. В конце синхронизации значение ЭДС подключаемого генератора  $E_0$  равно напряжению сети  $U_c$ , а ее частота равна частоте сети, и в дальнейшем эта частота неизменна. Так как уравнивающий ток в конце синхронизации равен нулю ( $E_0 = U_c$ ), то генератор будет работать в режиме холостого хода.

### 3.2.5 Регулирование активной и реактивной мощности

Изменение тока возбуждения  $I_b$  генератора, работающего автономно, имеет следствием изменение магнитного потока, ЭДС и напряжения. Напряжение на зажимах генератора, работающего параллельно с сетью, не может изменяться при изменении  $I_b$ .

Примем, что активная нагрузка генератора  $P = 3UI \cos \varphi$  постоянна. Таким образом, исходными условиями в наших дальнейших рассуждениях являются  $P = \text{const}$ ;  $U = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$ .

При постоянном значении активной нагрузки неизменной будет и электромагнитная мощность генератора. Поэтому при изменении тока возбуждения  $I_b$  генератора будет меняться ЭДС и угол  $\theta$  так, как это показано на векторной диаграмме (рисунок 3.15). Так как треугольник напряжений  $\underline{E}$ ,  $\underline{U}$ ,  $\underline{U}_x$  остается замкнутым и новый вектор  $\underline{U}_x$  должен оставаться перпендикулярным к вектору  $\underline{I}$ , то изменятся величина и положение на диаграмме этого вектора тока. При принятых выше условиях это приведет к изменению угла  $\varphi$ , то есть изменению реактивной мощности  $Q = 3UI \sin \varphi$  (активная мощность останется постоянной).

Следует помнить, что такое регулирование возможно только для СГ, работающих параллельно с сетью. Для автономно работающего генератора  $\cos \varphi$  целиком определяется характером нагрузки и не может быть изменен произвольно.

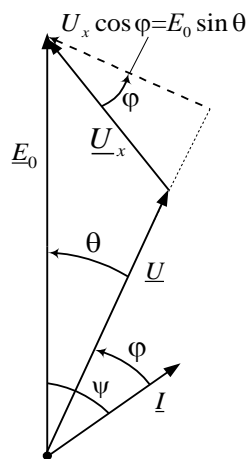
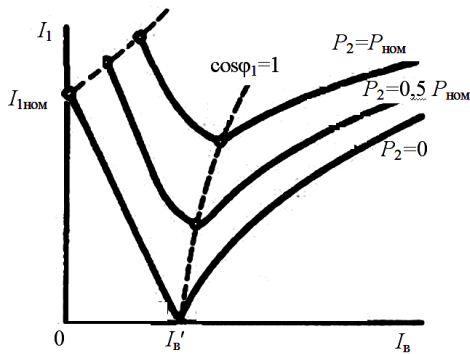


Рисунок 3.15 – Векторная диаграмма к определению момента

Зависимости общего тока якоря генератора, работающего параллельно с мощной сетью, от тока возбуждения при постоянной частоте и напряжении сети и отдаваемой генератором на сеть активной мощности ( $P_2 = 0$ ,



$P_2 = 0,5P_n$  и  $P_2 = P_n$ ) изображены в виде U-образных кривых (рисунок 3.16). В правой части кривая имеет малый угол наклона к горизонтальной оси, что объясняется насыщением стали машины.

Рисунок 3.16 – U-образные кривые СГ

Пунктирная линия соответствует такому значению тока возбуждения, при котором ток якоря становится минимальным и равным только активной составляющей. В этом случае генератор работает при

коэффициенте мощности  $\cos\varphi = 1$ . Отклонение этой пунктирной линии вправо указывает на то, что с возрастанием нагрузки ток возбуждения необходимо увеличивать для поддержания напряжения на зажимах генератора постоянным. Активную мощность СГ, работающего параллельно с мощной сетью, регулируют изменением напряжения питания приводного двигателя.

#### Регулирование реактивной мощности синхронного генератора

Работа параллельно работающего синхронного генератора при изменении тока:

$$I_{\text{в}} \uparrow \xrightarrow{1} \Phi_0 \uparrow \xrightarrow{2} E_0 \uparrow \xrightarrow{3} U_1 \uparrow (U_1 > U_c) \xrightarrow{4} I_{\text{yp}} = \frac{U_1 - U_c}{x_c}.$$

1 При увеличении тока обмотки возбуждения возрастает основной магнитный поток  $\Phi_0$ .

2 Рост  $\Phi_0$  приведет к увеличению ЭДС генератора  $E_0$ .

3 При увеличении  $E_0$  растет напряжение генератора  $U_1$  и оно становится больше напряжения сети  $U_c$ .

4 Возникает уравнительный ток  $I_{\text{yp}}$ . Он будет реактивным (разность напряжений  $(U_1 - U_c)$  приложена к индуктивному сопротивлению  $x_c$ ) и течет от генератора в сеть, так как  $(U_1 > U_c)$ .

Это означает, что генератор генерирует реактивную мощность в сеть.

Если ток возбуждения уменьшится, то

$$I_{\text{в}} \downarrow \xrightarrow{1} \Phi_0 \downarrow \xrightarrow{2} E_0 \downarrow \xrightarrow{3} U_1 \downarrow (U_1 < U_c) \xrightarrow{4} I_{\text{yp}} = \frac{U_1 - U_c}{x_c}.$$

Уравнительный ток будет направлен к генератору, то есть он будет потреблять реактивную мощность. Таким образом, при перевозбуждении генератор будет работать с опережающим током по отношению к напряжению сети, а при уменьшении возбуждения – с отстающим. При изменении возбуждения генератора изменяется только его реактивная мощность.

### 3.3 Синхронный двигатель и компенсатор

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем полюсов ротора. К статору синхронного двигателя подводят трехфазный переменный ток, а к обмотке возбуждения ротора – постоянный.

По конструкции синхронные двигатели отличаются от синхронных генераторов воздушным зазором (у двигателей он меньше), шириной полюсного наконечника (у двигателей он составляет 90 % ширины полюсного деления, а у генераторов – только 70 %), сечением короткозамкнутой (демферной) обмотки (у двигателей сечение обмотки больше, так как она используется для запуска). Поэтому промышленностью выпускаются серии генераторов и серии двигателей.

#### 3.3.1 Момент синхронного двигателя

Электрическая мощность, подводимая к трехфазному синхронному двигателю при симметричной нагрузке,

$$P = 3IU \cos \varphi, \quad (3.5)$$

где  $U$  и  $I$  – действующие фазные напряжение и ток.

Механическая мощность, вырабатываемая двигателем,

$$P_{\text{мх}} = \omega_p M, \quad (3.6)$$

где  $\omega_p$  – угловая скорость вращения ротора;

$M$  – момент сопротивления вращению ротора.

Пренебрегая потерями в машине и приравнивая электрическую и механическую мощности, получим выражение для момента

$$M = \frac{3UI \cos \varphi}{\omega_p}. \quad (3.7)$$

В двигательном режиме момент  $M$  является движущим, а в генераторном – тормозящим.

Из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 3.12, следует

$$U_x \cos \varphi = E_0 \sin \theta$$

или

$$I \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{x_c}, \quad (3.8)$$

где  $U_x$  – суммарное индуктивное падение напряжения от потока рассеяния и потока реакции якоря,

$$U_x = Ix_c; \quad (3.9)$$

$x_c$  – синхронное индуктивное сопротивление статора.

Угловая скорость вращения ротора

$$\omega_p = 2\pi n / 60 = 2\pi f / p = \omega / p, \quad (3.10)$$

где  $\omega$  – угловая скорость тока.

Подставляя выражения (3.9) и (3.10) в уравнение (3.8), находим

$$M = \frac{3UE_0}{\omega_p x_c} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta. \quad (3.11)$$

Значит вращающий момент синхронной машины и ее мощность пропорциональны синусу угла рассогласования. Зависимость момента синхронной машины от значения угла  $\theta$ , согласно формулы (3.11), называется *угловой характеристикой* синхронной машины (рисунок 3.17).

В двигательном режиме магнитное поле статора своими магнитными силовыми линиями связывается с полюсами ротора противоположной полярности. Вращающееся магнитное поле увлекает за собой полюса ротора и заставляет их вращаться.

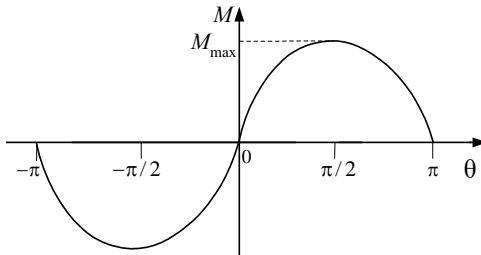


Рисунок 3.17 – Угловая характеристика синхронной машины

При нагрузке ротор синхронного двигателя отстает на некоторый угол от вращающегося магнитного поля, причем с увеличением нагрузки угол  $\theta$  увеличивается. Физически это означает, что в двигателе, в отличие от генератора, полюсы ротора отстают от вращающегося магнитного поля статора, теперь уже последнее «ведет» за собой

ротор.

Если момент нагрузки превысит  $M_{\max}$ , то поддержание синхронной частоты вращения ротора будет невозможно и машина выпадет из синхронизма. При номинальной мощности двигателя угол  $\theta = 20...30^\circ$ , при этом перегрузочная способность двигателя  $M_{\max}/M_H = 2...3$ .

Максимальный момент

$$M_{\max} = 3 \frac{p}{\omega_p} \frac{UE_0}{x_c} = 3 \frac{p}{\omega_p} UI_K, \quad (3.12)$$

где  $I_K$  – ток короткого замыкания, устанавливающийся в СГ при замыкании



обмотки статора, в которой индуцируется ЭДС  $E_0$ .

Исходя из формулы (3.12) следует, что вращающий момент синхронного двигателя пропорционален приложенному напряжению, а в асинхронном двигателе – квадрату напряжения. В связи с этим изменение напряжения в сети не так значительно влияет на создаваемый момент синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.

### 3.3.2 Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя называют зависимости частоты вращения ротора  $n$ , тока статора  $I$ , потребляемой из сети мощности  $P_1$ , полезного вращающего момента  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности на валу двигателя  $P_2$  при постоянных значениях напряжения сети  $U$ , частоты сети  $f$  и тока возбуждения  $I_b$  (рисунок 3.18).

Вид графика  $\cos\varphi$  зависит от настройки тока возбуждения: если в режиме холостого хода ток возбуждения установлен таким, что  $\cos\varphi = 1$ , то с ростом нагрузки коэффициент мощности снижается; если же установить  $\cos\varphi = 1$  при номинальной нагрузке, то при недогрузке синхронный двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке – отстающий.

График  $M_2 = f(P_2)$  выходит из начала координат и линейно зависит от мощности на валу  $P_2$ , так как частота вращения  $n$  не изменяется.

Ток в обмотке якоря двигателя определяется по формуле  $I = \frac{P_1}{m_e U \cos\varphi}$ . Из этого выражения видно, что с увеличением нагрузки на валу двигателя ток  $I$  растет быстрее, чем потребляемая мощность  $P_1$ , вследствие уменьшения  $\cos\varphi$ .

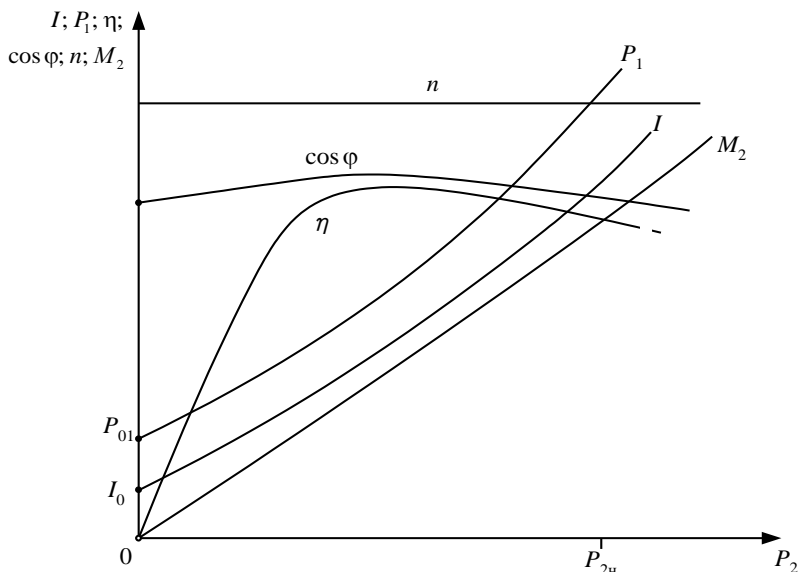


Рисунок 3.18 – Рабочие характеристики синхронного двигателя

С ростом нагрузки на валу двигателя увеличиваются потери, поэтому потребляемая мощность  $P_1$  растет быстрее полезной мощности  $P_2$ , и график  $P_1 = f(P_2)$  имеет несколько криволинейный вид.

Коэффициент полезного действия синхронной машины обычно составляет 85–99 %. Наибольший КПД соответствует нагрузке  $0,5–0,75P_n$ , также существует тенденция к увеличению КПД при повышении мощности.

В синхронных машинах выделяют следующие потери мощности:

- механические, обусловленные трением в подшипниках, ротора о воздух, щеток о контактные кольца и вентиляционные потери;
- магнитные в стали статора, состоящие из потерь на гистерезис и вихревые токи;
- на возбуждение, куда входит мощность возбуждения и потери в самом возбудителе;
- электрические в обмотках статора;
- добавочные, которые слагаются из потерь на вихревые токи в проводах обмотки статора, потерь в стали ротора, вызванных пульсацией магнитного потока вследствие зубчатости сердечника статора, и др.

### 3.3.3 Пуск синхронного двигателя

Пуск синхронного двигателя прямым включением в сеть невозможен, так как ротор, удерживаемый силами инерции, не может быть сразу увлечен магнитным полем статора, синхронная частота которого устанавливается тотчас же после включения статорной обмотки в сеть.

Пуск синхронного двигателя возможен лишь при условии предварительного разгона до частоты, равной синхронной или близкой к ней. Для синхронных двигателей обычно применяется асинхронный пуск, состоящий в том, что в начале пуска двигатель разгоняется как асинхронный (рисунок 3.19). Для этого на роторе размещается пусковая обмотка. Она представляет собой латунные или бронзовые стержни, уложенные в пазы на поверхности полюсных наконечников ротора и замкнутые между собой с двух сторон.

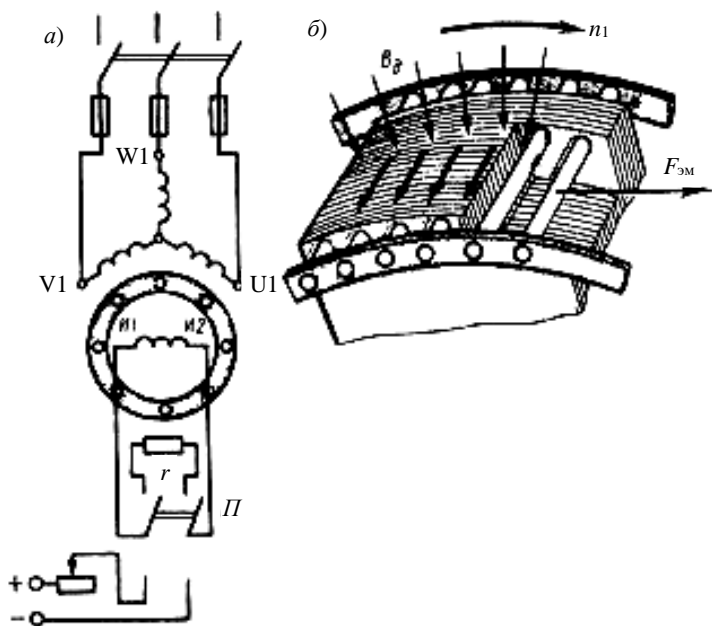


Рис. 3.19 – Асинхронный пуск синхронного двигателя

При подключении обмотки статора к сети возникает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует токи в пусковой обмотке ротора. В результате возникает вращающий момент, и двигатель разгоняется до некоторой установившейся частоты  $n_0$ . Все происходит так же, как и при пуске асинхронного двигателя; поэтому частота  $n_0$  оказывается близкой к частоте вращения магнитного поля, но меньшей ее на несколько процентов.

Затем обмотка возбуждения отключается от сопротивления и подключается к источнику постоянного тока. В результате возникает обычный для СМ момент взаимодействия вращающегося поля статора и полюсов ротора, и СМ втягивается в синхронизм, т. е. ротор начинает вращаться синхронно с полем.

В процессе асинхронного пуска обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой, так как магнитный поток статора, пересекающий ее в начальный период пуска с синхронной скоростью, наводит в ней ЭДС. Вследствие большого числа витков обмотки возбуждения эта ЭДС достигает значений, опасных как для целостности изоляции самой обмотки, так и для обслуживающего персонала. Для предотвращения этого обмотку возбуждения на период разгона ротора замыкают на активное сопротивление, примерно в десять раз большее сопротивления обмотки возбуждения. Переключение зажимов *И1* и *И2* обмотки возбуждения с сопротивления на зажимы возбуждителя осуществляют переключателем *П* (рисунок 3.19, *а*).

Чем меньше нагрузка на валу двигателя, тем легче его вхождение в синхронизм. С увеличением нагрузочного момента на валу вхождение двигателя в синхронизм затрудняется. Наибольший нагрузочный момент, при котором ротор синхронного двигателя еще втягивается в синхронизм, называют *моментом входа двигателя в синхронизм*  $M_{вх}$ . Величина асинхронного момента при частоте вращения  $0,95n_1$  зависит от активного сопротивления пусковой клетки, т. е. от сечения стержней и удельного электрического сопротивления металла, из которого они изготовлены.

При значительном увеличении момента сопротивления синхронный двигатель может не втянуться в синхронизм.

Порядок останова синхронного двигателя следующий:

- 1) уменьшают ток статора, изменяя ток возбуждения;
- 2) отключают обмотку статора от сети;
- 3) после отключения статорной обмотки снимают возбуждение, замыкая ротор на разрядное сопротивление.

У мощных синхронных двигателей для уменьшения пускового тока применяется, как правило, пуск при помощи автотрансформатора или реактивных сопротивлений (реакторов), включаемых последовательно с обмоткой статора. Непосредственный пуск применяется только для двигателей относительно небольшой мощности – до сотен киловатт.

Пусковая обмотка СД в отличие от обмотки ротора асинхронной машины рассчитывается для кратковременного процесса пуска и имеет относительно небольшую массу.

Синхронные двигатели имеют следующие достоинства:

- 1) возможность работы при  $\cos\varphi = 1$ ;
- 2) меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, т. к. их вращающий момент пропорционален напряжению в первой степени, а не

квадрату напряжения, как у асинхронных двигателей;

3) строгое постоянство частоты вращения, независимо от механической нагрузки на валу.

Недостатки синхронных двигателей:

1) конструкция сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током (кроме случая возбуждения СД от постоянных магнитов); вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже АД;

2) сравнительная сложность пуска;

Сопоставление достоинств и недостатков синхронных двигателей показывает, что их целесообразно применять для установок большой мощности (более 200 кВт) с условиями редких пусков (вентиляторы, компрессоры, насосы, дробилки и т.п.).

**Пример 7.** Трехфазный синхронный генератор мощностью  $S_n = 500$  кВА и номинальным напряжением  $U_{лн} = 3,2$  кВ работает с коэффициентом мощности  $\cos\varphi_{1н} = 0,9$ . Обмотка фазы статора соединена звездой. При этом частота вращения  $n = 600$  об/мин, КПД генератора при номинальной нагрузке  $\eta_n = 92\%$ . Соединение фазных обмоток статора по схеме Y.

Требуется определить активную и реактивную мощность генератора при номинальной нагрузке, ток в обмотке статора, требуемую первичному двигателю мощность и вращающий момент при непосредственном механическом соединении валов генератора и первичного двигателя.

*Решение.* Для определения номинальной активной и реактивной мощности генератора используем выражения

$$P_n = S_n \cos\varphi_{1н} = 500 \cdot 0,9 = 450 \text{ кВт},$$

$$Q_n = S_n \sin\varphi_{нг} = S_n \sin(\arccos\varphi_{нг}) = 500 \cdot \sin(\arccos 0,9) = 217,94 \text{ кВт}.$$

Номинальный ток в линейном проводе генератора

$$I_n = S_n / U_{лн} = \cos\varphi_{1н} = 500 / 3,2 = 156,25 \text{ А}.$$

Для соединения фазных обмоток по схеме звезда Y ток в фазах обмотки статора  $I_{фн}$  найдем через величину линейного тока  $I_{лн}$

$$I_{фн} = I_{лн} / \sqrt{3} = 156,25 / 1,73 = 90,32 \text{ А}.$$

Мощность первичного двигателя при непосредственном механическом соединении валов генератора и первичного двигателя выразим из формулы

$$\eta_n = 100\% P_n / P_{дв},$$

значит  $P_{дв} = 100\% P_n / \eta_n = 100\% 450 / 92 = 489,1 \text{ кВт}.$

Электромагнитный момент первичного двигателя при непосредственном соединении валов генератора и первичного двигателя

$$M_{эм} = P_{дв} / \omega = 60 P_{дв} / (2\pi n) = 60 \cdot 489,1 \cdot 10^3 / (2 \cdot 3,14 \cdot 600) = 7788,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

**Пример 8.** Трехфазный синхронный двигатель характеризуется номинальными величинами:  $P_n = 320$  кВт; частота вращения  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>; КПД  $\eta_n = 0,93$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi_n = 0,9$  ( $\varphi < 0$ , режим перевозбуждения). Обмотка статора соединена звездой. Электродвигатель присоединен к сети с линейным напряжением  $U_\Delta = 3000$  В, частотой  $f = 50$  Гц и жестко соединен с валом компрессора, развивая при этом мощность, равную номинальной. Индуцированная потоком возбуждения ЭДС  $E_o$  на 40 % превышает фазное напряжение обмотки статора.

Задание:

1. Определить число пар полюсов ротора и номинальный ток фазы статора синхронного двигателя.

2. Построить для заданного режима работы синхронного двигателя векторную диаграмму, пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора.

3. По диаграмме определить угол  $\theta$  между векторами напряжения  $U_\Phi$  и ЭДС  $E_o$ , падение напряжения в обмотке статора и ее синхронное реактивное сопротивление.

4. Определить коэффициент мощности промышленного предприятия после установки на нем синхронного двигателя, если до установки двигателя суммарная активная мощность электроприемников предприятия  $P_{пр} = 700$  кВт, а их коэффициент мощности  $\cos\varphi_{пр} = 0,75$ .

*Решение.* 1. Для синхронного двигателя частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и остается постоянной независимо от нагрузки на его валу  $n = 60f/p$ . Отсюда число пар полюсов ротора

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

Так как потребляемая двигателем мощность из сети

$$P_1 = P_n / \eta = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I_\Delta \cdot \cos\varphi_n,$$

то номинальный ток фазы статора

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_\Delta \eta_n \cos\varphi_n} = \frac{320000}{1,732 \cdot 3000 \cdot 0,93 \cdot 0,9} = 73,6 \text{ А}.$$

2. Фазное напряжение статора

$$U_\Phi = U_\Delta / \sqrt{3} = 3000 / \sqrt{3} = 1732 \text{ В};$$

ЭДС, индуцированная в фазной обмотке статора,

$$E_o = 1,4 \cdot U_\Phi = 1,4 \cdot 1732 = 2424,87 \text{ В}.$$

Для построения векторной диаграммы задаемся масштабом:

$$m_U = 300 \text{ В / см}, \quad m_I = 20 \text{ А / см}.$$

Откладываем вектор фазного напряжения  $\underline{U}_\Phi$  на векторной диаграмме синхронного двигателя (рисунок 3.20).

Вектор тока  $\underline{I}_n$  в обмотке статора опережает  $\underline{U}_\Phi$  на угол  $\varphi_n = 25^\circ 50'$ . Дальнейшее построение выполняем согласно уравнению напряжений фазы статора  $\underline{U}_\Phi = \underline{E}_o + jx \cdot \underline{I}_n$ : с конца  $\underline{U}_\Phi$  под углом  $90^\circ$  к  $\underline{I}_n$  проводим линию  $ab$ , затем из

точки «0» циркулем откладываем отрезок длиной  $E_0$  до пересечения с линией  $ab$ . Измерив длину вектора и умножив ее на масштаб, получим значение вектора падения напряжения.

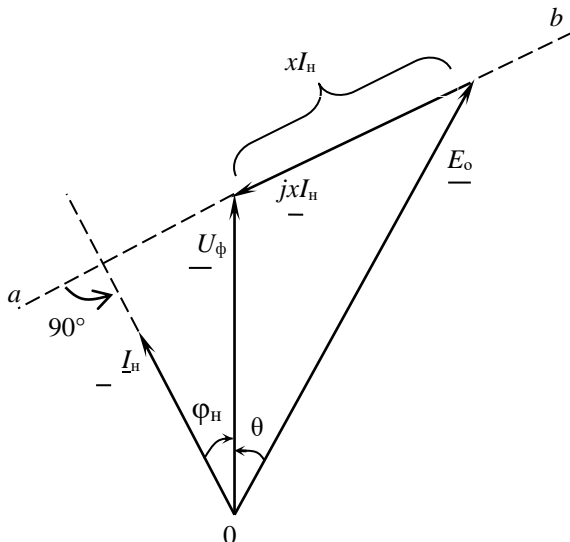


Рисунок 3.20 – Векторная диаграмма синхронного двигателя

$$|xI_n| = 1110 \text{ В,} \quad \text{затем } x = \frac{|xI_n|}{I_n} = \frac{1110}{73,6} = 15,06 \text{ Ом.}$$

3. Угол между векторами  $\underline{E}_o$  и  $\underline{U}_\phi$  является искомым углом  $\theta = 24^\circ$ .

4. Синхронный двигатель, установленный на промышленном предприятии, для питающей сети является активно-емкостной нагрузкой ( $\varphi < 0$ , режим перевозбуждения обмотки возбуждения).

Реактивная мощность, вырабатываемая синхронным двигателем,

$$Q_n = P_n \cdot \operatorname{tg}\varphi_n = 320 \cdot (-0,484) = -155 \text{ квар,}$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_n = \operatorname{tg}(-25^\circ 50') = -0,484$ .

Суммарная реактивная мощность электроприемников предприятия

$$Q_{np} = P_{np} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{np} = 700 \cdot 0,882 = 617,34 \text{ квар,}$$

где  $\operatorname{tg}\varphi_{np} = \operatorname{tg} 41^\circ 25' = 0,882$ .

Суммарная активная и реактивная мощность всей нагрузки после установки синхронного двигателя

$$P = P_{np} + P_n = 700 + 320 = 1020 \text{ кВт;}$$

$$Q = Q_{np} + Q_n = 617,34 - 155 = 462,34 \text{ квар.}$$

Коэффициент мощности промышленного предприятия

$$\cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2} = 1020 / \sqrt{1020^2 + 462,32^2} = 0,911.$$



### 3.3.4 Синхронный компенсатор

*Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода, назначение которого – компенсировать реактивную мощность в линии электропередач. У него та же функция, что и у батареи конденсаторов, используемых в электрических сетях для улучшения cosφ. Отличие в том, что батарея конденсаторов компенсирует лишь индуктивную составляющую реактивной мощности, а компенсатор может компенсировать как индуктивную, так и емкостную составляющие. Синхронный компенсатор также можно использовать для регулирования напряжения системе электроснабжения.*

Изменение тока возбуждения синхронного двигателя вызывает изменение общего тока статорной обмотки. Кривые изменения тока двигателя в зависимости от тока возбуждения имеют такой же характер, как и приведенные на рисунке 3.16. При перевозбуждении синхронный двигатель работает с опережающим током по отношению к току сети, улучшая cosφ сети, а при недо возбуждении – с отстающим током, т. е. будет ухудшать cosφ сети. С целью улучшения коэффициента мощности сети можно перевозбудить присоединенные к ней синхронные двигатели.

Синхронные компенсаторы выпускаемые промышленностью имеют следующие конструктивные отличия от синхронного двигателя: не имеют выходного конца вала; вал не передает вращающий момент, поэтому он может быть механически непрочным; уменьшен воздушный зазор, поэтому уменьшены размеры обмотки возбуждения. Синхронные компенсаторы выпускаются на большую мощность – от 10 до 100 тыс. кВт·А.

Мощность синхронного компенсатора выбирают по величине реактивной мощности, которую он должен компенсировать, а также места установки. Подключают его к шинам трансформаторной подстанции, что позволяет разгрузить линию передачи и генератор от реактивных токов, а значит уменьшить падение напряжения в линии и снизить потери электрической энергии.

#### **Пример 9.**

В цехе завода установлены асинхронные двигатели, средняя мощность и cosφ которых указаны в таблице 3.1.

Проектируется установка еще одного электрического привода компрессора, для которого предполагается использовать синхронный двигатель со следующими номинальными данными:  $P_n = 160$  кВт,  $U_n = 380$  В,  $n_n = 1000$  об/мин,  $\cos\varphi = 0,8$  (емкостной характер нагрузки).

Определить коэффициент мощности и суммарный ток нагрузки цеха до и после установки синхронного двигателя (двигатель будет нагружен полностью). Проанализировать целесообразность предложенного в задаче мероприятия.

**Таблица 3.1 – Параметры установленных асинхронных двигателей**

№ п/п	Число двигателей, $n_k$	Средняя потребляемая мощность одного двигателя $P_k$ , кВт	$\cos\varphi_k$
1	20	0,95	0,76
2	24	0,82	0,45
3	32	0,15	0,48
4	8	4,00	0,75
5	20	0,6	0,68
6	12	0,59	0,58
7	7	4,85	0,77

*Решение.* Определим активную и реактивную мощности нагрузки асинхронных двигателей (таблице 3.2) по формулам

$$P_i = P_{k_i} n_{k_i}, \quad Q_i = P_{k_i} n_{k_i} \operatorname{tg}(\arccos\varphi_{k_i}), \quad i = \overline{1,7}.$$

**Таблица 3.2 – Активная и реактивная мощности нагрузки**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	Суммарная мощность
$P$ , кВт	19,0	19,7	14,4	32,0	12,0	7,1	19,4	$P_1 = 124$ кВт
$Q$ , квар	16,2	38,8	26,0	28,4	13,0	10	16,1	$Q_1 = 149$ квар

Мощности синхронного двигателя  $P_n = 160$  кВт и  $Q_n = 160 \cdot 0,75 = 120$  квар. Суммарная мощность всей нагрузки после установки синхронного двигателя

$$P_2 = P_1 + P_n = 124 + 160 = 284 \text{ кВт},$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_n = 149 - 120 = 29 \text{ квар}.$$

Результирующий коэффициент мощности всех потребителей цеха:

– до установки синхронного двигателя

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{124}{\sqrt{124^2 + 149^2}} = 0,66,$$

– после установки синхронного двигателя

$$\cos\varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}} = \frac{284}{\sqrt{284^2 + 29^2}} = 0,995.$$

Ток, потребляемый всеми двигателями цеха, из сети:

– до установки синхронного двигателя  $I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} U_n} = \frac{\sqrt{124^2 + 149^2}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 294 \text{ А},$

– после установки синхронного двигателя  $I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} U_n} = \frac{\sqrt{284^2 + 29^2}}{\sqrt{3} \cdot 380} = 432 \text{ А}.$

Вывод: при увеличении активной мощности асинхронных и синхронных двигателей цеха в  $284 / 124 = 2,3$  раза ток, потребляемый из сети, увеличился лишь в 1,47 раза [5].

## Контрольные вопросы

1. Каковы устройство и принцип действия синхронного двигателя?
2. Какие типы роторов используются в турбо- и гидрогенераторах и почему?
3. Что называется угловой характеристикой синхронной машины и какое значение она имеет для оценки статической устойчивости машины при параллельной работе с сетью?
4. Что является обязательным условием преобразования энергии в синхронной машине?
5. При каких условиях синхронный двигатель представляет собой активно-емкостную нагрузку?
6. Как отражается на режиме работы элементов электропередачи уменьшение мощности потребителя?
7. Почему не разрешается работа потребителей электрической энергии с малым коэффициентом мощности?
8. Как используются синхронные двигатели для улучшения коэффициента мощности предприятий?
10. Как образуется вращающий электромагнитный момент синхронных двигателей?
11. Как влияет регулирование тока возбуждения  $I_b$  синхронного двигателя на изменение угла  $\theta$ ?
12. Как реагирует трехфазный синхронный двигатель на увеличение нагрузки на его валу?
13. Как осуществляется пуск синхронных двигателей?
14. Почему трехфазная обмотка переменного тока располагается на статоре, электромагниты постоянного тока – на роторе, а не наоборот?
15. Почему при пуске синхронных двигателей обмотка возбуждения ротора замыкается на внешнее активное сопротивление?
17. В каких условиях и почему применяется синхронный электропривод?
18. Как осуществляется быстрая остановка синхронных двигателей?
20. В каких условиях и где синхронный двигатель работает в качестве синхронного компенсатора?
21. Сравните свойства, конструкцию и характеристики синхронного и асинхронного двигателей.
22. Как влияет на механическую характеристику синхронного двигателя снижение питающего напряжения?
23. Каковы устройство и принцип действия реактивного синхронного двигателя?
24. Каковы устройство и принцип действия гистерезисного синхронного двигателя?
25. Перечислите условия и порядок включения синхронных машин на параллельную работу с трехфазной системой.
26. Как осуществляется регулирование реактивной мощности синхронных машин?
27. Возможна ли работа синхронного двигателя с  $\cos\varphi = 1$ ?

## 4 ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Процесс совершенствования традиционных типов электрических машин продолжается более ста лет. За это время были достигнуты значительные успехи. Однако требования, предъявляемые современными электромеханическими устройствами к электрическим машинам, продолжают расти, а резервы повышения их показателей и характеристик в определенной степени исчерпаны.

Качественный скачок в этом направлении обозначен разработкой интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии, которые одновременно осуществляют и преобразование энергии, и управление им. Одним из интеллектуальных электромеханических преобразователей энергии является вентильно-индукторный двигатель (ВИД).

ВИД представляет собой шаговый двигатель, работающий в режиме постоянного вращения. Шаговый двигатель – разновидность синхронного бесщеточного электродвигателя с несколькими обмотками, последовательная активация которых вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора.

Наиболее целесообразно использовать ВИД в качестве электропривода механизмов, в которых по условиям работы требуется осуществление регулирования в широком диапазоне частоты вращения. Примером здесь могут быть электроприводы станков с числовым программным управлением и промышленных роботов.

Эффективность использования ВИД существенно повышается, если необходимость регулирования частоты вращения сочетается с тяжелыми условиями работы, как это имеет место в электроприводах для металлургии, горнодобывающей промышленности и подвижного состава электрического транспорта.

В промышленности есть большой класс устройств и механизмов, использующих нерегулируемый электропривод, где энергетическая эффективность существенно возрастает при использовании регулируемого электропривода. К таким устройствам, прежде всего, относятся компрессоры, насосы и вентиляторы. Использование здесь ВИД является весьма перспективным.

Не менее перспективно применение ВИД в бытовой технике: стиральных машинах, пылесосах, кухонных комбайнах, электромясорубках, различных электроинструментах.

ВИД представляет собой относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии. Поэтому его продвижение на рынке происходит достаточно медленно. Однако уже сейчас многие электротехнические фирмы мира либо рассматривают возможность серийного выпуска ВИД, либо уже производят его. За последние десять лет доля применения ВИД в регулируемом электроприводе возросла в восемь

раз. По всей видимости, эта цифра будет расти. Материал данного раздела основан на источнике [6].

#### 4.1 Структурная схема вентильно-индукторного двигателя

Как всякий электродвигатель, ВИД обеспечивает преобразование электрической энергии, которая поступает от питающей сети, в механическую энергию, передаваемую в нагрузку. Как система регулируемого электропривода, он дает возможность осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями конкретной нагрузки: регулировать частоту вращения, момент, мощность и т. д.

ВИД представляет собой достаточно сложную электромехатронную систему, структурная схема которой приведена на рисунке 4.1 [6].

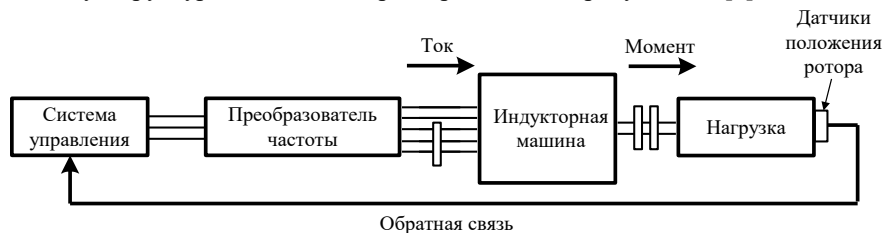


Рисунок 4.1 – Структурная схема ВИД

В ее состав входят: индукторная машина (ИМ) (рисунок 4.2), преобразователь частоты, система управления и датчики положения ротора (ДПР). Функциональное назначение этих элементов ВИД очевидно: преобразователь частоты обеспечивает питание фаз ИМ однополярными импульсами напряжения прямоугольной формы; ИМ осуществляет электромеханическое преобразование энергии; система управления в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом.



Рисунок 4.2 – ИМ конфигурации 6/4

По своей структуре ВИД ничем не отличается от классической системы регулируемого электропривода. Именно поэтому он и обладает всеми ее свойствами. Однако в отличие от регулируемого электропривода, например с асинхронным двигателем, индукторная машина в ВИД не является

самодостаточной. Она принципиально неспособна работать без преобразователя частоты и системы управления. Преобразователь частоты и система управления являются неотъемлемыми частями ИМ, необходимыми для осуществления электромеханического преобразования энергии.

Индукторная машина, входящая в состав ВИД, может иметь различные конструктивные исполнения. На рисунке 4.3, для примера, приведено поперечное сечение четырехфазной ИМ конфигурации 8/6. При обозначении конфигурации ИМ первая цифра указывает число полюсов статора, вторая – ротора.

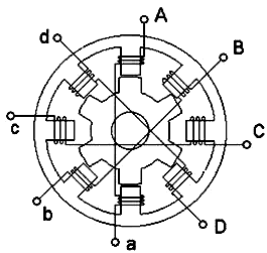


Рисунок 4.3 – Поперечное сечение четырехфазной ИМ конфигурации 8/6

ИМ имеет следующие конструктивные особенности:

- сердечники статора и ротора имеют явнополюсную структуру;

- число полюсов относительно невелико. При этом число полюсов статора больше числа полюсов ротора;

- сердечники статора и ротора выполняются шихтованными;

- обмотка статора состоит из сосредоточенных катушек. Она может быть одно- или многофазной;

- фаза ИМ, как правило, состоит из двух

катушек, расположенных на диаметрально противоположных полюсах статора;

- катушки фазы могут быть соединены в электрическом отношении параллельно или последовательно; в магнитном – согласно или встречно;

- обмотка на роторе ИМ отсутствует.

Конструктивно ИМ, преобразователь частоты и система управления в ВИД могут быть выполнены раздельно. При этом в процессе работы они могут находиться на достаточно большом удалении друг от друга. В последнее время наблюдается тенденция выполнения преобразователя частоты и двигателя в одном корпусе [6].

#### 4.2 Принцип действия вентильно-индукторного двигателя

Принцип действия ВИД основан на свойстве ферромагнитных тел ориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы пронизывающий их магнитный поток принимал максимальное значение из всех возможных.

Рассмотрим принцип действия ВИД на примере четырехфазного двигателя с ИМ конфигурации 8/6. На рисунке 4.4, *a* показано так называемое *рассогласованное взаимное положение сердечников статора и ротора* для фазы *A* этой машины.

Рассогласованным положением сердечников статора и ротора для некоторой фазы называется такое положение, при котором ось каждой катушки этой фазы совпадает с одной из осей  $q$ , совпадающей с серединой зубца статора фазы  $A$ , (рисунок 4.5) ротора, т.е. зубцы фазы

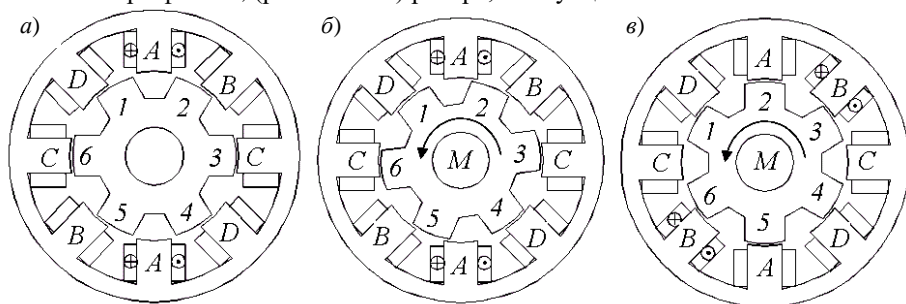


Рисунок 4.4 – Пояснение принципа действия ВИД:

$a$  – рассогласованное положение сердечников для фазы  $A$ ;  $b$  – промежуточное положение сердечников для фазы  $A$ ;  $c$  – согласованное положение сердечников для фазы  $A$

располагаются строго напротив пазов ротора. Это положение характеризуется минимальным значением индуктивности фазы и магнитного потока, сцепленного с ней, что объясняется максимальным значением магнитного сопротивления зазора между сердечниками. В теории ВИД рассогласованное положение одной из фаз принимается за начало отсчета углового положения сердечников статора и ротора. Примем за начало отсчета рассогласованное положение фазы  $A$ .

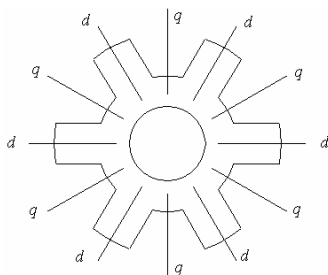


Рисунок 4.5 – Расположение осей ротора ИМ

Предположим, что в этом положении по сигналу системы управления произойдет коммутация ключей преобразователя частоты и к фазе  $A$  будет приложено постоянное напряжение  $U_A$ ; тогда по катушкам фазы потечет ток  $i_A$ , который создаст МДС  $F_A$ . Эта МДС, в свою очередь, возбудит в машине магнитное поле.

В магнитном поле фазы  $A$  ротор будет стремиться ориентироваться таким образом, чтобы магнитный поток, пронизывающий его, принял максимальное значение. При этом на сердечники статора и ротора будут действовать одинаковые по значению и обратные по направлению электромагнитные силы притяжения. Очевидно, что силы, действующие на первый и четвертый зубцы ротора, будут стремиться повернуть его по часовой стрелке, а силы, действующие на второй и пятый зубцы – против. В силу того, что ротор в данном положении симметричен относительно оси

возбужденной фазы, равнодействующая проекций на ось этих сил будет равна нулю. Таким образом, в рассогласованном положении ИМ и ВИД не развивают вращающего момента.

Рассогласованное положение представляет собой точку неустойчивого равновесия. Действительно, если под действием какого-либо внешнего воздействия ротор отклонится от рассогласованного положения в том или ином направлении, то равнодействующая проекций электромагнитных сил сердечников уже не будет равна нулю. Следовательно, возникнет вращающий момент, который будет стремиться повернуть ротор в направлении от рассогласованного положения.

Возьмем другое положение ротора, показанное на рисунке 4.4, б. Здесь фаза *A* имеет большее потокоцепление и индуктивность, чем в рассогласованном положении, что объясняется меньшей величиной зазора между сердечниками. При этом равнодействующая азимутальных составляющих ПС сердечников отлична от нуля, и созданный ею электромагнитный момент стремится повернуть ротор ИМ против часовой стрелки.

Вращение ротора будет продолжаться до тех пор, пока он не займет положение, показанное на рисунке 4.4, в. Оно называется согласованным положением фазы *A*.

*Согласованным положением сердечников статора и ротора ИМ* для какой-либо фазы называется такое положение, при котором ось каждой катушки этой фазы совпадает с одной из осей *d*, совпадающей с серединой зубца статора фазы *C*, (см. рисунок 4.5) ротора, т.е. зубцы фазы располагаются строго напротив полюсов ротора. Это положение характеризуется максимальным значением индуктивности фазы и сцепленного с ней магнитного потока, что объясняется минимальной величиной магнитного сопротивления зазора между сердечниками.

В этом положении ПС притяжения сердечников имеют только радиальные составляющие, в силу чего вращающий момент ИМ в этом положении равен нулю.

Согласованное положение представляет собой точку устойчивого равновесия. Действительно, если под действием какой-либо внешней силы ротор отклонится от согласованного положения в ту или иную сторону, то возникший электромагнитный момент будет стремиться вернуть его в согласованное положение.

Для того чтобы продолжить однонаправленное вращение ротора, необходимо еще до достижения согласованного положения фазы *A* осуществить коммутацию ключей преобразователя частоты, в результате которой фаза *A* должна быть отсоединена от источника питания, а фаза, момент которой стремится продолжить вращение ротора в прежнем направлении, подключена к нему. В данном случае это фаза *B*.



Взаимное положение сердечников статора и ротора, близкое к согласованному положению для фазы *A*, является для фазы *B* близким к рассогласованному положению, т.е. при подаче на нее напряжения и протекании по ее катушкам тока возникнет отличный от нуля вращающий момент, который будет стремиться повернуть ротор против часовой стрелки (рисунок 4.4).

Необходимость коммутации фаз еще до достижения согласованного положения сердечников диктуется желанием получить как можно меньшее значение тока в отключаемой фазе при достижении ее согласованного положения. Дело в том, что после отключения фазы накопленная в ней энергия магнитного поля не может исчезнуть мгновенно. Она расходуется на поддержание постоянства потокосцепления фазы, в силу чего в ней возникает ЭДС самоиндукции, и ток фазы остается отличным от нуля еще некоторое время после ее коммутации. Он замыкается через встречно включенный диод *VD<sub>2</sub>*, ключ *SV<sub>2</sub>* преобразователя частоты и питающую сеть. В конечном итоге ток достигнет нулевого значения (энергия магнитного поля выделится в виде электрических потерь на активных сопротивлениях фазы, встречно включенного диода *VD<sub>2</sub>* и ключа *SV<sub>2</sub>*). Однако если этот ток будет отличен от нуля в согласованном положении фазы, то при дальнейшем вращении ротора созданное им магнитное поле приведет к возникновению тормозного электромагнитного момента. С целью более быстрого гашения поля в ИМ после отключения фазы на нее подают напряжение обратной полярности.

Фаза *B* будет находиться под напряжением до тех пор, пока ротор не достигнет положения, близкого к согласованному. При достижении этого положения от ДПП в систему управления поступит соответствующий сигнал, обработка которого приведет к выдаче управляющего воздействия на преобразователь частоты и переключению фаз *B* и *C*. При дальнейшем вращении ротора будет происходить повторение рассмотренного выше цикла.

Таким образом, проводя последовательную коммутацию фаз, можно осуществить однонаправленное вращение ротора ИМ. Последовательность коммутации фаз определяется алгоритмом, заложенным в систему

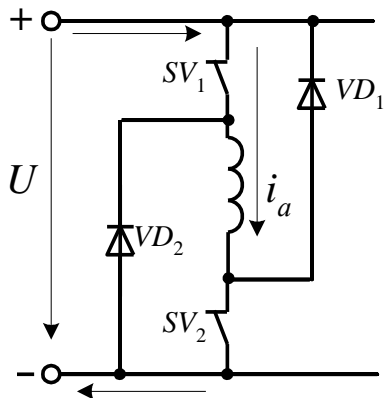


Рисунок 4.6 – Контуры замыкания тока в фазе ВИД

управления. Исходными данными для ее работы являются сигналы о положении ротора, поступающие от ДПР, что исключает возможность неправильной коммутации фаз.

### 4.3 Алгоритмы коммутации фаз

В рассмотренном примере в каждый момент времени работает только одна фаза ИМ ( $A-B-C-D-A\dots$ ). Коммутация фаз ИМ, при которой в каждый момент времени работает только одна его фаза, называется одиночной симметричной (рисунок 4.7, а).

Симметричная коммутация фаз является наиболее простой. Кроме нее в ИМ возможны парная симметричная коммутация и несимметричная коммутация фаз.

Коммутация фаз ИМ, когда в каждый момент времени работают две фазы ( $AB-BC-CD-DA-AB\dots$ ), называется парной симметричной (рисунок 4.7, б).

Коммутация фаз ИМ, при которой попеременно работают то одна, то две фазы ( $A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A\dots$ ), называется несимметричной (рисунок 4.7, в).

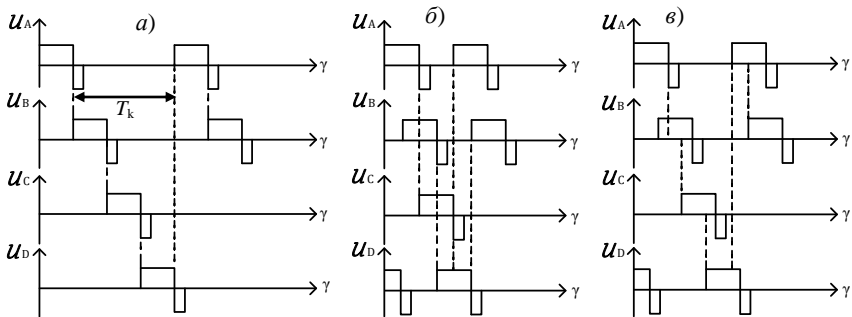


Рисунок 4.7 – Последовательность возбуждения фаз 4-фазного ВИД конфигурации 8/6 при различных алгоритмах коммутации:

а – симметричной одиночной; б – симметричной парной; в – несимметричной

Алгоритм коммутации фаз характеризуется несколькими параметрами:

- количеством тактов в полном цикле коммутации;
- тактовым углом  $\varepsilon$ , который определяет угол поворота ротора за один такт коммутации;
- числом тактов на один оборот ротора.

Тактом коммутации ( $T_k$ ) называется интервал времени, в пределах которого работает только одна фаза или их комбинация и не происходит включение другой фазы или их комбинации.

Цикл коммутации – это последовательность уникальных тактов, которая периодически повторяется. Количество тактов в полном цикле для случая симметричной одиночной или парной коммутации равно числу фаз, т. е.

$$\zeta = m,$$

а при несимметричной коммутации определяется удвоенным числом фаз

$$\zeta = 2m.$$

Тактовый угол  $\varepsilon$  в общем случае может быть найден по формуле

$$\varepsilon = 2\pi/(\zeta N_R),$$

где  $N_R$  – число зубцов ротора.

Используя последнее соотношение, легко получить выражение для количества тактов на один оборот ротора:

$$\xi = 2\pi/\varepsilon.$$

Связь между частотой возбуждения фаз ИМ  $f$  и частотой вращения ротора  $n$ . Пусть ротор двигателя вращается с частотой  $n$ . Тогда частота следования импульсов напряжения, прикладываемого к одной фазе двигателя, в этом случае равна

$$f = \begin{cases} \frac{\xi}{m} \frac{n}{60} & \text{– при симметричной одиночной коммутации;} \\ \frac{\xi}{2m} \frac{n}{60} & \text{– при симметричной парной коммутации;} \\ \frac{\xi}{3m} \frac{n}{60} & \text{– при несимметричной коммутации,} \end{cases}$$

или

$$f = \begin{cases} N_R \frac{n}{60} & \text{– при симметричной одиночной коммутации;} \\ \frac{N_R}{2} \frac{n}{60} & \text{– при симметричной парной коммутации;} \\ \frac{N_R}{3} \frac{n}{60} & \text{– при несимметричной коммутации.} \end{cases}$$

Коэффициенты 1/2 и 1/3 для симметричной парной и несимметричной коммутации объясняются тем, что каждая фаза работает на двух и трех тактах соответственно.

Число  $N_R$  всегда больше единицы, поэтому частота вращения магнитного поля статора в ИМ  $\Omega = 2\pi f$  всегда выше частоты вращения ротора  $\Omega_R = 2\pi n/60$ .

Отношение частоты вращения магнитного поля статора к частоте вращения ротора в ВИД называется *коэффициентом электромагнитной редукации*  $k_{эп} = kN_R$ , где  $k$  – коэффициент, равный соответственно 1, 1/2 и 1/3 для случаев симметричной одиночной, парной и несимметричной коммутации.  $k_{эп}$  определяется конструкцией двигателя (числом полюсов ротора  $N_R$ ) и алгоритмом управления коммутации фаз (числом тактов в полном цикле коммутации  $\zeta$ ).

#### 4.4 Кривые тока фаз ИМ

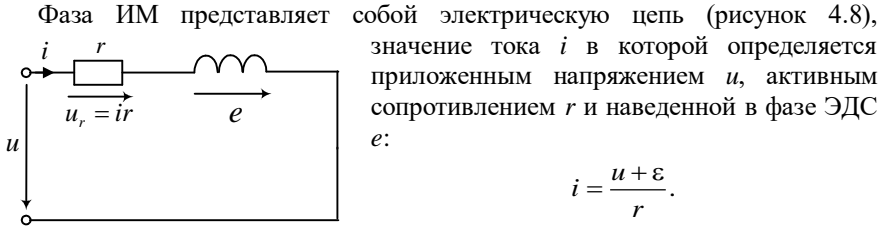


Рисунок 4.8 – Фаза ИМ

Фаза ИМ представляет собой электрическую цепь (рисунок 4.8), значение тока  $i$  в которой определяется приложенным напряжением  $u$ , активным сопротивлением  $r$  и наведенной в фазе ЭДС  $e$ :

$$i = \frac{u + \varepsilon}{r}.$$

На рабочем интервале к фазе прикладывается постоянное напряжение,

которое инвертируется в момент коммутации. ЭДС, наводимая в фазе, обусловлена изменением сцепленного с ней магнитного потока

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Угол коммутации  $\gamma$  характеризует процесс переключения вентиляей, когда в проводящем состоянии оказываются две фазы преобразователя. При вращении ротора от рассогласованного  $\gamma_u$  к согласованному  $\gamma_a$  положению сопротивление протеканию магнитного потока плавно уменьшается, что приводит к возрастанию потокосцепления фазы. Качественный характер данной зависимости для фазы  $A$  приведен на рисунке 4.9. Эта зависимость построена в предположении, что напряжение подается на фазу при угловом положении сердечников  $\gamma_{on} > \gamma_u$  и инвертируется при  $\gamma_{off} > \gamma_a$ . На рисунке 4.9 через  $\gamma_1$  обозначен угол, соответствующий началу перекрытия зубцов статора и ротора.

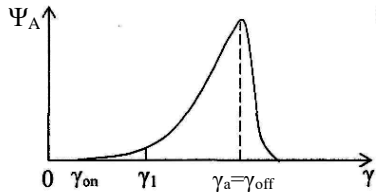


Рисунок 4.9 – Кривые изменения потокосцепления фазы

Наводимая в фазе ЭДС всегда направлена навстречу приложенному к фазе напряжению и нередко называется противоЭДС.

Приведенные рассуждения дают возможность построить качественную зависимость кривой фазного тока (рисунок 4.10). Анализ данного рисунка позволяет сделать вывод о том, что *ток фазы ИМ имеет резко несинусоидальный характер.*

На данной зависимости четко прослеживаются три участка:

- резкого нарастания тока ( $\gamma_{on} < \gamma < \gamma_1$ );
- медленного спадания тока ( $\gamma_1 < \gamma < \gamma_{off}$ );
- быстрого уменьшения тока до нулевого значения ( $\gamma > \gamma_{off}$ ).

Подача напряжения на фазу ИМ осуществляется в положении, близком к рассогласованному ( $\gamma_u < \gamma < \gamma_1$ ).

Резкое нарастание тока происходит при низком значении противоЭДС, которое наблюдается на интервале от рассогласованного положения  $\gamma_u$  до начала перекрытия полюсов статора и ротора  $\gamma_1$ . Замедление роста тока или даже его снижение на втором участке обусловлено резким нарастанием противоЭДС. Второй участок занимает

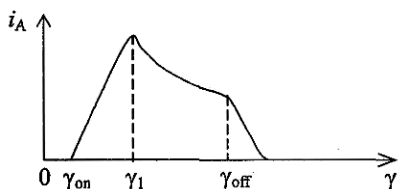


Рисунок 4.10 – Кривая фазного тока ИМ в ВИД конфигурации 8/6

угловой интервал от начала перекрытия полюсов статора и ротора  $\gamma_1$  до момента отключения фазы от источника питания  $\gamma_{off}$  (инвертирования напряжения). Третий участок сопровождается более резким по сравнению со вторым спаданием тока, что обусловлено тем, что на этом участке к фазе приложено напряжение обратной полярности.

Заметим, что характер кривой фазного тока зависит не только от величины приложенного напряжения, но и от частоты вращения ротора и углов включения и отключения фазы.

#### 4.5 Магнитное поле в ИМ

Характер поля в электрической машине определяется поведением пространственного вектора  $F$  МДС ее обмоток.

В традиционных типах электромеханических преобразователей энергии магнитное поле может быть круговым, эллиптическим или пульсирующим. В ИМ магнитное поле носит более сложный характер по сравнению с полем в традиционных электрических машинах.

Проведем анализ поведения вектора  $F$  в ВИД с четырехфазной ИМ для случая идеальной симметричной одиночной коммутации. Под идеальной симметричной одиночной коммутацией здесь понимается алгоритм управления, при котором углы включения и отключения фаз подобраны таким образом, что взаимного перекрытия токовых волн соседних фаз не происходит (рисунок 4.11).

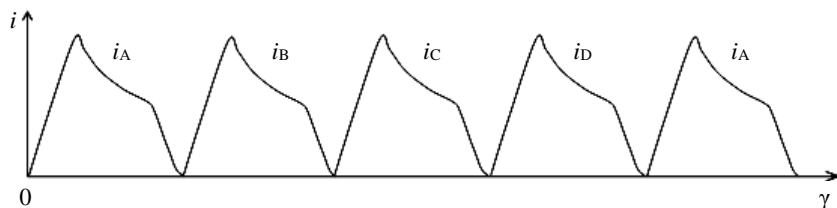


Рисунок 4.11 – Токи фаз при идеальной симметричной одиночной коммутации в ВИД четырехфазной ИМ

Исходя из определения алгоритма симметричной одиночной коммутации фаз, в каждый момент времени работает только одна фаза.

Следовательно, в пределах каждого такта коммутации направление вектора МДС в пространстве остается неизменным, а его величина изменяется в соответствии с изменением тока возбужденной фазы от нулевого значения в начале такта коммутации через максимальное значение до нулевого значения в конце такта коммутации.

В момент перехода системы из одного такта коммутации в другой вектор МДС ВИД изменяет свою ориентацию в пространстве на величину тактового угла. Количество положений вектора МДС в пространстве определяется числом фаз двигателя.

Напомним, что фазы ИМ питаются однополярными импульсами напряжения. Поэтому после окончания полного цикла коммутации (рисунок 4.12,  $\varepsilon$ ), вектор МДС возвращается в свое первоначальное положение (рисунок 3.12,  $\delta$ ).

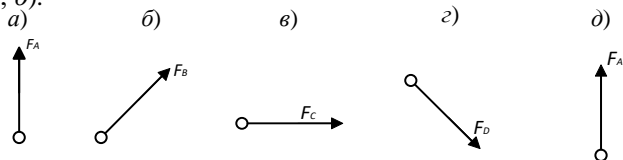


Рисунок 4.12 – Поведение вектора МДС в четырехфазном ВИД с ИМ конфигурации 8/6 для случая идеальной симметричной одиночной коммутации:

$a$  – включена фаза  $A$ ;  $b$  – включена фаза  $B$ ;  $c$  – включена фаза  $C$ ;  
 $\varepsilon$  – включена фаза  $D$ ;  $\delta$  – включена фаза  $A$

В рассмотренном примере вектор МДС принимает в процессе работы двигателя строго определенные дискретные положения в пространстве. Причем в каждом таком положении поле носит пульсирующий характер. Таким образом, при идеальной симметричной одиночной коммутации фаз ИМ поле может быть охарактеризовано как дискретно-пульсирующее.

Рассмотренный случай одиночной коммутации фаз является идеальным, хотя принципиально он может быть реализован. На практике при использовании симметричной одиночной коммутации токовые волны соседних фаз перекрывают друг друга (рисунок 4.13). Это явление в еще большей степени проявляется при использовании других алгоритмов управления.

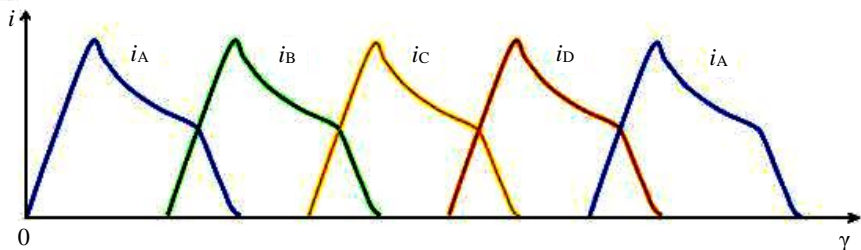


Рисунок 4.13 – Фазные токи при реальной симметричной одиночной

коммутации в ВИД с четырехфазной ИМ

Таким образом, результирующий вектор МДС за полный цикл коммутации осуществляет плавный поворот в пространстве от оси первой до оси последней фазы двигателя. После чего он возвращается в исходное положение, и цикл повторяется. При этом амплитуда вектора МДС несколько раз изменяется от некоторого минимального до некоторого максимального значения.

Можно сделать вывод о том, что в ВИД *магнитное поле не может быть ни круговым, ни эллиптическим, ни даже пульсирующим* в обычном понимании. Оно имеет сложный характер и в пределе стремится к дискретно-пульсирующему.

Следует также отметить, что вектора МДС и ротор ИМ имеют различные направления вращения. Это означает, что если переключение фаз происходит, например, по часовой стрелке, то есть  $A-B-C-D-A\dots$ , то вращение магнитного поля и ротора – против, то есть  $A-D-C-B-A\dots$ .

Исходя из принципа действия ВИД, каждая его фаза может развивать ненулевой вращающий момент в двигательном режиме на интервале от рассогласованного до согласованного положения. Этот интервал называется

абсолютной моментной зоной и определяется соотношением  $\gamma_{abs} = \frac{\pi}{F_{Dq}}$ .

На границах абсолютной моментной зоны момент, развиваемый фазой, принимает нулевое значение. Примерный характер его изменения внутри нее показан на рисунке 4.15.

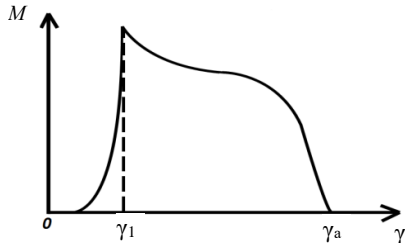


Рисунок 4.15 – Кривая мгновенного момента фазы двигателя

Экспериментальные исследования показывают, что максимальный момент фаза развивает на интервале увеличения взаимного перекрытия полюсов статора и ротора. Этот интервал называется *эффективной моментной зоной фазы* и определяется по формуле  $\gamma_{eff} = \min(\beta_R; \beta_S)$ , где  $\beta_R, \beta_S$  – угловой размер полюсов ротора и статора индукторной

машины.

Несколько снизить пульсации момента ВИД можно за счет использования парной или несимметричной коммутации фаз. Также на пульсации момента оказывают влияние конфигурация и форма пазов и зубцов ротора.

#### 4.6 Достоинства и недостатки ВИД

Момент и создающие его силы имеют резко несинусоидальный характер и могут быть разложены в ряд Фурье. Как всякая механическая система, сердечник статора имеет резонансные частоты собственных



свободных колебаний. При совпадении частоты какой-либо гармоники пондеромоторной силы (нелинейная сила, действующая на заряженные частицы в неоднородном электромагнитном поле) с одной из собственных частот колебаний статора возникает явление механического резонанса, которое сопровождается резким возрастанием амплитуды деформаций сердечника по данной гармонике и следовательно, уровня шума, излучаемого двигателем.

Исследования показывают, что наиболее важными являются первые три резонансные частоты. Характер деформаций статора при возникновении резонанса по ним для случая трехфазного двигателя конфигурации 6/4 условно представлен на рисунке 4.16.

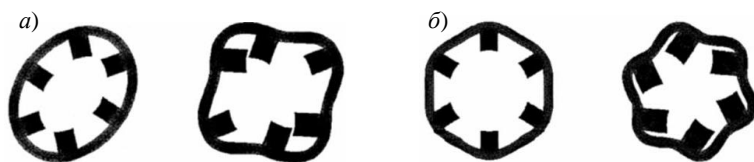


Рисунок 4.16 – Деформация статора при резонансе по второй (а) и третьей (б) резонансным частотам

Для снижения уровня шумов и вибраций следует проектировать вентильно-индукторную машину таким образом, чтобы резонансные частоты сердечника статора принимали как можно большие значения. При этом резко снижается вероятность того, что первые гармоники в кривой пондеромоторной силы будут иметь частоты, совпадающие с резонансными.

*Достоинства ВИД:* простота конструкции ИМ, высокая надежность, низкие потери в роторе, минимальные температурные эффекты, низкий момент инерции, возможность работы на больших частотах вращения, возможность работы в агрессивных средах, высокая степень утилизации.

*Недостатки ВИД:* высокий уровень шумов и вибраций, плохое использование стали, работа возможна только совместно с преобразователем частоты, значительные отходы при штамповке.

### Контрольные вопросы

- 1 Опишите структурную схему ВИД и назначение ее элементов.
- 2 Опишите особенности конструкции ИМ.
- 3 Опишите принцип действия ВИД. Поясните, почему этот тип электромеханического преобразователя энергии принципиально не может работать без системы управления и преобразователя частоты.
- 4 Расскажите, какие Вы знаете алгоритмы коммутации фаз ИМ для ВИД.
- 5 Выведите соотношение частоты коммутации фаз и частоты вращения ротора  $n$  для известных Вам алгоритмов коммутации.

- 6 Опишите характер магнитного поля в ИМ.
- 7 Какими достоинствами и недостатками обладает ВИД и почему?
- 8 Какие Вы знаете области практического применения ВИД?

## 5 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока (МПТ) используются в режиме двигателя и генератора. В качестве источников энергии постоянного тока раньше обычно применялись генераторы постоянного тока (для питания электроприводов с широким диапазоном регулирования частоты вращения, в электролизной промышленности, на судах, тепловозах и т. д.). В настоящее время они используются относительно мало, так как для получения энергии постоянного тока разработаны и широко применяются полупроводниковые преобразователи переменного тока в постоянный.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) используются на электротранспорте (электровозы, троллейбусы, трамваи, электрокары), в качестве привода различных станков, механизмов и т. д. Их применение обусловлено простотой регулирования частоты вращения, большими пусковыми моментами.

В таблице 5.1 приведены характеристики некоторых электрических машин постоянного тока.

Таблица 5.1 – Примеры применения машин постоянного тока

Назначение	Использование	$P$ , кВт	$I$ , А	$U$ , В	Примечание
Двигатели	Трамвай (привод колес)	40–50	75–100	550	Достоинства: 1) широкое регулирование частоты вращения; 2) развивают большой пусковой момент
	Электровоз (привод колес)	755–855	400–600	1500	
	Прокатный стан	11500	11500	1000	
	Атомоход (привод гребного)	18000	18000	1000	
Генераторы	Тепловоз	2700	3600	750	Сейчас чаще применяют синхронные генераторы

### 5.1 Конструкция и принцип действия машин постоянного тока

Конструкция МПТ. Любая электрическая машина обратима, т. е. может работать генератором или двигателем, поэтому их конструкции не отличаются (рисунок 5.1 [8]).

Конструктивно МПТ состоят из двух частей: неподвижной – статора (индуктора для создания неподвижного магнитного поля) и подвижной – ротора (якоря). Статор представляет собой пустотелый стальной цилиндр, называемый станиной, на внутренней поверхности которого располагаются полюса магнитной системы, создающие магнитный поток электрической

машины. В зависимости от способа создания магнитного потока различают МПТ с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением.

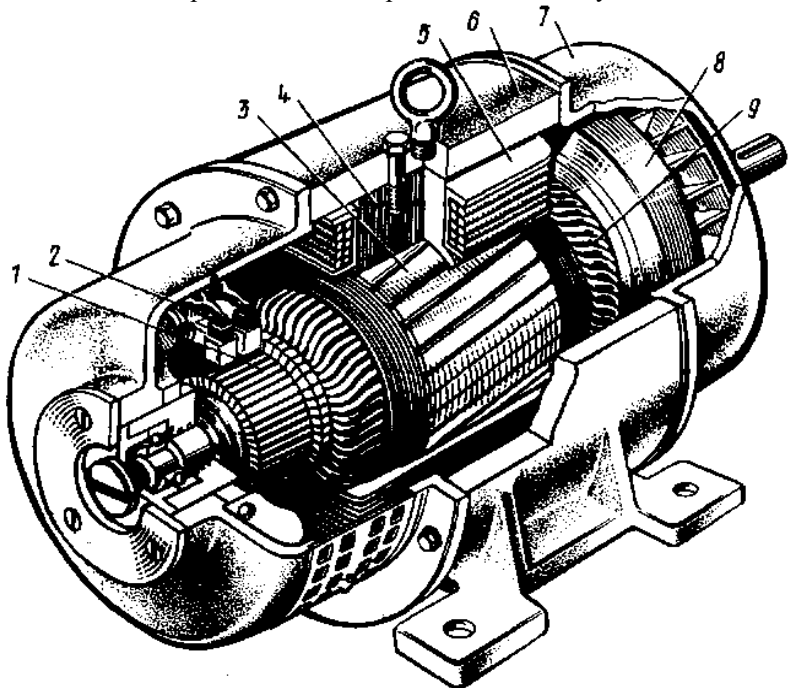


Рисунок 5.1 – Устройство электрической машины постоянного тока:

1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник главного полюса; 5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

При магнитоэлектрическом возбуждении полюса магнитной системы МПТ формируются постоянными магнитами. Такое возбуждение находит применение в машинах малой мощности. В МПТ с электромагнитным возбуждением полюс магнитной системы создается электромагнитом, представляющим собой ферромагнитный сердечник с размещенной на нем обмоткой, по которой протекает постоянный ток. Эта обмотка получила название *обмотки возбуждения*. Полюсы, формирующие основной магнитный поток, называются главными (рисунок 5.2).

Между главными полюсами могут быть установлены дополнительные полюсы, при

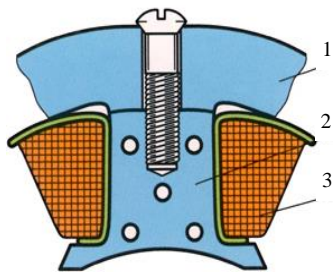


Рисунок 5.2 –

Главный полюс:

1 – станина; 2 – сердечник;  
3 – обмотка возбуждения

помощи которых корректируется искажение основного магнитного поля, вызванное влиянием нагрузки МПТ. Воздействие корректирующего магнитного поля дополнительных полюсов позволяет уменьшить искрение между щетками и коллектором.

Часть МПТ, создающая магнитный поток, называется *индуктором*.

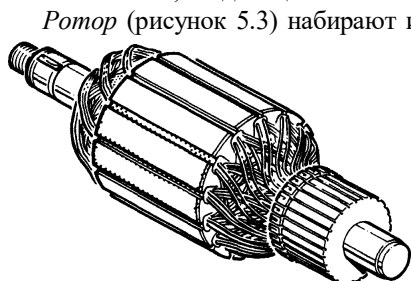


Рисунок 5.3 – Ротор МПТ

*Секция* – элементарная часть роторной обмотки (рисунок 5.4). Она может состоять из одного или нескольких витков. В пазы ротора секция укладывается таким образом, что одна ее часть находится под северным полюсом магнитной системы, а вторая – под южным. Часть секции, лежащая в пазу под полюсом, называется активной стороной секции. Каждая секция

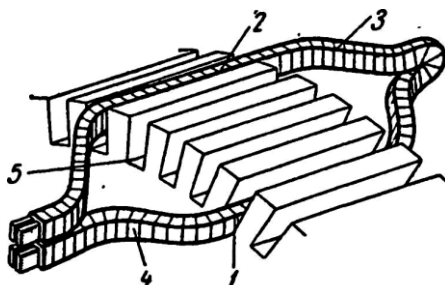


Рисунок 5.4 – 1, 2 – активные стороны витка; 3, 4 – лобовые части витка; 5 – пазы сердечника

содержит две активные стороны, которые объединены лобовыми частями.

Точки соединения секций между собой подключаются к коллектору, который закреплен на валу. Коллектор (рисунок 5.5) представляет собой цилиндрическую конструкцию, набранную из пластин кадмированной меди (для увеличения износостойкости). Эти пластины располагаются на изоляционном основании и изолированы друг от друга. Число пластин коллектора зависит от количества точек соединения между собой секций. Коллекторные пластины осуществляют последовательное соединение секций обмотки якоря.

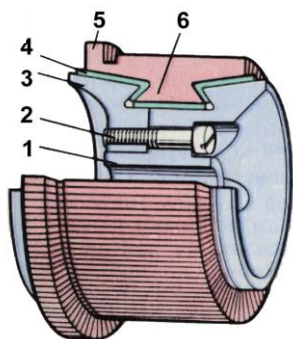


Рисунок 5.5 – Коллектор:  
1, 3 – стальные части втулки;  
2 – стягивающий винт;  
4 – миканитовая прокладка;  
5 – петушок; 6 – коллекторные пластины

К наружной поверхности коллектора прижимаются щетки, закрепленные на станине и изолированные от нее (рисунок 5.6 [12]). С помощью коллектора и щеток осуществляется электрическое соединение вращающегося коллектора с щетками.

В обмотке ротора МПТ, как в двигательном, так и в генераторном режимах, появляется ЭДС, поэтому вращающуюся часть МПТ чаще называют *якорем*.

Таким образом, в конструкции МПТ можно выделить две электрические цепи: возбуждения и якоря.

Возбудить машину – означает навести в ней основной магнитный поток. Системы возбуждения, которые создают его, зависят от конструкции и назначения машины постоянного тока.

При независимом возбуждении (рисунок 5.7) основной магнитный поток создается постоянными магнитами или обмоткой возбуждения, питаемой от независимого источника. Для промышленных целей в основном применяют машины постоянного тока с *самовозбуждением*. Для таких машин не требуется дополнительного источника питания. В машинах постоянного тока со смешанным возбуждением параллельная и последовательная обмотки могут быть включены согласно (МДС этих обмоток совпадают) и встречно (МДС обмоток направлены противоположно друг другу).

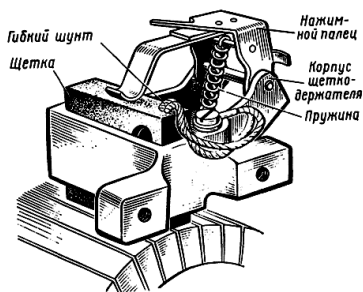


Рисунок 5.6 – Пример конструкции щеточного узла

Наименование	Обозначение	
	буквенно-цифровое	графическое
1 Обмотка якоря	Я1-Я2 (ГОСТ 183-74) А1-А2 (СТ СЭВ 3170-81) М – двигатель G – генератор	
2 Независимая обмотка возбуждения	Ш1-Ш2 (ГОСТ 183-74) F1-F2 (СТ СЭВ 3170-81)	
3 Параллельная обмотка возбуждения	Ш1-Ш2 (ГОСТ 183-74) E1-E2 (СТ СЭВ 3170-81)	
4 Последовательная обмотка возбуждения	С1-С2 (ГОСТ 183-74) Д1-Д2 (СТ СЭВ 3170-81)	
5 Компенсационная обмотка	К1-К1 (ГОСТ 183-74) С1-С2 (СТ СЭВ 3170-81)	
6 Обмотка дополнительных полюсов	Д1-Д1 (ГОСТ 183-74) В1-В2 (СТ СЭВ 3170-81)	

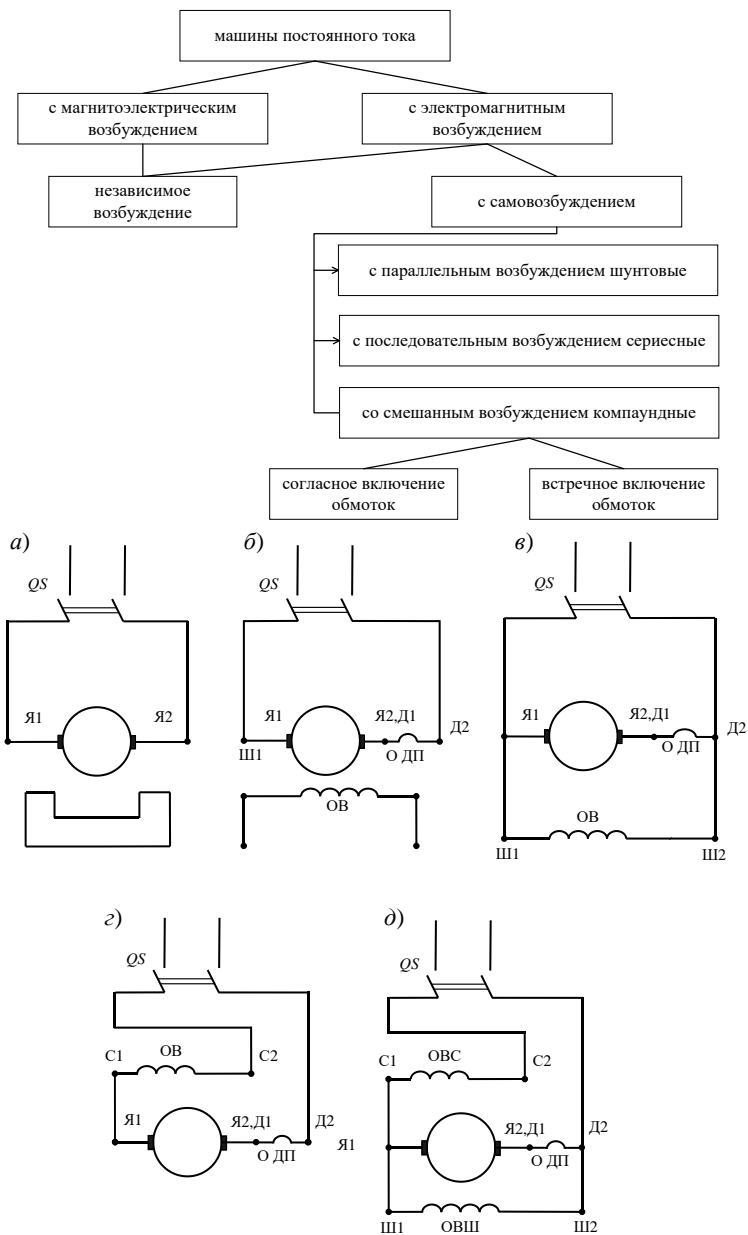


Рисунок 5.7 – Классификация систем возбуждения МПТ: магнитоэлектрическая (а), независимая (б), шунтовая или параллельная (в), сериесная или последовательная (з), компаундная или смешанная (д)



Обмотки параллельного возбуждения имеют большое количество витков, намотанных проводом малого сечения. Поэтому их омическое сопротивление большое и по ним протекает небольшой ток. В результате мощность обмоток параллельного возбуждения составляет 1–5 % номинальной мощности машины [19].

Для подключения обмоток якоря и возбуждения используется клеммный щиток, выводы которого маркируются, как правило, следующим образом:

Я1, Я2 – обмоток якоря (ГОСТ 183-74) (А1, А2 по ГОСТ 26772-85);

К1, К2 – компенсационной обмотки (С1, С2);

Д1, Д2 – обмоток дополнительных полюсов (В1, В2);

С1, С2 – последовательной обмотки возбуждения (серийной) (D1, D2);

Ш1, Ш2 – параллельной обмотки возбуждения (шунтовой) (Е1, Е2).

*Современные серии МПТ*

В настоящее время в используются машины постоянного тока серии П, 2П и более новой – 4П.

Машины серии П классифицируются по наружному диаметру сердечника якоря. Машины серии 2П классифицируются по высоте оси горизонтального вала от 90 до 315 мм. Каждый габарит серии П и 2П имеет две длины: М (Middle) – средняя и L (Long) – длинная. Машины изготавливаются как с параллельным, так и смешанным возбуждением. Исполнение защитное с самовентиляцией (Н), с независимой вентиляцией (Ф), закрытое обдуваемое (О), естественное охлаждение (Б). Климатическое исполнение – У, категория - 4, режим работы -81.

Пример условного обозначения двигателя серии 2П: 2ПБ 112L У4 – двигатель с естественным охлаждением, высота оси горизонтального вала – 112 мм второй длины, климатическое исполнение – У4.

Серия 4П отличается от серии 2П тем, что магнитопровод статора выполнен из пластин электротехнической стали и все машины снабжены компенсационной обмоткой.

Принцип действия генератора постоянного тока. В генераторах постоянного тока (ГПТ) происходит преобразование механической энергии в электрическую, снимаемую со щеток МПТ. Работа генератора основана на явлении электромагнитной индукции.

Для пояснения принципа действия ГПТ воспользуемся рисунком 5.8 [13]. На этом рисунке основное магнитное поле создается полюсами *N* и *S* индуктора. Сердечники полюсов, якоря и станины являются частью магнитной цепи машины, через которые проходит основной магнитный поток, пересекая проводники якорной обмотки.

Представленная на рисунке 5.8 секция якорной обмотки состоит из одного витка. Концы секции подключены к простейшему коллектору, состоящему из двух полуколец, изолированных между собой. Щетки *A* и *B*

прижимаются к полукольцам (пластинам коллектора), и к ним подключается электрическая нагрузка  $R$ .

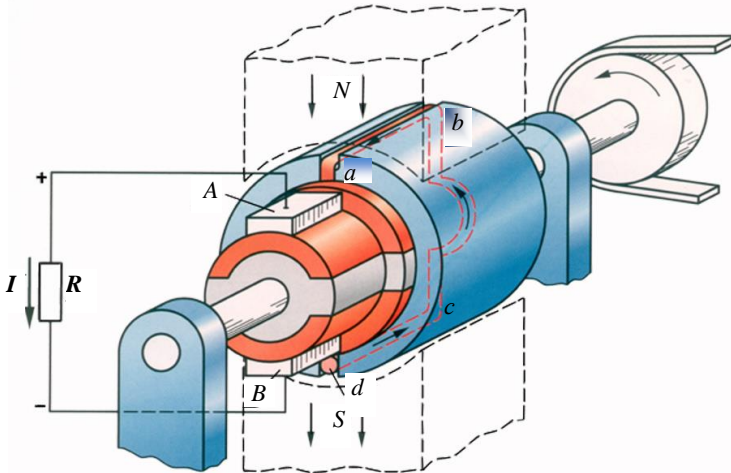


Рисунок 5.8 – Упрощенная модель ГПТ

При вращении якоря, в каждой из активных сторон секции (витка) индуцируется ЭДС, мгновенное значение которой

$$e_{\text{в}} = Blv \sin \alpha, \quad (5.1)$$

где  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре между полюсом и якорем;  $l$  – активная длина двух сторон витка ( $ab$  и  $cd$ );  $v$  – линейная скорость движения проводника;  $\alpha$  – угол поворота витка относительно геометрической нейтрали (воображаемая линия, проходящая посередине между полюсами).

Из графика, приведенного на рисунке 5.9, следует, что ЭДС одного витка  $e_{\text{в}}$ , снимаемая со щеток, имеет неизменную полярность, но пульсирует от максимального значения до нуля.

Для получения во внешней цепи ЭДС, близкой к постоянной, необходимо увеличить количество секций в обмотке якоря, равномерно распределив их по поверхности сердечника ротора, и соответственно увеличить число коллекторных пластин. В этом случае суммируются ЭДС всех проводников, включенных последовательно в ветви обмотки, заключенной между щетками.

Таким образом ЭДС реальной МПТ, снимаемая со щеток

$$E = e_1 + e_2 + \dots + e_{N/(2a)} = (B_1 + B_2 + \dots + B_{N/(2a)})lv = \sum_{i=1}^{N/(2a)} B_i lv,$$

где  $e_1, e_2, \dots, e_{N/(2a)}$  – ЭДС проводников обмотки якоря;

$B_1, B_2, \dots, B_{N/(2a)}$  – магнитная индукция, пронизывающая проводники;

$N$  – количество проводников в обмотке;

$2a$  – число параллельных ветвей.

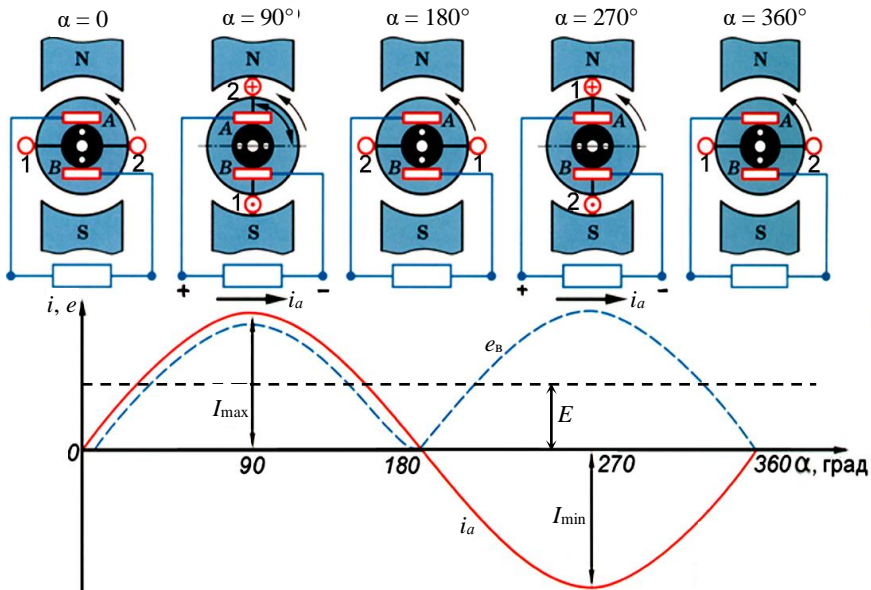


Рисунок 5.9 – Пример выпрямления тока коллектором

При достаточно большом количестве секций в обмотке можно считать

$$\sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_i = B_{\text{cp}} \frac{N}{2a} = \text{const},$$

где  $B_{\text{cp}}$  – среднее значение магнитной индукции под полюсом.

Согласно второму закону Кирхгофа, напряжение  $U$  на зажимах якоря ГПТ будет меньше ЭДС  $E$  на величину падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря

$$U = E - I_a r_a. \quad (5.2)$$

Проводники обмотки якоря с током находятся в магнитном поле, поэтому на них действуют электромагнитные силы, направление которых определяется по правилу левой руки. Эти силы создают механический момент, который в режиме генератора постоянного тока является тормозящим, а в двигательном – движущим.

Принцип действия двигателя постоянного тока. В двигателях постоянного тока (ДПТ) происходит преобразование электрической энергии в механическую. При подключении двигателя к внешнему источнику питания в обмотке якоря начинает протекать постоянный ток  $I_a$ . При этом на проводники с током обмотки якоря в магнитном поле будут действовать электромагнитные силы и возникнет вращающий момент. Направление действия электромагнитной силы при переходе активной стороны секции от

одного полюса к другому не изменяется, так как коллектор меняет направление тока в обмотке якоря.

Направление ЭДС в двигателе *не совпадает* с направлением тока якоря  $I_a$  и напряжения  $U$ , поэтому она называется *противоэлектродвижущей* силой.

Приложенное к якорю двигателя напряжение  $U$  уравнивается противоЭДС  $E$  и падением напряжения в обмотке якоря  $I_a r_a$ :

$$U = E + I_a r_a. \quad (5.3)$$

Таким образом, в генераторном режиме  $U < E$ , а в двигательном –  $U > E$ .

Каждая электрическая машина характеризуется номинальными данными, которые указываются на ее заводском щитке. К основным номинальным данным машин постоянного тока относятся:

- а) номинальная мощность  $P_n$  генератора – это мощность на его зажимах, которую он может отдать потребителям;
- б) номинальное напряжение  $U_n$  – это напряжение, для работы на котором предназначена электрическая машина;
- в) номинальная сила тока  $I_n$ , которая определяется номинальными значениями мощности и напряжения;
- г) номинальная частота вращения  $n_n$  – это частота вращения якоря (ротора), развиваемая в номинальном режиме.

## 5.2 Обмотки якоря и их ЭДС

Назначение обмотки якоря следующее:

- при работе машины генератором в обмотке создается ЭДС, снимаемая с коллектора щетками;
- при работе двигателем через обмотку проходит ток, который, взаимодействуя с основным магнитным потоком, создает вращающий момент.

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных в пазах якоря и присоединенных к коллектору.

В настоящее время широко применяются обмотки якоря барабанного типа, в которых проводники обмотки укладываются двумя слоями в пазы, расположенные на наружной поверхности.

*Полюсным делением*  $\tau$  называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс или, как показано на рисунке 5.10, между соседними разноименными

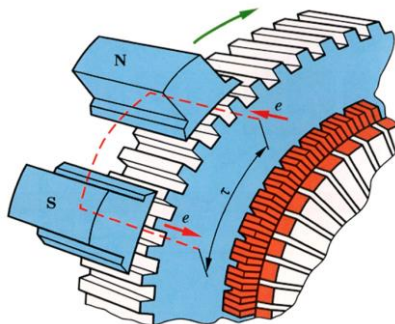


Рисунок 5.10 – Полюсное деление

полюсами.

Обмотка якоря представляет собой замкнутую систему, в которой секции соединены последовательно, для чего к каждой коллекторной пластине припаивают конец одной секции и начало другой, следующей за ней по схеме обмотки.

Простейший элемент обмотки – виток. *Ряд последовательно соединенных витков, лежащих в двух пазах и имеющих общую пазовую изоляцию, называется секцией.* Секция имеет две активные стороны (лежащие в пазах якоря и принимающие участие в создании электродвижущей силы или вращающего момента) и две лобовые части, которые соединяют активные стороны между собой или коллектором. Если одна активная сторона секции находится под одним полюсом, то вторая должна быть под противоположным, чтобы ЭДС, создаваемая сторонами, или усилия, прилагаемые к ним, были максимальными.

Последовательность соединения секций между собой и коллекторными пластинами задается типом обмотки и обмоточными шагами (рисунок 5.11):

- первый частичный  $y_1$  – расстояние между начальной и конечной сторонами секции, т. е. ширина секции;
- второй частичный  $y_2$  – расстояние между конечной стороной одной секции и начальной стороной другой, следующей за ней по схеме обмотки;
- результирующий  $y$  – расстояние между начальными сторонами двух соседних секций;
- шаг обмотки по коллектору  $y_k$  – расстояние между коллекторными пластинами, к которым подключены начало и конец секции.

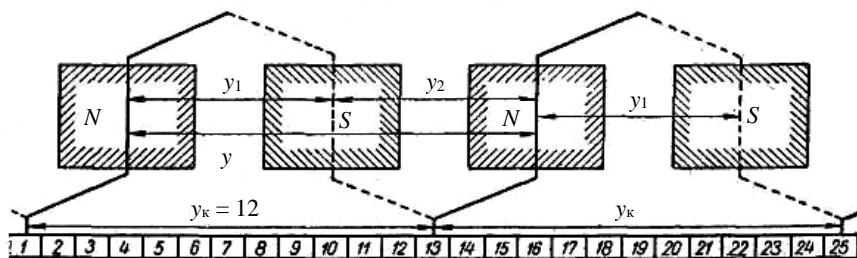


Рисунок 5.11 – Шаги волновой обмотки

Шаги обмотки по магнитопроводу ротора измеряют числом пропущенных промежутков между пазами, а шаг по коллектору – числом изоляционных промежутков между коллекторными пластинами.

В современных машинах ширину секции делают меньше величины полюсного деления, что позволяет экономить медь в лобовых соединениях и улучшить условия коммутации. Такую секцию называют *секцией с укороченным шагом* (рисунок 5.12).

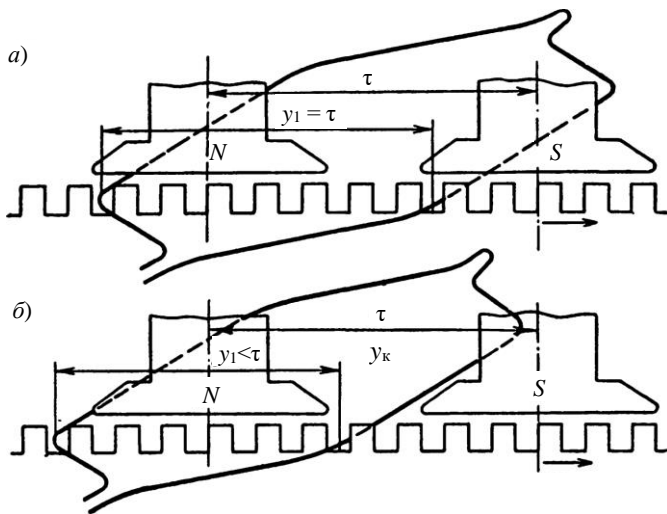


Рисунок 5.12 – Секции различной ширины:  
 а – с полным шагом; б – с укороченным шагом

### 5.2.1 Простая петлевая обмотка

Петлевой обмотке называют потому, что ее секции имеют форму петли (рисунок 5.13). В простой петлевой обмотке начало и конец секции присоединены к рядом расположенным коллекторным пластинам.

Обмотку якоря машин постоянного тока делают двухслойными. В каждом пазу такой обмотки располагаются две активные стороны двух различных секций: начальная сторона одной секции вверху паза и конечная сторона другой – внизу паза.

При расчетах многослойных обмоток применяют понятие *элементарного паза*, под которым понимают паз с двумя активными сторонами. В  $y_k$  -слойной обмотке в одном реальном пазу может быть несколько элементарных пазов.

Так как в секции есть две активные стороны, то каждой секции соответствует один элементарный паз, и на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина, поскольку к каждой пластине присоединяют начало одной секции и конец другой. Поэтому для любой многослойной обмотки

$$S = K = Z_{ол},$$

где  $S$  – число секций в обмотке якоря;

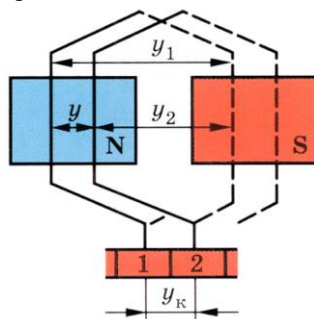


Рисунок 5.13 –  
 Петлевая обмотка

$K$  – число коллекторных пластин;

$Z_{эл}$  – число элементарных пазов.

Расчетные формулы для простой двухслойной петлевой обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \pm b; \quad y = y_k = 1; \quad y = y_1 - y_2,$$

где  $b$  – число, которое отнимают или добавляют, чтобы при делении  $y_1$  было целым числом.

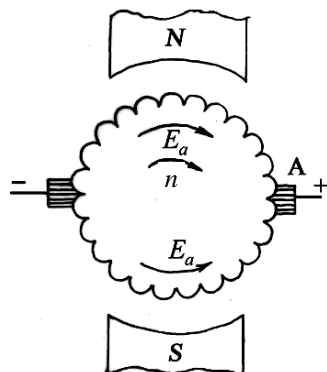


Рисунок 5.14 – Пример параллельной ветви

*Параллельной ветвью* обмотки называют часть обмотки, находящуюся между двумя разноименными щетками. В одну ветвь входят секции, начальные стороны которых находятся под северным полюсом, а другую – под южным (рисунок 5.14).

Следовательно, в простой петлевой обмотке столько параллельных ветвей, сколько полюсов, т. е.  $2a = 2p$ , где  $a$  – число пар параллельных ветвей. ЭДС секций в параллельной ветви складываются.

Между щетками в разные моменты времени находятся различные секции, т. к. обмотка с коллектором при вращении непрерывно перемещается относительно щеток. Секции переходят из одной параллельной ветви в другую, но сумма ЭДС секций в параллельной ветви не меняется по величине и, следовательно, на щетках ЭДС неизменна.

Для большей наглядности обмотку якоря представляют в виде электрической цепи (см. рисунок 5.16), которая выполняется на основании развернутой схемы. Для изображения электрической схемы берут щетки и имеющие с ними контакт коллекторные пластины. Затем начинают обход секций обмоток и изображают их в виде отдельных витков.

Если параллельные ветви обмотки обладают одинаковыми электрическими сопротивлениями, и в них индуктируются одинаковые по величине ЭДС, то такая обмотка называется *симметричной*.

Схема-развертка – мысленно разрезанная и развернутая на плоскость проекция якорной обмотки с уложенной в них обмоткой. На них изображено соединение катушек в катушечные группы и групп в фазы, сопряжение фаз между собой.

Рекомендуется схему-развертку выполнять в следующем порядке:

1 На листе миллиметровой или клетчатой бумаги изображают  $Z_{эл}$  элементарных пазов в виде отрезков вертикальных линий – сплошного (слева), который изображает верхнюю сторону, и пунктирного (справа), изображающего нижнюю активную сторону.



2 Нумеруют элементарные пазы по порядку, начиная с первого и заканчивая последним ( $Z_{эл}$ ). Эта нумерация является основной нумерацией всех элементов обмотки: номер паза является номером секции, начало которой лежит в верхнем слое паза, и коллекторной пластине, с которой соединено начало секции. Так как в каждом пазу лежат две активные стороны, то верхнюю сторону обозначают номером паза без штриха, а нижнюю – номером паза со штрихом.

3 Производят разметку положения и нумерацию коллекторных пластин. Для этого посередине между элементарными пазы  $N_1 = 1$  и  $N_n = 1 + y_1$  (рисунок 5.15) проводят вертикальную линию  $ab$ . Буквой  $N_1$  обозначен полюс) на которой находится вершина верхней лобовой части секции № 5.

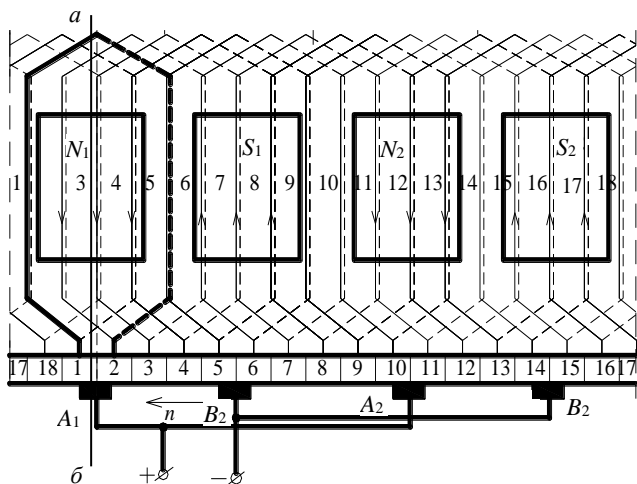


Рисунок 5.15 – Схема-развертка простой петлевой обмотки при  $Z_{эл} = S = K = 18$ ;  $p = 2$ ;  $y_1 = 4$ ;  $y_k = 1$

В случае простой петлевой обмотки (см. рисунок 5.15) на этой же линии  $ab$  находится граница (изоляционный промежуток) между коллекторными пластинами 1 и 2. Найдя положение пластин 1 и 2, размечают остальные пластины, приняв их ширину  $t_k$  равной расстоянию между элементарными пазы.

Наносят на схему-развертку контуры главных полюсов. Щетки должны быть расположены на линии геометрической нейтрали (в процессе эксплуатации их положение корректируют). Задавшись направлением вращения (рекомендуется взять против вращения часовой стрелки) и полярностью главных полюсов, определяют полярность щеток (с учетом режима работы машины – генераторный или двигательный). Все щетки одинаковой полярности соединяются друг с другом.

Для определения полярности щеток необходимо выявить направление ЭДС в какой-либо секции и перенести это направление на схему параллельных ветвей (рисунок 5.16). Схема параллельных ветвей представляет собой электрическую схему соединения секций, которые изображаются в виде полуокружностей. Схема показывается для того момента времени, для которого выполнена схема-развертка. Щетки образуют  $2a$  параллельных ветвей и замыкают накоротко секции, проходящие коммутацию (одновременно соединенные щетками).

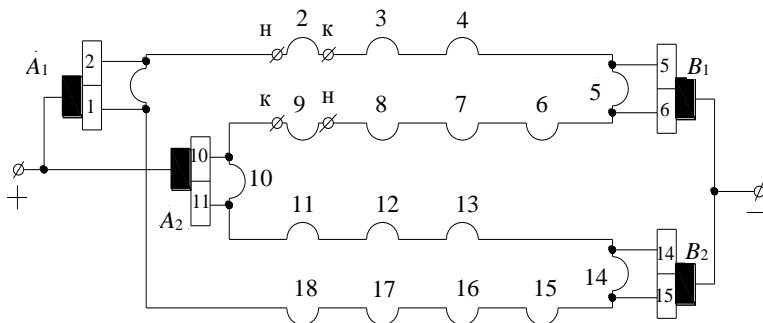


Рисунок 5.16 – Схема параллельных ветвей простой петлевой обмотки, изображенной на рисунке 5.15

Выполнение петлевой обмотки рассмотрим на примере 5.5.

**Пример 5.5.** Рассчитать и вычертить простую двухслойную петлевую обмотку, если известно, что  $2p = 4$ ;  $Z_{эл} = 12$ .

*Решение.* Для простой петлевой двухслойной обмотки

$$y = y_k = 1; \quad Z_{эл} = K = S = 12; \quad y_1 = Z_{эл} / (2p) \pm b = 12 / 4 \pm 0 = 3.$$

Производим нумерацию пазов, произвольно выбрав первый. При определении номера паза, в который нужно укладывать конец первой секции, прибавляем  $y_1$ :  $1 + 3 = 4$ . По приведенной выше методике размечаем положения коллекторных пластин. Начинаем выполнять обмотку с первой коллекторной пластины, затем укладываем ее в паз 1 (рисунок 5.17, а). Конец секции укладываем в паз 4 и присоединяем ее ко второй коллекторной пластине, так как  $y_k = 1$ , т. е. между началом и концом секции по коллектору находится один изоляционный промежуток.

Вторую секцию начинаем со второй коллекторной пластины. Для определения номера паза, в который нужно уложить начало второй секции, к номеру паза, в котором лежит начало первой секции, прибавляем  $y$ :  $1 + 1 = 2$ . Начало второй секции находится в пазу 2. В дальнейшем обмотка рассчитывается по тому же принципу. Для облегчения выполнения обмотки составляем обмоточную таблицу (таблица 5.2). Номера сторон секций, лежащих внизу паза, обозначим в таблице с помощью штриха.

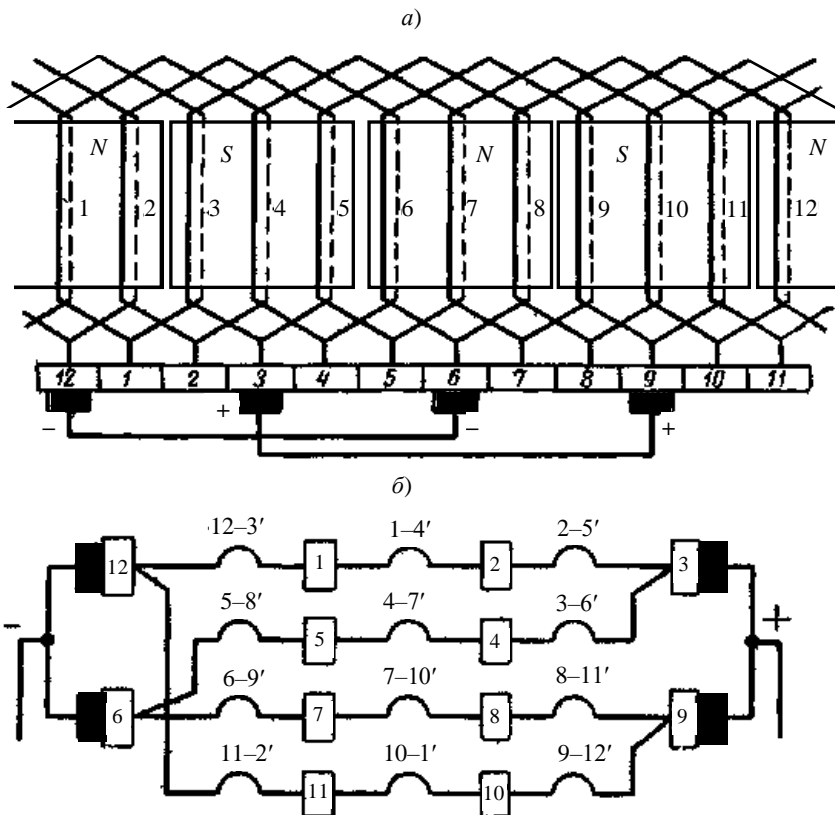


Рисунок 5.17 – Простая петлевая двухслойная обмотка:  
а – развертка обмотки; б – схема параллельных ветвей

Принцип составления обмоточной таблицы заключается в следующем. В первой графе по вертикали к каждой цифре прибавляем  $u_k$ , по второй по вертикали –  $u$ , а по горизонтали –  $u_1$  в третьей по вертикали –  $u_k$ .

Составим схему параллельных ветвей простой петлевой двухслойной обмотки (рисунок 5.17, б). Если начать вычерчивать параллельную ветвь с положительной щетки, то закончится она на отрицательной. Начертим параллельную ветвь, начиная с коллекторной пластины 3, на которой расположена щетка. Обходя обмотку по часовой стрелке, наносим на схему секцию 3-6', которая заканчивается на коллекторной пластине 4. Далее вычерчиваем секцию 4-7', выходящую из коллекторной пластины 4. Секция 4-7' заканчивается на коллекторной пластине 6. После этого следует секция 5-8', конец ее присоединен к коллекторной пластине 6, на которой стоит отрицательная щетка. Далее, обходя обмотку по часовой стрелке, составляем схему параллельных ветвей, которых в данной обмотке четыре.

Таблица 5.2 – Обмоточная таблица

Номер коллекторной пластины, к которой припаяно начало секции	Номера пазов, в которых лежит секция	Номер коллекторной пластины, к которой припаян конец секции
↓ 1 2 3 4 5 6 7 ↓ у <sub>к</sub>	→ у <sub>1</sub> 1–4' 2–5' 3–6' 4–7' 5–8' 6–9' 7–10' ↓ у 8–11' 9–12' 10–1' 11–2' 12–3'	↓ 2 3 4 5 6 7 8 ↓ у <sub>к</sub> 9 10 11 12 1

### 5.2.2 Простая волновая обмотка

Волновой обмотку называют потому, что по форме секция обмотки напоминает волну. В зависимости от взаимного расположения выводов секций различают также неперекрещенные и перекрещенные обмотки (на рисунке 5.18 приведена перекрещенная обмотка).

Расчетные формулы для простой двухслойной волновой обмотки:

$$y = y_1 + y_2; \quad y_k = \frac{K \pm 1}{p}; \quad 2a = 2; \quad y_1 = \frac{Z_{\text{эл}} \pm b}{2p}.$$

Число параллельных ветвей  $2a$  простой волновой обмотки независимо от числа полюсов машины всегда равно двум.

Пример выполнения простой двухслойной волновой обмотки для  $Z_{\text{эл}} = S = K = 19; p = 2; y_1 = 4; y_k = 9$  приведен на рисунках 5.19 и 5.20.

Для разметки положения и нумерации коллекторных пластин посередине между элементарными пазами  $N_1 = 1$  и  $N_n = 1 + y_1$  (см. рисунок 5.19) проводят вертикальную линию  $ab$ , на которой находится вершина верхней лобовой части секции № 5. В случае простой волновой обмотки для разметки пластин коллектора необходимо найти элементарный паз  $N_n$ , в котором лежит начало следующей за первой секции ( $N_n = N_1 + y_k = 1 + y_k$ ).

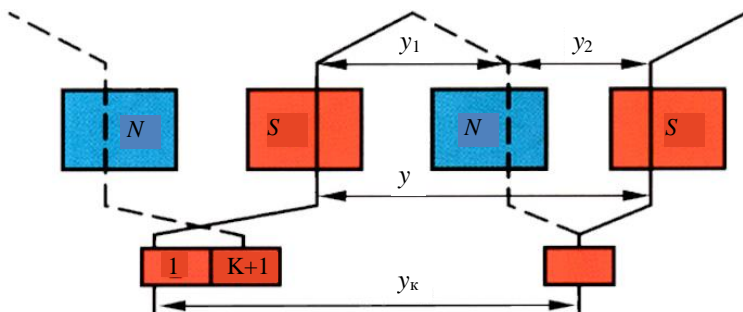


Рисунок 5.18 – Волновая обмотка

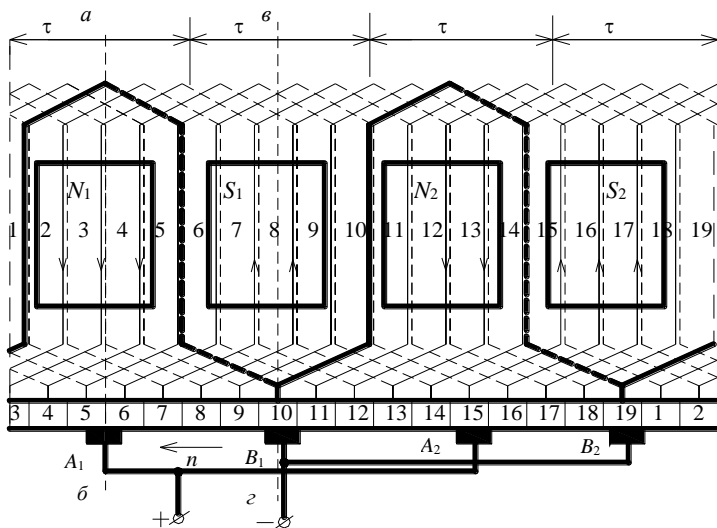


Рисунок 5.19 – Схема-развертка простой волновой обмотки при  $Z_{ол} = S = K = 19$ ;  $p = 2$ ;  $y_1 = 4$ ;  $y_k = 9$

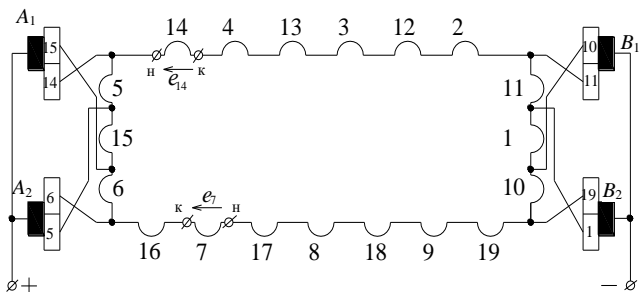


Рисунок 5.20 – Схема параллельных ветвей простой волновой обмотки, соответствующая рисунку 5.19

Посредине между пазами  $(1 + y_1)$  и  $(1 + y_k)$  (см. рисунок 5.19) проводят линию  $вz$ , которая делит коллекторную пластину с номером  $N_n$  пополам. Найдя положение коллекторной пластины  $N_n$ , размечают остальные пластины в порядке дальнейшей последовательности цифр.

**Пример 5.2.** Рассчитать и вычертить простую двухслойную волновую обмотку, составить обмоточную таблицу, если известно, что  $2p = 4$ ;  $Z_{эл} = K = S = 9$ .

*Решение.*  $y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{9 - 1}{2} = 4$ ;  $y_1 = \frac{Z_{эл} \pm b}{2p} = \frac{9 - 1}{4} = 2$ ;  $y_2 = y - y_1 = 4 - 2 = 2$ .

Обмотку выполняем аналогично петлевой, но с шагом по коллектору  $y_k = 4$  (например, если начало первой секции присоединить к коллекторной пластине 1, то конец этой секции присоединяем к коллекторной пластине 5; начала секций располагаем также на расстоянии  $y = 4$ ). Развернутая схема обмотки приведена на рисунке 5.25. Для облегчения выполнения обмотки составляем обмоточную таблицу (таблица 5.3).

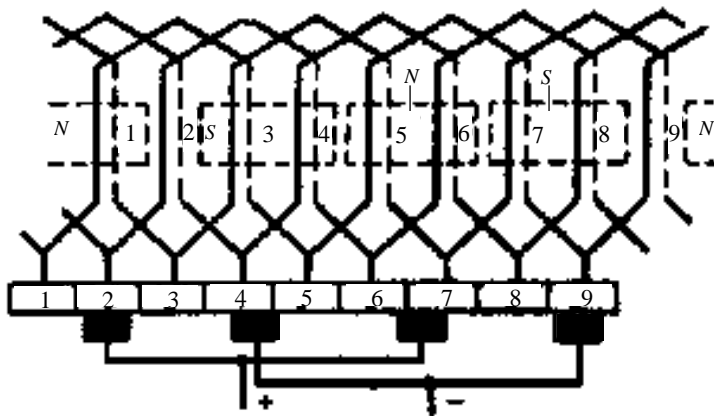


Рисунок 5.21 – Развертка простой волновой двухслойной обмотки

Таблица 5.3 – Обмоточная таблица

Номер коллекторной пластины, к которой припаяно начало секции	Номера пазов, в которых лежит секция	Номер коллекторной пластины, к которой припаян конец секции
↓ $y_k$	1-3' $y_1$	5
	5-7'	9
	9-2'	4
	4-6'	8
	8-1'	3
	3-5'	7
	7-9'	2
	2-4'	6
	6-8'	1

При данном положении якоря в схеме обмотки секции 2–4', 7–9' и 9–2' замкнуты коротко проводниками, соединяющими щетки одноименной полярности.

Число щеток к обмотке должно быть не меньше одной на каждую параллельную ветвь. Поэтому в данном случае можно было бы ограничиться и двумя щетками, но принято ставить столько щеток в машине, сколько в ней полюсов, что сопровождается снижением тока, приходящегося на одну щетку, уменьшением размеров коллектора и позволяет достигнуть большей симметрии обмоток.

Волновую последовательную обмотку применяют в электрических машинах больших напряжений, а петлевую параллельную – в машинах больших токов.

#### *Сложные обмотки и уравнительные соединения*

В машинах большой мощности, где по обмоткам протекают значительные токи, секция имеет большое поперечное сечение. Поэтому сечение паза якоря также получается большим. Это приводит к увеличению размеров машины.

Чтобы уменьшить ток, протекающий по одной секции, применяют сложные обмотки. Они представляют собой некоторое количество  $m$  простых обмоток, уложенных на якоре и соединенных параллельно. Число параллельных ветвей в сложных обмотках увеличено в  $m$  раз. Чтобы простые обмотки соединить параллельно, минимальная ширина щетки должна равняться  $m$  коллекторным пластинам.

При проектировании обмоток стремятся получить их симметричными. Обмотка симметрична, если ее параллельные ветви имеют одинаковое электрическое сопротивление и в них индуцируются одинаковые ЭДС при любом положении якоря относительно полюсов.

Каждая параллельная ветвь должна иметь одинаковое количество секций и занимать одинаковое положение относительно системы главных полюсов, а секции параллельных ветвей должны занимать на якоре одинаковое количество пазов. Если эти условия не выполняются, ЭДС параллельных ветвей будет неодинакова. Более того, даже если вышеуказанные условия соблюдаются, ЭДС параллельных ветвей петлевой обмотки могут оказаться неодинаковыми из-за магнитной несимметрии, причина которой – дефекты при изготовлении машины: наличие раковин в отливке станины, некачественная сборка полюсов, неправильная центровка якоря и т.п., из-за чего воздушный зазор под полюсами неодинаков.

Неравенство ЭДС параллельных ветвей приведет к появлению *уравнительных токов*, протекающих по обмоткам и щеткам. Наиболее слабым элементом электрической машины является скользящий контакт. Уравнительные токи вызывают ухудшение его работы: одни щетки будут перегружены, вторые – недогружены. Поэтому уравнительные токи направляют не через щетки, а через уравнительные соединения (уравнители).

Для выравнивания нагрузок щеток петлевой обмотки при магнитной несимметрии используют уравнительные соединения (уравнители) первого рода: электрическое соединение точек обмоток якоря с равными потенциалами. Полное число уравнителей первого рода  $N_{ур}$ , которое можно установить в машине, равно

$$N_{ур} = S / p$$

где  $S$  – количество секций обмотки.

В волновых обмотках секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами, вследствие чего ЭДС параллельных ветвей даже при магнитной несимметрии одинаковы. Это означает, что уравнителей первого рода в волновых обмотках нет.

В сложных обмотках простые обмотки соединены между собой параллельно щетками, и если ЭДС простых обмоток неодинаковы, также появляются уравнительные токи. Для равномерного распределения тока по простым обмоткам, в сложных обмотках применяют уравнительные соединения (уравнители) второго рода, которые электрически соединяют между собой простые обмотки в точках одинакового потенциала.

Таким образом, в простых петлевых обмотках используются уравнители первого рода, которые устраняют последствия магнитной несимметрии. В сложных обмотках, как в волновых, так и в петлевых, используют уравнители второго рода.

При выборе типа обмотки для машин небольшой мощности отдают предпочтение волновой обмотке, так как она не требует уравнителей. В мощных машинах при токе, превышающем 250–300 А, используют петлевые обмотки.

Для уменьшения числа уравнителей в мощных машинах применяются комбинированные обмотки, представляющие собой сочетание петлевой и волновой обмоток [19].

### **5.2.3 Магнитный поток, магнитная цепь машины постоянного тока**

Магнитная система четырехполюсной машины в режиме холостого хода показана на рисунке 5.22. Магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения 4, проходит через полюсы 1, станину 2, зубцовую зону ротора 3, и воздушный зазор 5. Магнитный поток должен быть всегда замкнут.

#### *Основы расчета магнитной цепи*

При проектировании стремятся сконструировать машину с максимальной мощностью. Мощность зависит от значения магнитного потока, который, в свою очередь, создается магнитодвижущей силой (МДС). МДС необходима для того, чтобы заставить магнитный поток идти по магнитопроводу, подобно тому как ЭДС заставляет течь электрический ток по проводнику. Размеренность МДС – амперы. Чтобы создать МДС в 100 ампер, можно намотать на магнитопровод 100 витков и пропустить ток равный 1 А или взять один виток с током 100 А.



При расчете магнитных цепей сначала задаются значением магнитного потока  $\Phi$ , а потом определяют ток обмотки возбуждения  $I_v$  и число витков.

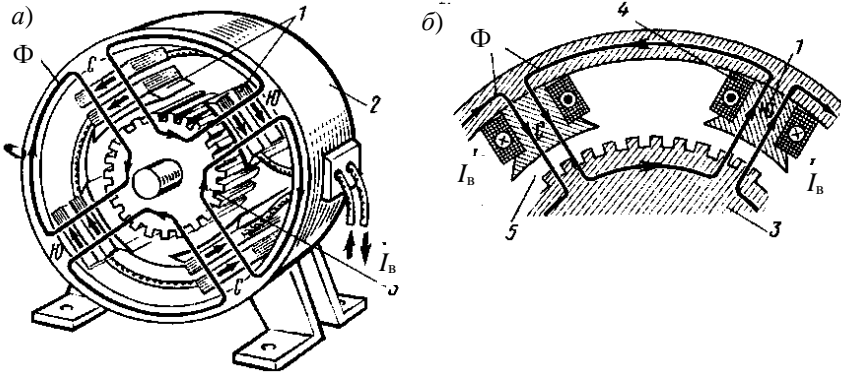


Рисунок 5.22 – Кривая намагничивания машины постоянного тока

Алгоритм решения задачи:

$$\Phi \rightarrow B \rightarrow H \rightarrow F \rightarrow I_B w,$$

- где  $B$  – магнитная индукция, Тл;
- $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;
- $F$  – магнитодвижущая сила, А;
- $w$  – количество витков обмотки возбуждения, шт.

МДС, необходимая для создания требуемого магнитного потока, будет равна сумме МДС участков.

Магнитный поток зависит от тока возбуждения. Зависимость магнитного потока от тока возбуждения называется кривой намагничивания машины (рисунок 5.23). Ее можно разделить на два участка.

На первом участке зависимость прямолинейна. Это означает, что вся МДС машины тратится только на преодоление воздушного зазора,

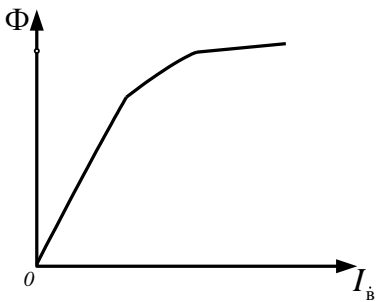


Рисунок 5.23 – Кривая намагничивания

магнитное сопротивление которого постоянно. С ростом тока возбуждения и, следовательно, магнитного потока сталь насыщается и начинает оказывать сопротивление магнитному потоку. Поэтому характеристика теряет свою линейность.

Обычно ток возбуждения принимают такой, чтобы рабочая точка находилась в месте перегиба характеристики. Это означает, что магнитная система практически всех

электрических машин насыщена.

На рисунке 5.24 показано примерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре под главным полюсом и кривая распределения магнитной индукции в зазоре машины постоянного тока при холостом ходе. Магнитный поток  $\Phi$  в зазоре можно определить как

$$\Phi = B_{\text{cp}} l \tau,$$

где  $B_{\text{cp}}$  – средняя индукция в пределах полюсного деления;

$l$  – длина полюса по оси;

$\tau$  – полюсное деление.

За время оборота якоря потокосцепление  $\Psi$  одного витка при  $p$  пар полюсов изменяется на величину  $\Delta\Psi = 2 \Phi 2 p$ ; время одного оборота якоря  $\Delta t = 60/n$ . Следовательно, в каждом витке секции индуцируется ЭДС  $e_{\text{в}} = -\Delta\Psi/\Delta t = -4\Phi p n/60$ .

Если число проводов на поверхности якоря равно  $N$ , число витков секций  $N/2$  и число параллельных ветвей обмотки  $2a$ , ЭДС машины постоянного тока  $E$  определяется как

$$E = \frac{4\Phi p n}{60} \frac{N}{2} \frac{1}{2a} = \frac{p}{60} \frac{N}{a} n\Phi = c_E n\Phi, \quad (5.4)$$

где  $c_E = pN/(60a)$ .

Таким образом, можно определить ЭДС как результат пересечения линий магнитного поля  $N$  проводами якоря, вращающегося с частотой  $n$ .

Определим электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$ , действующий на провода, а следовательно, и на якорь. Электромагнитная сила равна произведению числа проводов  $N$  на среднюю магнитную индукцию  $B_{\text{cp}}$ , активную длину проводов  $l$  и ток в ветви обмотки  $i_a = I_a/(2a)$ . Диаметр якоря выразим через полюсное деление  $D = 2p\tau/\pi$ . Тогда электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = B_{\text{cp}} l \frac{I_a}{2a} \frac{p\tau}{\pi} = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} I_a \Phi, \quad (5.5)$$

где  $\Phi = B_{\text{cp}} l \tau$

Обозначив неизменную для данной машины величину  $c_M = pN/(2\pi a)$ , получим сокращенные выражения для  $E$  и  $M_{\text{эм}}$ , которыми часто пользуются на практике:

$$\left. \begin{aligned} E &= c_E n\Phi, \\ M_{\text{эм}} &= c_M I_a \Phi. \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

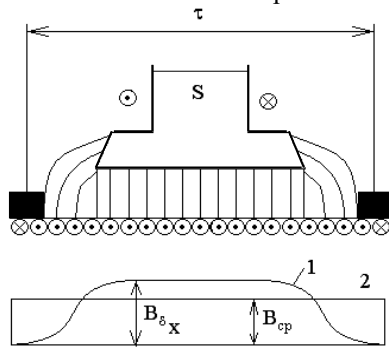


Рисунок 5.24 – Распределение магнитного поля в зазоре под полюсом

**Пример 5.3.** Определить ЭДС машины постоянного тока, если число проводов обмотки якоря  $N = 360$ , число пар полюсов  $p = 2$ , число пар параллельных ветвей обмотки якоря  $a = 2$ , частота вращения якоря  $n = 2000$  об/мин, магнитный поток полюсов  $\Phi = 0,01$  Вб.

*Решение.* Значение ЭДС определяем по формуле (5.4):

$$E = \frac{p}{60} \frac{N}{a} n \Phi = \frac{2}{60} \frac{360}{2} \cdot 2000 \cdot 0,01 = 120 \text{ В.}$$

### 5.3 Реакция якоря. Коммутация

*Реакция якоря машин постоянного тока.*

Для холостого хода распределение магнитного поля в зазоре, создаваемое основными полюсами, представлено на рисунке 5.25, *а*. Вокруг проводников якоря с током создается магнитный поток  $\Phi_a$ , направление которого определяется по правилу правоходового буравчика (рисунок 5.25, *б*). Поля якоря и индуктора, действующие совместно, образуют результирующее поле. Воздействие поля якоря на поле индуктора называется *реакцией якоря* (рисунок 5.25, *в*).

По величине результирующий магнитный поток  $\Phi_{рез}$  становится меньше магнитного потока индуктора  $\Phi$  из-за того, что вследствие насыщения магнитной цепи увеличение потока под краем полюса будет происходить меньше, а ослабление – больше.

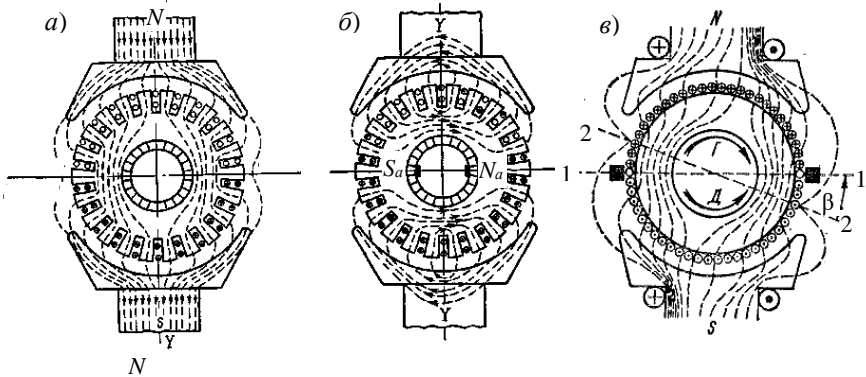


Рисунок 5.25 – Магнитное поле:

*а* – полюсов, *б* – якоря, *в* – результирующее при нагрузке

Линия, проходящая через точки, на которых индукция результирующего магнитного поля равна нулю, называется *физической нейтралью* (линия 2–2 на рисунке 5.25, *в*). Таким образом, реакция якоря при нагрузке искажает магнитный поток, уменьшает его значение и сдвигает физическую нейтраль с геометрической нейтральной (при холостом ходе геометрическая и физическая нейтральные совпадают). В генераторе физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря; в двигателе – против

направления вращения ротора. Поэтому результирующее магнитное поле в генераторном режиме работы ослабевает под набегающей частью полюса, а в двигательном – под сбегающей.

Реакция якоря вызывает искажение результирующего магнитного поля машины, что приводит к следующим изменениям:

1 Повышается напряжение между соседними коллекторными пластинами, когда стороны секции, соединенные с указанными пластинами, проходят под краем полюса с большей индукцией. При перегрузках машины это напряжение может вызвать искрообразование между пластинами и стать причиной кругового огня на коллекторе.

2 У машины с насыщенным магнитопроводом магнитный поток уменьшается, так как увеличение магнитной индукции у одного из краев полюса будет меньше, чем снижение его у другого. В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генераторов понижается ЭДС, у двигателей – вращающий момент.

Для устранения нежелательного влияния реакции якоря при проектировании машины принимают следующие меры:

- устанавливают добавочные полюса.
- увеличивают воздушный зазор под главными полюсами;
- используют специальные материалы для изготовления машины;
- используют компенсационную обмотку.

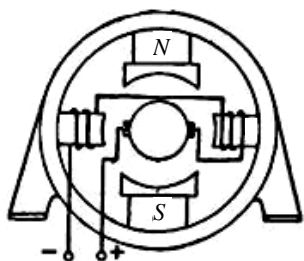


Рисунок 5.26 –  
Схема включения  
дополнительных полюсов

*Дополнительные полюсы.* Основным способом улучшения коммутации в современных МПТ является создание корректирующего магнитного поля с помощью дополнительных полюсов (рисунок 5.26) для  $P_n > 0,3$  кВт.

Намагничивающая сила дополнительных полюсов направлена против намагничивающей силы якоря, вследствие чего компенсируется магнитное поле якоря в зоне коммутации, а так как обе они пропорциональны току нагрузки, то получается автоматическая компенсация магнитного поля якоря при любой нагрузке.

Число витков обмотки дополнительных полюсов рассчитывают так, чтобы магнитный поток, создаваемый ими, был на 15–30 % больше магнитного потока якоря. Магнитный поток дополнительных полюсов создает в короткозамкнутой секции коммутирующую ЭДС, равную по величине и противоположную по направлению реактивной ЭДС.

Можно сформулировать правило: за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря в режиме генератора должен следовать дополнительный полюс противоположной полярности, а в режиме двигателя – той же полярности.

В машинах большой мощности, работающих с большими перегрузками, кроме дополнительных полюсов применяют *компенсационную обмотку* (рисунок 5.27), соединяемую последовательно с обмоткой якоря и укладываемую в пазы полюсных наконечников. Поле компенсационной обмотки нейтрализует поперечную реакцию якоря под главными полюсами.

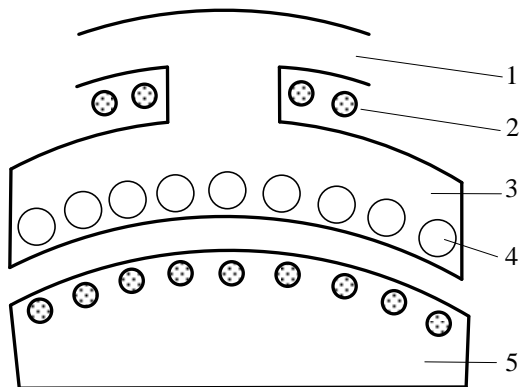


Рисунок 5.27 – Компенсационная обмотка:  
 1 – станина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюс;  
 4 – паза для компенсационной обмотки; 5 – якорь

Количество витков компенсационной обмотки подбирают такое, чтобы созданный ими поток был равен потоку реакции якоря. При встречном включении потоки реакции якоря и компенсационной обмотки будут компенсировать друг друга, и распределение магнитной индукции в зазоре главных полюсов остается практически неизменным. Компенсационная обмотка в машинах серии 2П применяется для машин постоянного тока средней и большой мощности, в серии 4П используется, начиная с машин постоянного тока малой мощности.

Увеличение зазора под главными полюсами только ослабляет поток реакции якоря, потому что воздух имеет большое сопротивление для магнитного потока. Но это также ослабляет и основной магнитный поток, поэтому в таких машинах требуется большая МДС обмоток главных полюсов, что ведет к увеличению размеров полюсных катушек, полюсов и размеров машины в целом. Применяется только для машин малой мощности.

Поперечная реакция якоря уменьшается также при изготовлении сердечников главных полюсов из листовой холоднокатаной стали. Магнитное сопротивление такой стали в продольном (направлении проката) и поперечном направлениях неодинаково. Поэтому главные полюса

выполняют так, чтобы основной магнитный поток проходил в продольном направлении, а поток реакции якоря – в поперечном.

### *Коммутация в машинах постоянного тока*

За время перехода щеток с одной коллекторной пластины на другую секция, заключенная между ними, замыкается накоротко щеткой, и направление тока в ней меняется на противоположное. Этот процесс называется *коммутацией*. При коммутации между щетками и коллектором может наблюдаться искрение. Сильное искрение приводит к повреждению поверхности коллектора и щеток – это наиболее слабый элемент в МПТ.

Причины искрения щеток на коллекторе разделяют на механические, потенциальные и электромагнитные.

Механические причины приводят к неполному прилеганию щеток к коллектору. Они связаны с некачественным изготовлением коллектора и щеточного узла: неровная или загрязненная поверхность коллектора, его эллиптичность, биение, слабое давление щеток на коллектор и т. д.

Потенциальные причины искрения связаны с напряжением между коллекторными пластинами. При вращении щетки стираются, а угольная пыль от них заполняет изоляционные промежутки между пластинами коллектора. При искрении угольная пыль сгорает. В машинах малой мощности данный процесс протекает относительно безвредно.

При большом токе происходит оплавление смежных пластин, что отрицательно сказывается и на щетках: они быстро изнашиваются. Искры могут перейти в электрическую дугу (круговой огонь на коллекторе).

Электромагнитные причины связаны с протеканием электромагнитных процессов в коммутируемых секциях. Эти причины являются основными.

Как правило, искрение щеток – это результат совместного действия многих причин. Качество коммутации оценивается степенью искрения под сбегающим краем щетки (таблица 5.4).

**Таблица 5.4 – Характеристики степеней искрения по ГОСТ 183-74**

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 <sup>1/4</sup>	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
1 <sup>1/2</sup>	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках и перегрузке	Следы нагара на щетках, а также следы почернения на коллекторе, легко устраняемые протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках	Следы нагара на щетках, почернение на коллекторе, не устраняемое поверхности
3	Искрение под всем краем щетки с крупными вылетающими искрами. Допускается только для моментов прямого включения или реверса	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемые протиранием поверхности коллектора бензином



При переходе секции из одной параллельной ветви в другую в ней происходит изменение направления тока. Промежуток времени, в течение которого направление тока в секции изменяется на противоположное называется периодом коммутации  $T_k$  (рисунок 5.28).

Изменение тока секции на интервале коммутации вызывает появление в ней ЭДС самоиндукции

$$e_s = -L_s di/dt,$$

где  $L_s$  – индуктивность секции, поддерживающая то направление тока, которое было до коммутации, т. е. до замыкания секции щеткой.

Если в процессе коммутации щетка замыкает несколько коллекторных пластин, то изменение тока происходит в нескольких секциях. Так как секции имеют магнитную связь, то в коммутируемых секциях создается ЭДС взаимной индукции  $e_m$ .

Кроме того, коммутируемая секция может пересекаться магнитными силовыми линиями результирующего магнитного поля МПТ, которые наводят в секции ЭДС вращения. Таким образом, закон изменения тока коммутируемых секций формируется под воздействием ЭДС  $e_s$ ,  $e_m$  и  $e_{вр}$ .

ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называют *реактивной ЭДС*, а вращения – *коммутирующей ЭДС*.

Если суммарное значение ЭДС секции  $e = e_s + e_m + e_{вр}$  равно нулю, то имеет место линейный закон изменения тока в секции (см. рисунок 5.25).

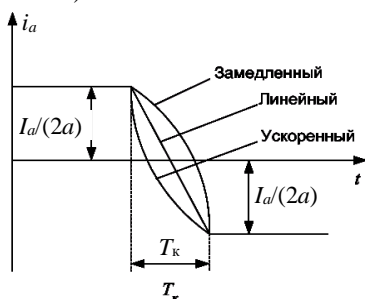
При  $e_s + e_m + e_{вр} > 0$  на начальном этапе ток изменяется медленнее, чем при прямолинейной коммутации, поэтому такая коммутация называется замедленной, а при  $e_s + e_m + e_{вр} < 0$  – ускоренной.

В связи с тем, что скорость изменения тока влияет на значения  $e_s$  и  $e_m$ , то при замедленной коммутации значение ЭДС в конце периода коммутации будет больше, чем в начале. Это может привести к искрению под сбегающим краем щеток. При ускоренной коммутации искрение может наблюдаться под набегающим краем щетки. В связи с вышеизложенным, наиболее приемлемым видом коммутации является прямолинейная.

Основной причиной неудовлетворительной коммутации является наличие дополнительного тока коммутации. Коммутация – сложный процесс, зависящий от множества причин, поэтому используют следующие способы ее улучшения: устанавливают добавочные полюса, сдвигают щетки с геометрической нейтрали.

Установка добавочных полюсов в настоящее время является лучшим способом улучшения коммутации для машин мощностью свыше 1 кВт.

В машинах мощностью до 1 кВт коммутирующее поле в зоне коммутации создается смещением щеток с геометрической нейтрали.



характер изменения тока в коммутируемой секции

Добавочные полюса располагаются между основными по линиям геометрических нейтралей. Число витков обмотки добавочного полюса принимают несколько больше, чем необходимо для полной компенсации реактивной ЭДС, чтобы коммутация была ускоренной. Сердечники добавочных полюсов работают в ненасыщенном режиме за счет увеличенных воздушных зазоров.

*Улучшение коммутации путем сдвига щеток* применяют в машинах малой мощности без дополнительных полюсов. Коммутирующее поле при этом можно создать путем сдвига щеток с геометрической нейтрали, благодаря чему в зоне коммутации начинает действовать поле главных полюсов. Чтобы индуцируемая этим полем в коммутируемой секции ЭДС  $e_{вр}$  имела правильное направление, поле главных полюсов в зоне коммутации должно быть направлено против поля реакции якоря. Для этого в генераторе щетки необходимо повернуть в сторону вращения, а в двигателе – наоборот. Установку щеток иногда производят экспериментально, наблюдая за искрением.

Недостатками указанного способа являются:

- необходимость сдвига щеток при изменении нагрузки;
- невозможность использования для реверсируемых машин, так как при изменении направления вращения меняется направление смещения физической нейтрали.

Для хорошей коммутации нужно также, чтобы коллектор был цилиндрическим и гладким, щетки хорошо притертыми к коллектору и легко передвигались в обоймах щеткодержателей, пружины щеткодержателей нормально натянутыми и машина не была перегружена [19].

## 5.4 Генераторы постоянного тока

Генератор, в котором обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника тока (аккумулятора, батареи или другой машины постоянного тока), называют *генератором с независимым возбуждением*. Генераторы независимого возбуждения делятся на генераторы с электромагнитным возбуждением, в которых обмотка возбуждения (ОВ) питается постоянным током от постороннего источника (аккумуляторная батарея, вспомогательный генератор, возбудитель постоянного тока или выпрямитель переменного тока (выпрямитель переменного тока – преобразователь электрической энергии; механическое, электровакуумное, полупроводниковое или другое устройство, предназначенное для преобразования входного электрического тока переменного направления в ток постоянного направления)), и на магнитоэлектрические генераторы с полюсами в виде постоянных магнитов. Генераторы последнего типа изготавливаются только на малые мощности.

Если напряжение на обмотку возбуждения подается с зажимов якоря того же генератора, то его называют *генератором с самовозбуждением*. В зависимости от того, каким образом присоединена в этих генераторах обмотка возбуждения к обмотке якоря, различают генераторы параллельного возбуждения, или шунтовые (см. рисунок 5.7), последовательного возбуждения, или серийные и смешанного возбуждения или компаундные.

На практике в основном наиболее распространены ГПТ малой и средней мощности, которые большей частью имеют параллельное или смешанное возбуждение, т. к. не требуется отдельный источник питания индуктора. Крупные машины постоянного тока часто работают с независимым возбуждением. Генераторы с последовательным возбуждением менее распространены.

**Генераторы независимого возбуждения.** Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают зависимости между основными величинами, определяющими работу генераторов. Такими основными величинами являются: 1) напряжение на зажимах  $U$ ; 2) ток возбуждения  $I_b$ ; 3) ток якоря  $I_a$  или ток нагрузки  $I$ ; 4) частота вращения  $n$ .

Обычно генераторы работают при  $n = \text{const}$ . Поэтому основные характеристики генераторов определяются при  $n = n_n = \text{const}$ .

Рассмотрим три основных характеристики генераторов:

- 1) холостого хода;
- 2) внешнюю;
- 3) регулировочную.



Рисунок 5.29 –  
Характеристика холостого

Характеристикой *холостого хода* генератора называется зависимость напряжения на зажимах якоря от тока возбуждения  $U = f(I_b)$ , снятая при отсутствии нагрузки ( $n = \text{const}$ ). Снятие характеристики целесообразно начать с максимального напряжения  $U \approx (1,15 \dots 1,25)U_n$  (рисунок 5.29). Из-за насыщения магнитной цепи напряжение вначале уменьшается по нисходящей ветви характеристики медленно, а затем быстрее.

При  $I_b = 0$  генератор развивает напряжение  $U_{ост}$ , которое обычно составляет 2–3 % от  $U_n$  вследствие остаточной намагниченности полюсов и ярма индуктора. Характеристика холостого хода имеет вид неширокой гистерезисной петли из-за явления гистерезиса в магнитной цепи индуктора. При снятии характеристики холостого хода ток  $I_b$  необходимо менять по нисходящей ветви (см. рисунок 5.29), так как в

противном случае точки будут рассеиваться, а не ложиться на данную гистерезисную петлю.

Характеристика холостого хода позволяет судить о степени насыщения магнитной цепи машины при номинальном напряжении, проверять соответствие расчетных данных экспериментальным и составляет основу для исследования эксплуатационных свойств машины.

*Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения*  $U = f(I_a)$  при  $I_b = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  (рисунок 5.30) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки в естественных условиях, когда ток возбуждения не регулируется.

При увеличении тока  $I_a$  напряжение  $U$  несколько уменьшается по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря  $I_a r_a$  [см. уравнение (5.2)] и уменьшения ЭДС  $E$ , ввиду снижения потока под воздействием поперечной реакции якоря. При дальнейшем увеличении  $I_a$  напряжение начинает падать быстрее, так как под воздействием реакции якоря поток уменьшается и рабочая точка смещается на более круто падающий участок кривой намагничивания.

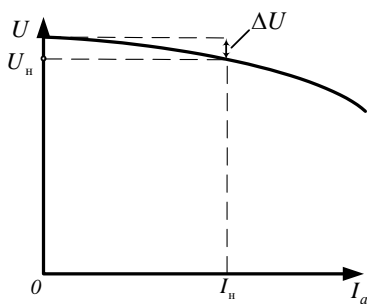


Рисунок 5.30 – Внешняя характеристика генератора

Внешнюю характеристику рекомендуется снимать при токе возбуждения  $I_b = I_{bн}$ , который обеспечивает номинальное значение тока нагрузки при номинальном напряжении  $U = U_n$ . С уменьшением тока нагрузки до нуля напряжение на зажимах генератора возрастает на значение  $\Delta U$ , которое называется номинальным изменением напряжения генератора.

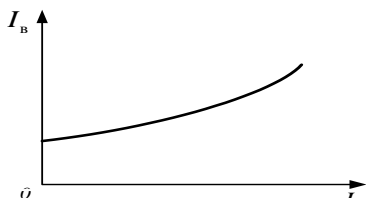


Рисунок 5.31 – Регулировочная характеристика генератора

*Регулировочная характеристика*

$I_b = f(I_a)$  при  $U = \text{const}$  и  $n = \text{const}$  показывает, как нужно регулировать ток

возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не изменялось (рисунок 5.31). С ростом  $I_a$  ток  $I_b$  необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения  $I_a r_a$  и реакцию якоря.

*Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения.*

При пуске генератора с самовозбуждением начальный ток в обмотке возбуждения возникает за счёт ЭДС, наводимой в обмотке якоря остаточным магнитным полем главных полюсов. Для поддержания

самовозбуждения необходимо, чтобы начальный ток усиливал это поле. Добавочный магнитный поток увеличивает ЭДС якоря и, как следствие, ток в обмотках главных полюсов. Однако из-за магнитного насыщения магнитопровода одинаковым приращением увеличивающегося тока возбуждения соответствуют всё меньшие приращения магнитного потока (рисунок 5.32).

Процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока ЭДС якоря превосходит падение напряжения в обмотке возбуждения. При определённой величине магнитного потока наступает электрическое равновесие, а дальнейшее повышение магнитного потока, ЭДС якоря и тока возбуждения прекращается. Самовозбуждение может осуществляться при величине сопротивления обмотки возбуждения, не превышающей известного предельного значения, зависящего от электрических параметров генератора. Поэтому для самовозбуждения необходимо выполнение следующих трех условий:

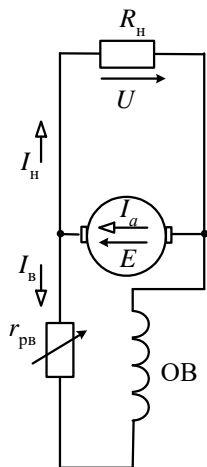


Рисунок 5.32 – Принципиальная электрическая схема ГПТ параллельного возбуждения

1) наличие остаточного магнитного потока полюсов;

2) правильное подключение концов обмотки возбуждения, при котором остаточный магнитный поток совпадает по направлению с потоком обмотки возбуждения;

3) сопротивление цепи возбуждения  $r_{\text{в}}$  при данной скорости вращения  $n$  должно

быть ниже некоторого критического значения, или частота вращения при данном  $r_{\text{в}}$  должна быть выше  $n_{\text{кр}}$ .

Для самовозбуждения ГПТ достаточно, чтобы остаточный поток составлял 2–3 % от номинального. Остаточный поток такого значения практически всегда имеется в уже работавшей машине. Вновь изготовленную машину или размагнитченную можно намагнитить, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника.

Так как ток  $I_{\text{в}}$  мал, то  $U \approx E$ , и характер кривой холостого хода у генератора с параллельным возбуждением будет такой же, как и у генератора с независимым возбуждением. Внешняя характеристика  $U = f(I_a)$  при  $r_{\text{в}} = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  генератора параллельного возбуждения падает круче (рисунок 5.33, а, линия 2), чем у генератора независимого возбуждения, так как, помимо падения напряжения  $I_a r_a$  и реакции якоря, еще влияет уменьшение тока  $I_{\text{в}}$  при уменьшении  $U$ . Регулировочная характеристика ГПТ параллельного возбуждения представлена линией 2 на рисунке 5.33, б.

### Генераторы смешанного возбуждения.

Они имеют две обмотки возбуждения, расположенные на общих главных полюсах: параллельную и последовательную. Если эти обмотки создают намагничивающую силу одинакового направления, то их включение называется согласным; в противном случае соединение обмоток возбуждения называется встречным. Обычно применяется согласное включение обмоток возбуждения, причем чаще всего основная часть намагничивающей силы возбуждения (65–80 %) создается параллельной обмоткой возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения самовозбуждается так же, как и генератор параллельного возбуждения, и их характеристики холостого хода аналогичны.

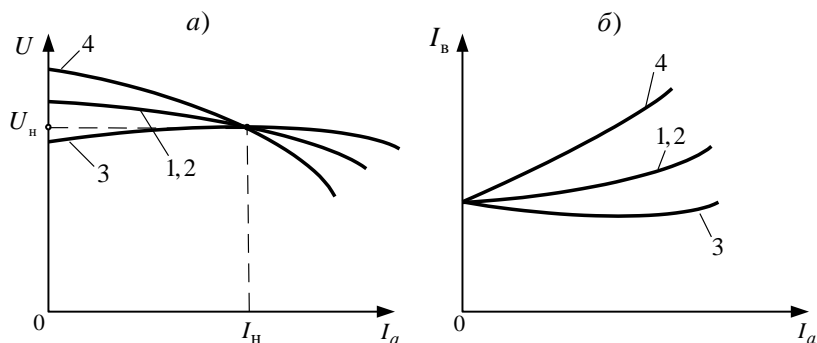


Рисунок 5.33 – Сравнение внешних (а) и регулировочных (б) характеристик генераторов независимого (1), параллельного (2), смешанного возбуждения с согласным (3) и встречным (4) включением последовательной обмотки

На рисунке 5.33 сопоставлены внешние и регулировочные характеристики генераторов различных типов. Генератор смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки возбуждения имеет самую благоприятную внешнюю характеристику. Его напряжение при надлежащем выборе намагничивающей силы последовательной обмотки мало изменяется с изменением нагрузки.

## 5.5 Двигатели постоянного тока

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

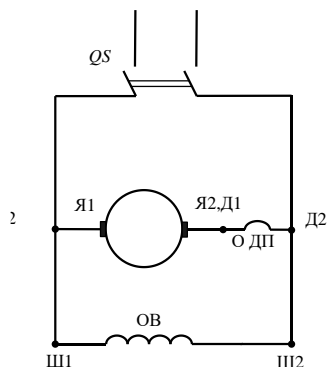


Рисунок 5.34 – Схема ДПТ параллельного возбуждения

Двигатель параллельного возбуждения. Рассмотрим более подробно характеристики двигателя параллельного возбуждения (рисунок 5.34), которые определяют его рабочие свойства.

Решая совместно выражения (5.3) и (5.4) относительно  $n$ , находим уравнение скоростной характеристики  $n = f(I_a)$

$$n = \frac{U - I_a r_a}{c_E \Phi}. \quad (5.7)$$

Выразив  $I_a$  из формулы (5.6) и подставив в выражение (5.7), получим уравнение механической характеристики  $n = f(M)$ , которое определяет зависимость

частоты вращения двигателя от развиваемого электромагнитного момента

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a M}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (5.8)$$

Скоростная и механическая характеристики двигателя определяются равенствами (5.7) и (5.8) при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ . При отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря эти характеристики называются *естественными*.

При увеличении  $I_a$  поток  $\Phi$  несколько уменьшится вследствие действия поперечной реакции якоря. В результате этого частота  $n$ , согласно выражению (5.7), будет стремиться возрасти. С другой стороны, падение напряжения  $I_a r_a$  вызывает уменьшение скорости. Ввиду того, что изменение  $\Phi$  относительно мало, механические характеристики  $n = f(M)$  двигателя параллельного возбуждения, определяемые равенством (5.8), при  $U = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$  совпадают по виду с характеристиками  $n = f(I_a)$  (рисунок 5.35). По этой же причине эти характеристики практически прямолинейны.

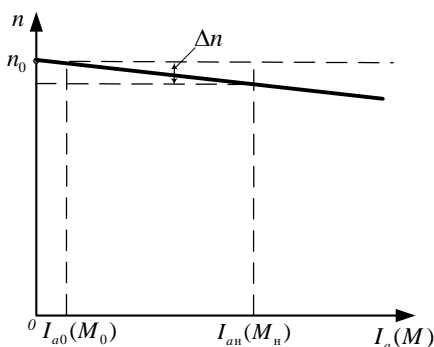


Рисунок 5.35 – Скоростная и механическая естественная характеристика

Изменение частоты вращения  $\Delta n$ , при переходе от холостого хода  $[I_{a0}(M_{a0})]$  к номинальной нагрузке  $[I_{an}(M_{an})]$ , для двигателя параллельного

возбуждения при работе на естественной характеристике мало и составляет 2–8 % от  $n_n$ . Такие слабо падающие характеристики называются *жесткими*. Двигатели постоянного тока параллельного возбуждения с жесткими характеристиками применяются в установках, в которых требуется, чтобы частота вращения при изменении нагрузки сохранялась почти постоянной (металлорежущие станки, прокатные станы).

*Регулировать частоту вращения ДПТ* можно тремя способами: 1) изменением магнитного потока  $\Phi$ ; 2) включением добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря; 3) изменением питающего напряжения  $U$ .

*Регулирование частоты вращения с помощью ослабления магнитного потока* производится обычно с помощью реостата в цепи возбуждения  $R_{рв}$ . При отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ( $R_{ра} = 0$ ) и  $U = \text{const}$  характеристики  $n = f(I_a)$  и  $n = f(M)$ , определяемые равенствами (5.7) и (5.8), для разных  $I_b$  или  $\Phi$  имеют вид, показанный на рисунке 5.36. На графике  $M_{ст}$  – статический момент нагрузки двигателя (момент сопротивления



механизма, приводимого во вращение, с учетом механических потерь в самом двигателе). Характеристики  $n = f(I_a)$  сходятся на оси абсцисс ( $n = 0$ ) в общей точке при весьма большом токе  $I_a = U/r_a$ .

Нижняя характеристика на рисунке 5.36 соответствует номинальному потоку. Значения  $n$  при установившемся режиме работы соответствуют точкам пересечения рассматриваемых характеристик с кривой  $M_{ст} = f(n)$  для постоянной нагрузки (штриховая линия).

Регулирование частоты вращения с помощью сопротивления в цепи якоря. Если последовательно в цепь якоря включить добавочное сопротивление  $R_{pa}$ , то вместо выражений (5.7) и (5.8) получим

$$n = \frac{U - I_a (r_a + R_{pa})}{c_E \Phi} \quad \text{и} \quad n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{(r_a + R_{pa})M}{c_E c_M \Phi^2}.$$

Сопротивление  $R_{pa}$  может быть регулируемым и должно быть рассчитано на длительную работу.

Характеристики  $n = f(I_a)$  и  $n = f(M)$  для различных значений  $R_{pa}$  при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$  изображены на рисунке 5.37. Верхняя характеристика – естественная. При больших значениях  $R_{pa}$  характеристики становятся крутопадающими (мягкими).

Регулирование частоты вращения ДПТ путем изменения подаваемого напряжения питания требует наличия соответствующего источника. В качестве источника с регулируемым значением выходного напряжения можно использовать управляемый выпрямитель. Если невозможно регулировать напряжение источника питания, то в таком случае двигатель подключают через импульсный регулятор, который превращает подаваемое на его вход напряжение источника в последовательность импульсов, близких к прямоугольной форме. Изменяя период следования импульсов и их длительность, можно изменять среднее значение, подаваемое на двигатель напряжения.

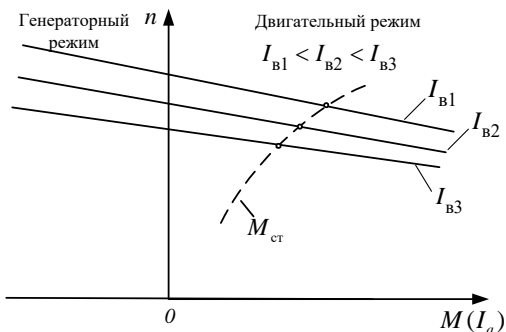


Рисунок 5.36 – Механические и скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при разных токах возбуждения

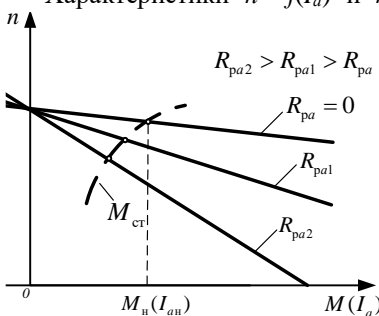


Рисунок 5.37 – Механические и скоростные характеристики регулирования частоты вращения с помощью сопротивления в цепи якоря

Таким образом, импульсный метод позволяет регулировать частоту вращения двигателя при его питании от источника с неизменным напряжением в широких пределах с малыми потерями энергии в регулировочной аппаратуре. Данный метод позволяет также производить пуск двигателя без пускового реостата. Импульсный способ регулирования в экономическом отношении весьма выгоден для управления двигателями, работающими в режимах переменной частоты вращения с частыми пусками.

На рисунке 5.38 изображены рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения. Они представляют собой зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , тока  $I_a$ , частоты вращения  $n$ , момента  $M$  и КПД  $\eta$ , от отдаваемой мощности  $P_2$  на валу двигателя при  $U = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$ .

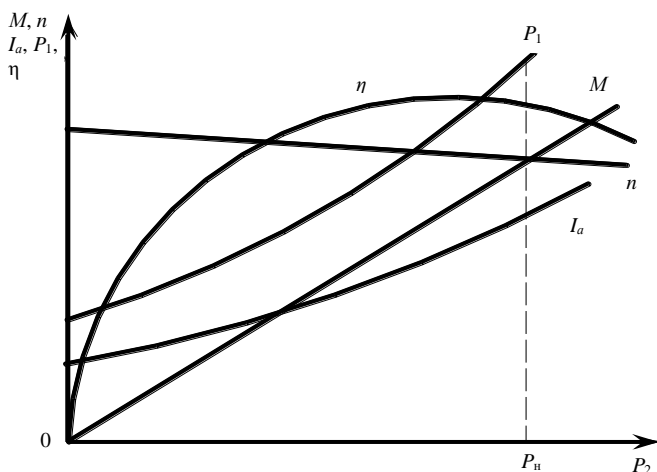


Рисунок 5.38 – Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Характеристика  $n = f(P_2)$ , как следует из рассмотренных выше положений, является линейной, а зависимости  $P_1 = f(P_2)$ ,  $I_a = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  имеют вид, общий для всех электрических машин. Зависимость момента на валу двигателя  $M = f(P_2)$  представляет собой почти прямую линию, так как момент пропорционален нагрузке на валу:  $M = P_2/\omega$ .

**Пример 5.4.** Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощность на валу  $P_n = 70$  кВт, напряжение на зажимах двигателя  $U_n = 220$  В, номинальная частота вращения якоря  $n = 600$  об/мин, коэффициент полезного действия  $\eta_n = 88\%$ , ток возбуждения  $i_{вн} = 0,025 I_n$ , потери мощности в цепи якоря  $\Delta P_{ан} = 2500$  Вт. Механические потери в стали и добавочные потери считаем постоянными.

Необходимо:

1 Определить для номинального режима работы момент на валу двигателя  $M_n$ , ток якоря  $I_{ан}$ , ток обмотки возбуждения  $I_{вн}$  и ток, потребляемый из сети  $I_n$ .  
 2 Найти сопротивление цепи возбуждения  $r_b$  и цепи якоря  $r_a$ , сопротивление пускового реостата  $r_{пуск}$ , чтобы пусковой ток был в 2,5 раза больше номинального.

3 Рассчитать и построить графики зависимостей  $n = f(I_a)$ ,  $n = f(M)$ ,  $\eta = f(I_a)$ .

4 Определить пределы изменения частоты вращения двигателя при регулировании добавочного сопротивления в цепи якоря от 0 до  $4r_a$  и токе  $I_a = I_{ан}$ .

*Решение.* Номинальный момент на валу двигателя

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{70 \cdot 10^3}{600} = 1114 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{ин} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{70 \cdot 10^3}{0,88} = 79545 \text{ Вт}.$$

Ток, потребляемый из сети в номинальном режиме,

$$I_n = \frac{P_{ин}}{U_n} = \frac{79,545 \cdot 10^3}{220} = 361,57 \text{ А}.$$

Ток обмотки возбуждения в номинальном режиме работы

$$I_b = i_b I_n = 0,025 \cdot 361,57 = 9,04 \text{ А}.$$

Номинальный ток якоря

$$I_{ан} = I_n - I_b = 361,57 - 9,04 = 352,53 \text{ А}.$$

Сопротивление цепи возбуждения

$$r_b = \frac{U_n}{I_b} = \frac{220}{9,04} = 24,33 \text{ Ом}.$$

Сопротивление цепи якоря

$$r_a = \frac{\Delta P_{ан}}{I_{ан}^2} = \frac{2500}{352,53^2} = 0,02 \text{ Ом}.$$

Сопротивление пускового реостата, ограничивающего пусковой ток в 2,5 раза больше номинального,

$$r_{пуск} = \frac{U_n}{I_{апуск}} - r_a = \frac{U_n}{2,5 I_{ан}} - r_a = \frac{220}{2,5 \cdot 352,53} - 0,02 = 0,226 \text{ Ом}.$$

ПротивоЭДС, индуцируемая в обмотке якоря при номинальной частоте вращения,

$$E_n = U_n - r_a I_{ан} = 220 - 0,02 \cdot 352,53 = 212,9 \text{ В}.$$

Частота вращения якоря в режиме идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{n_n U_n}{E_n} = \frac{600 \cdot 220}{212,9} = 620 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Определим частоту вращения двигателя при сопротивлении в цепи якоря  $r_d = 4r_a$  и токе  $I_a = I_{ан}$ :

$$n = n_n \frac{U_n - (r_a + 4r_a)I_{ан}}{E_n} = 600 \frac{220 - (0,02 + 4 \cdot 0,02) \cdot 352,53}{212,9} = 520 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Рассчитаем мощности потерь двигателя в номинальном режиме:

– суммарные

$$P_{\Sigma} = P_{1н} - P_n = 79,545 \cdot 10^3 - 70 \cdot 10^3 = 9545 \text{ Вт.}$$

– в цепи возбуждения

$$P_{вн} = r_{вн} I_{вн}^2 = 24,33 \cdot 9,04^2 = 1988,3 \text{ Вт.}$$

– в цепи якоря (из условия задачи)

$$\Delta P_{ан} = 2500 \text{ Вт.}$$

– механические, добавочные и потери в стали

$$P_{ост} = (P_{мех} + P_{ст} + P_{доб}) = P_{\Sigma} - P_{вн} - P_{ан} = 9545 - 1988,3 - 2500 = 5056,7 \text{ Вт.}$$

На рисунке 5.39 представлена механическая естественная характеристика двигателя параллельного возбуждения  $n = f(M)$ , построенная по двум точкам:

– холостой ход ( $M = 0$ ;  $n_0 = 620$  об/мин);

– номинальный режим работы ( $M_n = 1114$  Нм;  $n_n = 600$  об/мин).

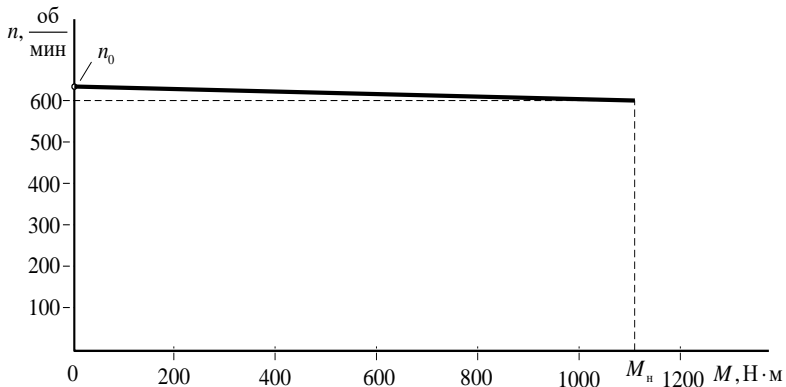


Рисунок 5.39 – Механическая естественная характеристика  $n = f(M)$

На рисунке 5.40 представлена зависимость  $n = f(I_a)$ , построенная по двум точкам:

– холостой ход ( $I_a = 0$ ;  $n_0 = 620$  об/мин);

– номинальный режим работы ( $I_{ан} = 352,53$  А;  $n_n = 600$  об/мин).

Рассчитаем график зависимости  $\eta = f(I_a)$ , задаваясь значениями 0, 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25  $I_{ан}$ . В расчетах (например, для значения 0,25  $I_{ан}$ ) используем следующие формулы:

– мощность потребляемая из сети

$$P'_1 = U_n (0,25 I_{ан} + I_{вн}) = 220 \cdot (0,25 \cdot 352,53 + 9,04) = 21378 \text{ Вт;}$$

– мощность на валу двигателя

$$P'_2 = P'_1 - P_{вн} - (P_{мех} + P_{ст} + P_{доб}) - 0,25^2 P_{ан} = 21378 - 1988,3 - 5056,7 - 0,25^2 \cdot 2500 = 14177 \text{ Вт;}$$

– КПД при 0,25  $I_{ан}$

$$\eta = \frac{P_2'}{P_1'} = \frac{14177}{21378} = 0,663.$$

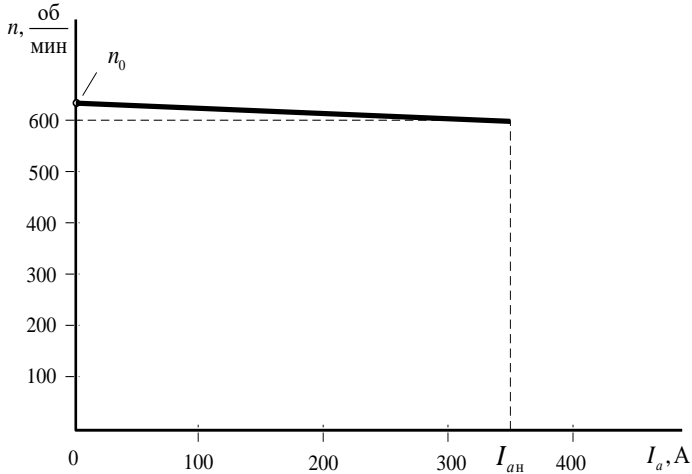


Рисунок 5.40 – Зависимость  $n = f(I_a)$

Результаты расчета зависимости  $\eta = f(I_a)$  представлены в таблице 5.4 и на рисунке 5.41.

Таблица 5.4 – Результаты расчета зависимости  $\eta = f(I_a)$

$I_a, \text{A}$	0	88,1	176,27	264,4	352,53	440,66
$\eta$	0	0,663	0,812	0,86	0,88	0,889

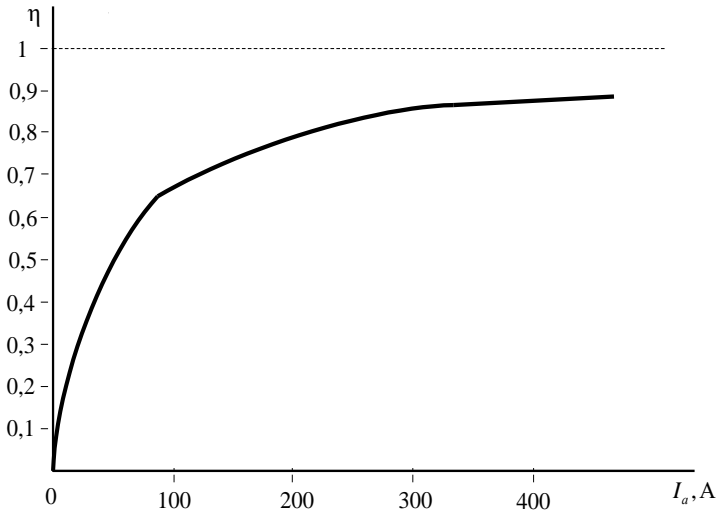


Рисунок 5.41 – Зависимость  $\eta = f(I_a)$

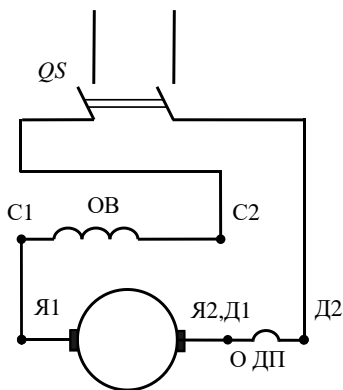


Рисунок 5.42 – Схема ДПТ последовательного возбуждения

Скоростная характеристика двигателя, представленная на рисунке 5.43, является мягкой и имеет гиперболический характер. При  $k_\Phi = \text{const}$  вид кривой  $n = f(I)$  показан штриховой линией.

При небольшой нагрузке на валу, исходя из естественной механической характеристики

Двигатель последовательного возбуждения. В двигателях последовательного возбуждения (рисунок 5.42) ток якоря одновременно является также током возбуждения:  $I_a = I_b = I$ . Ток якоря такого двигателя изменяется в широких пределах, а вместе с ним изменяется магнитный поток  $\Phi$ . Можно написать, что  $\Phi = k_\Phi I$ , тогда формула (5.5) примет вид  $M = c_M k_\Phi I^2$ .

Коэффициент пропорциональности  $k_\Phi$  при  $I < I_n$  является практически постоянным, и лишь при  $I > 0,8I_n$  вследствие насыщения магнитной цепи начинает несколько уменьшаться.

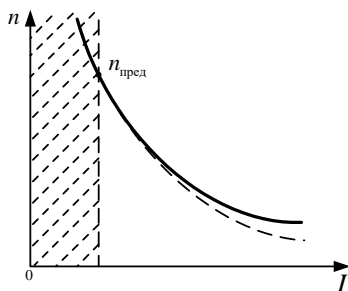


Рисунок 5.43 – Естественная скоростная характеристика двигателя

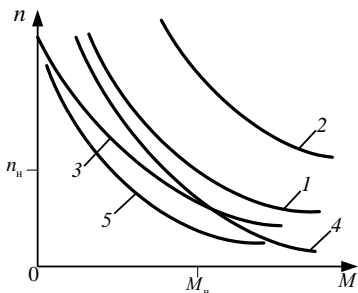


Рисунок 5.44 – Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при разных способах регулирования

двигателя (кривая 1 на рисунке 5.44), частота вращения двигателя резко возрастает ("разнос"), и возникает круговой огонь на коллекторе машины. Поэтому работа двигателей последовательного возбуждения на холостом ходу не допускается, а использование ременной передачи неприемлемо. Обычно минимально допустимая нагрузка  $P_2 \approx 0,2P_n$ , при которой частота может достигнуть значения  $n > n_{\text{пред}}$ , опасная для двигателя.

Поскольку у двигателей

параллельного возбуждения  $M \sim I_a$ , а у двигателей последовательного возбуждения  $M \sim I_a^2$ , то двигатели последовательного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент. Для двигателей параллельного возбуждения  $n \approx \text{const}$ , а для двигателей последовательного возбуждения  $n \propto U/\sqrt{M}$ . Поэтому для двигателей параллельного возбуждения  $P_2 \sim M$ , а при последовательном возбуждении  $P_2 \sim \sqrt{M}$ . В связи с этим двигатели последовательного возбуждения имеют существенные преимущества в случаях тяжелых условий пуска, т. к. создают большой пусковой момент. Они находят применение для электрической тяги (трамвай, метро, электровозы на железных дорогах).

*Регулирование частоты вращения посредством ослабления поля.* Регулирование  $n$  посредством ослабления поля производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением, либо уменьшением числа включенных в работу витков обмотки возбуждения. В последнем случае должны быть предусмотрены соответствующие выводы из обмотки возбуждения (кривая 2 на рисунке 5.44).

*Регулирование частоты вращения путем шунтирования якоря.* При шунтировании якоря ток и поток возбуждения возрастают, а частота уменьшается. Так как падение напряжения  $R_a I$  мало, то сопротивление  $R_{ша}$  практически находится под полным напряжением сети, его значение должно быть значительным, потери в нем будут велики и КПД сильно уменьшится (см. кривую 3 на рисунке 5.44). Кроме того, шунтирование якоря эффективно только тогда, когда магнитная цепь не насыщена.

*Регулирование частоты вращения включением сопротивления в цепь якоря.* Этот способ позволяет регулировать  $n$  вниз от номинального значения (см. кривую 4 на рисунке 5.44). Так как при этом способе значительно снижается КПД, то он находит ограниченное применение.

*Регулирование частоты вращения изменением напряжения.* Этим способом можно регулировать  $n$  вниз от номинального значения с сохранением высокого КПД. Рассматриваемый способ регулирования широко применяется в транспортных установках, где на каждой ведущей оси устанавливается отдельный двигатель, и регулирование осуществляется путем переключения двигателей с параллельного включения в сеть на последовательное (см. кривую 5 на рисунке 5.44).

На рисунке 5.45 приведены рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.

**Пример 5.5.** Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощность на валу  $P_n = 2500$  Вт, напряжение на зажимах двигателя  $U_n = 220$  В, номинальная частота вращения якоря  $n = 1100$  об/мин, потери мощности в цепях обмотки якоря  $\Delta P_{ан} = 310$  Вт и обмотки возбуждения якоря  $\Delta P_{вн} = 300$  Вт, прочие потери мощности  $\Delta P_m = 50$  Вт.



Необходимо:

- 1 Найти мощность, потребляемую из сети  $P_{1н}$ , ток  $I_n$ , момент на валу  $M_n$ .
- 2 Сопrotивление якорной обмотки  $r_a$  и обмотки возбуждения  $r_b$ .

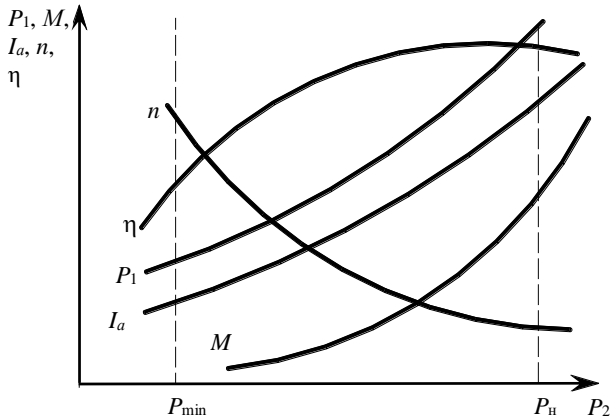


Рисунок 5.45 – Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

3 Построить зависимости частоты вращения якоря и момента от тока якоря, т. е.  $n = f(I_a)$  и  $M = f(I_a)$ . Используя указанные зависимости, рассчитать и построить механическую характеристику двигателя  $n = f(M)$ .

При выполнении п. 3 необходимо учесть насыщение магнитопровода, используя зависимость  $\frac{\Phi}{\Phi_n} = f\left(\frac{I_B}{I_{Bн}}\right)$ , приведенную в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Зависимость магнитного потока от тока возбуждения

$\frac{\Phi}{\Phi_n}$	0,05	0,26	0,48	0,7	0,9	1
$\frac{I_B}{I_{Bн}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

Решение. Номинальный момент на валу двигателя

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{2500}{1100} = 21,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети, при номинальном режиме работы

$$P_{1н} = P_n + \Delta P_{ан} + \Delta P_{вн} + \Delta P_m = 2500 + 300 + 310 + 50 = 3160 \text{ Вт}.$$

Ток, потребляемый из сети в номинальном режиме,

$$I_n = \frac{P_{1н}}{U_n} = \frac{3160}{220} = 14,36 \text{ А}.$$

Сопротивление цепи возбуждения

$$r_b = \frac{\Delta P_{\text{вн}}}{I_n^2} = \frac{300}{14,36^2} = 1,454 \text{ Ом.}$$

Сопротивление цепи якоря

$$r_a = \frac{\Delta P_{\text{ан}}}{I_n^2} = \frac{310}{14,36^2} = 1,5 \text{ Ом.}$$

Для определения частоты вращения якоря при токах  $I_a = (0,2; 0,4; 0,6; 0,8)I_n$  необходимо воспользоваться зависимостью  $\frac{\Phi}{\Phi_n} = f\left(\frac{I_B}{I_{\text{Вн}}}\right)$ , приведенную в таблице 5.3.

Учитывая, что у двигателя последовательного возбуждения  $I_a = I_b$ , то, задаваясь значениями тока и данными из условия для номинальной частоты вращения двигателя, определяем частоты вращения по формуле (5.7)

$$n = n_n \left( \frac{\Phi_n}{\Phi} \right) \frac{U_n - \left( \frac{I_B}{I_{\text{Вн}}} \right) (r_a + r_b) I_n}{U_n - (r_a + r_b) I_n}.$$

Выполним подстановку чисел для расчета частоты вращения при  $I_a = 0,2I_n$ :

$$n = 1100 \cdot \left( \frac{1}{0,26} \right) \cdot \frac{220 - 0,2 \cdot (1,454 + 1,5) \cdot 14,36}{220 - (1,454 + 1,5) \cdot 14,36} = 5039,3 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Для расчета момента на валу используем формулу  $M = c_M \Phi I_a$ , с учетом номинального режима выразим  $c_M \Phi_n = M_n / I_n$ . Тогда при любом режиме работы двигателя (при любом токе  $I_a$ )

$$M = c_M \Phi I_a = M_n \left( \frac{\Phi}{\Phi_n} \right) \left( \frac{I_B}{I_{\text{Вн}}} \right).$$

Выполним подстановку чисел для расчета частоты вращения при  $I_a = 0,2I_n$ :

$$M = 21,7 \cdot 0,26 \cdot 0,2 = 1,128 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Результаты расчета частоты вращения и момента двигателя постоянного тока последовательного возбуждения представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты расчета

$\Phi/\Phi_n$	0,26	0,48	0,7	0,9	1
$I_B/I_{\text{Вн}}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$I_a, \text{А}$	2,87	5,74	8,62	11,49	14,36
$M, \text{Нм}$	1,128	4,17	9,12	15,63	21,7
$n, \text{об/мин}$	5039,3	2620,6	1721,8	1280,7	1100

На основании результатов расчета, представленных в таблице 5.4, построим наиболее важные эксплуатационные зависимости для двигателя постоянного тока

последовательного возбуждения  $n = f(M)$ ,  $n = f(I_a)$  и  $M = f(I_a)$ , представленные соответственно на рисунках 5.46–48.

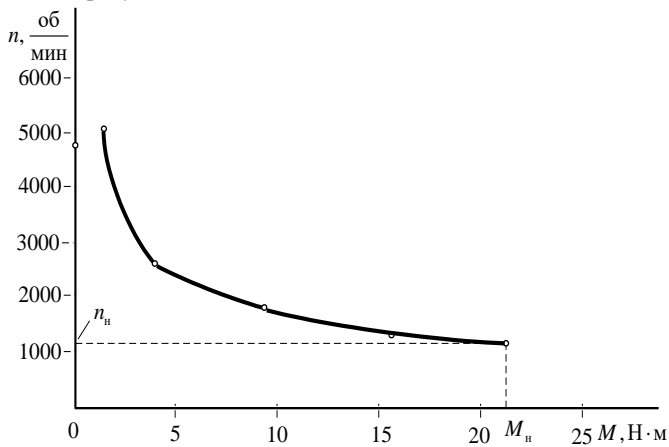


Рисунок 5.46 – Электромеханическая характеристика  $n = f(M)$

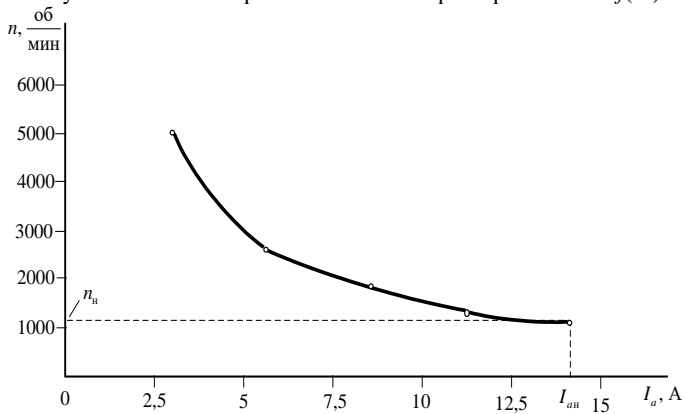


Рисунок 5.47 – Зависимость  $n = f(I_a)$

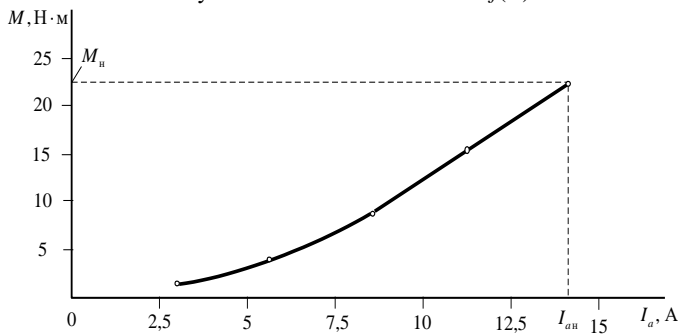


Рисунок 5.48 – Зависимость  $M = f(I_a)$

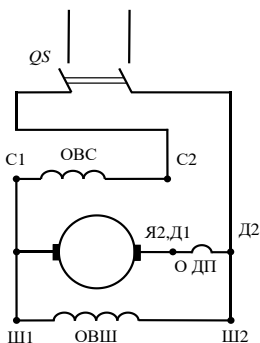


Рисунок 5.49 – Схема ДПТ смешанного возбуждения

*Двигатель смешанного возбуждения.* При согласном включении последовательной обмотки возбуждения (рисунок 5.49) поток  $\Phi$  с увеличением нагрузки возрастает. Поэтому такой двигатель смешанного возбуждения имеет более мягкую механическую характеристику (рисунок 5.50, кривая 3) по сравнению с двигателем параллельного возбуждения (рисунок 5.50, кривая 1), но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения (рисунок 5.50, кривая 2). В зависимости от назначения двигателя доля последовательной обмотки в создании полной намагничивающей силы возбуждения может меняться в широких пределах.

Частота вращения двигателей смешанного возбуждения обычно регулируется так же, как и в двигателях параллельного возбуждения. Двигатели

когда пусковой ускорение

частоты нагрузки.

случаях,

пределах, двигателя двигателя

этим

возбуждения применяются для привода на постоянном токе троллейбусов, компрессоров, строгальных станков, печатных машин, кранах и т. д.

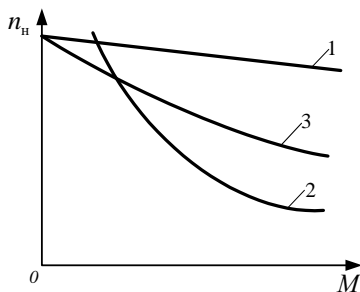


Рисунок 5.50 – Естественные механические характеристики двигателей параллельного (1), последовательного (2) и смешанного возбуждения с согласным включением

смешанного возбуждения применяются в условиях, требуется большой момент, быстрое при пуске и допустимы значительные изменения вращения при изменении Эти двигатели используются также в когда момент нагрузки изменяется в широких так как при этом мощность снижается, как и у с последовательным возбуждением. В связи с двигателями смешанного

### 5.6 Пуск, реверсирование и торможение двигателей

При пуске  $n = 0$ , согласно выражениям  $I_a = (U - E) / r_a$  и  $E = c_E n \Phi$  получим  $I_a = U / r_a$ . В МПТ средней и большой мощности  $r_a$  мало, и поэтому при *прямом пуске* ток якоря недопустимо велик:  $I_a = (10-50)I_n$ . Большой ток:

– вызывает значительные динамические усилия в двигателе, что может привести к его разрушению:

- ухудшает условия коммутации, возможен круговой огонь по коллектору;
- вызывает значительное падение напряжения в линии, что отрицательно влияет на работу других электропотребителей.

Возможны **три способа пуска двигателя в ход**:

- 1) прямой, когда цепь якоря подключается непосредственно к сети на ее полное напряжение;
- 2) пусковым реостатом, включаемым последовательно в цепь якоря;
- 3) понижением напряжения в цепи якоря.

Прямой пуск применяется только для двигателей малой мощности до нескольких сотен ватт, у которых  $r_a$  относительно велико, и поэтому при пуске  $I_a \leq (4...6)I_n$ , а процесс пуска длится не более 1–2 с.

Пуск с помощью пускового реостата. При пуске  $n = 0$ , значит ток якоря  $I_a = U / (R_a + R_n)$ , где  $R_n$  – сопротивление пускового реостата.

Значение  $R_n$  подбирается так, чтобы в начальный момент пуска ток уменьшился до значения  $I_a = (1,4...1,7)I_n$  [в машинах малой мощности –  $(2...2,5)I_n$ ]. Число ступеней пускового реостата (рисунок 5.51) и значения их сопротивлений рассчитываются таким образом, чтобы при надлежащих интервалах времени переключения ступеней максимальные и минимальные значения тока  $I_a$  на всех ступенях получались одинаковыми. По условиям нагрева ступени реостата рассчитываются на *кратковременную* работу под током.

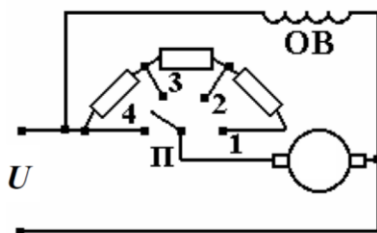


Рисунок 5.51 – Схема реостатного пуска ДПТ

Недостаток реостатного способа – большие потери в пусковом реостате. Поэтому в двигателях большой мощности применяют пуск при пониженном напряжении. Для этого необходим регулятор напряжения. В качестве регулятора напряжения используются: регулируемые автотрансформаторы с выпрямительным блоком, генераторы постоянного тока, тиристорные регуляторы, широтно-импульсные преобразователи, переключение с последовательного соединения двигателей на параллельное.

Ни в коем случае *нельзя допускать разрыва цепи параллельного возбуждения* двигателя, работающего без нагрузки. В этом случае поток возбуждения исчезает не сразу, а поддерживается индуктируемыми в ярме вихревыми токами. Однако этот поток будет быстро уменьшаться, и частота

и, согласно выражению (5.7), будет сильно увеличиваться («разнос» двигателя). При этом ток якоря значительно возрастет и возникнет круговой огонь, вследствие чего возможно повреждение машины, и поэтому в цепях возбуждения не ставят предохранителей и выключателей.

*Реверсирование* (изменение направления вращения двигателя) производится путем изменения направления действия вращающего момента. Для этого требуется изменить полярность обмотки возбуждения или якоря. При переключении и цепи возбуждения, и якоря направление вращения останется прежним.

#### *Торможение двигателей постоянного тока*

Для того чтобы замедлить или остановить рабочую машину, наряду с механическими, применяют электрические способы торможения. Их преимущество в том, что торможение осуществляется электромагнитным полем, без износа тормозных колодок.

При *механическом торможении* обычно производится прижатие тормозных колодок на тормозной диск. Недостатком механических тормозов является то, что тормозной момент и время торможения зависят от случайных факторов: попадания масла или влаги на тормозной диск и пр. Поэтому такое торможение применяется, когда не ограничены время и тормозной путь.

*Электрическое торможение* обеспечивает достаточно точное получение требуемого тормозящего момента, но не может обеспечить фиксацию механизма в заданном месте. Поэтому электрическое торможение при необходимости дополняется механическим, которое входит в действие после окончания электрического.

Различают следующие виды электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

*Рекуперативное* – это такое торможение, при котором машина работает генератором с отдачей энергии в сеть, что соответствует генераторному режиму (рисунок 5.52). При этом ЭДС  $E$  должна быть больше напряжения источника питания  $U$ , и ток будет протекать в направлении ЭДС, являясь током генераторного режима. Запасенная кинетическая энергия будет преобразовываться в электрическую и частично возвращаться в сеть.

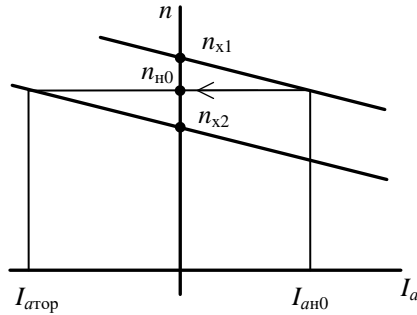


Рисунок 5.52 – Характеристика рекуперативного торможения

Такое торможение наиболее экономично, но не всегда осуществимо в реальных условиях, так как частота вращения должна быть выше, чем в режиме холостого хода. Из рисунка 5.52 видно, что при указанном способе рекуперативного торможения частота вращения уменьшится только до  $n_x$ . Чтобы совсем остановить двигатель, требуется постоянное увеличение магнитного потока либо уменьшение напряжения.

*Динамическое* – это генераторное торможение, при котором кинетическая энергия рабочей машины и самого двигателя гасится на специальном сопротивлении. Динамическое торможение выполняется при включении на зажимы вращающегося возбужденного двигателя резистора  $R_{\text{торм}}$ . Запасенная кинетическая энергия преобразуется в электрическую и рассеивается в  $R_{\text{торм}}$  как тепловая. Это наиболее распространенный способ торможения. Схема и скоростная характеристика приведены на рисунок 5.53, б.

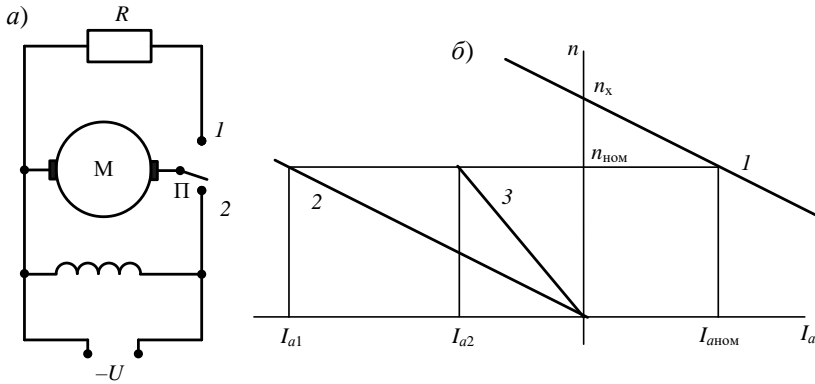


Рисунок 5.53 – Динамическое торможение:

а – схема; б – скоростные характеристики

(1 – естественная; 2 – тормозная при  $R_{\text{торм}} = 0$ ; 3 – тормозная при  $R_{\text{торм}} > 0$ )



При переключателе П в положении 1 машина работает двигателем с частотой вращения якоря  $n_n$  и током якоря  $I_a$  на естественной характеристике 1. Если необходимо затормозить, переключатель П переводят в положение 2. Якорь двигателя продолжает вращаться, обмотка возбуждения от сети не отключена и наводит магнитный поток, следовательно, машина начинает работать генератором. Если сопротивление  $R$  равно нулю (клеммы якоря закорочены), ток якоря в первый момент в несколько раз больше номинального, что соответствует тормозной характеристике 2 (характеристики 1 и 2 параллельны). Если сопротивление  $R$  отлично от нуля, наклон скоростной характеристики увеличивается (тормозная характеристика 3) и ток торможения уменьшается.

Торможение *противовключением* выполняется путем изменения направления электромагнитного момента, развиваемого двигателем. Для этого достаточно изменить направление магнитного потока. При таком изменении ЭДС  $E$  и напряжение  $U$  в якоря складываются, и для ограничения тока  $I$  следует включать резистор с начальным сопротивлением  $R_p \approx (U + E) / I_{\max}$ , где  $I_{\max}$  – наибольший допустимый ток. Торможение связано с большими потерями энергии.

При переводе переключателя П (рисунок 5.54, а) с положения 1 в положение 2, ток якоря изменится на противоположный. Согласно правилу левой руки, момент также изменится на противоположный, то есть будет тормозящим. По мере торможения тормозной момент будет уменьшаться пропорционально току. Однако при  $n = 0$  он не будет равен нулю, и если двигатель не отключить, то он раскрутит якорь двигателя в обратную сторону.

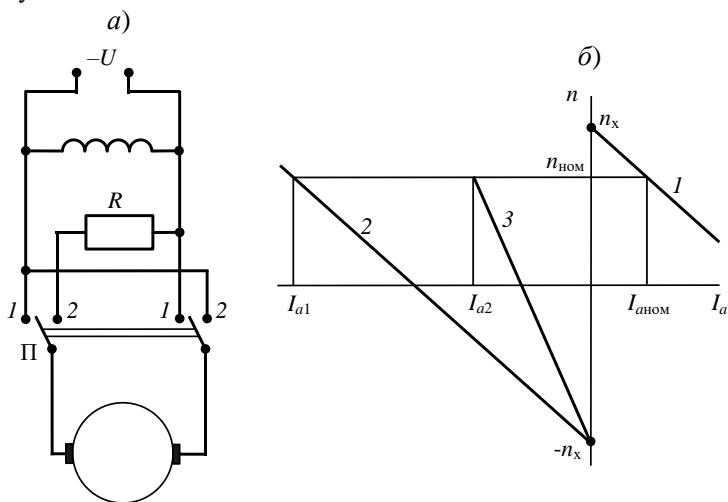


Рисунок 5.54 – Торможение противовключением  
*a* – схема; *б* – скоростные характеристики  
 (1 – естественная; 2 – тормозная при  $R = 0$ ; 3 – тормозная при  $R > 0$ )

### 5.7 Потери мощности и коэффициент полезного действия машин постоянного тока

В электрических машинах преобразование механической энергии в электрическую и наоборот связано с потерями части энергии, которая в конечном счете переходит в тепло, вследствие чего происходит повышение температуры отдельных частей машины. Допустимые пределы превышения температуры машины над температурой окружающей среды определяются теплостойкостью изолирующих материалов и, в первую очередь, обмоток машины. В тех случаях, когда повышение температуры превосходит установленные пределы для данного класса изоляции, срок службы последней резко сокращается.

Различают основные и добавочные *потери мощности*, причем из основных, в свою очередь, выделяют постоянные и переменные. К постоянным потерям относят магнитные, или потери в стали машины, и механические.

*Магнитные потери* складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи. Первые из них вызываются в основном перемагничиванием стали якоря при вращении его в магнитном поле машины, а вторые – возникновением в магнитной системе вихревых токов.

Магнитные потери зависят от частоты  $f$  перемагничивания стали якоря, т. е. от скорости его вращения, и от величины магнитной индукции  $B$ .

Потери на гистерезис

$$P_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} \frac{f}{100} B_m^2 m,$$

где  $\sigma_{\Gamma}$  – коэффициент, зависящий от марки стали ( $\sigma_{\Gamma} \approx 2,4 \dots 4,7$ );

$B_m$  – максимальное значение магнитной индукции в стали якоря;

$m$  – масса стали.

Потери на вихревые токи

$$P_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вх}} \left( \frac{f}{100} \right)^2 B_m^2 m,$$

где  $\sigma_{\text{вх}}$  – коэффициент, зависящий от толщины листов стали и ее качества ( $\sigma_{\text{вх}} = 0,6 \dots 5,6$  при толщине листов стали до 0,5 мм; для листов стали толщиной 1 мм  $\sigma_{\text{вх}}$  возрастает до 22,4).

Суммарные потери в стали

$$P_{\text{ст}} = P_{\Gamma} + P_{\text{вх}}.$$

*Механические потери* состоят из потерь в подшипниках, на трение щеток о коллектор, вентиляционных, которые включают в себя потери на трение частей машины о воздух. Механические потери зависят только от

частоты вращения и не зависят от нагрузки. В машинах постоянного тока мощностью до 100 кВт данные потери составляют соответственно около 2–4 % от номинальной мощности машины.

К *переменным* потерям, которые называют также потерями в меди или электрическими потерями, относят потери на нагрев обмоток якоря и возбуждения и потери в щеточных контактах.

$$P_{эл} = I_a^2 r_a + I_B^2 r_B,$$

где  $I_a$  – ток якоря, А;

$r_a$  – сопротивление всей цепи якоря, Ом;

$I_B$  – ток возбуждения, А;

$r_B$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

К *добавочным* относят потери, вызванные различными вторичными явлениями, зависящими от тока нагрузки. Например, вследствие искажения кривой магнитного поля в воздушном зазоре при нагрузке под влиянием поперечной реакции якоря. В результате этого магнитный поток распределяется по зубцам и сечению спинки якоря неравномерно.

КПД машин постоянного тока

$$\eta = P_2/P_1,$$

где  $P_1$  – подводимая к машине мощность [у генератора – это механическая мощность, сообщаемая ему первичным двигателем (при независимом возбуждении  $P_1$  включает в себя также мощность для питания цепи обмотки возбуждения), у двигателя – мощность, потребляемая им от источника постоянного тока;

$P_2$  – полезная мощность машины (у генератора – это электрическая мощность, отдаваемая приемнику, для двигателя – механическая на валу).

Современные МПТ имеют высокий КПД: для мощностей 10 кВт КПД составляет 83–87 %, мощностью 100 кВт – 88–93 % и для мощности 1000 кВт – 92–96 %. Машина большей мощности свойственен более высокий КПД.

## 5.8 Универсальные коллекторные двигатели

Если любой двигатель постоянного тока включить на переменное напряжение, он будет работать. В двигателе меняется направление тока в якоре и почти одновременно – направление магнитного потока. Поэтому, согласно правилу левой руки, направление вращающего момента остается прежним. На этом принципе и основана работа универсального коллекторного двигателя. Универсальный коллекторный двигатель дороже двигателя постоянного тока и имеет худшие рабочие характеристики.

Если сравнить его с асинхронным двигателем, он также выше его по стоимости и менее надежен. При этом универсальный коллекторный двигатель может работать от одной фазы сети переменного тока (коммунально-бытовые потребители), его частота вращения ротора меньше

снижается под нагрузкой, чем у АД и лучше возможности регулирования частоты вращения [19]. В связи с вышеперечисленным, область применения универсальных коллекторных двигателей – привод бытовых электроприборов, различного электроинструмента и т. п.

Необходимым условием работы двигателя постоянного тока на переменном является одновременное изменение направления тока якоря и магнитного потока. Наилучшим образом это происходит у двигателей последовательного возбуждения, потому что у них обмотка возбуждения обладает меньшим количеством витков и, следовательно, меньшей индуктивностью. Поэтому время запаздывания его магнитного потока по сравнению с током якоря будет меньше, чем у двигателя с параллельным возбуждением. Поэтому универсальные коллекторные двигатели имеют последовательное возбуждение и отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюса делаются из пластин электротехнической стали, чтобы уменьшить потери в магнитопроводе, которые от переменного магнитного потока выше, чем от постоянного. При работе двигателя на переменном токе сопротивление обмотки выше из-за ее индуктивности, и чтобы частота вращения была такая, как при работе на постоянном токе, необходимо увеличить ток якоря, для чего в обмотке делают отпайки и переменное напряжение подают на меньшее количество витков. Мгновенное значение электромагнитного момента равно:

$$M = C_M \Phi i_a,$$

где  $i_a$  – мгновенное значение тока якоря, изменяющегося по синусоидальному закону ( $i_a = I_{a\max} \sin \omega t$ ),

Мгновенное значение магнитного потока:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin(\omega t - \varphi),$$

где  $\varphi$  – угол запаздывания между током якоря и магнитным потоком из-за индуктивности обмотки.

Учитывая формулы для магнитного потока и тока якоря и, выполнив тригонометрические преобразования, получим:

$$M = 0,5 C_M \Phi_{\max} I_{a\max} \cos \varphi - 0,5 C_M I_{a\max} \Phi_{\max} \cos(2\omega t + \varphi).$$

Первая составляющая момента является постоянной, вторая – переменной (рисунок 5.55, линии 1 и 2). То есть результирующий момент – переменный, а иногда тормозной (рисунок 5.55, кривая 3). Однако пульсации момента не нарушают работу двигателя из-за наличия момента инерции.

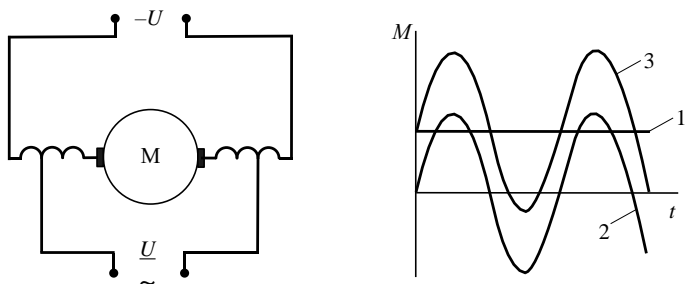


Рисунок 5.55 – Универсальный коллекторный двигатель:  
*a* – схема; *б* – моменты (1 – постоянный; 2 – переменный; 3 – суммарный);

Условия коммутации в универсальном коллекторном двигателе значительно хуже, чем двигателе постоянного тока. Кроме результирующей реактивной ЭДС, в коммутируемой секции наводится еще и ЭДС от переменного магнитного поля, так называемая трансформаторная ЭДС  $E_{тр}$

$$E_{тр} = 4,44 f \omega \Phi_{max}.$$

Все ранее представленные способы улучшения коммутации не полностью ограничивают трансформаторную ЭДС, из-за чего универсальные коллекторные двигатели для средней и большой мощности не применяются.

Ток якоря при работе на переменном токе больше, чем на постоянном из-за наличия реактивной составляющей тока, а также из-за больших потерь в стали. По этим причинам КПД двигателя на переменном токе меньше. При работе на переменном токе частота вращения в большей степени зависит от нагрузки из-за наличия индуктивной составляющей обмоток:

$$n = \frac{U - I_a \sqrt{r_a + x_a}}{c_E \Phi},$$

где  $x_a$  – индуктивное сопротивление цепи якоря.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение дополнительных полюсов в МПТ?
2. Какие условия нужно выполнить, чтобы произошло самовозбуждение генератора постоянного тока параллельного возбуждения?
3. Для чего в цепи обмотки якоря при пуске двигателя необходимо включать дополнительные сопротивления?
4. Почему нельзя включать в сеть двигатель последовательного возбуждения без нагрузки? Каким при этом должно быть соединение двигателя постоянного тока с рабочим механизмом?
5. Чем определяется конечное напряжение, до которого самовозбуждается генератор с параллельным возбуждением?
6. Каким образом можно регулировать ЭДС генератора?
7. Объясните влияние реакции якоря на величину ЭДС машин постоянного тока.

8. Поясните сущность коммутации машины постоянного тока.
9. Как уменьшить вредное влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока?
10. Каковы особенности внешней характеристики генератора с параллельным и смешанным возбуждением?
11. Поясните, как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением.
12. Как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с последовательным возбуждением?
13. Зачем необходим реостат в цепи якоря ДПТ при его запуске?
14. Поясните, почему с увеличением нагрузки частота вращения ДПТ последовательного возбуждения уменьшается, а с уменьшением нагрузки – увеличивается.
15. От чего зависит частота вращения двигателя постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения и как ее регулировать?
16. Что произойдет при обрыве обмотки возбуждения двигателя с параллельным возбуждением, если он работал с номинальным моментом на валу?
17. То же, но в условиях, когда двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением работал в режиме холостого хода.
18. Как изменяется частота вращения двигателя с параллельным возбуждением при увеличении нагрузки?
19. Как скажется снижение напряжения питающей сети на частоте вращения и токе якоря при неизменной нагрузке на валу двигателя параллельного возбуждения?
20. Как скажется снижение напряжения питающей сети на частоте вращения и токе якоря при неизменной нагрузке на валу ДПТ последовательного возбуждения?
21. Как зависит пусковой ток двигателя от нагрузки на валу и момента инерции устройства, приводимого во вращение?

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Техническое обслуживание электрических машин

#### А.1 Техническое обслуживание трансформаторов

Под техническим обслуживанием электрооборудования подразумевается комплекс технологических операций и организационных мероприятий по поддержанию его работоспособности или исправности при использовании, хранении или транспортировке. Такое обслуживание реализуется следующими мерами:

- 1 инспекцией в определенном объеме и периодичностью;
- 2 плановой заменой деталей по мере их износа;
- 3 плановой заменой смазочных и охлаждающих жидкостей;
- 4 плановым ремонтом по состоянию оборудования.

#### *Содержание технического обслуживания.*

В объем технического обслуживания трансформаторов, аппаратов и силовых преобразователей входят следующие работы:

1. Осмотры оборудования по графику, определяемому местными условиями, но не реже 1 раза в месяц. Для энергетического оборудования, отнесенного к категории основного, а также для оборудования, работающего в условиях повышенной влажности агрессивных сред, осмотры проводятся не реже 2 раз в месяц. Ежесуточные осмотры оборудования предусмотрены для подстанций с постоянным дежурством.

В местной инструкции для оперативного персонала указывается конкретный состав оборудования, осматриваемого каждой сменой. При этом должен предусматриваться и осмотр в ночное время не реже 1 раза в месяц для контроля за отсутствием разрядов и свечения контактов.

Внеочередные осмотры трансформаторов производятся: при резком изменении температуры наружного воздуха; при каждом отключении трансформаторов от действия газовой или дифференциальной защиты.

В зависимости от местных условий, инструкций и состояния трансформатора указанные сроки осмотров трансформаторов без отключения могут быть изменены лицом, ответственным за электрохозяйство предприятия или организации.

Отключение оборудования в аварийных ситуациях в соответствии с требованиями ПТЭ и ПТБ [17, 18] и в порядке, предусмотренном местными инструкциями; участие в приемке оборудования и рабочего места после монтажа, ремонта, испытаний и наладки.

В объем осмотров, производимых как в порядке технического обслуживания, так и по графику, как самостоятельные операции входят следующие работы: контроль за показаниями термометров, манометров,

вакуумметров, за уровнем масла в маслонаполненных аппаратах, в маслонаполненных вводах и расширителях; контроль за состоянием кожухов, уплотнений, кранов; проверка отсутствия течи масла, состояния маслоочистительных устройств непрерывной регенерации масла, термосифонных фильтров и влагопоглощающих патронов, а также маслосборных устройств.

2. Визуальная проверка состояния изоляторов на предмет отсутствия пыли, трещин, сколов, разрядов, осмотр крепления и т. п.

3. Проверка наличия, исправности и соответствия требованиям ПТЭ и ПТБ ограждений, предупредительных плакатов и надписей, средств защиты и сроки их испытаний, переносных заземлений, противопожарных средств; проверка плотности пломб у счетчиков и реле, проверка работы счетчиков; контроль состояния ошиновки, кабелей, отсутствия нагрева контактных соединений, проверка отсутствия свечения и подгорания контактов, изменения цвета термоиндикаторных красок и пленок.

4. Тщательная проверка состояния сети заземления, в том числе мест для наложения переносных заземлений, проверка надежности заземления проверяемого оборудования; проверка исправности сигнализации, положения указателей, состояния пробивных предохранителей.

5. Кроме того, при осмотре проверяется:

– для масляных выключателей и разъединителей – состояние контактов, работа приводного механизма, пружинного и масляного буферов, отключающих пружин, указателей уровня масла, подтяжка контактов, производится залив масла или слив излишков, проверяются состояния ножей и изоляторов у разъединителей и устраняются мелкие дефекты;

– для трансформаторов тока и напряжения – отсутствие следов перегрева токоведущих частей и магнитопроводов, отсутствие изоляционной массы, исправность вторичных цепей.

При осмотре распределительных устройств необходимо проверить состояние помещения, исправность дверей и жалюзи на окнах, отсутствие течи в кровле и междуэтажных перекрытиях, наличие и исправность замков, исправность отопления, вентиляции и освещения.

Результаты осмотра вносят в карту осмотра в которой предусматривают соответствующие показатели состояния отдельных частей и деталей оборудования и его дефекты, обнаруженные во время осмотра. Обнаруженные дефекты записывают в журнале дежурного персонала.

При техническом обслуживании и осмотре электрооборудования, предусматриваются следующие операции:

– для трансформаторов и автотрансформаторов – устранение всех обнаруженных дефектов при очередном осмотре, удаление грязи из расширителя и доливка трансформаторного масла, протирка всех изоляторов, подтяжка всех болтовых соединений, разборка и очистка маслоуказателя, проверка работы переключателя напряжения, проверка и



ремонт механизма переключателей у автотрансформаторов; очистка и ремонт охлаждающих устройств, измерение изоляции обмоток до ремонта и после его окончания в соответствии с нормами испытания электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей, утвержденных соответствующей организацией;

– для масляных выключателей, выключателей нагрузки, разъединителей, заземляющих ножей, короткозамыкателей, отделителей и их приводов – разборка аппарата, проверка состояния, ремонт или замена подвижных контактов, осей, шарниров, измерение и регулировка хода подвижной части, вжима (хода) контактов, одновременности замыкания и размыкания контактов, проверка и регулировка механизма свободного расцепления, измерение и регулировка расстояния между бойком и рычагом отключающего устройства, ремонт приводов и приводных механизмов, тяг и рычагов, замена дефектных изоляторов, испытание и замена масла при необходимости, смазка трущихся частей привода и приводного механизма незамерзающей смазкой, проверка и ремонт сигнализации и блокировок, проверка и замена крепежных деталей, испытание вводов встроенных трансформаторов тока, измерение сопротивления постоянному току контактов, шунтирующих сопротивлений дугогасительных устройств, обмоток включающих и отключающих катушек, испытание повышенным напряжением основной изоляции и изоляции вторичных цепей в соответствии с требованиями ПТЭ и ПТБ при эксплуатации электроустановок потребителей;

– для трансформаторов тока и напряжения – очистка изоляторов, проверка и ремонт присоединений шин первичной и проводов (кабелей) вторичной цепей, проверка заземляющих болтов и шунтирующих перемычек, измерение сопротивления изоляции первичных и вторичных обмоток, угла диэлектрических потерь, испытание вводов, испытание электрической прочности изоляции первичных и вторичных обмоток, а также изоляции доступных стяжных болтов в соответствии с ПТЭ;

– для трубчатых и вентильных разрядников – проверка состояния поверхности разрядника и расположения зон выхлопа, измерение внутреннего диаметра, внутреннего и внешнего искровых промежутков трубчатых разрядников, измерение сопротивления элемента вентильного разрядника, тока проводимости и пробивных напряжений;

– для предохранителей – проверка целостности, соответствия схемам, действующим нагрузкам и нормам, замена плавких вставок и, при необходимости, токоограничивающих сопротивлений; проверка и регулировка плотности зажима контактной части.

#### *Оперативное и техническое обслуживание*

К *оперативному обслуживанию* трансформаторов относятся следующие мероприятия:

- управление режимом работы;
- проведение периодических и внеочередных осмотров;
- периодический контроль значений параметров, характеризующих режим работы и анализ полученных данных;
- выполнение организационно-технических мероприятий по обеспечению безопасного технического обслуживания и ремонта.

*Техническое обслуживание трансформаторов* включает:

- профилактический контроль состояния изоляции и контактной системы, а также устройств охлаждения, регулирования и пожаротушения, выполняемый вне комплекса планово-предупредительного ремонта;
- работы по поддержанию надлежащего состояния изоляционного масла в трансформаторе, в баке устройства переключения под нагрузкой и во вводах, в том числе работы по восстановлению качества масла (сушка, регенерация) и по его доливке;
- смазка и уход за доступными вращающимися и трущимися узлами. подшипниками устройств регулирования напряжения и охлаждения;
- периодическое опробование резервного вспомогательного оборудования: настройка, проверки и ремонты вторичных цепей и устройств защиты, автоматики, сигнализации и управления.

*Предупредительные ремонты трансформаторов.* Этот вид обслуживания включает текущий и капитальный ремонты и связанные с ними испытания и измерения. Работы по обслуживанию трансформаторов могут быть как плановыми, так и внеочередными. Плановые работы выполняются с заранее определенным объемом и сроками проведения, а неплановые – вследствие отказов трансформатора или его элементов.

*Обслуживание силовых трансформаторов в энергосистемах.*

Обслуживание силовых трансформаторов в энергосистемах проводится предприятиями электрических станций или электрических сетей.

Функции по обслуживанию силовых трансформаторов распределяются между ремонтным и оперативным персоналом, персоналом, обслуживающим системы релейной защиты, и испытателями.

Ремонтный персонал (в основном электрослесари по ремонту оборудования) под руководством инженерно-технических работников (мастеров, начальников групп подстанций, инженеров служб) проводит капитальные и текущие ремонты трансформаторов, а также ряд эксплуатационных работ (отбор пробы масла, обтирка изоляции, техническое обслуживание устройств охлаждения и др.) и некоторые виды испытаний (проверка изоляции обмоток трансформатора, цепей питания электродвигателей системы охлаждения и пожаротушения, измерение сопротивлений контактной системы и ряд других).

Оперативный персонал участвует и оперативном обслуживании трансформаторов, а выявленные им дефекты учитываются при планировании эксплуатационных и ремонтных работ. Оперативный

персонал сведения об обнаруженных дефектах записывает в специальный журнал. Руководитель подразделения указывает в журнале намеченные мероприятия и сроки по устранению дефекта. Кроме того, оперативный персонал участвует в приемке оборудования из ремонта.

Устройства релейной защиты и автоматики обслуживаются специальным персоналом, связанным с оперативным и ремонтным.

Испытатели проводят профилактические проверки изоляции и контактной системы трансформатора. Проверяются также выключатели, разъединители, разрядники, системы охлаждения и регулирования напряжения и др. Этот персонал разрабатывает также мероприятия по защите трансформаторов от перенапряжений. Некоторые виды испытаний могут проводиться ремонтным персоналом.

Координация действия всех категорий эксплуатационного персонала по обслуживанию трансформаторов осуществляется руководством электроцеха или соответствующих служб, а на электросетевых предприятиях – руководством электросети или производственных служб предприятия электросети.

#### *Контроль температуры трансформатора.*

Для контроля за температурой внешних слоёв масла, всех маслонаполненных трансформаторов в карманы, расположенные на крышке трансформаторного бака, помещаются термометры.

На трансформаторах мощностью до 1000 кВ·А устанавливаются ртутные или ртутно-контактные термометры, а на трансформаторах 1000 кВ·А и выше – главным образом манометрические термометры. Для каждого трансформатора на основе заводских данных определяется максимально допустимая температура верхних слоёв масла. Эта температура для трансформаторов без принудительной циркуляции масла (с естественным охлаждением) не должна быть больше 95°C (в зависимости от типа охлаждения применяемого на трансформаторе, температура изменяется от 70 до 80°C).

Согласно ГОСТ 11677-75 превышение температуры масла над температурой окружающей среды должно быть не более 60°C.

Трансформаторы с дутьевым охлаждением допускают работу с отключенным дутьём, если температура верхних слоёв масла не превышает 55°C и нагрузка не более 100% номинальной мощности трансформаторов.

#### *Контроль за нагрузкой трансформатора.*

Следует различать номинальную мощность и нагрузочную способность трансформатора. Под номинальной мощностью понимают условную мощность, которую трансформатор может отдавать постоянно в течение всего нормального срока службы.

Нагрузочная способность – это мощность, которую трансформатор способен отдавать только в данный рассматриваемый относительно короткий промежуток времени. В этот момент трансформатор работает под

нагрузкой, превышающей номинальную мощность трансформатора. Обязательным условием допустимости систематической работы трансформатора в таком режиме является обеспечение нормального срока службы трансформатора, т.е. если перегрузки не сокращают в значительной степени срок службы изоляции, следовательно, и трансформатора в целом. При аварийных перегрузках возникающие в трансформаторе температуры превышают допускаяемые нормами значения, а значительный износ изоляции приводит к укорочению его срока службы.

Степень неравномерности нагрузки по фазам трансформатора не должна превышать 20 %. Она определяется так:

$$k_n = \left( \frac{I_{\max} - I_{\text{cp}}}{I_{\text{cp}}} \right) 100,$$

где  $I_{\max}$  – ток перегруженной фазы в момент наибольшей нагрузки трансформатора;

$I_{\text{cp}}$  – средний ток трех фаз трансформатора в тот же момент.

Контроль за нагрузкой трансформатора осуществляется амперметрами и ваттметрами, температура проверяется термометрами или термосигнализаторами. Периодичность контроля зависит от того, является данная установка обслуживаемой или необслуживаемой.

*Порядок действий персонала при обнаружении неисправности.*

Непрерывность цепи между зажимом защитного заземления на электроустановке и заземляющей клеммой на щите или шине защитного заземления должна проверяться осмотром персонала в начале каждой рабочей смены. Запрещается подача сетевого питания на электроустановку при нарушении непрерывности цепи защитного заземления.

В помещении, где эксплуатируется электрооборудование, радиаторы и металлические трубы отопления, водопроводы, канализационные и газовые системы должны быть закрыты деревянными решетками или другими диэлектрическими заградительными приспособлениями, а полы должны быть не токопроводящими.

Персоналу запрещается включать электрооборудование в сеть при поврежденной изоляции шнура питания и корпуса штепсельной вилки, а также других дефектах, при которых возможно прикосновение персонала к частям, находящимся под напряжением.

При обнаружении неисправности в процессе эксплуатации электрооборудования, персонал должен немедленно отключить неисправный прибор от сети, доложить об этом непосредственному руководителю.

Работать с неисправным оборудованием запрещается, возобновлять работы можно только после устранения неисправности и наличии соответствующей записи в журнале технического обслуживания лицом, отвечающим за исправность электрооборудования.

Запрещается отключать электрооборудование путем выдергивания штепсельной вилки из розетки за шнур, усилие должно быть приложено к корпусу вилки.

Запрещается перевозить тележки по проводам и кабелям, наступать на кабели или шнуры электрооборудования, переносить работающие электроустройства или оставлять их без надзора включенными в сеть, бросать штепсельные вилки на пол.

При подключении стационарного оборудования запрещается использование переходников и удлинителей (кроме специальных стабилизирующих устройств) для чего в помещениях должно предусматриваться достаточное число штепсельных розеток.

Персоналу запрещается самостоятельно устранять неисправности электрооборудования, ремонт осуществляет работник требуемой квалификации и только после отключения прибора от сети.

*Признаки неисправной работы трансформаторов.*

1 Перегрев трансформатора.

1.1 Трансформатор перегружен. Необходимо проверить нагрузки трансформатора; у трансформаторов с постоянной нагрузкой можно установить перегрузку по амперметрам; у трансформаторов с неравномерным графиком нагрузки устанавливаются путем снятия суточного графика по току. Следует также иметь в виду, что трансформаторы допускают нормальные перегрузки, зависящие от графика нагрузки, температуры окружающей среды и недогрузки в летнее время. Кроме того, по ПТЭ допускаются аварийные перегрузки трансформаторов независимо от предшествующей нагрузки и температуры охлаждающей среды. Допустимые превышения температуры отдельных частей трансформатора и масла над температурой охлаждающей среды, воздуха или воды не должны превышать значений, указанных в инструкции. Если указанные мероприятия не дают должного эффекта, необходимо разгрузить трансформатор, включив в параллельную работу еще один трансформатор или отключив менее ответственных потребителей.

1.2 Высокая температура трансформаторного помещения. Необходимо измерить температуру воздуха в трансформаторном помещении на расстоянии 1,5–2 м от бака трансформатора на середине его высоты. Если эта температура превышает более чем на 8–10 °С температуру наружного воздуха, необходимо улучшить вентиляцию трансформаторного помещения. Для обеспечения нормальной вентиляции трансформаторных помещений, в которых установлены трансформаторы мощностью 1000 кВА и выше, применяют специальные вытяжные трубы, устанавливаемые наверху помещения, а внизу помещения делают соответствующие отверстия для подвода холодного воздуха.

1.3 Низкий уровень масла в трансформаторе. В данном случае обнаженная часть обмотки и активной стали сильно перегревается;

убедившись в отсутствии течи масла из бака, необходимо долить масло до нормального уровня.

1.4 В трансформаторе имеются внутренние повреждения: замыкания между витками, фазами, образование короткозамкнутых контуров из-за повреждения изоляции болтов (шпилек), стягивающих активную сталь трансформатора, замыкания между листами активной стали трансформатора. Все эти недостатки при незначительных короткозамкнутых контурах, несмотря на высокую местную температуру, обычно не всегда дают заметное повышение общей температуры масла, и развитие этих повреждений ведет к быстрому росту температуры масла.

2 Ненормальное гудение трансформатора.

2.1 Ослабла прессовка шихтованного магнитопровода. Необходимо подтянуть прессующие болты.

2.2 Нарушена прессовка стыков в стыковом магнитопроводе с течением времени, под влиянием вибрации магнитопровода, ослабла затяжка вертикальных болтов, стягивающих стержни с ярами. Это изменило зазоры в стыках, что и вызвало усиленное гудение. Необходимо перепрессовать магнитопровод, заменив прокладки в верхних и нижних стыках листов магнитопровода.

2.3 Вибрируют крайние листы магнитопровода. Необходимо расклинить листы электрокартоном.

2.4 Ослабли болты, крепящие крышку трансформатора и прочие детали. Необходимо проверить затяжку всех болтов.

2.5 Трансформатор перегружен или нагрузка фаз отличается значительной несимметричностью. Необходимо устранить перегрузку трансформатора или уменьшить несимметрию нагрузки потребителей.

2.6 Имеются замыкания между фазами, между витками. Необходимо отремонтировать обмотку.

2.7 Трансформатор работает при повышенном напряжении. Необходимо установить переключатель напряжения (при его наличии) в положение, соответствующее повышенному напряжению.

3 Потрескивание внутри трансформатора.

3.1 Произошло перекрытие (но не пробой) между обмоткой или отводами на корпус вследствие перенапряжений. Необходимо осмотреть и отремонтировать обмотку.

3.2 Обрыв заземления. Необходимо восстановить заземление в полном соответствии с выполнением его заводом-изготовителем: присоединить заземление в тех же точках и с той же стороны трансформатора, т.е. со стороны выводов обмотки низшего напряжения. Однако при неправильном восстановлении заземления в трансформаторе могут возникнуть короткозамкнутые контуры, в которых могут появиться циркулирующие токи.

4 Пробой обмоток и обрыв в них.

4.1 Пробой обмоток на корпус, между обмотками высшего и низшего напряжения или между фазами. Причины:

- а) возникли перенапряжения, связанные с грозовыми явлениями, аварийными или коммутационными процессами;
- б) резко ухудшилось качество масла;
- в) понизился уровень масла;
- г) изоляция подверглась естественному износу;
- д) при внешних КЗ, а также при замыканиях внутри трансформатора возникли электродинамические усилия.

4.2 Обрывы в обмотках. В результате обрыва или плохого контакта происходит оплавление или выгорание части проводника. Дефект обнаруживается по выделению горючего газа в газовом реле и работе реле на сигнал или отключение.

#### 5 Работа газовой защиты.

Газовая защита является чувствительной защитой от внутренних повреждений или ненормального режима работы трансформатора. Настоящая защита в зависимости от интенсивности газообразования срабатывает или на сигнал, или на отключение, или одновременно на то и другое.

#### 5.1 Газовая защита сработала на сигнал. Причины:

- а) произошли небольшие внутренние повреждения трансформатора, что привело к слабому газообразованию;
- б) при заливке или очистке масла в трансформатор попал воздух;
- в) медленно понижается уровень масла из-за снижения температуры окружающей среды или вследствие течи масла из бака.

5.2 Газовая защита сработала на сигнал и на отключение или только на отключение. Это вызывается внутренними повреждениями и другими причинами, сопровождаемыми сильным газообразованием:

а) произошло замыкание между витками первичной или вторичной обмоток трансформатора. Данное повреждение может быть вызвано недостаточной изоляцией переходных соединений, продавливанием изоляции витков при опрессовке, или из-за заусенцев на мели витка, механическими повреждениями изоляции, естественным износом, перенапряжениями, электродинамическими усилиями при коротких замыканиях, обнажением обмотки вследствие снижения уровня масла. По замкнутым накоротко виткам проходит ток большой силы, причем ток в фазе может лишь незначительно возрасти; изоляция витков быстро сгорает, могут выгорать сами витки, причем возможно разрушение к соседних витков. При развитии авария может перейти в междуфазное короткое замыкание. Если число замкнутых витков значительно, то в короткий промежуток времени масло сильно нагревается и может закипеть.

б) произошло междуфазное короткое замыкание, вызванное теми же причинами, что и пробой изоляции и протекающее бурно. При этом может

произойти выброс масла из расширителя или через диафрагму предохранительной трубы, которая устанавливается в трансформаторах мощностью 1000 кВА и выше;

в) образовался короткозамкнутый контур из-за повреждения изоляции болтов, стягивающих активную сталь трансформатора. Короткозамкнутый контур сильно нагревается и вызывает перегрев масла. Болт и близлежащие листы активной стали могут быть разрушены. В трансформаторах со стыковыми магнитопроводами короткозамкнутый контур может получиться при соприкосновении накладок, прессующих стержни, с ярмами;

г) произошло замыкание между листами активной стали вследствие повреждения междулистовой изоляции, естественного износа (старения) изоляции. Из-за такого повреждения изоляции появляются значительные вихревые токи, которые приводят к большим местным перегревам активной стали, что с течением времени может привести к местному выгоранию стали (пожару в железе). В стыковых магнитопроводах может произойти сильное нагревание стыков вихревыми токами из-за повреждения прокладок в них;

д) значительно снизился уровень масла и трансформаторе или интенсивно выделяется воздух из масла вследствие резкого похолодания или же после ремонта (заливка свежего масла, его очистка центрифугой и пр.). Необходимо подчеркнуть, что в практике отмечены также случаи ложной работы газовой защиты из-за неисправности цепей вторичной коммутации защиты. Например, работа газовой защиты может быть вызвана различными причинами, и перед тем как приступить к устранению неисправности, необходимо точно установить причину, вызвавшую срабатывание газовой защиты. Для этого необходимо выяснить, какая из защит (релейных) сработала, произвести исследование газов, скопившихся в газовом реле, и определить их горючесть, цвет, количество и химический состав. Для того чтобы определить горючесть газа, следует к верхнему крану газового реле поднести сбоку зажженную спичку, после чего открыть кран.

Горючесть газа свидетельствует о наличии внутреннего повреждения. Если газы бесцветны и не горят, то причиной действия реле является выделившийся из масла воздух.

Цвет выделившегося газа позволяет судить о характере повреждения; бело-серый цвет свидетельствует о повреждении бумаги или картона, желтый – дерева, черный – масла. Но так как окраска газа может через некоторое время исчезнуть, то его цвет следует определить тут же при его появлении. Снижение температуры вспышки масла также свидетельствует о наличии внутреннего повреждения. Если причиной действия газовой защиты является выделение воздуха, то воздух из реле необходимо выпустить.



При снижении уровня масло следует долить, отключить газовую защиту от действия на отключение.

При повреждении обмотки необходимо найти место повреждения и произвести соответствующий ремонт. Для этого необходимо вскрыть трансформатор и извлечь сердечник.

Замкнутые накоротко витки обмотки можно найти при включении трансформатора со стороны низшего напряжения на пониженное напряжение. Короткозамкнутый контур будет сильно разогрет, и из обмотки появится дым. Этим способом могут быть найдены и другие короткозамкнутые контуры.

Поврежденные места в активной стали могут быть найдены при холостом ходе трансформатора (при вынутом сердечнике). Эти места будут сильно нагреты. При этом испытании напряжение подводят к обмотке низшего напряжения и поднимают с нуля; обмотка высшего напряжения должна быть предварительно разъединена в нескольких местах во избежание пробоя обмотки (из-за отсутствия масла).

Замыкание между листами активной стали и ее оплавление следует устранить перешихтовкой поврежденной части магнитопровода с заменой междулистовой изоляции.

6 Ненормальное вторичное напряжение трансформатора.

6.1 Первичные напряжения одинаковы; вторичные напряжения одинаковы при холостом ходе, но сильно разнятся при нагрузке. Причины:

а) плохой контакт в соединении одного зажима или внутри обмотки одной фазы;

б) обрыв первичной обмотки трансформатора стержневого типа, соединенного по схеме треугольник – звезда или треугольник – треугольник.

6.2 Первичные напряжения одинаковы; вторичные напряжения неодинаковы при холостом ходе и при нагрузке. Причины:

а) неправильно соединены начала и конец обмотки одной фазы вторичной обмотки при соединении звездой;

б) обрыв в первичной обмотке трансформатора, соединенного по схеме звезда-звезда. В этом случае три линейные вторичные напряжения не равны нулю;

в) обрыв во вторичной обмотке трансформатора при соединении его по схеме звезда-звезда или треугольник-звезда. В этом случае только одно линейное напряжение не равно нулю, а два других линейных напряжения равны нулю. При схеме соединения треугольник-треугольник обрыв его вторичной цепи можно установить измерением сопротивлений или по нагреву обмоток: обмотка фазы, имеющей обрыв, будет холодной из-за отсутствия в ней тока. В последнем случае возможна временная эксплуатация трансформатора при токовой нагрузке вторичной обмотки не

более 58 % номинальной. Для устранения данных неисправностей необходим ремонт обмоток.

*Назначение устройств релейной защиты, автоматики и сигнализации.*

1 Газовая защита трансформатора.

Газовая защита является одной из основных защит трансформатора. Данная защита предназначена для отключения трансформатора от сети в случае возникновения внутренних повреждений в баке трансформатора.

Данное защитное устройство устанавливается в маслопроводе, который соединяется бак трансформатора с его расширителем. Основным конструктивным элементом газового реле – поплавков и две пары контактов, которые соединяются при опускании поплавка. При нормальном режиме работы газовое реле заполнено трансформаторным маслом, и поплавков находится в верхнем положении, при этом обе пары контактов разомкнуты.

В случае возникновения межвитковых коротких замыканий обмоток трансформатора, либо в случае так называемого горения стали (нарушения изоляции листов стали магнитопровода) в баке появляются газы, образующиеся при разложении электротехнических материалов под воздействием электрической дуги.

Образующийся газ попадает в газовое реле и вытесняет из него масло. При этом поплавок опускается и замыкает контакты. В зависимости от количества скапливаемого газа могут замыкаться контакты, действующие на сигнал либо на полное отключение трансформатора от сети.

Срабатывание газового реле может быть также по причине значительного снижения уровня масла в баке силового трансформатора, что свидетельствует о полном отсутствии масла в расширителе. То есть данное устройство также выступает в роли защиты от чрезмерного снижения уровня масла.

2 Струйная защита бака РПН.

Силовые трансформаторы часто имеют устройство регулировки напряжения под нагрузкой (РПН). РПН расположено в отдельном отсеке бака трансформатора, изолированного от основного бака с обмотками. Поэтому для данного устройства предусмотрено защитное устройство – струйное реле.

Все повреждения внутри бака РПН сопровождаются выбросом трансформаторного масла в расширитель, поэтому в случае наличия потока масла мгновенно срабатывает струйная защита, осуществляя автоматическое отключение силового трансформатора от электрической сети.

3 Реле уровня масла (РУМ).

Газовое реле сигнализирует о полном отсутствии масла в расширителе силового трансформатора, но обнаружение недопустимого снижения уровня масла – эту функцию выполняет реле уровня масла (РУМ).

Реле уровня масла устанавливается, как правило, в расширителе основного бака трансформатора, а также расширителе бака РПН,

Устройство настраивается таким образом, чтобы поплавков – основной конструктивный элемент реле, замыкал контакты реле в случае снижения уровня масла ниже минимально допустимого значения для данного силового трансформатора.

Данное защитное устройство дает сигнал на срабатывание аварийной сигнализации, что позволяет вовремя обнаружить снижение уровня масла.

#### 4. Дифференциальная защита трансформатора (ДЗТ)

Дифференциальная защита трансформатора (ДЗТ) является основной защитой трансформатора и служит для защиты от коротких замыканий обмоток трансформатора и токопроводов, находящихся в зоне действия данной защиты.

Принцип действия данной защиты основан на сравнении токов нагрузки каждой из обмоток трансформатора. В нормальном режиме на выходе реле дифференциальной защиты отсутствует ток небаланса. В случае возникновения двух или трехфазного короткого замыкания возникает ток небаланса – дифференциальный ток и реле действует на полное отключение трансформатора от сети.

Зона действия данной защиты – трансформаторы тока каждой из сторон напряжения силового трансформатора.

#### 5. Автоматика силовых трансформаторов

Если на подстанции работает два трансформатора, то при падении напряжения до недопустимых величин, либо при обесточивании трансформатора защита минимального напряжения воздействует на устройство автоматического включения резерва (АВР). Данное устройство осуществляет включение секционных или шиносоединительных выключателей, обеспечивая питание потребителей от резервного силового трансформатора.

На вводных выключателях среднего и низкого напряжения трансформатора может быть реализовано автоматическое повторное включение выключателя (АПВ), одноразово восстанавливающее питание трансформатора в случае его отключения действием той или иной защиты.

Если силовой трансформатор конструктивно имеет устройство регулировки напряжения под нагрузкой (РН), то для него может быть установлено устройство автоматической регулировки напряжения (АРН).

Данное устройство осуществляет контроль напряжения на обмотках трансформатора и обеспечивает автоматическое переключение устройства РН для обеспечения требуемого уровня напряжения на обмотках.

*Таблица А.1– Пример карты осмотра трансформатора*

№	Наименование выполняемого действия	Результат	
		✓	х
1	Измерительные приборы		
•	Термометр		

•	Термосигнализатор		
•	Мановакуумметр		
2	Состояние изоляции		
•	Состояние ошиновки		
•	Состояние кабельных вводов		
•	Контактные соединения		
3	Состояние фланцевых соединений маслопровода		
•	Отсутствие течи масла		
4	Наличие масла и его уровень		
•	В расширительном бачке		
•	В маслonaполненных вводах		
5	Состояние контура заземления		
7	Состояние маслоприёмных устройств		
8	Наличие посторонних звуков в работе трансформатора <sup>1</sup>		
Дополнительные пункты проверки <sup>2</sup>			
9	Состояние помещения		
10	Исправность вентиляции		
11	Наличие средств пожаротушения		

1 – при отключённых вентиляторах

2 – при закрытой установке трансформатора

## **А.2 Основные неисправности асинхронных двигателей и их причины**

*1. Активная сталь статора равномерно перегрета, хотя нагрузка электродвигателя не превышает номинальной. Причина:*

Напряжение сети выше номинального. Необходимо снизить напряжение сети до номинального или усилить вентиляцию электродвигателя.

*2. Наблюдается повышенный местный нагрев активной стали при холостом ходе электродвигателя и номинальном напряжении сети. Причины:*

1. Между отдельными местами активной стали имеются местные замыкания, вызванные заусенцами, образовавшимися при опиловке, или же из-за задевания ротора о статор во время работы электродвигателя. Необходимо удалить заусенцы, обработать места замыкания напильником, разредить листы стали и покрыть их изоляционным лаком.

2. Нарушена изоляция между стяжными болтами и активной сталью (в электродвигателях старых конструкций). Необходимо исправить изоляцию стяжных болтов или заменить повреждённые болты новыми; в большинстве случаев для этого необходимо произвести частичную или полную перемотку обмотки статора.

3. Зубцы активной стали в отдельных местах выгорели и оплавлены в следствие коротких замыканий в обмотке статора или пробоя обмотки на корпус. Необходимо вырезать или вырубить повреждённые места. Между отдельными листами проложить тонкий электрокартон или пластинки слюды и покрыть их изоляционным лаком. До укладки обмотки необходимо активную сталь статора испытать на отсутствие замыканий между листами. Испытание проводится с помощью намагничивающей обмотки, питаемой однофазным током при индукции в стали, равной 1 Тл. Отсутствие местных перегревов в стали свидетельствует об удовлетворительном ремонте.

*3. Общій равномерный перегрев всей обмотки статора. Причины:*

1. Электродвигатель перегружен или у него нарушена нормальная вентиляция.

2. Напряжение на зажимах электродвигателя ниже номинального, вследствие чего электродвигатель при номинальной мощности перегружен током. Необходимо повысить напряжение до номинального или уменьшить нагрузку до номинального тока. Обмотка статора соединена не звездой, а треугольником. Необходимо соединить обмотку статора звездой.

*4. Обмотка одной фазы замкнута на землю в двух местах. Обмотка статора местами нагревается. Сила тока в отдельных местах неодинакова. АД гудит и развивает пониженный крутящий момент. Причины:*

1. Замыкание витков обмоток.

2. Неправильно соединены катушки одной фазы, одна или несколько катушек «перевёрнуты». Необходимо найти мегаомметром или

индикатором место замыкания обмотки на землю и устранить этот дефект; в случаях надобности перемотать повреждённые катушки.

3. Короткие замыкания между двумя фазами. Необходимо найти место короткого замыкания. Повреждённое место отремонтировать или же перемотать повреждённую часто обмотки.

*5. Электродвигатель не запускается. Причина:*

Отсутствует ток в статоре, что объясняется перегоранием предохранителей или отказом в работе автоматического выключателя вследствие его неисправности. Необходимо поставить новые предохранители или исправить автоматический выключатель.

*6. Электродвигатель не идёт в ход; при разворачивании от руки работает толчками и гудит; в одной фазе статора нет тока. Причина:*

Обрыв одной фазы сети или внутренний обрыв в обмотке статора при соединении фаз звездой. Если обрыв фазы произошёл во время работы электродвигателя, то частота вращения его понижается, а сила тока настолько увеличивается, что может перегореть обмотка у статора или ротора. В этом случае необходимо проверить вольтметром напряжение на зажимах статора. Если имеется обрыв в одной фазе сети или напряжение во всех трёх фазах несимметрично, то устранить неисправность сети, а если сеть исправна, то необходим ремонт электродвигателя.

*7. Электродвигатель не идёт в ход, несмотря на то что напряжение на зажимах статора номинальное; сила тока во всех трёх фазах статора одинаковая. Причины:*

1. Обрыв в двух или трёх фазах пускового реостата или в соединительных проводах между ротором и пусковым реостатом. Следует отыскать при помощи мегаомметра или индикатора напряжения место обрыва.

2. Сильное одностороннее притяжение ротора к статору из-за большой разработки вкладышей подшипников, смещения подшипниковых щитов или подшипниковых стояков.

*8. При номинальной нагрузке электродвигатель вращается с частотой, не достигающей номинальной. Причины:*

1. Напряжение на зажимах электродвигателя понижено. Напряжение на зажимах необходимо повысить до номинального или, если это возможно, уменьшить нагрузку во избежание перегрева электродвигателя.

2. Обмотка статора вместо треугольника соединена звездой. Необходимо обмотку статора соединить треугольником.

*9. Электродвигатель плохо идёт в ход и гудит; сила тока во всех трёх фазах различна и при холостом ходе электродвигателя превышает номинальную. Причины:*

1. Одна фаза обмотки статора «перевёрнута». Как это бывает у электродвигателей, имеющих шесть выводов обмотки, это случается в результате неправильного соединения имя между собой выводов на доске

зажимов или в результате неправильной маркировки выводов. Необходимо соединить провода на доске зажимов согласно схеме соединения, приложенной к электродвигателю, а при отсутствии ее – по буквенным обозначениям выводов обмотки или выполнить заново маркировку.

2. Неправильное соединение переключателя электродвигателей с короткозамкнутым ротором, пуск которых производится переключением обмотки статора со звезды на треугольник. Необходимо проверить и правильно соединить переключатель с двигателем.

*10. Одностороннее притяжение ротора. Во время работы электродвигателя происходит задевание ротора за статор. Причины:*

1. Нарушена правильность зазора между статором и ротором вследствие износа вкладышей подшипников, смещения подшипниковых щитов, неправильной установки подшипниковых стоячков, деформации стали ротора или статора, изгиба вала. Необходимо проверить зазор между шейками и вкладышами и в случае надобности перезалить вкладыши или заменить их новыми; выверить зазор между ротором и статором; при отсутствии установочных штифтов и подшипниковых щитах или подшипниковых стояках поставить их; при деформации стали статора опилить её острые углы напильником, избегая, однако, при этом образования заусенцев; при деформации стали ротора обточить его или отшлифовать наждачным кругом; проверить вал.

2. Ротор плохо отбалансирован. Необходимо ротор отбалансировать.

3. Межвитковое замыкание в обмотке статора или неправильное соединение фаз статора. Это нарушает симметрию магнитного потока, и ротор подвергается одностороннему притяжению. При этом ротор притягивается к станине статора, противоположной повреждению, так как в дефектном месте магнитный поток будет ослаблен размагничивающим действием короткозамкнутой части обмотки.

*11. Ненормальный шум в машине. Электродвигатель сильно гудит. Сила тока во всех фазах различна. Нагрев обмотки статора неравномерен. Причины:*

Короткое замыкание в обмотке статора; обмотки статора соединены неправильно; число витков в отдельных катушках обмотки статора неодинаково. Гудение наблюдается только в случае наличия параллельных ветвей в обмотке и при соединении фаз треугольником. Необходимо отсоединить все три фазы и параллельные ветви друг от друга. Поочередно дать в каждую фазу (при последовательном соединении всех катушек) или в каждую ветвь (при параллельном соединении катушек) переменный ток и измерить вольтметром напряжение на отдельных группах катушек. В группах, имеющих меньше витков, напряжение будет меньше, чем в других. Наибольшая допустимая разность напряжений на отдельных группах катушек не должна превышать 5 %. Испытание допустимо как при вставленном, так и при вынутом роторе. При вставленном и разомкнутом

фазном роторе испытание можно производить при номинальном напряжении. При вынужом роторе или же вставленном короткозамкнутым роторе напряжение, подверженное к статору, не должно превышать 15–20 % номинального напряжения АД.

*12. Электродвигатель работает нормально, но слышится гудение. Сила тока во всех трех фазах одинакова. Причина:*

Катушечные группы распределены несимметрично при наличии параллельных ветвей в обмотках статора. Несимметричное распределение особенно резко сказывается при неравномерности зазора между статором и ротором, вызывая иногда вибрацию машины. Необходимо тщательно выровнять зазор между ротором и статором.

*13. Наиболее характерные признаки неисправной работы электродвигателей (асинхронных, постоянного тока и синхронных) представлены в таблице 2.25.*

**Таблица 2.2 – Характерные признаки неисправной работы электродвигателей**

Вид неисправности	Причина	Способ устранения
При включении в сеть ротор неподвижен	На входных клеммах машины отсутствует напряжение либо оно слишком мало	Проверить питающую линию, устранить повреждение и обеспечить подачу номинального напряжения
При включении в сеть ротор неподвижен, сильное гудение, интенсивное нагревание	Разрушен подшипник; задевание ротора о статор; заклинило вал рабочего механизма	Отсоединить вал двигателя от вала механизма и вновь включить двигатель; если вал двигателя остается неподвижным, то отправить в ремонт
Остановка работающего двигателя	Прекращена подача напряжения. Сработала защита двигателя	Найти и устранить разрыв в питающей цепи. Выяснить причину срабатывания защиты (перегрузка двигателя, изменилось напряжение в сети) и устранить
АД не достигает требуемой частоты вращения, сильно перегревается	Двигатель перегружен. Подшипник вышел из строя	Устранить перегрузку. Заменить подшипник
Двигатель сильно перегревается	Двигатель перегружен. Повышено или понижено напряжение сети. Повышена температура окружающей среды. Нарушена вентиляция двигателя	Устранить перегрузку. Выяснить и устранить причину отклонения напряжения от номинального. Очистить вентиляционные каналы и устранить загрязнение поверхности



		двигателя
Работа АД сопровождается сильным гудением, появился дым	Произошло замыкание витков некоторых катушек обмотки статора; короткое замыкание одной фазы	Двигатель отправить в ремонт

*Продолжение таблицы 2.2*

Вид неисправности	Причина	Способ устранения
Сильная вибрация двигателя	Нарушилась балансировка вентиляторного колеса двигателя либо другого элемента на валу двигателя	Устранить небаланс вентилятора либо другого элемента, установленного на валу двигателя
Подшипник перегревается, в нем слышны шумы	Подшипник и смазка в нем загрязнены. Подшипник изношен. Нарушена центровка валов двигателя и рабочей машины	Удалить из подшипника смазку, промыть его и заложить новую смазку. Заменить подшипник. Произвести центровку валов
Двигатель не отключается от сети при нажатии кнопки «Стоп»	«Залипли» контакты магнитного пускателя	Отключить двигатель автоматическим выключателем и заменить магнитный пускатель
При включении в сеть АД работает неустойчиво	Силовые контакты магнитного пускателя не создают устойчивого соединения	Заменить магнитный пускатель
Разрушение гнезд с резьбой в креплениях подшипниковых щитов	Слишком сильная вибрация. Разрушен подшипник	Устранить причины, вызывающие такую вибрацию. Заменить подшипник

*14 Какие виды защиты предусматриваются для двигателей переменного тока напряжением до и выше 1000 В?*

Правильный выбор и настройка защиты электродвигателей позволяет продлить ресурс их работы, обеспечить безаварийную работу и повысить их надежность в эксплуатации. С другой стороны, применение защиты увеличивает стоимость двигателя, поэтому выбор типа и количества защит определяется не только технической, но и экономической целесообразностью.

Предусматриваются следующие виды защиты электродвигателей напряжением до 1000 В: от минимального напряжения и многофазных коротких замыканий, а в сетях с глухозаземленной нейтралью от однофазных; от коротких замыканий и недопустимого повышения частоты вращения (для двигателей постоянного тока); от перегрузки и для синхронных двигателей от асинхронного режима.

Для электродвигателей переменного тока напряжением свыше 1000 В и различными системами охлаждения обмоток дополнительно предусматриваются защиты, действующей на сигнал и отключение: при повышении температуре смазки сверх допустимого значения или прекращении ее циркуляции; при повышении температуры обмоток сверх допустимого значения или прекращении вентиляции; при снижении циркуляции воды ниже заданного значения.

Для защиты электродвигателей от коротких замыканий должны применяться предохранители или автоматические выключатели.

Защита от перегрузки используется в случаях, когда возможна перегрузка механизма по технологическим причинам, а также при тяжелых условиях пуска с целью ограничения длительности пуска при пониженном напряжении. Защита выполняется с выдержкой времени на тепловых реле и действует на отключение или сигнал.

### **А.3 Основные неисправности машин постоянного тока и их причины**

1. Искрение щёток. Искрят все щётки или часть их. Искрение щёток иногда сопровождается сильным нагревом коллектора и щёток. Причины:

1. Щётки установлены неправильно. Проверяют положение щёток по заводским меткам, имеющимся на траверсе.

2. Расстояние между щётками отдельных бракетов по окружности коллектора неравномерно. Проверяют положение щёток на коллекторе бумажной лентой и устанавливают бракетки так, чтобы щётки соседних бракетов находились на одинаковом расстоянии друг от друга по окружности коллектора. Нельзя устанавливать щётки, отсчитывая определённое число коллекторных пластин. Небольшое искрение щёток неререверсивных машин может быть устранено в некоторых случаях незначительным сдвигом траверсы.

3. Щётки находятся в плохом состоянии и неправильно установлены в щёткодержателях. Правильно устанавливают щёткодержатели и щётки. Угольные щётки тщательно шлифуют к коллектору стеклянной шкуркой. Металлические щётки промывают в бензине и пригоняют к коллектору. Угольные щётки имеют неровную обгоревшую рабочую поверхность с царапинами, набитыми медной пылью, плохо прошлифованы, их края обломаны или обгорели. Металлические щётки загрязнены, обгорели и концы их расплющены. Размеры обойм щёткодержателей не соответствуют размерам щёток (слишком велик или слишком мал зазор между щёткой и обоймой щёткодержателей), плохой контакт между щётками и их арматурой; мало сечение токоведущих кабелей (жгутов).

Щёткодержатели установлены неправильно. Слишком велико расстояние между обоймой щёткодержателя и коллектором; установка реактивного щёткодержателя не соответствует направлению вращения. В

результате этих недостатков щётка заклинивается. Необходимо правильно установить щёткодержатели.

4. Щёточный бракет слабо закреплён и поэтому вибрирует. Подтягивают болты, крепящие бракет к траверсе.

5. Щётки слабо прилегают к коллектору. Сильнее прижимают щётки; в случае надобности укорачивают нажимную пружину щёткодержателя или заменяют новой. У щёткодержателей, допускающих регулировку нажатия на щётку, устанавливают требуемое нажатие.

6. Щётки слишком сильно прижаты к коллектору. Ослабляют нажатие щёток; в случае надобности растягивают нажимную пружину щёткодержателя или заменяют её новой. У щёткодержателей, допускающих регулировку нажатия на щётку, устанавливают требуемое нажатие.

7. Поставлены угольные щётки несоответствующей марки (слишком мягкие или слишком твёрдые). Используются щётки разных сортов (это нередко случается при замене сработавшихся щёток). Вследствие различной проводимости щёток нагрузка на них распределяется неравномерно. Устанавливаются щётки, соответствующие предписанию завода-изготовителя. Применяют щётки только одной марки. В случае продолжающегося искрения щёток снижают нагрузку на электрическую машину.

8. Нажатие на щётки неодинаково, вследствие чего ток между ними распределяется неравномерно. Регулировкой щёткодержателей добиваются, чтобы нажатие на все щётки было одинаковым в пределах допуска по инструкции завода-изготовителя.

9. Плохой контакт в токособирательных кольцах; ослаблены стяжные болты, загрязнены или окислены контактные поверхности в местах соединения бракетов щёткодержателей и токособирательных колец между щёткодержателями и бракетами, между щётками и щёткодержателями, что приводит к неравномерному распределению тока между отдельными стержнями, особенно у машин на большую силу тока. Проверяют, вычищают и исправляют все контакты токопроводящих и токособирательных систем, между бракетами щёткодержателей и токособирательными кольцами, между токопроводящими кабелями и токособирательными кольцами, между щёткодержателями и стержнями щёткодержателей, между щётками и щёткодержателями. Места плохого контакта обычно легко обнаруживаются при наружном осмотре, так как они сильно нагреваются и часто имеют побежалые цвета. Если же наружным осмотром не удаётся найти место плохого контакта, то измеряют милливольтметром падение напряжения во всех указанных местах токоведущей и токособирательной систем; при плохом контакте падение напряжения будет увеличено.

10. Наблюдается повышенная вибрация щёточного аппарата. Частота собственных колебаний щёточного аппарата совпадает с частотой его

вынужденных колебаний (резонансные явления), вызываемых выступающими коллекторными пластинами или вибрацией коллектора. При этом искрение усиливается при какой-либо одной частоте вращения и ослабевает при уменьшении или увеличении её. Увеличивают жёсткость щёточного аппарата, например скрепляют концы бракетов планками из изолирующего материала (гетинакса, текстолита), прикрепив их винтами к торцам бракетов.

15. Главные и дополнительные полюсы расположены неравномерно. Проверяют расстояние между краями башмаков соседних главных полюсов, а также между краями башмаков дополнительных и соседних главных полюсов. По опытным данным, эти расстояния не должны отличаться друг от друга более чем на 1,5 мм при диаметре якоря до 600 мм и более чем на 2 мм при диаметре якоря выше 600 мм; расстояния во втором случае не должны отличаться друг от друга более чем на 1 мм.

2. Щётки искрят, генератор плохо возбуждается, электродвигатель плохо идёт в ход или работает с ненормальной частотой вращения; обмотка якоря местами сильно нагревается. Причины:

1. Некоторые соседние пластины коллектора затянута медью, так как образовавшиеся во время обточки заусеницы не были удалены. Необходимо осторожно удалить все заусеницы острым шабером; отшлифовать коллектор стеклянной шкуркой, а в некоторых случаях коллектор обточить.

2. Между петушками коллектора или хомутами имеется замыкание, например из-за оставшегося после пайки олова. Осмотреть все петушки и хомутики, устранить замыкания; затёкшее олово осторожно удалить.

3. В одной или нескольких якорных катушках имеется межвитковое соединение. Повреждённые якорные катушки заменить новыми или перемотать. Если число коллекторных пластин не очень мало, то в виде временной меры можно отсоединить неисправную катушку от коллектора. Частичная переизоляция повреждённых мест обмотки нежелательна, так как перегрев вызывает в большинстве случаев повреждение всей изоляции, неисправность катушки, вследствие чего появляется опасность образования в дальнейшем новых межвитковых соединений.

3. Машина начинает искрить при частичной нагрузке. При холостом ходе машина не искрит. По мере возрастания нагрузки искрение увеличивается и достигает в некоторых случаях недопустимых пределов. Причины:

1. Щётки расположены неправильно; неисправен щёточный аппарат. Проверить щёточный аппарат и устранить неисправности.

При сильных кратковременных перегрузках мощных двигателей и генераторов постоянного тока, сопровождающихся, как правило, отключением автоматических выключателей, может произойти поджог под щётками коллекторных пластин по полюсному делению.

Поджог пластин проявляется не сразу, а через некоторое время. Если устранить искрение коллектора шлифовкой его наждачной бумагой или шлифовальным камнем не удастся (после такой шлифовки через некоторое время коллектор начинает вновь искрить), коллектор следует проточить, снимая не менее 0,4 – 0,5 мм. После проточки продорожить и снять фаски.

2. Главные и дополнительные полюсы чередуются неправильно. Проверить правильность чередования полярности главных и дополнительных полюсов.

3. Неправильная полярность отдельных главных и дополнительных полюсов. Проверить и устранить неправильную полярность главных и дополнительных полюсов.

4. Параллельная и последовательная обмотки замкнулись на обмотку дополнительных полюсов, вследствие чего последняя частично или полностью шунтируется. Отыскать при помощи мегаомметра или контрольного индикатора место замыкания между обмотками и устранить его.

4. Щётки равномерно искрят при нагрузке. При холостом ходе машина не искрит. Причины:

Зазор между якорем и отдельными или всеми дополнительными полюсами не соответствует паспорту машины. После ремонта или ревизии может иметь место по небрежности неправильная установка прокладок между сердечниками дополнительных полюсов и станиной. Проверить и установить под всеми дополнительными полюсами правильный зазор, предписанный заводом-изготовителем. Проверить метод подпитки или более грубо, пробным передвижением щёток, насколько сильны или слабы дополнительные полюсы. Если искрение исчезает или уменьшается при передвижении щёток против направления вращения у электродвигателя, то дополнительные полюсы слишком сильны, если же искрение усиливается, то дополнительные полюсы слишком слабы. Если дополнительные полюсы слабы, то нужно уменьшить зазор, если же они сильны, то его надо увеличить.

5. Щётки одного полюса искрят сильнее щёток других полюсов. Возможные причины:

1. Расстояние между щётками по окружности коллектора различно или имеется какая-либо другая неисправность щёточного аппарата. Наладить щёточный аппарат.

2. Межвитковое соединение или короткое замыкание в обмотке одного из дополнительных или главных полюсов. Необходимо найти неисправную катушку, отремонтировать её или заменить новой.

6. Наблюдается переходящее искрение при нагрузке. Причины:

Недостаточен контакт в щёточном аппарате. Необходимо наладить щёточный аппарат.

7. Щётки искрят, дрожат, сильно шумят; на коллекторе видны следы обгорания; коллектор почернел на всей окружности или на большей её части; поверхность коллектора испещрена бороздами (волнообразно); коллектор и щётки сильно нагреваются. Причины:

1. Коллектор деформирован; отдельные коллекторные пластины выступают; затяжка коллектора ослабла. Неравномерный износ коллекторных пластин может быть вызван различной твёрдостью меди. Проверить биение коллектора. Коллектор подтянуть и обточить. Изоляцию между пластинами продорожить. Устранить вибрацию машины.

2. Между пластинами коллектора выступает изоляция. Это часто бывает у новых быстроходных машин. Продорожить коллектор.

3. Щётки поставлены неправильно, вследствие чего коллектор изнашивается неравномерно.

8. Наблюдается лёгкое круговое искрение по поверхности коллектора со щётки одного полюса на щётки другого полюса перескакивают искры. Причины:

1. Коллектор загрязнён из-за чрезмерного смазывания или применения слишком мягких угольных щёток. Необходимо протереть коллектор чистой неволокнистой тряпкой, слегка смоченной в бензине, или отшлифовать стеклянной шкуркой. Поставить более твёрдые щётки.

2. Коллектор загрязнён из-за сильного износа щёток, обусловленного неравномерностью или негладкостью коллектора или выбора подходящего материала для щёток. Необходимо неровный коллектор отшлифовать или обточить и продорожить изоляцию между пластинами коллектора. Коллектор содержать в чистоте. После каждой притирки щёток и шлифовки очищать и продувать сжатым воздухом коллектор и весь щёточный аппарат.

9. Круговой огонь по коллектору. Наблюдается постоянная наклонность к искрению при вращении электродвигателя в каком-либо направлении; электродвигатель вращается в одном направлении быстрее, чем в другом. Причины:

1. Щётки расположены неправильно, их расположение надо проверить.

2. Главные и дополнительные полюсы чередуются неправильно (Дополнительные полюсы неправильно соединены с якорем). Проверить правильность чередования главных и дополнительных полюсов.

3. Выбрана неподходящая марка щёток. Частицы угля, оторвавшиеся от щёток при их износе, образуют проводящие мостики между пластинами коллектора и сильно накаляются. При коротких замыканиях небольшие раскалённые угольные частицы отрываются от мягких графитных щёток, что приводит к образованию кругового огня. Заменить щётки более твёрдыми, лучше всего электрографитированными, обладающими наибольшей механической прочностью и легче всего переносящими короткое замыкание.

4. При коротких замыканиях во внешней цепи щётки накапливаются и под ними собирается много токопроводящего пара, ионизирующего воздух. Вследствие этого между смежными пластинами коллектора при выходе их из-под щёток возникает дуга. Если короткое замыкание продолжается достаточно долго, то такие дуги возникают между соседними пластинами по всему коллектору и переходят в круговой огонь. Для защиты от коротких замыканий установить быстродействующий автоматический выключатель. Машины, подвергающиеся частым коротким замыканиям, снабдить электрографитными щётками.

5. Щётки стоят не на нейтрали. Проверить нейтраль и правильно установить щётки.

6. У электродвигателей устаревшей конструкции отсутствуют дополнительные полюсы. Для реверсивной работы необходимо применять только электродвигатели с дополнительными полюсами.

10. Перегрев электродвигателя постоянного тока. Причины:

1. Электродвигатель равномерно перегрет. Других признаков ненормальной работы нет. Следовательно, электродвигатель перегружен и нужно снизить нагрузку или запросить завод-изготовитель о наибольшей допустимой нагрузке электродвигателя.

2. Электродвигатель, работающий в режиме кратковременной или повторно-кратковременной нагрузки (например крановая или тяговая) эксплуатируется излишне длительно. Следует соблюдать минимальный режим работы электродвигателя.

3. Вентиляционные пути электродвигателя засорились; активная сталь и обмотки покрылись теплоизолирующим слоем мелких волокон и пыли. Необходимо тщательно очистить электродвигатель и продуть его чистым сжатым воздухом. Следить за тем, чтобы пыль выдувалась из электродвигателя, а не перегонялась из одной его части в другую. При продувании не пользоваться металлическими мундштуками с острыми краями, так как они легко повредят изоляцию обмоток. Следить за тем, чтобы пыль выдувалась в нужном направлении.

4. Направление вращения электродвигателя, имеющего вентилятор с наклонными крыльями, выбрано неверно, что значительно снижает подачу воздуха. Необходимо переменить направление вращения электродвигателя или переставить крылья вентилятора.

5. Воздушный канал или трубопровод (у электродвигателя с подводным извне охлаждающим воздухом) обладает недостаточным сечением или же имеет слишком много изгибов. Следует увеличить сечение канала или трубопровода до нужного, устранить лишнее количество изгибов. Увеличить площадь сечения канала или трубопровода до нужной, устранить лишнее количество изгибов.

6. Засорились воздушные фильтры. Матерчатые фильтры очистить от грязи и пыли. Чистку удобнее производить пылесосом.

7. Неисправен воздухоохладитель. Отсутствует тепловая изоляция воздухопровода выходящего воздуха при замкнутой системе вентиляции, что повышает нагрев электродвигателя. В подобных случаях рекомендуется установить тепловую изоляцию на выводном воздухопроводе.

11. Ненормальная частота вращения электродвигателя постоянного тока.  
Причины:

1. Электродвигатель не идёт в ход. В якоре нет тока при включенном пусковом реостате – перегорели предохранители. Следует поставить новые предохранители. Возможно, произошёл обрыв в пусковом реостате или проводах. Необходимо найти при помощи индикатора или мегаомметра повреждённое место и устранить обрыв. Возможно также, что произошёл обрыв в обмотке якоря.

2. Ток в якоре имеется, но электродвигатель с нагрузкой не идёт в ход. Без нагрузки, развёрнутый от руки, развивает очень большую частоту вращения, и его может «понести». Это обстоятельство имеет место из-за отсутствия или ослабления поля. Также может иметь место межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких катушках параллельного возбуждения, параллельная обмотка возбуждения, возможно, соединена с корпусом или другими обмотками, вследствие чего обмотка возбуждения подключена к линии одной полярности. Необходимо правильно соединить параллельную обмотку возбуждения.

12. Электродвигатель идёт в ход только вхолостую, с нагрузкой в ход не идёт. После установки щётки пускового реостата на последний контакт (рабочее положение) электродвигатель работает нормально. Причины:

Параллельная обмотка возбуждения присоединена неправильно – после пускового реостата. Вследствие этого параллельная обмотка возбуждения во время пуска электродвигателя получает небольшой ток, полюсы слабо намагничиваются и электродвигатель не может развивать достаточный пусковой момент. По мере уменьшения сопротивления пускового реостата ток в параллельной обмотке возбуждения увеличивается и, и после установки щётки реостата на последний контакт двигатель работает нормально.

13. Электродвигатель не идёт в ход или работает с сильно пониженной частотой вращения. Щётки сильно искрят. Причины:

Обрыв или плохой контакт в обмотке якоря; межвитковое соединение или короткое замыкание в якоре.

14. Частота вращения электродвигателя при нормальном напряжении превышает номинальную. Электродвигатель смешанного возбуждения развивает, кроме того, пониженный пусковой момент. Причины:

1. Щётки сдвинуты с нейтрали против направления вращения электродвигателя. Необходимо поставить щётки на нейтраль.



2. Сопротивление регулятора возбуждения слишком велико. Следует уменьшить сопротивление регулятора возбуждения, в случае надобности выключить.

3. Межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких параллельных катушках возбуждения.

4. У электродвигателя смешанного возбуждения последовательная обмотка выключена.

15. Частота вращения двигателя при нормальном напряжении меньше номинальной. Причины:

1. Щётки сдвинуты с нейтрали по направлению вращения электродвигателя. Необходимо щётки поставить на нейтраль.

2. Сопротивление регулятора возбуждения слишком мало. Необходимо увеличить сопротивление регулятора возбуждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Данилов, И. А.** Электрические машины / И. А. Данилов, К. В. Лотоцкий. – М. : Колос, 1972. – 527 с.

2 **Копылов, И. П.** Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2000. – 606 с.

3 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.

4 **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Машины переменного тока : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.

5 Сборник задач по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Анвелт [и др.]; под ред. В. С. Пантюшина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1979. – 253 с.

6 **Кузнецов, В. А.** Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.– 70 с.

7 Нетрадиционная энергетика [Электронный ресурс] / Форум по малым альтернативным источникам энергии. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://alter-energo.ru/topic1828.html>. – Дата доступа: 23.12.2014.

8 Электромонтер. Инфо [Электронный ресурс] / Справочник. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://www.electromonter.info/handbook/09/DC>. – Дата доступа: 23.12.2012.

9 Синхронные машины [Электронный ресурс] / Принцип действия синхронного генератора. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://www.feklistovstudio.narod.ru/1principsinhr.html>. – Дата доступа: 23.12.2012.

10 Спецтехника и оборудование [Электронный ресурс] / Двигатель постоянного тока. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <http://xn----itbb1bjjwe.xn--p1ai/poleznaya-informaciya/dvigatel-postoyannogo-toka.html>. – Дата доступа: 23.12.2012.

11 Бесщёточный двигатель. [Электронный ресурс] / Вентильный электродвигатель. – Гомель, 2014. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=nGrXTokodPk>. – Дата доступа: 23.12.2012.

12 Двухмашинный агрегат и тахогенераторы [Электронный ресурс] / Особенности устройства и характеристики возбуждений. – Гомель, 2015. – Режим доступа: [http://pomogala.ru/teplovoz/teplovoz\\_27.html](http://pomogala.ru/teplovoz/teplovoz_27.html). – Дата доступа: 7.03.2015.

13 Принцип действия генератора постоянного тока [Электронный ресурс] / Упрощенная модель генератора постоянного тока. – Гомель, 2015. – Режим доступа: <http://el-mashin.narod.ru/text/125.html>. – Дата доступа: 7.03.2015.

14 Трансформатор с масляным охлаждением [Электронный ресурс] / Упрощенная модель трансформатора. – Гомель, 2018. – Режим доступа: <https://www.google.by/search?rlz>. – Дата доступа: 7.04.2018.

15 Автотрансформатор [Электронный ресурс] / Внешний вид автотрансформатора. – Гомель, 2018. – Режим доступа:

<https://www.google.by/search?q=Автотрансформатор&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved>]. – Дата доступа: 10.05.2018.

16 Конструкции магнитопроводов [Электронный ресурс] / Внешний вид конструкций магнитопроводов. – Гомель, 2018. – Режим доступа: <https://www.google.by/search?rlz>. – Дата доступа: 7.05.2018.

17 Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок: ТКП 427-2012 (02230). – Введ. 28.11.2012. – Минск: Министерство энергетики Респ. Беларусь, 2012.

18 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: ТКП 181-2009 (02230). – Введ. 20.05.2009. – Минск: Министерство энергетики Респ. Беларусь, 2009.

19 **Шевчик, Н. Е.** Электрические машины : учеб.-методич. пособие: В 2 ч. Ч. 1 / Н. Е. Шевчик. – Минск : БГАТУ, 2011. – 188 с.

20 Трансформатор [Электронный ресурс] / Внешний вид конструкций магнитопроводов. – Гомель, 2019. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. – Дата доступа: 15.12.2019.

21 **Кацман, М. М.** Электрические машины : учеб. для вузов / М. М. Кацман. – М., 1990. – 463 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>3</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ.....</b>	<b>5</b>
<b>1 ТРАНСФОРМАТОРЫ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Назначение трансформаторов и их применение.....	13
1.2 Принцип действия трансформатора.....	16
1.3 Приведенный трансформатор и его схема замещения.....	20
1.4 Режим холостого хода.....	21
1.5 Короткое замыкание трансформатора.....	26
1.6 Работа трансформатора под нагрузкой.....	28
1.7 Потери и коэффициент полезного действия трансформатора.....	33
1.8 Трехфазные трансформаторы. Группы соединений обмоток.....	35
1.9 Параллельная работа трансформаторов.....	39
1.10 Специальные типы трансформаторов.....	42
1.10.1 Автотрансформаторы.....	42
1.10.2 Измерительные трансформаторы.....	45
1.12 Трехобмоточные трансформаторы.....	49
1.13 Переходные процессы и перенапряжения в трансформаторах.....	50
<b>2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....</b>	<b>60</b>
2.1 Общие сведения. Устройство.....	60
2.2 Обмотки статора машин переменного тока.....	65
2.2.1 Однофазные однослойные обмотки.....	66
2.2.2 Трехфазные однослойные обмотки.....	69
2.3 Принцип действия асинхронного двигателя.....	72
2.3.1 Асинхронный двигатель при неподвижном роторе.....	76
2.3.2 Асинхронный двигатель при вращающемся роторе.....	78
2.4 Схемы замещения асинхронного двигателя.....	81
2.5 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.....	83
2.6 Электромагнитный момент асинхронного двигателя.....	85
2.7 Рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	91
2.8 Магнитная цепь асинхронной машины.....	93
2.9 Пуск в ход асинхронных двигателей. Реверс.....	94
2.10 Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.....	103
2.11 Асинхронная машина в режимах генератора и электромагнитного тормоза..	108
2.12 Однофазные асинхронные двигатели.....	111

2.13	Использование трехфазного асинхронного двигателя в режиме однофазного	115
<b>3</b>	<b>СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ</b>	<b>120</b>
3.1	Применение, классификация и устройство синхронных машин	120
3.2	Синхронный генератор	122
3.2.1	Принцип действия синхронного генератора	122
3.2.2	Реакция якоря синхронного генератора	127
3.2.3	Характеристики синхронного генератора	129
3.2.4	Параллельная работа синхронных генераторов с сетью	131
3.2.5	Регулирование активной и реактивной мощности	135
3.3	Синхронный двигатель и компенсатор	136
3.3.1	Момент синхронного двигателя	137
3.3.2	Рабочие характеристики синхронного двигателя	138
3.3.3	Пуск синхронного двигателя	140
3.3.4	Синхронный компенсатор	145
<b>4</b>	<b>ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ</b>	<b>148</b>
4.1	Структурная схема вентильно-индукторного двигателя	149
4.2	Принцип действия вентильно-индукторного двигателя	150
4.3	Алгоритмы коммутации фаз	154
4.4	Кривые тока фаз ИМ	156
4.5	Магнитное поле в ИМ	157
4.6	Достоинства и недостатки ВИД	159
<b>5</b>	<b>МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b>	<b>161</b>
5.1	Конструкция и принцип действия машин постоянного тока	161
5.2	Обмотки якоря и их ЭДС	169
5.2.1	Простая петлевая обмотка	171
5.2.2	Простая волновая обмотка	176
5.2.3	Магнитный поток, ЭДС и электромагнитный момент	180
5.3	Реакция якоря. Коммутация	183
5.4	Генераторы постоянного тока	188
5.5	Двигатели постоянного тока	192
5.6	Пуск, реверсирование и торможение двигателей	204
5.7	Потери мощности и коэффициент полезного действия машин постоянного тока	208
5.8	Универсальные коллекторные двигатели	210
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b>	<b>Техническое обслуживание электрических машин</b>	<b>213</b>
A.1	Техническое обслуживание трансформаторов	213
A.2	Основные неисправности асинхронных двигателей и их причины	226
A.3	Основные неисправности машин постоянного тока и их причины	231
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>		<b>238</b>