

РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ

НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по дисциплине

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (I-II часть)

Область знаний	300 000	– Производственно-техническая сфера
Область образования	310 000	– Инженерное дело
Направление образования	310700	– Электротехника, электромеханика и электротехнологии (по отраслям)

Навои 2018 г.

**РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
КАФЕДРА: «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

_____ **Н.А. Абдуазизов**

“ ____ ” _____ 2018 у.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по дисциплине

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

(I-II часть)

Навои 2018 г.

Составители:

Каршибаев А.И. – доц. кафедры «Электроэнергетика»,

Рабочая учебная программа обсуждена и одобрена на заседании кафедры «Электроэнергетика» от «___» _____ 2018 года. (Протокол №___)

Заведующий кафедрой _____ **Товбаев А.Н.**

Рабочая учебная программа обсуждена и одобрена на Совете энергомеханического факультета “___” _____ 2018 года (Протокол №___).

Декан факультета _____ **Базарова С.Ж.**

Секретарь учебно-методического совета _____ **Норматова М.Ж.**

Начальник учебно-методического отдела _____ **Каримов И.А.**

СТРУКТУРА УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

УЧЕБНОЕ ЗАНЯТИЕ

Текст лекции

Лабораторные работы

Практические работы

Курсовая работа

ГЛОССАРИЙ

ПРИЛОЖЕНИЕ

Учебная программа

Рабочая программа

Критерия оценок

Раздаточные материалы

Тестовые вопросы

Контрольные вопросы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

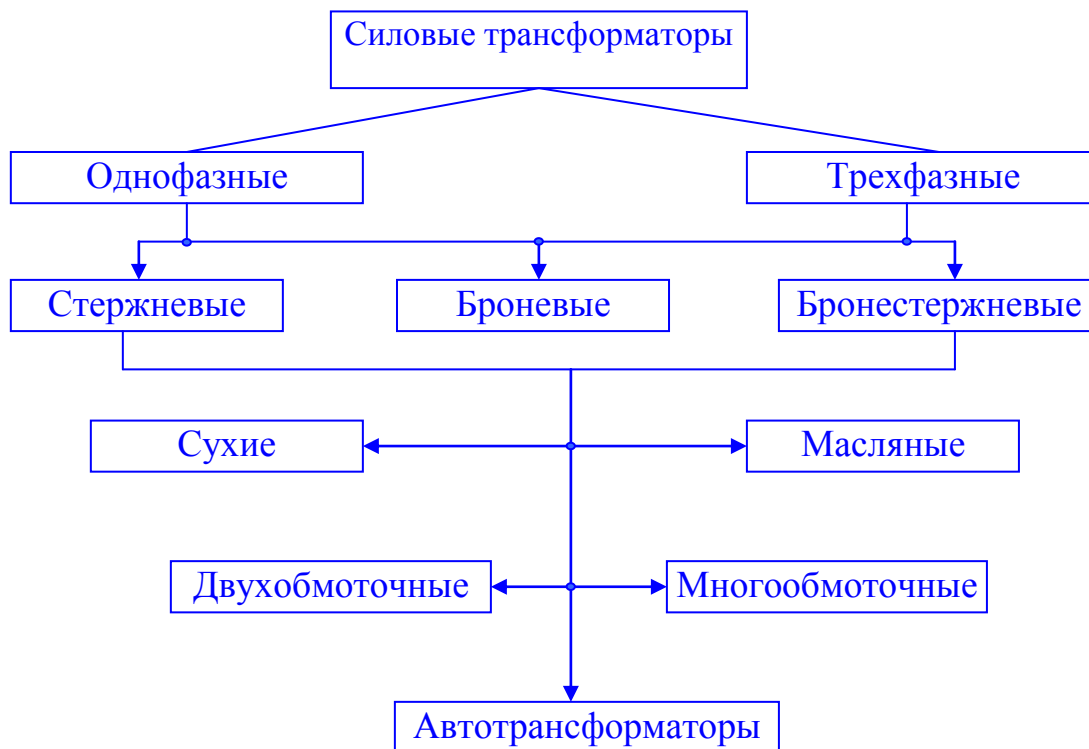
ЛЕКЦИЯ-1

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ.

Цель: Изучение, применение и место электромеханики в промышленности.

План:

1. Основные понятия трансформатора и электрических машин.
2. Основные понятия асинхронных машин.
3. Применение генераторов постоянного тока и синхронных машин.



Электрификация, являясь стержнем строительства экономики, играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства. В арсенале электротехнических средств, применяемых при электрификации народного хозяйства, ведущее место занимают электрические машины, широко используемые как в процессе производства электрической энергии, так и в процессе ее потребления.

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергии. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях электрическими машинами-генераторами, преобразующими механическую энергию в электрическую. Основная часть электроэнергии (до 80%) вырабатывается на тепловых электростанциях, где при сжигании химического топлива (уголь, торф, газ) нагревается вода и переводится в пар высокого давления. Последний подается в турбину, где, расширяясь, приводит ротор турбины во вращение (тепловая энергия в турбине преобразуется в механическую). Вращение ротора турбины передается на вал генератора (турбогенератора). В результате электромагнитных процессов, происходящих в генераторе, механическая энергия преобразуется в электрическую.

Процесс производства электроэнергии на атомных электростанциях аналогичен тепловому, с той лишь разницей, что вместо химического топлива используется ядерное.

Процесс выработки электроэнергии на гидравлических электростанциях состоит в следующем: вода, поднятая плотиной на определенный уровень, сбрасывается на рабочее колесо гидротурбины; получаемая при этом механическая энергия путем вращения колеса турбины передается на вал электрического генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую.

В процессе потребления электрической энергии происходит ее преобразование в другие виды энергий (тепловую, механическую, химическую). Около 70% электроэнергии используется для приведения в движение станков, механизмов, транспортных средств, т.е. для преобразования

ее в механическую энергию. Это преобразование осуществляется электрическими машинами-электродвигателями.

Электродвигатель – основной элемент электропривода рабочих машин. Хорошая управляемость электрической энергии, простота ее распределения позволили широко применить в промышленности многодвигательный электропривод рабочих машин, когда отдельные звенья рабочей машины приводятся в движение самостоятельными двигателями. Многодвигательный привод значительно упрощает механизм рабочей машины (уменьшается число механических передач, связывающих отдельные звенья машины) и создает большие возможности в автоматизации различных технологических процессов. Электродвигатели широко применяют на транспорте в качестве тяговых двигателей, приводящих во вращение колесные пары электропоездов, троллейбусов и др. За последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности- микромашин мощностью от долей до нескольких сотен ватт. Такие электрические машины используют в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Особый класс электрических машин составляют двигатели для бытовых электрических устройств- пылесосов, холодильников, вентиляторов и др. мощность этих двигателей невелика (от единиц до сотен ватт), конструкция проста и надежна, и изготавливают их в больших количествах.

Электрическую энергию, вырабатываемую на электростанциях, необходимо передать в места ее потребления, прежде всего в крупные промышленные центры страны, которые удалены от мощных электростанций на многие сотни, а иногда и тысячи километров. Но электроэнергию недостаточно передать. Ее необходимо распределить среди множества разнообразных потребителей -промышленных предприятий, транспорта, жилых зданий и т.д. Передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют при высоком напряжении (до 500 кВ и более), чем обеспечиваются минимальные электрические потери в линиях электропередачи. Поэтому в процессе передачи и распределения электрической энергии приходится неоднократно повышать и понижать напряжение. Этот процесс выполняется посредством электромагнитных устройств, называемых трансформаторами. Трансформатор не является электрической машиной, так как его работа не связана с преобразованием электрической машиной, так как его работа не связана с преобразованием электрической энергии в механическую и наоборот; он преобразует лишь напряжение электрической энергии. Кроме того, трансформатор-это статическое устройство, и в нем нет никаких движущихся частей. Однако электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторах, аналогичны процессам, происходящим при работе электрических машин. Более того, электрическим машинам и трансформаторам свойственна единая природа электромагнитных и энергетических процессов, возникающих при взаимодействии магнитного поля и проводника с током. По этим причинам трансформаторы составляют неотъемлемую часть курса электрических машин.

Отрасль науки и техники, занимающаяся развитием и производством электрических машин и трансформаторов, называется электромашиностроением. Теоретические основы электромашиностроения были заложены в 1821 г. М.Фарадеем, установившим возможность преобразования электрической энергии в механическую и создавшим первую модель электродвигателя. Важную роль в развитии электромашиностроения имели работы ученых Д.Максвелла и Э.Х.Ленца. Дальнейшее развитие идея взаимного преобразования электрической и механической энергий получила в работах выдающихся русских ученых Б.С.Якоби и М.О. Доливо-Добровольского, которыми были разработаны и созданы конструкции электродвигателей, пригодные для практического использования. Большие заслуги в создании трансформаторов и их практическом применении принадлежат замечательному русскому изобретателю П.Н.Яблочкову.

При этом необходимо учитывать возрастающие экологические требования к источникам электроэнергии и наряду с традиционными способами развивать экологически чистые (альтернативные) способы производства электроэнергии с использованием энергии солнца, ветра, морских приливов, термальных источников. Широко внедряются автоматизированные системы в различные сферы народного хозяйства. Основным элементом этих систем является автоматизированный электропривод, поэтому требуется опережающими темпами наращивать выпуск автоматизированных электроприводов.

В условиях научно-технической революции большое значение приобретают работы, связанные с повышением качества выпускаемых электрических машин и трансформаторов.

Решение этой задачи является важным средством развития международного экономического сотрудничества. Соответствующие научные учреждения и промышленные предприятия нашей страны ведут работы по созданию новых видов электрических машин и трансформаторов, удовлетворяющих современным требованиям к качеству и технико-экономическим показателям выпускаемой продукции.

Лекция-2:

РОЛЬ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ТРАНСФОРМАТОРОВ. НОМИНАЛЬНЫЕ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель: Применение электрических машин в различных отраслях промышленности.

План:

1. Основная роль электрических машин в промышленности.
2. Виды электрических машин.
3. Основные физические и механические сущности электрических машин.

Использование электрических машин в качестве генераторов и двигателей является их главным применением, так как связано исключительно с целью взаимного преобразования электрической и механической энергий. Применение электрических машин в различных отраслях техники может иметь и другие цели. Так, потребление электроэнергии часто связано с преобразованием переменного тока в постоянный или же с преобразованием тока промышленной частоты в ток более высокой частоты. Для этих целей применяют *электромашинные преобразователи*.

Электрические машины используют также для усиления мощности электрических сигналов. Такие электрические машины называют *электромашинными усилителями*. Электрические машины, используемые для повышения коэффициента мощности потребителей электроэнергии, называют *синхронными компенсаторами*. Электрические машины, служащие для регулирования напряжения переменного тока, называют *индукционными регуляторами*.

Очень разнообразно применение микромашин в устройствах автоматики и вычислительной техники. Здесь электрические машины используют не только в качестве двигателей, но и в качестве *тахогенераторов* (для преобразования частоты вращения в электрический сигнал), *сельсинов*, *вращающихся трансформаторов* (для получения электрических сигналов, пропорциональных углу поворота вала) и т. п.

Из приведенных примеров видно, сколь разнообразно разделение электрических машин по их назначению.

Рассмотрим классификацию электрических машин по принципу действия, согласно которой все электрические машины разделяются на бесколлекторные и коллекторные, различающиеся как принципом действия, так и конструкцией. Бесколлекторные машины — это машины переменного тока. Они разделяются на асинхронные и синхронные. Асинхронные машины применяются преимущественно в качестве двигателей, а синхронные — как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов. Коллекторные машины применяются главным образом для работы на постоянном токе в качестве генераторов или двигателей. Лишь коллекторные машины небольшой мощности делают универсальными двигателями, способными работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока.

Электрические машины одного принципа действия могут различаться схемами включения либо другими признаками, влияющими на эксплуатационные свойства этих машин. Например, асинхронные и синхронные машины могут быть трехфазными (включаемыми в трехфазную сеть), конденсаторными или однофазными. Асинхронные машины в зависимости от конструкции обмотки ротора разделяются на машины с короткозамкнутым ротором и машины с фазным ротором. Синхронные машины и коллекторные машины постоянного тока в зависимости от способа создания, в них магнитного поля возбуждения разделяются на машины с обмоткой возбуждения и машины с постоянными магнитами. На переднем форзаце данной книги представлена в виде диаграммы классификация электрических машин, содержащая основные виды электрических машин, получивших наибольшее применение в современном электроприводе. Эта же классификация электрических машин положена в основу изучения курса «Электрические машины».

Курс «Электрические машины» помимо собственно электрических машин предусматривает

изучение трансформаторов. Трансформаторы являются статическими преобразователями электроэнергии переменного тока. Отсутствие каких-либо вращающихся частей придает трансформаторам конструкцию, принципиально отличающую их от электрических машин. Однако принцип действия трансформаторов, так же как и принцип действия электрических машин, основан на явлении электромагнитной индукции, и поэтому многие положения теории трансформаторов составляют основу теории электрических машин переменного тока.

Электрические машины и трансформаторы — основные элементы любой энергетической системы или установки, поэтому для специалистов, работающих в сфере производства или эксплуатации электрических машин, необходимы знания теории и понимание физической сущности электромагнитных, механических и тепловых процессов, протекающих в электрических машинах и трансформаторах при их работе.

Лекция-3:

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Цель: Изучение принципа работы трансформаторов и их применение.

План:

1. Понятие о трансформаторах.
2. Назначение и использование трансформаторов в промышленности.
3. Виды трансформатроов.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока. Трансформаторы широко используются в промышленности и быту для различных целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии.

Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6 - 24 кВ, а передавать электроэнергию на дальние расстояния выгодно при значительно больших напряжениях (110, 220, 330, 400, 500, и 750 кВ). Поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, осуществляющие повышение напряжения.

Распределение электрической энергии между промышленными предприятиями, населёнными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий производится по воздушным и кабельным линиям, при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех распределительных узлах должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение до величины 220, 380 и 660 В.



Рис. 1.1

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентилях в преобразовательных устройствах и согласования напряжения на выходе и входе преобразователя. Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются преобразовательными.

3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электропечные трансформаторы) и др.

4. Для питания различных цепей радиоаппаратуры, электронной аппаратуры, устройств связи и автоматики, электробытовых приборов, для разделения электрических цепей различных элементов указанных устройств, для согласования напряжения и пр.

5. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов (реле и др.) в электрические цепи высокого напряжения или же в цепи, по которым проходят большие токи, с

целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этих целей, называются измерительными.

Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:

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

2. По виду охлаждения – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением.

3. По числу фаз на первичной стороне – однофазные и трёхфазные.

4. По форме магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.

5. По числу обмоток на фазу – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).

6. По конструкции обмоток – с concentрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками.

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рис. 1.2), размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т.е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток трансформатора. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением сети u_1 . К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_H .

Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), а низкого напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами А и Х; обмотки НН – буквами а и х.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создаёт переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС – e_1 и e_2 пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

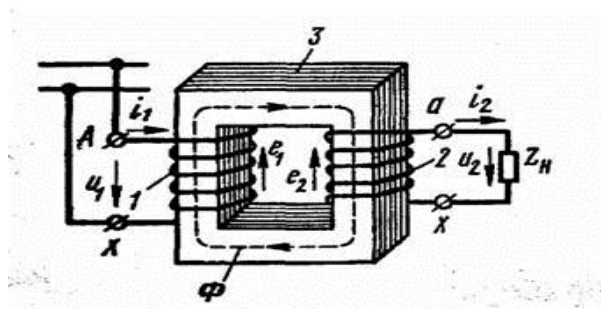


Рис. 1.2

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} ;$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

$$E_1 / E_2 = e_1 / e_2 = w_1 / w_2 \quad (1.1)$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3-5 % от номинальных значений U_1 и U_2 , и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим

$$U_1 / U_2 \approx w_1 / w_2 \quad (1.2)$$

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2 . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа w_1 ; такой трансформатор называют повышающим. Если требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 берут меньшим w_1 ; такой трансформатор называют понижающим.

Отношение ЭДС $E_{вн}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{нн}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют коэффициентом трансформации

$$n = \frac{E_{вн}}{E_{нн}} = \frac{w_{вн}}{w_{нн}} \quad (1.3)$$

Коэффициент n всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трёхобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики – многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что даёт возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений (U_2 , U_3 , U_4 и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжения.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остаётся приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно, полная мощность потребляемая из сети

$$S_1 = U_1 I_1 ,$$

практически полностью выделяется на нагрузке.

$$S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2 .$$

Отсюда следуют соотношения между токами и напряжениями на первичной и вторичной обмотках трансформатора.

$$U_1 / U_2 = I_2 / I_1 = w_1 / w_2 = n \quad (1.4)$$

При уменьшении вторичного напряжения в n раз по сравнению с первичным, ток i_2 во вторичной обмотке соответственно увеличится в n раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а, следовательно, не передаётся электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС E_1 в первичной обмотке ток $I_1 = U_1 / R_1$ весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать сопротивление нагрузки. Если к источнику переменного тока подключить нагрузку с сопротивлением R через трансформатор с

коэффициентом трансформации n , то для цепи источника

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \approx n^2 R \quad (1.5)$$

где: P_1 – мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт;

$P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ – мощность, потребляемая нагрузкой с сопротивлением R от трансформатора.

Таким образом, трансформатор изменяет значение сопротивления нагрузки R в n^2 раз. Это свойство широко используется при разработке электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

Трансформаторы широко используют для следующих целей:

1. Для передачи и распределения электрической энергии. Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—24 кВ. Передавать же электроэнергию на дальние расстояния выгодно при больших напряжениях, поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, повышающие напряжение.

В настоящее время для высоковольтных линий электропередачи в СССР применяют силовые трансформаторы с масляным охлаждением напряжением 330, 500 и 750 кВ, мощностью до 1200—1600 МВ-А. В связи со строительством дальних линий электропередачи Экибастуз — Центр, Экибастуз — Урал и других напряжением 1150 кВ переменного тока наша электропромышленность создала трансформаторные группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов мощностью 667 МВ-А, а для линий 1500 В постоянного тока — двенадцати фазные преобразовательные блоки с четырехобмоточными трансформаторами общей мощностью 1500 МВ-А. КПД таких трансформаторов составляет 98 — 99% и выше.

Для перспективных линий электропередачи переменного тока напряжением 1800—2000 кВ и постоянного тока напряжением 3000 кВ разрабатывают трансформаторы мощностью 1320 МВ-А на одну фазу.

Электрическая энергия распределяется между промышленными предприятиями и населенными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий по воздушным и кабельным линиям при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение. Кроме того, понижающие трансформаторы следует устанавливать в пунктах потребления электроэнергии, так как большинство электрических потребителей переменного тока работает при напряжениях 220, 380 и 660 В. Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3 — 5 раз). Применяемые для этих целей трансформаторы могут быть одно- и трехфазными, двух- и трехобмоточными.

1. Для обеспечения нужной схемы включения вентилях в преобразовательных устройствах и согласования напряжений на входе и выходе преобразователя. В вентилях преобразователях, выпрямляющих переменный ток или преобразующих его из постоянного в переменный (инверторы), отношение напряжений на входе и выходе зависит от схемы включения вентилях. Поэтому если на вход преобразователя подается стандартное напряжение, то на выходе получается нестандартное. Для устранения этого недостатка вентилях преобразователи, как правило, снабжают трансформаторами, обеспечивающими стандартное выходное напряжение при принятой схеме включения вентилях. Кроме того, ряд схем включения вентилях требует обязательного применения трансформатора. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *преобразовательными*. Их мощность достигает тысяч киловольт-ампер, напряжение 110 кВ; они работают при частоте 50 Гц и более. Рассматриваемые трансформаторы выполняют одно-, трех- и многофазными с регулированием выходного напряжения в широких пределах и без регулирования.

В последнее время для возбуждения мощных турбо- и гидрогенераторов, электропривода и других целей все шире начинают применять трансформаторы с естественным воздушным

охлаждением напряжением 3 — 24 кВ и мощностью 133-6300 кВ·А. Благодаря использованию в этих трансформаторах новой теплостойкой изоляции удается повысить их нагрузочную способность и в 1,3 — 1,5 раз сократить, массогабаритные показатели по сравнению с применявшимися ранее трансформаторами с масляным охлаждением.

1. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электропечные трансформаторы) и др. Мощность их достигает десятков тысяч киловольт-ампер при напряжении до 10 кВ; они работают обычно при частоте 50 Гц.

2. Для питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; устройств связи, автоматики в телемеханике, электробытовых приборов; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений и т. п. Трансформаторы, используемые в этих устройствах, обычно имеют малую мощность (от нескольких вольт-ампер до нескольких киловольтампер), невысокое напряжение, работают при частоте 50 Гц и более. Их выполняют двух-, трех- и многообмоточными; условия работы, предъявляемые к ним требования и принципы проектирования весьма специфичны.

3. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например реле, в электрические цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *измерительными*. Они имеют сравнительно небольшую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.

Трансформаторы, перечисленные в п. 1, 2, 3 и частично в п. 4, предназначенные для преобразования электрической энергии в сетях энергосистем и потребителей электрической энергии, называют *силовыми*. Для режима их работы характерны неизменная частота переменного тока и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений.

Силовые трансформаторы, выпускаемые отечественными заводами, разделены на несколько групп (габаритов) от I до VIII. Например, трансформаторы мощностью до 100 кВ·А включительно относят к габариту I, от 160 до 630 кВ · А — к габариту II, от 1000 до 6300 кВ · А — к габариту III и т. п.

Однофазные трансформаторы небольшой мощности применяют в качестве сварочных, измерительных, испытательных, специального назначения и для бытовых нужд. Мощные однофазные силовые трансформаторы служат для трансформации электрической энергии трехфазного тока и для питания специальных промышленных установок. Простейший однофазный трансформатор (рис. 1) состоит из рамообразной магнитной системы, включающей два стержня 5, верхнее 4 и нижнее 5 ярма, обмоток высшего 1 и низшего 2 напряжения. Левый стержень, если смотреть на трансформатор со стороны выведенных от обмоток ВН концов (отводов), принято обозначать буквой А, правый — Х.

Чтобы двухстержневую магнитную систему однофазного трансформатора использовать наиболее рационально и трансформатор конструктивно был более компактным, обмотки ВН и НН как бы делят на две части и размещают их на стержнях А и Х. Соединив между собой параллельно или последовательно отдельные части обмоток ВН и соответственно НН, от обмоток, размещены на стержне А, выводят их «начала», а на стержне Х — их «концы».

Трансформацию трехфазного тока однофазными трансформаторами осуществляют следующим образом: устанавливают рядом три однофазных трансформатора, образующих трехфазную группу, и внешние зажимы обмоток ВН и НН (при трехобмоточных трансформаторах и СН) соединяют в трехфазные электрические схемы (звезда — звезда, звезда — треугольник). Полученная трехфазная трансформаторная группа имеет общую электрическую схему, а электромагнитная система каждого трансформатора работает отдельно.

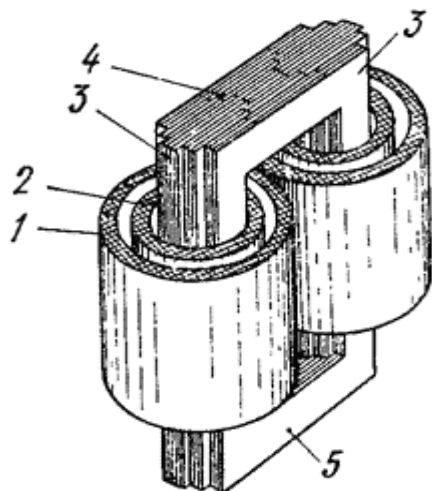


Рис. 1. Устройство простейшего однофазного трансформатора

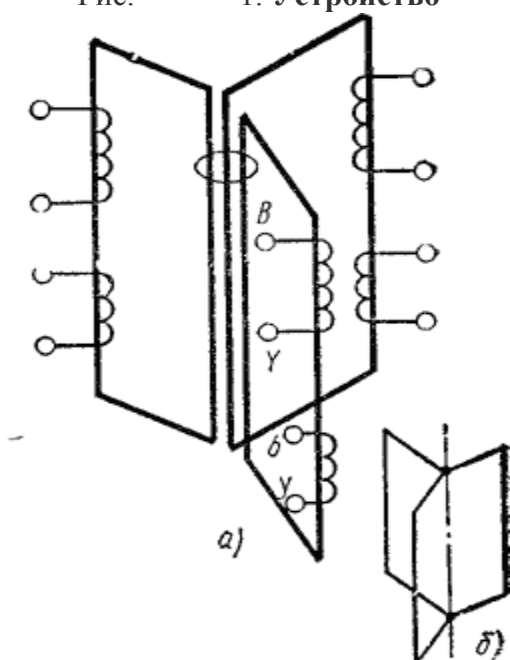


Рис. 2. Получение трехфазного трансформатора из трех однофазных: а — схема объединения трех магнитных систем с фазными обмотками в одну трехфазную, б — схема пространственной симметричной магнитной системы трехфазного трансформатора

В трехфазном трансформаторе электрические и электромагнитные системы трех однофазных трансформаторов объединены в одну. Физическую сторону такого совмещения схематично можно пояснить следующим образом. Если три магнитные системы однофазных трансформаторов с обмотками ВН и НН, размещенными на одном стержне (рис. 2), составить под углом 120° друг к другу, свободные от обмоток стержни примкнуть — состыковать в один, соединить обмотки в трехфазные схемы и подать на одну из них трехфазное напряжение, то и получится трехфазный трансформатор с общей электрической и магнитной системой, состоящей из трех стержней с обмотками и одного центрального стержня без обмоток.

Однако исходя из известного положения электротехники о том, что сумма мгновенных значений токов и магнитных полей трехфазной системы равна нулю, магнитный поток в центральном стержне будет отсутствовать, а следовательно, в нем нет необходимости, поэтому его из конструкции магнитной системы удаляют. Полученная при этом трехстержневая пространственная магнитная система (рис. 2, б) является симметричной — у нее длина путей основного магнитного поля каждой фазы одинакова.

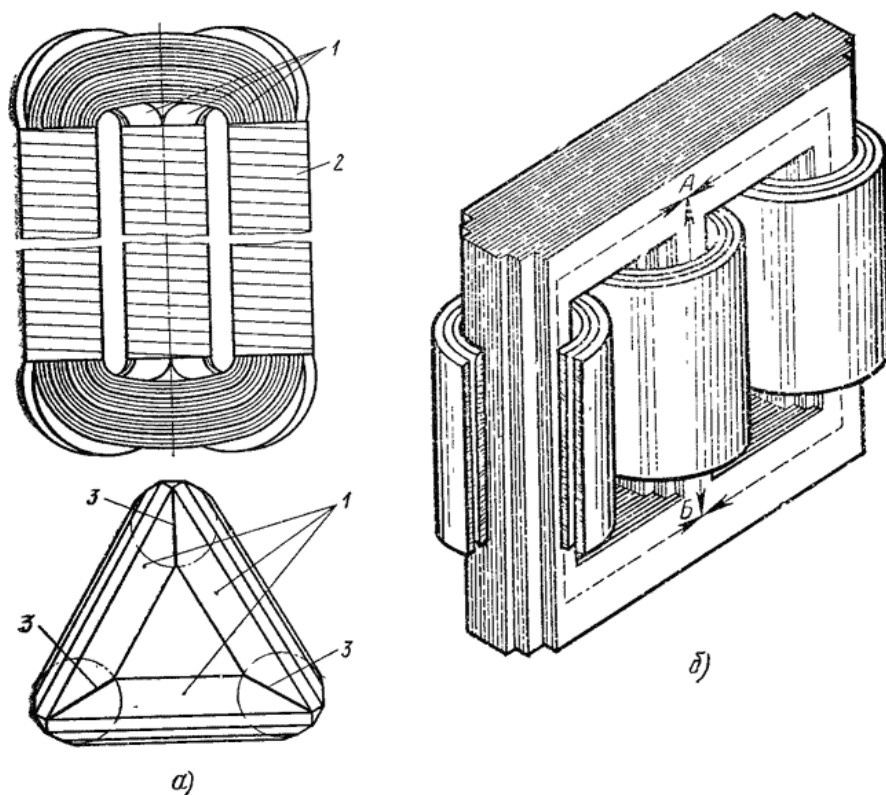


Рис. 3. Пространственная (а) и плоская несимметричная магнитная система трехфазного трансформатора с обмотками (б): 1 — элементы навитой ленточной магнитной системы; 2 — стеклобандаж, скрепляющий составной стержень; 3 — изоляционная прокладка стыка стержня

Симметричная магнитная система наиболее совершенна, однако трудности, связанные с технологией изготовления и ремонта трансформаторов с такой магнитной системой, ограничивают ее применение; она используется только в трансформаторах некоторых серий мощностью в основном до 250 кВ·А. На рис. 3, а изображена одна из трехфазных пространственных магнитных систем, применяемая в трансформаторах I и частично II габаритов. Она состоит из трех ленточных магнитных систем, составленных под углом 60° и скрепленных стеклобандажной лентой.

Каждая из них навита (намотана) непрерывной (без стыков) электротехнической лентой. Чтобы форма составленного стержня была близка к кругу и в местах стыка. Так как навитая магнитная система неразъемная, то обмотки с помощью специальных станков приходится наматывать («вматывать») непосредственно на стержне. У навитых магнитных систем переход из стержней в ярма плавный, совпадающий с направлением магнитного потока, тем самым исключаются добавочные потери в местах перехода стержней в ярма под прямым углом при применении анизотропной стали. Кроме того, процесс сборки трансформаторов с пространственными магнитными системами может быть полностью механизирован. Однако, по ранее указанным причинам, они нашли применение только в трансформаторах небольшой мощности.

Для упрощения конструкции и технологии сборочно-разборочных операций в трехфазном трансформаторе применяют главным образом плоскую несимметричную магнитную систему (рис. 3, б). Она состоит из трех стержней, расположенных в одной плоскости, и перекрывающих их ярм — верхнего и нижнего. Из рис. 3, б видно, что длина пути А—Б магнитного потока среднего стержня меньше длин пути потока крайних стержней. Асимметрия магнитной системы несколько сказывается на значении токов холостого хода отдельных фаз. Фазные обмотки на стержнях трехфазной магнитной системы размещаются так же, как и на однофазной, — концентрически соосно и соединяются в трехфазные схемы. Стоимость изготовления и монтажа одного трехфазного трансформатора ниже стоимости трех однофазных на ту же суммарную мощность.

Современные силовые трансформаторы преимущественно имеют трехфазное исполнение. Масса трехфазного трансформатора на 30—35% меньше массы трех однофазных трансформаторов. Кроме того, он экономичнее в работе и обслуживании. Применение в отдельных случаях однофазных силовых трансформаторов объясняется тем, что одновременное повреждение нескольких фаз маловероятно. Поэтому достаточно иметь один запасной однофазный

трансформатор, чтобы в случае аварии заменить поврежденную фазу. Однако в настоящее время однофазные трансформаторы применяют только для очень крупных мощностей, где транспортировка и установка трехфазных трансформаторов, имеющих большие массы и размеры, вызывает значительные трудности.

Лекция-4:

Устройства и принцип действия трансформатора

Цель: Ознакомить студентов с принципом работы трансформаторов.

План:

1. Принцип работы силового трансформатора.
2. Классификация и свойства трансформаторов.
3. Устройства трансформаторов.

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 4.1, а). Одна из обмоток, которую называют *первичной*, присоединена к источнику переменного тока G на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой *вторичной*, подключен потребитель 2,.. Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

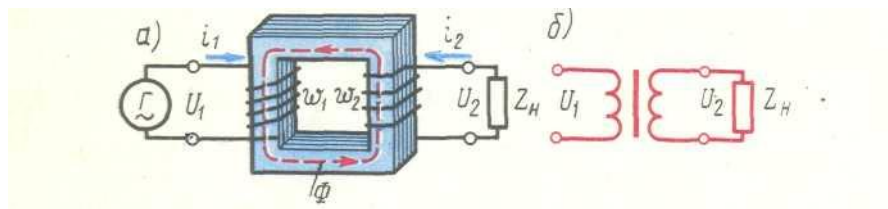


Рис. 4.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

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

в первичной обмотке ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -\omega_1(d\Phi/dt), \quad (4.1)$$

во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -\omega_2(d\Phi/dt), \quad (4.2)$$

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

При подключении нагрузки Z_H к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а в понижающих $U_2 < U_1$

Из (4.1) и (4.2) видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков ω_1 и ω_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — *обмоткой низшего напряжения* (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости, один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо — понижающий.

Трансформатор — это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению ($d\Phi/dt=0$), поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а следовательно, электроэнергия из первичной цепи *не будет* передаваться во вторичную.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

по назначению — силовые общего назначения, силовые специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т. д.;

по виду охлаждения — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;

по числу трансформируемых фаз — однофазные и трехфазные;

по форме магнитопровода — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;

по числу обмоток на фазу — двухобмоточные, многообмоточные.

На заднем форзаце данной книги представлена диаграмма классификации силовых трансформаторов общего назначения.

Устройство трансформаторов.

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его

стержни обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными (вспомогательными) частями*. Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

Магнитопровод. Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т. е. он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

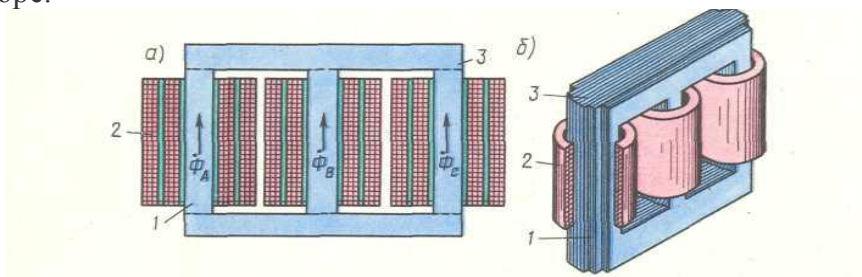


Рис.4.2. Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

Силовые трансформаторы выполняются с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневое и бронестержневого. В магнитопроводе стержневого типа (рис. 4.2, а) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях — потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне — поток Φ_B . На рис. 4.2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром d . (рис. 4.3). Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее использование площади круга внутри обмотки.

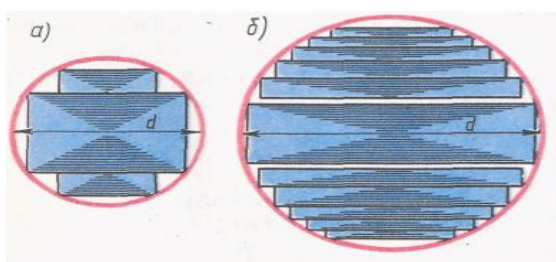


Рис. 4.3. Форма сечения стержней:

а — трансформаторов малой и средней мощности;
б — трансформаторов большой мощности

Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5—6 мм, служащие вентиляционными каналами.

Магнитопровод броневое типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рис. 4.4). Магнитный поток в стержне магнитопровода броневое типа в два раза больше, чем в ярах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневое типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы).

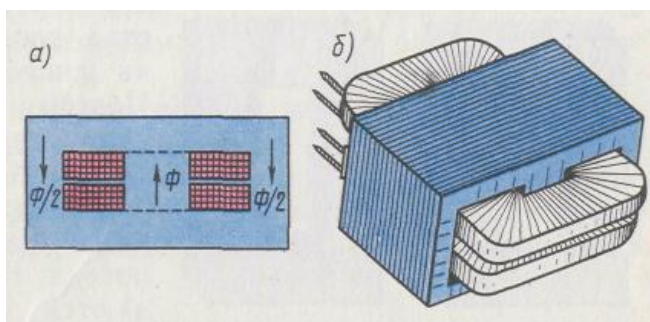


Рис. 4.4. Однофазный трансформатор бронестержневого типа

а—устройство; б—внешний вид

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 4.5), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода ($H_{БС} < H_C$), а следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов по железной дороге.

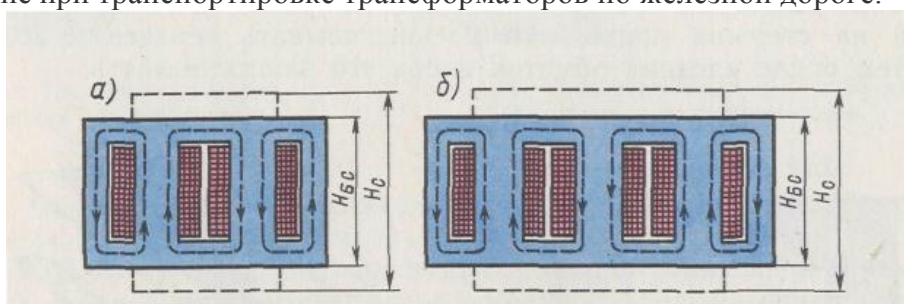


Рис. 4.5. Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов: а — однофазного; б — трехфазного

По способу сочленения стержней с ярами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода (рис. 4.6).

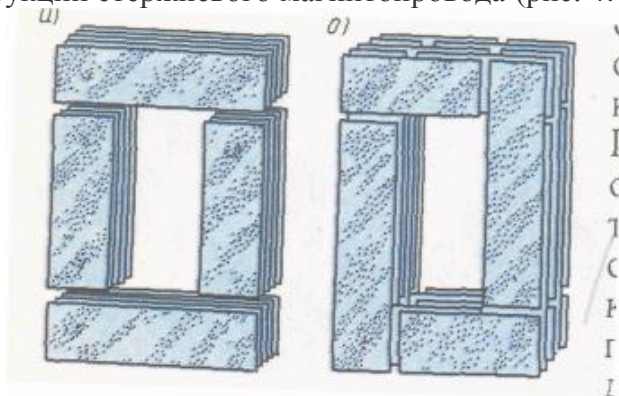


Рис. 4.6. Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкции магнитопроводов

При стыковой конструкции (рис. 4.6, а) стержни и яра собирают отдельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее яра, заранее проложив изолирующие прокладки между стыкующимися элементами, с целью ослабления вихревых токов, возникающих при взаимном перекрытии листов стержней и яр. После установки двух яр всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпильками. Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

Шихтованная конструкция магнитопроводов силовых

трансформаторов показана на рис. 1.6,6, когда стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слой содержит 2—3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на 90° появятся «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления этого явления применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка (рис. 4.7, а) получают косой стык (рис. 4.7, б), у которого «зона несовпадения» гораздо меньше.

Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

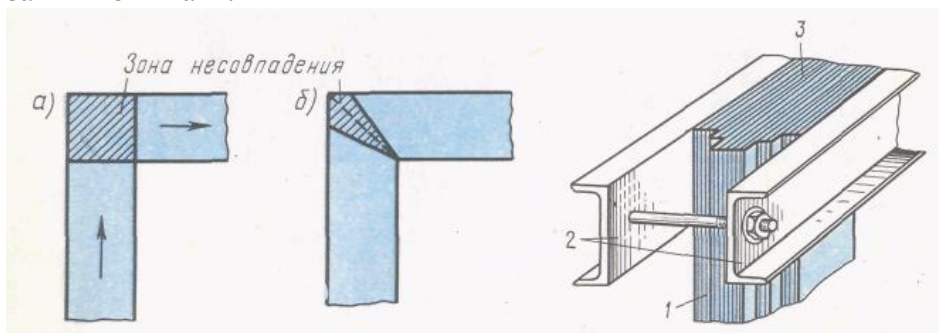


Рис. 4.7. «Зоны несовпадения» при прямом (а) и косом (б) стыках

Рис. 4.8. Опрессовка ярма

Стержни магнитопроводов во избежание распушения опрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандаж из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм 3 и мест их сочленения со стержнями 1 используют ярмовые балки 2, которые в местах, выходящих за крайние стержни (рис. 1.8), стягивают шпильками.

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления обязательно заземляют. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными (рис. 1.9), а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

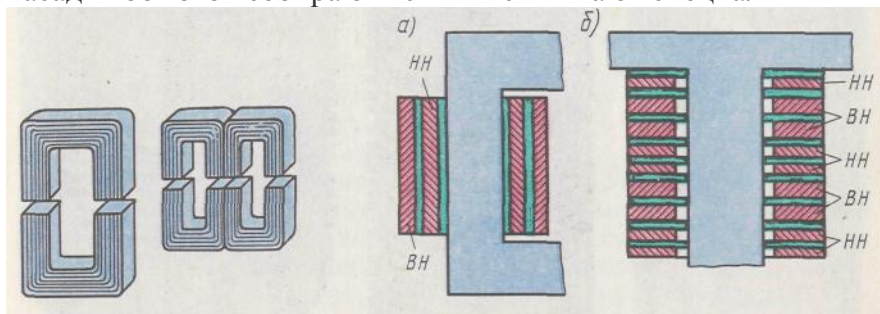


Рис. 4.9. Ленточные разрезные магнитопроводы

Рис. 4.10. Концентрическая (а) и дисковая (б) обмотки трансформаторов

Лекция-5:

Уравнения напряжений трансформатора

Цель: Рассмотреть и получить уравнение напряжений для первичной и вторичной цепей трансформатора.

План:

1. Действующее значение первичной ЭДС.
2. Коэффициент трансформации.
3. Уравнения напряжений для цепей трансформатора.

Основной переменный магнитный поток Φ в магнитопроводе трансформатора, сцепляясь с витками обмоток w_1 и w_2 (см. рис. 4.1), наводит в них ЭДС [см. (4.1) и (4.2)]

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt); \quad e_2 = -w_2(d\Phi/dt).$$

Предположим, что магнитный поток Φ является синусоидальной функцией времени, т. е.

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t \quad (5.1)$$

где Φ_{\max} — максимальное значение потока.

Тогда, подставив (5.1.) в формулу ЭДС e_1 и дифференцируя, получим

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\max} \cos \omega t; \quad (5.2.)$$

Но так как $\cos \omega t = \sin(\omega t - \pi/2)$ то

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (5.3)$$

По аналогии,

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (5.4)$$

Из (5.3) и (5.4) следует, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от потока Φ на угол $\pi/2$. Максимальное значение ЭДС

$$E_{1\max} = \omega w_1 \Phi_{\max} \quad (5.5)$$

Разделив $E_{1\max}$ на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим действующее значение первичной ЭДС (В):

$$E_1 = E_{1\max}/\sqrt{2} = (2\pi/\sqrt{2}) w_1 f \Phi_{\max} = 4,44 w_1 f \Phi_{\max} \quad (5.6)$$

Аналогично, для вторичной ЭДС

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{\max} \quad (5.7)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называют *коэффициентом трансформации*:

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2 \quad (5.8)$$

При практических расчетах коэффициент трансформации с некоторым допущением принимают равным отношению номинальных напряжений обмоток ВН и НН: $k \approx U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$.

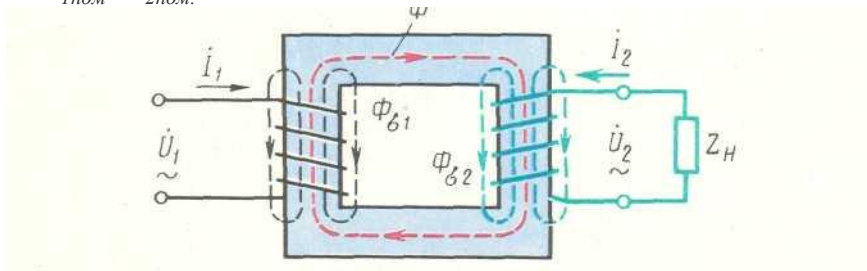


Рис. 5.1. Магнитные потоки в однофазном трансформаторе.

Токи I_1 и I_2 в обмотках трансформатора помимо основного магнитного потока Φ

создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 5.1), каждый из которых сцеплен с витками лишь собственной обмотки и индуцирует в ней ЭДС рассеяния. Эти ЭДС в первичной и вторичной обмотках таковы:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} (di_1/dt); \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} (di_2/dt)$$

где $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния.

Так как магнитные потоки рассеяния замыкаются главным образом в немагнитной среде (воздух, масло, медь), магнитная проницаемость которой постоянна, то и индуктивности $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными.

Действующие значения ЭДС рассеяния пропорциональны токам в соответствующих обмотках:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\sigma 1} &= -j\dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_{\sigma 2} &= -j\dot{I}_2 x_2 \end{aligned} \quad (5.9)$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно, Ом (знак минус в этих выражениях свидетельствует о реактивности ЭДС рассеяния). Таким образом, в каждой из обмоток трансформатора индуцируются по две ЭДС: ЭДС от основного потока Φ и ЭДС от потока рассеяния ($\Phi_{\sigma 1}$ в первичной обмотке и $\Phi_{\sigma 2}$ во вторичной обмотке).

Для первичной цепи трансформатора, включенной в сеть на напряжение U_1 , с учетом падения напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки r_1 можно записать уравнение напряжений по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1$$

или, перенеся ЭДС \dot{E}_1 и $\dot{E}_{\sigma 1}$ в правую часть уравнения и выразив ЭДС рассеяния через индуктивное сопротивление рассеяния x_1 , получим *уравнение напряжений для первичной цепи трансформатора*:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (5.10)$$

ЭДС первичной обмотки E_1 , наведенная основным магнитным потоком Φ , представляет собой ЭДС самоиндукции, а поэтому находится в противофазе с подведенным к первичной обмотке напряжением U_1 .

Обычно индуктивное $j\dot{I}_1 x_1$ и активное $\dot{I}_1 r_1$ падения напряжения невелики, а поэтому с некоторым приближением можно считать, что подведенное к трансформатору напряжение U_1 уравновешивается ЭДС E_1 , т. е.

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1) \quad (5.11)$$

Для вторичной цепи трансформатора, замкнутой на нагрузку с сопротивлением Z_n , уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n \quad (5.12)$$

т. е. сумма ЭДС, наведенных во вторичной обмотке ($\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2}$), уравновешивается суммой падений напряжений ($\dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n$). Здесь r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки. Падение " напряжения на нагрузке $\dot{I}_2 Z_n$ представляет собой напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора:

$$\dot{I}_2 Z_n = \dot{U}_2 \quad (5.13)$$

Приведем уравнение (5.12) к виду, аналогичному уравнению ЭДС для первичной цепи (5.10). При этом учтем выражения (5.9) и (5.13) и получим *уравнение напряжений для вторичной цепи трансформатора*:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_n \quad (5.14)$$

Из этого уравнения следует, что напряжение на выходе нагруженного трансформатора отличается от ЭДС вторичной обмотки на значение падения напряжения во вторичной обмотке.

Лекция-6:

Уравнения магнитодвижущих сил трансформатора

Цель: Дать представление о режиме работы трансформаторов.

План:

1. Режимы холостого хода и нагрузки в однофазном трансформаторе.
2. Векторные диаграммы МДС трансформатора.
3. Уравнение МДС трансформатора.

Предположим, что трансформатор работает в режиме холостого хода (рис. 6.1, а), т. е. к зажимам его первичной обмотки подведено напряжение U_1 , а вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$). Ток I_0 в первичной обмотке при этих условиях называют *током холостого хода*.

Магнитодвижущая сила (МДС) $I_0 w_1$ созданная этим током, наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток, максимальное значение которого

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2} I_0 w_1 / R_m \quad (6.1)$$

где R_m — магнитное сопротивление магнитопровода.

При замыкании вторичной обмотки на нагрузку Z_H (рис. 6.1, б) в ней возникает ток I_2 . При этом ток в первичной обмотке увеличивается до значения I_1 .

Теперь поток Φ_{\max} создается действиями МДС $I_1 w_1$ и $I_2 w_2$

$$\Phi_{\max} = (\sqrt{2} / R_m) (I_1 w_1 + I_2 w_2) \quad (6.2)$$

Этот поток можно определить из (1.9):

$$\Phi_{\max} = E_1 / (4,44 w_1 f) \quad (6.3)$$

или, принимая во внимание, что $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, получим

$$\Phi_{\max} \approx U_1 / (4,44 f w_1) \quad (6.4)$$

Из (6.4) следует, что значение основного магнитного потока Φ практически не зависит от нагрузки трансформатора, так как напряжение U_1 неизменно. Однако следует иметь в виду, что это положение является приближенным и относится к случаям нагрузки, не превышающим номинальную. Объясняется это тем, что положение о неизменности потока Φ принято на основании уравнения $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, которое не учитывает падений напряжения в первичной цепи.

Принятое положение $\Phi = \text{const}$ позволяет приравнять выражения (6.1) и (6.2):

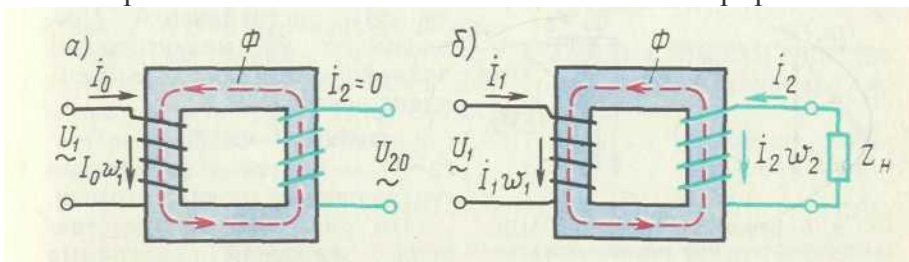


Рис. 6.1. Режимы холостого хода (а) и нагрузки (б) в однофазном трансформаторе

$$(\sqrt{2} / R_m) I_0 w_1 = (\sqrt{2} / R_m) (I_1 w_1 + I_2 w_2)$$

и получить уравнение МДС трансформатора:

$$I_0 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2 \quad (6.5)$$

Преобразуя (6.5), можно МДС первичной обмотки $I_1 w_1$ представить в виде суммы двух составляющих:

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2)$$

Составляющая $\dot{I}_0 w_1$ наводит в магнитопроводе трансформатора основной магнитный поток Φ , а составляющая $-\dot{I}_2 w_2$ уравнивает МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$.

Воздействие МДС вторичной обмотки трансформатора $I_2 w_2$ на основной магнитный поток Φ можно объяснить с помощью правила Ленца. В соответствии с этим правилом наведенная в обмотке ЭДС создает в этой обмотке такой ток, который своим магнитным действием направлен против причины, вызвавшей появление этой ЭДС. Причиной наведения ЭДС E_2 во вторичной обмотке трансформатора является основной магнитный поток Φ , поэтому ток во вторичной обмотке I_2 создает МДС $I_2 w_2$, направленную встречно потоку Φ , т. е. находящуюся с ним в противофазе и стремящуюся ослабить этот поток. Если бы обмотка w_2 была замкнута накоротко или на чисто индуктивное сопротивление и при этом не обладала активным сопротивлением, то ток I_2 отставал бы по фазе от ЭДС E_2 на угол $\psi_2=90^\circ$ и вся МДС $I_2 w_2$ оказывала бы на магнитопровод размагничивающее действие. Но в реальных условиях вторичная обмотка замкнута на сопротивление нагрузки $Z_H = r_H + jx_H$ да к тому же она сама обладает активным сопротивлением r_2 . Поэтому фазовый сдвиг тока I_2 от ЭДС E_2 отличается от 90° и с основным магнитным потоком Φ взаимодействует не вся МДС $I_2 w_2$, а лишь ее реактивная составляющая.

При активно-индуктивной нагрузке, когда $Z_H = r_H + jx_H$ и ток нагрузки I_2 отстает по фазе от ЭДС вторичной обмотки E_2 на угол ψ_2 , МДС $I_2 w_2$ своей реактивной (индуктивной) составляющей $I_{2p} w_2$ оказывает на магнитопровод трансформатора размагничивающее действие:

$$I_{2p} w_2 = I_2 w_2 \sin \psi_2$$

где $I_{2p} = I_2 \sin \psi_2$ — реактивная составляющая тока нагрузки.

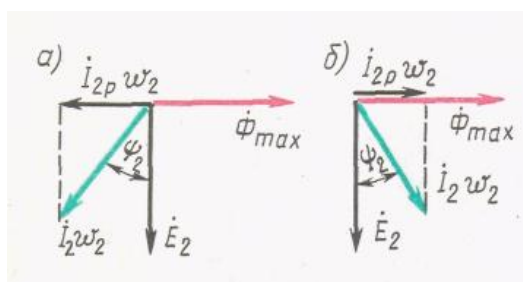


Рис. 6.2. Векторные диаграммы МДС трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

На рис.6.2, а представлена векторная диаграмма активно-индуктивной нагрузки трансформатора. На диаграмме вектор ЭДС вторичной обмотки E_2 отстает по фазе от вектора основного магнитного потока на угол 90° , а вектор МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ отстает по фазе от ЭДС E_2 на угол ψ_2 (рис. 6.2, а). Из выполненных на этой диаграмме построений видно, что реактивная (индуктивная) составляющая МДС вторичной обмотки $I_{2p} w_2$ находится в противо-фазе с основным магнитным потоком Φ_{\max} т.е. оказывает на магнитопровод трансформатора размагничивающее действие.

Анализируя работу трансформатора, необходимо отметить, что при нагрузке трансформатора в пределах номинального значения основной магнитный поток Φ изменяется весьма незначительно и принятое ранее положение $\Phi \approx \text{const}$ вполне допустимо. Происходит это потому, что МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$, реактивная составляющая которой оказывает на магнитопровод размагничивающее действие, компенсируется составляющей первичной МДС:

$$(-\dot{I}_2 w_2) = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_0 w_1 \quad (6.6)$$

При колебаниях нагрузки трансформатора I_2 изменяется МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$, а это вызывает соответствующие изменения МДС первичной обмотки $\dot{I}_1 w_1$ за счет ее составляющей $-\dot{I}_2 w_2$. Что же касается составляющей МДС холостого хода $\dot{I}_0 w_1$, то ее значение остается практически неизменным, достаточным для создания в магнитопроводе трансформатора основного магнитного потока $\Phi \approx \text{const}$.

При активно-емкостной нагрузке трансформатора, когда $Z_{\text{н}} = r_{\text{н}} - jx_{\text{н}}$ и ток нагрузки I_2 опережает по фазе ЭДС \dot{E}_2 на угол Ψ_2 , реактивная (емкостная) составляющая МДС вторичной обмотки $\dot{I}_2 w_2$ совпадает по фазе с основным магнитным потоком $\Phi_{\text{тах}}$ и подмагничивает магнитопровод трансформатора (рис. 6.2, б). В этом случае, так же как и при активно-индуктивной нагрузке, составляющая первичной МДС $-\dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_0 w_1$ компенсирует действие вторичной МДС $\dot{I}_2 w_2$.

Разделив уравнение МДС (6.5) на число витков w_1 получим

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 w_2 / w_1, \text{ или } \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \quad (6.7)$$

где $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ — ток нагрузки (вторичный ток), приведенный к числу витков первичной обмотки.

Другими словами, это такой ток, который в обмотке с числом витков w_1 создает такую же МДС, что и ток I_2 во вторичной обмотке w_2 , т.е. $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 (w_2 / w_1) w_1 = \dot{I}_2 w_2$.

Преобразовав выражение (6.7), получим уравнение токов трансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) \quad (6.8)$$

Из этого уравнения следует, что первичный ток I_1 можно рассматривать как сумму двух составляющих: составляющую I_0 , создающую МДС $I_0 w_1$ необходимую для наведения в магнитопроводе основного магнитного потока Φ , и составляющую $-\dot{I}'_2$, которая, создавая МДС $-\dot{I}'_2 w_1$, компенсирует МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ трансформатора. Такое действие составляющих первичного тока приводит к тому, что любое изменение тока нагрузки I_2 сопровождается изменением первичного тока I_1 за счет изменения его составляющей $-\dot{I}'_2$, находящейся в противофазе с током нагрузки I_2 .

Основной магнитный поток Φ является переменным, а поэтому магнитопровод трансформатора подвержен систематическому перемагничиванию. Вследствие этого в магнитопроводе трансформатора имеют место *магнитные потери от гистерезиса и вихревых токов*, наводимых переменным магнитным потоком в пластинах электротехнической стали. Мощность магнитных потерь эквивалентна активной составляющей тока х.х. Таким образом, ток х.х. имеет две составляющие: реактивную $I_{\text{ор}}$, представляющую собой намагничивающий ток, и активную $I_{\text{оа}}$, обусловленную магнитными потерями:

$$I_0 = \sqrt{I_{\text{оа}}^2 + I_{\text{ор}}^2} \quad (6.9)$$

Обычно активная составляющая тока х.х. невелика и не превышает 0,10 от I_0 , поэтому она не оказывает заметного влияния на ток х.х.

На рис.6.3 представлена векторная диаграмма, на которой показаны векторы тока х.х. I_0 и его составляющих I_{0a} и I_{0p} . Угол δ , на который вектор основного магнитного потока Φ_{max} отстает по фазе от тока I_0 , называют *углом магнитных потерь*. Нетрудно заметить, что этот угол увеличивается с ростом активной составляющей тока х.х. I_{0a} , т. е. с ростом магнитных потерь в магнитопроводе трансформатора.

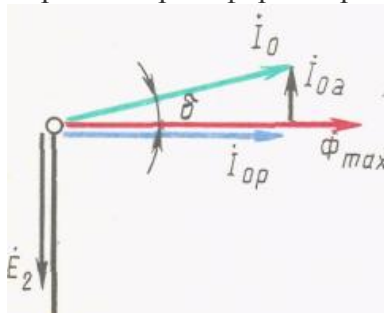


Рис.6.3. Разложение тока х.х. на составляющие.

Сила тока х.х. в трансформаторах большой и средней мощности соответственно составляет 2—10% от номинального первичного тока. Поэтому при нагрузке, близкой к номинальной, пренебрегая током I_0 и преобразуя (6.6), получим

$$I_1 / I_2 = w_1 / w_2 \quad (6.10)$$

т. е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток: ток больше в обмотке с меньшим числом витков и меньше в обмотке с большим числом витков. Поэтому обмотки НН выполняют проводом большего сечения, чем обмотки ВН, имеющие большее число витков.

Лекция-7:

Режим работы трансформатора

Цель: Изучение основные работы и их применение трансформаторов.

План:

1. Режим холостого хода трансформатора .
2. Режим нагрузки трансформатора.
3. Режим короткого замыкания трансформатора.

Режим холостого хода трансформатора

Режимом холостого хода трансформатора называют режим работы при питании одной из обмоток трансформатора от источника с переменным напряжением и при разомкнутых цепях других обмоток. Работу трансформатора в режиме холостого хода удобнее всего рассмотреть на модели однофазного трансформатора, показанной на рис. 2, а. Здесь первичная 1 и вторичная 2 обмотки для наглядности расположены на разных стержнях. К первичной обмотке подведено переменное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Такой режим работы может быть у реального трансформатора, когда он подключен к сети, а нагрузка, питаемая от его вторичной обмотки, еще не включена. По первичной обмотке трансформатора проходит ток I_0 , в то же время во вторичной обмотке тока нет так как цепь ее разомкнута. Ток I_0 , проходя по первичной обмотке, создает в магнитопроводе Φ синусоидально изменяющийся поток Φ_0 , который из-за магнитных потерь отстает по фазе от тока на *угол потерь* δ .

Очевидно, что переменный магнитный поток Φ_0 пересекает обе обмотки трансформатора. В каждой из них возникают эдс: в первичной обмотке — эдс самоиндукции E_1 во вторичной обмотке — эдс взаимной индукции E_2 . Действующие значения этих эдс зависят от числа витков в обмотках, магнитного потока Φ_0 и частоты его изменения f . Величины эдс определяют по формулам:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_{0 \max} 10^{-8} \text{ В,}$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_{2 \max} 10^{-8} \text{ В}$$

где w_1 и w_2 — числа витков в обмотках; f — частота, Гц; $\Phi_{0 \max}$ — максимальное

значение магнитного потока, Вб.

Разделив E_1 на E_2 , получим

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

Это соотношение характеризует одно из основных свойств трансформатора: *эДС в обмотках трансформатора пропорциональны количеству витков.*

Отношение числа витков $\frac{w_1}{w_2} = k$ называют *коэффициентом*

трансформации. Таким образом, если мы хотим повысить полученное от генератора напряжение в 10, 100 или 1000 раз, то необходимо так подобрать обмотки трансформатора, чтобы число витков w_2 вторичной обмотки было больше числа витков w_1 первичной обмотки соответственно в 10, 100 или 1000 раз. Тогда вторичная обмотка оказывается обмоткой высшего напряжения (ВН), а первичная — обмоткой низшего напряжения (НН). Наоборот, если необходимо снизить напряжение в линии, первичное напряжение подводят к обмотке ВН, а к обмотке НН подключают приемники электрической энергии.

Итак, любой трансформатор может работать как повышающий и как понижающий. Все зависит от того, к какой из его обмоток будет подведено напряжение для преобразования. Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия преобразуемого переменного тока, называется *первичной* (независимо от того, будет ли эта обмотка высшего или низшего напряжения). Обмотка трансформатора, от которой отводится энергия преобразованного переменного тока, называется *вторичной*.

Мы рассмотрели действие только рабочего, или основного, магнитного потока Φ_0 . Однако в трансформаторе кроме рабочего существует еще магнитный поток рассеяния Φ_{p1} . Этот магнитный поток образуется силовыми линиями, которые ответвляются от основного потока в сердечнике и замыкаются по воздуху вокруг витков обмотки w_1 . Поскольку поток рассеяния замыкается по воздуху, его величина пропорциональна току, в нашем случае — току холостого хода I_0 . Следовательно, поток рассеяния Φ_{p1} является, как и ток I_0 , переменным и, пересекая витки первичной обмотки, создает в ней ЭДС самоиндукции E_{p1}

В первичной обмотке трансформатора создаются две ЭДС самоиндукции: одна E_1 — рабочим магнитным потоком Φ_0 , другая E_{p1} — магнитным потоком рассеяния. Мы знаем, что ЭДС самоиндукции всегда направлена против приложенного напряжения и ее действие на ток в цепи равносильно добавочному сопротивлению, которое называют *индуктивным* и обозначают x .

Для поддержания неизменным тока холостого хода подводимое напряжение U_i должно расходоваться не только на преодоление активного сопротивления r обмотки, но и на создание ЭДС самоиндукции. Другими словами, приложенное напряжение U_1 складывается из нескольких частей: первая часть равна ЭДС самоиндукции E_1 от потока Φ_0 , вторая — ЭДС самоиндукции E_{p1} от потока рассеяния Φ_{p1} третья — активному падению напряжения $I_0 r_1$. В векторной форме это запишется так:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 + (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1})$$

Знак минус в последних слагаемых формулы означает, что ЭДС самоиндукции направлены противоположно напряжению U_1 . Очень удобно рассматривать эту зависимость, пользуясь векторной диаграммой. Построим векторную диаграмму холостого хода трансформатора.

Известно, что векторами можно изображать любые синусоидально изменяющиеся величины. В нашем случае такими величинами являются приложенное напряжение U_1 и магнитный поток Φ_0 . Ток I_0 благодаря магнитному насыщению стали магнитопровода, влиянию гистерезиса и вихревых токов не является синусоидальным. Однако для приближенных

расчетов он обычно заменяется эквивалентным синусоидальным током с действующим значением, соответствующим несинусоидальному току I_0 . Это позволяет изображать его вектором так же, как и другие синусоидально изменяющиеся величины. Как правило, векторы на диаграмме изображают действующие значения переменных величин.

Построение векторной диаграммы начинается с откладывания по горизонтальной оси вектора магнитного потока Φ_0 (рис. 7.1). Он создается током I_0 , который из-за магнитных потерь в стали опережает поток Φ_0 на угол δ . Поток Φ_0 , пересекая витки обмоток w_1 и w_2 , создает в них эдс E_1 и E_2 , отстающие от потока на четверть-периода. Ток I_0 создает не только главный поток Φ_0 , но и поток рассеяния Φ_{p1} пропорциональный току и совпадающий с ним по направлению. Этот магнитный поток создает в обмотке да, вокруг которой он замыкается, эдс самоиндукции \dot{E}_{p1} . Приложенное напряжение \dot{U}_1 должно компенсировать как эдс \dot{E}_1 и \dot{E}_{p1} так и активное падение напряжения $i_0 r_1$ (где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки). Откладываем на диаграмме отрезок E_1 , равный и противоположно направленный эдс \dot{E}_1 к концу вектора \dot{E}_1 пристраиваем отрезок $i_0 r_1$ совпадающий с током I_0 по направлению, а к концу вектора $i_0 r_1$ — отрезок, равный и противоположно направленный эдс \dot{E}_{p1} . Приложенное напряжение \dot{U}_1 равно геометрической сумме этих величин; на диаграмме его можно получить, соединив точку O с концом отрезка E_{p1} . Таким образом, мы построили полную векторную диаграмму холостого хода трансформатора.

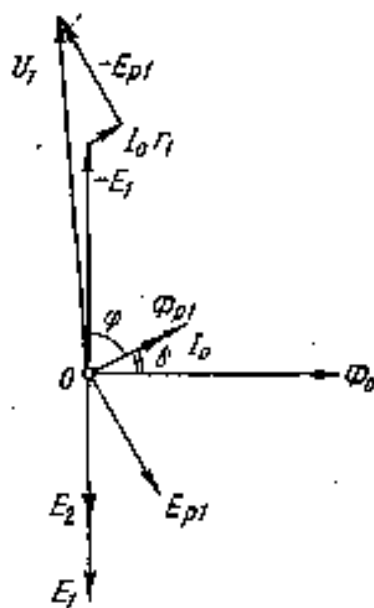


Рис. 7.1. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

В режиме холостого хода вторичная обмотка разомкнута, следовательно, в ней нет тока и она не потребляет активной мощности. В то же время оказывается, что первичная обмотка получает от генератора не только намагничивающую — реактивную мощность, которая вновь возвращается в генератор, но и определенную активную мощность. На первый взгляд кажется, что эта мощность теряется в первичной обмотке при протекании по ней тока I_0 . Однако оказывается, что измеренные при этом потери получаются во много раз больше. Куда же расходуется эта энергия? Дело в том, что в действительности только часть тока холостого хода I_0 (ее называют намагничивающим током $I_{нам}$) создает магнитный поток Φ_0 . Другая его часть (ее называют активной составляющей и обозначают I_a) зависит от потерь в стали магнитопровода, характеризуемых величиной угла потерь δ .

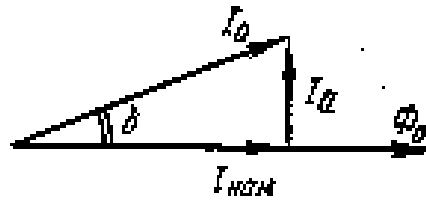


Рис.7.2. Векторная диаграмма тока холостого хода и его составляющих.

Векторная диаграмма тока холостого хода и его составляющих показана на рис. 7.2. Между током холостого хода и его составляющими существует зависимость причем намагничивающая составляющая обычно во много раз больше активной.

Режим нагрузки трансформатора

Если включить вторичную обмотку трансформатора (см. рис. 2, б) во внешнюю цепь, замкнув рубильник 3, то трансформатор перейдет из режима холостого хода в режим нагрузки. Очевидно, что с момента включения рубильника в цепи вторичной обмотки появляется ток нагрузки I_2 . Этот ток, как и любой изменяющийся ток, создает свой переменный магнитный поток Φ_2 - Большая часть отока Φ_2 замыкается по магнитопроводу трансформатора, а меньшая часть Φ_{p2} — по воздуху вокруг витков вторичной обмотки; она оставляет магнитный поток рассеяния.

Будучи индуктированным, ток вторичной обмотки по правилу Ленца противодействует причине, его вызвавшей, т. е. имеет на правление, противоположное току I_0 , поэтому и его магнитный поток Φ_2 направлен навстречу потоку Φ_0 . Другими словами, поток, созданный вторичным током, должен был бы ослаблять основной магнитный поток Φ_0 .

Однако стоит только уменьшиться потоку Φ_0 , как это вызывает уменьшение эдс самоиндукции E_x в первичной обмотке. Эдс самоиндукции, как известно, направлена против приложенного напряжения U_1 (см, рис. 7.1), и ее увеличение или уменьшение соответственно уменьшает или увеличивает первичный ток. Это легко подтверждается уравнением для напряжения первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 + (-\dot{E}_1) + (-\dot{E}_{p1})$$

Из уравнения находим

$$\dot{i}_0 = \frac{\dot{U}_1 - (-\dot{E}_1) - (-\dot{E}_{p1})}{r_1}$$

Следовательно, если допустить, что поток в магнитопроводе уменьшился, уменьшится и E_1 а это значит, что первичный ток возрастет. Увеличение первичного тока по сравнению с током холостого хода станет настолько большим, что созданный этим током дополнительный магнитный поток Φ_1 полностью скомпенсирует поток Φ_2 вторичной обмотки.

Таким образом, действуя почти противоположно друг другу, потоки Φ_1 и Φ_2 компенсируются, а результирующий поток Φ_0 индуктирует в первичной обмотке эдс E_1 почти полностью уравновешивающую напряжение U_1 . При неизменном первичном напряжении U_1 эдс E_1 также остается неизменной, следовательно, и магнитный поток Φ_0 остается практически неизменным при любых нагрузках (токах I_1 и I_2) трансформатора. Итак, мы убедились, что в трансформаторе при увеличении вторичного тока от нуля до h происходит автоматическое увеличение первичного тока от I_0 до I_1 .

Подобные же процессы происходят и при уменьшении вторичного тока. Действительно, при уменьшении тока I_2 поток Φ_2 уменьшается; одновременно уменьшается и его противодействие потоку Φ_0 , величина которого, казалось бы,

должна при этом возрасти. Однако увеличение Φ_0 вызывает увеличение эдс E_u т. е. уменьшение первичного тока. Ток I_1 уменьшается ровно настолько, чтобы создаваемый им дополнительный поток Φ_1 в точности соответствовал изменившемуся магнитному потоку Φ_2 .

Режим короткого замыкания трансформатора

Как известно, в режиме нагрузки вторичная обмотка трансформатора включается на сопротивление приемников. Во вторичной цепи устанавливается ток, пропорциональный нагрузке трансформатора. При питании большого числа приемников нередки случаи, когда нарушается изоляция соединительных проводов. Если в местах повреждения изоляции произойдет соприкосновение проводов, питающих приемники, то возникнет режим, называемый *коротким замыканием* (к. з.) участка цепи.

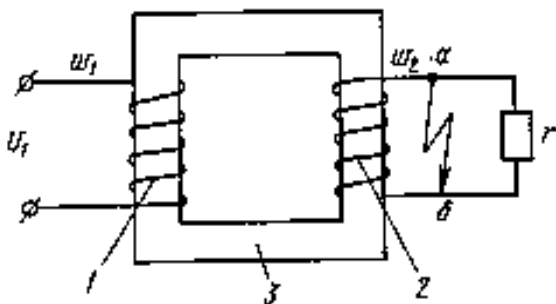


Рис. 7.3. Короткое замыкание на выводах вторичной обмотки трансформатора: 1-первичная обмотка, 2-вторичная обмотка, 3-магнитопровод

Если соединительные провода, идущие от обмотки, замкнутся где-то в точках *a* и *б*, расположенных до приемника энергии (рис. 7.3), то возникнет короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора. В этом режиме вторичная обмотка окажется замкнутой накоротко. При этом она будет продолжать получать энергию -из первичной обмотки и отдавать ее во вторичную цепь которая состоит теперь только из обмотки и части соединительных проводов.

На первый взгляд кажется, что при коротком замыкании трансформатор должен неизбежно разрушиться, так как сопротивление r_2 обмотки и соединительных проводов в десятки раз меньше сопротивления r приемника. Если допустить, что сопротивление r нагрузки хотя бы в 100 раз больше r_2 , то и ток короткого замыкания $I_{2к}$ должен быть в 100 раз больше тока I_2 при нормальной работе трансформатора. Так как первичный ток также возрастает в 100 раз ($I_1 w_1 = I_2 w_2$) > потери в обмотках трансформатора резко увеличатся, а именно в 100^2 раз ($I^2 r$), т. е. в 10000 раз. При этих условиях температура обмоток за 1—2 с достигнет $500—600^\circ \text{C}$ и они быстро сгорят.

Кроме того, при работе трансформатора между обмотками всегда существуют механические усилия, стремящиеся раздвинуть обмотку в радиальном и осевом направлениях. Эти усилия пропорциональны произведению токов $I_1 I_2$ в обмотках, и если при коротком замыкании каждый из токов I_1 и I_2 увеличится, например, в 100 раз, то и усилия увеличатся в 10000 раз. Их величина при этом достигнет сотен тонн и обмотки трансформатора должны были бы мгновенно разрушиться.

Однако на практике этого не происходит. Трансформаторы выдерживают, как правило, короткие замыкания в те весьма малые промежутки времени, пока защита не отключит их от сети. При коротком замыкании резко проявляется действие какого-то дополнительного сопротивления, ограничивающего ток короткого замыкания в обмотках. Это сопротивление связано с магнитными потоками рассеяния Φ_{p1} и Φ_{p2} , которые отходят от основного потока Φ_0 и замыкаются каждый вокруг части витков «своей»

обмотки 1 или 2 (рис. 9).

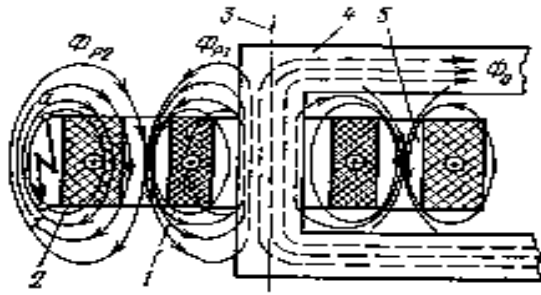


Рис. 7.4. Поток рассеяния и концентрическое расположение обмоток трансформатора:

1 — первичная обмотка, 2 — вторичная обмотка, 3 — общая ось обмоток и стержня трансформатора. 4 — магнитопровод, 5 — главный канал рассеяния.

Непосредственно измерять величину рассеяния очень трудно: слишком разнообразны пути, по которым могут замыкаться эти потоки. Поэтому на практике рассеяние оценивают по влиянию, которое оно оказывает на напряжение и токи в обмотках. Очевидно, что потоки рассеяния возрастают с увеличением тока, протекающего в обмотках. Очевидно также, что при нормальной работе трансформатора поток рассеяния составляет сравнительно небольшую долю основного потока Φ_0 . Действительно, поток рассеяния сцеплен только с частью витков, основной поток — со всеми витками. Кроме того, поток рассеяния большую часть пути вынужден проходить по воздуху, магнитная проницаемость которого принята за единицу, т. е. она в сотни раз меньше магнитной проницаемости стали, по которой замыкается поток Φ_0 .

Все это справедливо как для нормальной работы, так и для режима короткого замыкания трансформатора. Однако поскольку потоки рассеяния определяются токами в обмотках, а в режиме короткого замыкания токи увеличиваются в сотни раз, то во столько же увеличиваются и потоки Φ_p ; при этом они значительно превосходят поток Φ_0 .

Потоки рассеяния индуктируют в обмотках эдс самоиндукции E_{p1} и E_{p2} , направленные против тока. Противодействие, например, эдс E_{p2} можно считать некоторым дополнительным сопротивлением в цепи вторичной обмотки при ее коротком замыкании. Это сопротивление называют *реактивным*.

Для вторичной обмотки справедливо уравнение

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + (-\dot{E}_{p2})$$

В режиме короткого замыкания $U_2=0$ и уравнение преобразуется следующим образом:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_{2к} r_{2к} + (-\dot{E}_{p2к}), \text{ или } \dot{E}_2 = \dot{I}_{2к} r_{2к} + \dot{I}_{2к} x_{2к}$$

где индекс «к» относится к сопротивлениям и токам в режиме короткого замыкания; $I_{2к}x_{2к}$ — индуктивное падение напряжения в режиме короткого замыкания, равное по величине $E_{p2к}$; $x_{2к}$ — реактивное сопротивление вторичной обмотки.

Опыт показывает, что в зависимости от мощности трансформатора сопротивление x_2 в 5—10 раз больше r_2 . Поэтому в действительности ток $I_{2к}$ не в 100, а лишь в 10—20 раз будет больше тока I при нормальной работе трансформатора (активным сопротивлением из-за его малой величины пренебрегаем). Следовательно, в действительности потери в обмотках увеличатся не в 10 000, а только в 100—400 раз; температура обмоток за время короткого замыкания (несколько секунд) едва достигнет 150—200° С и в трансформаторе за это малое время не

возникнет никаких серьезных повреждений. Итак, благодаря рассеянию трансформатор способен сам защищаться от токов короткого замыкания.

Все рассмотренные явления происходят при коротком замыкании на зажимах (вводах) вторичной обмотки (см. точки *a* и *b* на рис. 7.3). Это — аварийный режим работы для большинства силовых трансформаторов и возникает он, конечно, не каждый день или даже не каждый год. За время работы (15—20 лет) трансформатор может иметь всего несколько столь тяжелых коротких замыканий. Тем не менее он должен быть так спроектирован и изготовлен, чтобы они не разрушили его и не привели к аварии. Надо четко представлять себе явления, происходящие в трансформаторе при коротком замыкании, сознательно собирать наиболее ответственные узлы его конструкции. В этом отношении весьма существенную роль играет одна из важнейших характеристик трансформатора — напряжение короткого замыкания.

Лекция-8:

Внешняя характеристика трансформатора

Цель: Построить внешнюю характеристику трансформатора.

План:

1. Построение и расчет напряжений при нагрузках.
2. Внешние характеристики трансформатора.

При колебаниях нагрузки трансформатора его вторичное напряжение U'_2 меняется. В этом можно убедиться, воспользовавшись упрощенной схемой замещения трансформатора, из которой следует, что $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1ном} - \dot{I}_1 Z_k$.

Изменение вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки от х.х. до номинальной является важнейшей характеристикой трансформатора и определяется выражением

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{1ном} - U'_2}{U_{1ном}} \cdot 100 \quad (8.1)$$

Для определения $\Delta U_{ном}$ воспользуемся упрощенной векторной диаграммой трансформатора, сделав на ней следующее дополнительное построение (рис. 8.1). Из точки *A* опустим перпендикуляр на продолжение вектора — U'_2 , получим точку *D*. С некоторым допущением будем считать, что отрезок \overline{BD} представляет собой разность $\dot{U}_{1ном} - \dot{U}'_2 = \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD}$, где $\overline{BF} = U_{к.а} \cos \varphi_2$; $\overline{FD} = U_{к.р} \sin \varphi_2$, тогда

$$U_{1ном} - U'_2 = U_{к.а} \cos \varphi_2 + U_{к.р} \sin \varphi_2 \quad (8.2)$$

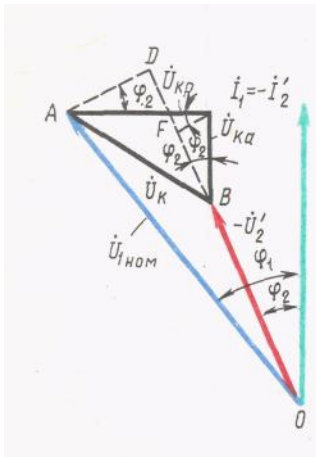


Рис. 8.1. К выводу формулы $\Delta U_{ном}$

Изменение вторичного напряжения (8.1) с учетом (8.2) примет вид

$$\Delta U_{ном} = (U_{к.а} \cos \varphi_2 + U_{к.р} \sin \varphi_2) 100 / U_{1ном} \quad (8.3)$$

Обозначим $(U_{к.а}/U_{1ном})100 = u_{к.а}$; $(U_{к.р}/U_{1ном}) 100 = u_{к.р}$, тогда выражение изменения вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки примет вид

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2 \quad (8.4)$$

Выражение (8.4) дает возможность определить изменение вторичного напряжения лишь при номинальной нагрузке трансформатора. При необходимости расчета изменения вторичного напряжения для любой нагрузки в выражение (8.4) следует ввести коэффициент нагрузки, представляющий собой относительное значение тока нагрузки $\beta = I_2 / I_{2ном}$:

$$\Delta U_{ном} = \beta (u_{к.а} \cos \varphi_2 + u_{к.р} \sin \varphi_2) \quad (8.5)$$

Из выражения (8.5) следует, что изменение вторичного напряжения ΔU зависит не только от величины нагрузки трансформатора (β), но и от характера этой нагрузки (φ_2).

На рис. 8.2, а представлен график зависимости $\Delta U = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = \text{const}$, а на рис. 8.2, б — график $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = \text{const}$. На этих графиках отрицательные значения ΔU при работе трансформатора с емкостной нагрузкой соответствуют повышению напряжения при переходе от режима х.х. к нагрузке. Имея в виду, что $u_{ка} = u_k \cos \varphi_k$, $u_{ка} = u_k \sin \varphi_k$, получим еще одно выражение для расчета изменения вторичного напряжения при любой нагрузке:

$$\Delta U_{ном} = \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2) \quad (8.6)$$

Из (8.6) следует, что наибольшее значение изменения напряжения $\Delta U = u_k$ имеет место при равенстве углов фазового сдвига $\varphi_2 = \varphi_k$, когда $\cos(\varphi_2 - \varphi_k) = 1$.

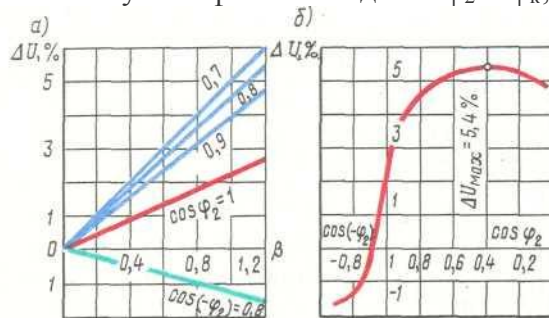


Рис.8.2. Зависимость ΔU от величины нагрузки (а) и коэффициента мощности

нагрузки (б) трехфазного трансформатора (100 кВ-А, 6,3/0,22 кВ, $u_k=5,4\%$, $\cos\varphi_k=0,4$)

Зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от нагрузки I_2 называют *внешней характеристикой*. Напомним, что в силовых трансформаторах за номинальное вторичное напряжение принимают напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме х. х. при номинальном первичном напряжении .

Вид внешней характеристики (рис. 8.3) зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos\varphi_2$). Внешнюю характеристику трансформатора можно построить по (8.6) путем расчета ΔU для разных значений β и $\cos\varphi_2$.

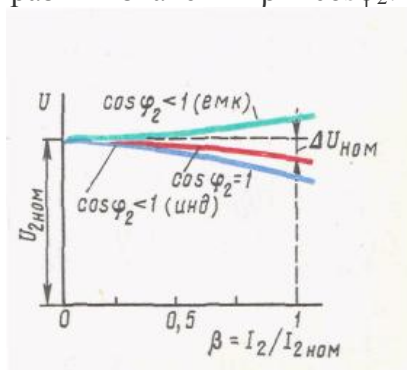


Рис. 8.3. Внешние характеристики трансформатора

Пример . Для трансформатора, данные которого приведены в примерах, определить изменение вторичного напряжения при номинальной нагрузке ($\beta=1$) с коэффициентом мощности $\cos\varphi_2=0,8$ для нагрузок двух характеров: активно-индуктивной и активно-емкостной.

Решение . Из примера 1.4 имеем: $u_{k75} = 5,4 \%$; $\cos\varphi_{k75} = 0,40$; $\sin\varphi_{k75}=0,92$. По (8.6) при $\cos\varphi_2 = 0,8$ и $\sin\varphi_2 = 0,6$ получим:

для активно-индуктивной нагрузки $\Delta U = 5,4(0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot 0,6) = 4,65 \%$;

для активно-емкостной нагрузки

$$\Delta U = 5,4[0,4 \cdot 0,8 + 0,92 \cdot (-0,6)] = -1,2 \%$$

Лекция-9

Потери и КПД трансформатора.

Цель: Рассмотреть значение потерь в трансформаторах.

План:

1. Потери холостого хода.
2. Основные потери в обмотках.
3. Коэффициент полезного действия.

Трансформатор —статическое электромагнитное устройство, в котором нет вращающихся частей и, следовательно, механических потерь. Все потери в трансформаторе — это потери активной мощности, возникающие в магнитной системе, обмотках и других частях трансформатора при различных режимах его работы. Рассмотрим эти потери.

Потери холостого хода. Мы видели, что в режиме холостого хода потребляемая трансформатором активная мощность расходуется только на покрытие потерь в стали магнитопровода и в первичной обмотке от тока холостого хода ($I_0^2 r_1$)- Потери, возникающие при этом в магнитопроводе, называют *магнитными* и обозначают P_m . А суммарные потери в режиме холостого хода (при номинальных первичном напряжении и частоте) называют *потерями холостого хода* и обозначают P_0 :

$$P = P_m + I_0^2 r_1,$$

где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки.

Особенностью потерь холостого хода являются их постоянство и независимость от режима нагрузки трансформатора. Действительно, ток холостого хода I_0 определяется геометрической суммой намагничивающей и активной составляющих (см. рис. 6). Ток $I_{\text{нам}}$ создает основной поток Φ_0 , а активная составляющая I_a определяется только потерями в стали от гистерезиса и вихревых токов. Магнитный поток Φ_0 , как мы установили, остается постоянным, как бы ни менялся режим нагрузки (токи I_1 и I_2) трансформатора. Следовательно, и ток $I_{\text{нам}}$ останется неизменным при любой нагрузке.

Активная составляющая зависит только от магнитных потерь и для данного магнитопровода, выполненного из определенной марки стали (при номинальных первичном напряжении и частоте), является также неизменной. Естественно, что и потери в первичной обмотке от протекания тока I_0 останутся неизменными.

Таким образом, *при номинальных первичном напряжении и частоте потери холостого хода P_0 постоянны и не зависят от нагрузки трансформатора.*

Основные потери в обмотках. Как мы установили, при включении нагрузки, из первичной обмотки во вторичную передается электромагнитная мощность; во вторичной обмотке появляется ток I_2 ; одновременно в первичной обмотке возникает ток I_1 который находится в прямой зависимости от нагрузки, т. е. от тока I_2 . При этом в обмотках теряется мощность, пропорциональная квадратам токов и сопротивлениям первичной и вторичной обмоток:

$$P_{\text{нагр}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$$

где I_1 и I_2 — токи нагрузки; r_1 и r_2 — сопротивления соответствующих обмоток.

Естественно, что потери $P_{\text{нагр}}$ непосредственно зависят от величины мощности, необходимой потребителю. Так, если в какой-либо момент потребляемая мощность составляет 0,7 номинальной, т. е. токи равны 0,7 своих номинальных значений, потери будут составлять $0,7^2 = 0,49$, или только половину расчетных в номинальном режиме. А если учесть, что потребность в энергии в течение суток неодинакова, то очевидны значительные колебания нагрузочных потерь в обмотках, т. е. эти потери непостоянны и полностью зависят от режима нагрузки.

Добавочные потери в обмотках. Однако I_1 и I_2 — не единственные токи, протекающие в обмотках трансформатора. Кроме токов нагрузки в обмотках трансформаторов обнаруживаются еще и другие токи, которые замыкаются внутри отдельных проводов и между параллельными ветвями обмоток; эти токи в отличие от токов нагрузки не выходят за пределы обмоток.

Токи, замыкающиеся внутри отдельных проводов, называют *вихревыми* (аналогично токам внутри пластин магнитной системы). Токи, замыкающиеся между параллельно соединенными обмотками или частями обмоток, называют *циркулирующими*. Эти токи вызваны полем рассеяния, т. е. той частью магнитного поля трансформатора, силовые линии которой сцепляются не со всеми, а только с частью витков обмоток и проходят главным образом в немагнитной среде (в воздухе, масле и т. п.).

При расчете потерь в обмотках реальный ток, неравномерно распределяющийся по сечению проводов и между параллельными ветвями обмоток, обычно рассматривают как сумму трех токов:

тока нагрузки, равномерно распределяющегося по поперечному сечению и между параллельными ветвями;

циркулирующего тока, замыкающегося внутри контура, образованного параллельными ветвями;

вихревого тока, замыкающегося только в пределах каждого провода.

При этом сумма потерь от трех указанных токов равна реальным потерям в обмотках трансформатора.

Кроме потерь в обмотках поля рассеяния вызывают потери в стенках бака, прессующих кольцах, ярмовых балках и других элементах конструкции

трансформатора. Добавочные потери снижают эффективность трансформатора; с ними ведется постоянная борьба с целью добиться их минимальной величины.

Итак, в трансформаторе различают потери активной мощности, не зависящие от нагрузки (P_0); нагрузочные ($P_{нагр}$) и добавочные ($P_{доб}$) потери, определяемые режимом работы (величиной нагрузки) трансформатора:

$$\Sigma P = P_0 + P_{нагр} + P_{доб}$$

Коэффициент полезного действия

Мощность P_1 , получаемая трансформатором из сети, расходуется на полезную мощность P_2 , передаваемую потребителю, и на суммарные потери ΣP :

$$P_1 = P_2 + \Sigma P$$

Отсюда КПД трансформатора определяется формулой

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \cdot 100$$

Полезная мощность, передаваемая потребителю, определяется как $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, где U_2 и I_2 — вторичные напряжение и ток нагрузки, а $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности, зависящий от характера нагрузки (активная, индуктивная, смешанная). При «чисто» активной нагрузке (например, осветительная электросеть) угол сдвига векторов вторичных тока и напряжения равен нулю, т. е. $\cos \varphi_2 = 1$ и $P_2 = U_2 I_2$.

Однако на практике «чисто» активная нагрузка встречается очень редко. Чаще всего приходится иметь дело со смешанной нагрузкой (например, активная и индуктивная), при которой $\cos \varphi_2$ меньше единицы и, следовательно, полезная мощность, передаваемая потребителю, меньше $U_2 I_2$.

Но при изготовлении трансформатора неизвестно, для какой нагрузки он будет использован, поэтому в табличке паспортных данных при выпуске с завода всегда указывают так называемую полную (или кажущуюся) мощность трансформатора в киловольт-амперах, т. е.

$$S = U_2 I_2 \cdot 10^{-3}, \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

где U_2 и I_2 — указанные в табличке паспортных данных вторичные токи и напряжения трансформатора.

В свою очередь получаемую трансформатором мощность можно записать как

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

где U_1 и I_1 — номинальные значения первичных напряжения и тока; φ_1 — угол сдвига векторов первичных напряжений и тока, определяемый величиной потребляемой трансформатором реактивной мощности.

Учитывая, что КПД трансформаторов обычно очень высок и достигает 99,5%, и пренебрегая на этом основании потерями, можно записать, что $P_1 = P_2$ или $U_1 I_1 = U_2 I_2$ (при близких значениях углов φ_1 и φ_2).

Разделив последнее равенство на $U_1 I_2$ получим

$$\frac{U_1 I_1}{U_1 I_2} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_2}, \text{ т. е. } \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Вспомним что напряжения (или ЭДС) обмоток пропорциональны числу витков

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}$$

Токи же в обмотках, как видно из предыдущего равенства, обратно пропорциональны напряжениям и, следовательно, числам витков:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_2}{w_1} \quad \text{или} \quad I_1 w_1 = I_2 w_2$$

т. е. намагничивающая сила (ампер-витки) первичной обмотки равна намагничивающей силе (ампер-виткам) вторичной обмотки.

Способы уменьшения потерь в трансформаторе

Мы уже видели, что кпд трансформатора достигает весьма высоких значений. Однако как бы ни был высок кпд, за время эксплуатации (20—25 лет) потери мощности, безвозвратно теряемые в трансформаторе, довольно значительны. Поэтому всемерное повышение эффективности, т.е. снижение потерь, остается одной из главных задач производства трансформаторов. Конечно, не все здесь зависит от рабочих, собирающих отдельные узлы или трансформатор в целом. Однако глубокие знания причин возникновения потерь и путей их снижения совершенно необходимы для успешного освоения и грамотного исполнения любых производственных операций при сборке.

Мы уже рассмотрели, где и почему возникают потери в трансформаторе. Посмотрим, какие пути существуют для уменьшения потерь в трансформаторах. Когда говорят о повышении кпд трансформатора, в первую очередь рассматривают возможность снижения потерь холостого хода — постоянных потерь трансформатора. Для уменьшения потерь в стали существует несколько путей. Первый — снижение величины магнитного потока Φ_0 . Однако это самый невыгодный путь, так как для создания тех же эдс потребовалось бы увеличить число витков в обмотках, т.е. израсходовать больше медных или алюминиевых проводов.

Выгоднее использовать другой путь: не уменьшая магнитного потока, применять такие электротехнические стали, которые имели бы высокое сопротивление (для уменьшения вихревых токов) и пониженные потери на гистерезис. Еще один путь — выполнение магнитной системы из тонких изолированных пластин, что резко уменьшает потери от вихревых токов. Широкое использование конструкций магнитопроводов с косыми стыками пластин и без отверстия в активной стали также снижает потери холостого хода.

Однако для сборщика трансформатора особенно важно знать, как зависят потери в стали от качества выполнения им соответствующих производственных операций. Применяемая сейчас практически для всех трансформаторов холоднокатаная сталь весьма чувствительна к механическим воздействиям. Даже при резке и штамповке пластин происходит ухудшение магнитных свойств стали в зоне реза. Удары по стали, перегибы пластин, наклеп легко нарушают ориентацию кристаллов, увеличивают удельные потери и намагничивающую мощность. До сборки магнитопровода пластины стали обязательно проходят высокотемпературный отжиг в печах, восстанавливающий магнитные характеристики стали.

Однако при сборке магнитопровода, расшихтовке и повторной шихтовке его верхнего ярма сталь очень легко может вновь повредиться. Именно на этих операциях сборщик должен проявить особую осторожность и аккуратность при обращении с пластинами стали, не допуская механических повреждений. Чем осторожнее обращается сборщик с пластинами, тем меньше потери холостого хода в собранном трансформаторе.

Опыт показывает, что удельные потери в стали трансформатора в 1,3—1,5 раза выше, чем в исходном материале. В значительной степени это зависит от качества сборки. При хорошей сборке потери в магнитной системе трансформатора превышают потери в стали до начала ее механической обработки лишь на 25—30%.

Снижение потерь в обмотках от токов нагрузки трансформатора проще всего получить, увеличив сечение обмоточных проводов. Однако экономически это невыгодно, так как при этом неизбежно увеличиваются размеры не только обмоток, но и

магнитопровода, т.е. увеличиваются масса активных материалов и потери холостого хода в трансформаторе. Поэтому размеры обмоточных проводов увеличивают редко, чаще всего, если этого требует механическая прочность обмоток.

Существуют и другие пути снижения потерь в обмотках. Мы уже знаем, что кроме нагрузочных в обмотках существуют добавочные потери. Эти потери не только уменьшают КПД трансформатора, снижая его эффективность, но и часто концентрируются в отдельных элементах конструкции трансформатора, вызывая их опасный нагрев. Такие нагревы возникают обычно в верхних и нижних витках (катушках) обмоток, в прессующих кольцах, яр-мовах балках и баке трансформатора.

Потоки рассеяния весьма «чувствительны» к магнитной симметрии обмоток. Достаточно даже незначительного смещения обмоток относительно друг друга, чтобы резко увеличить рассеяние. Такие смещения особенно часто происходят по высоте: одна из обмоток может быть неплотно насажена или несколько отличаться по высоте от другой. Это практически всегда нарушает магнитную симметрию и увеличивает рассеяние. Поэтому при насадке (монтаже) обмоток сборщик должен тщательно следить за их высотами, не допуская смещения обмоток, за равномерностью каналов между ними, за их строго концентрическим расположением на сердечнике.

Нарушение заданных промежутков между обмотками, отводами и баком, как правило, изменяет направление потоков рассеяния и нередко может вызвать опасные местные нагревы в баке или полке ярмовой балки.

Потери мощности и КПД трансформатора.

Трансформаторы нормируются не по активной, а по полной мощности, т.к. размеры трансформаторов при данной частоте определяется в основном номинальными напряжением и током. Номинальный, т.е. допустимый по нагреву, ток определяет собой сечение проводов обмоток трансформатора. От напряжения, приходящегося на один виток, зависят магнитный поток и размеры магнитопровода. Поэтому основной паспортной величиной является номинальная полная мощность $S = U I$. Потери энергии при трансформации бывают постоянные и переменные, зависящие от нагрузки. Постоянные потери мощности состоят из потерь в стальном магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. Потери в стали определяются значением потока и частотой и не зависят от нагрузки, т.к. при $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$ амплитуда потока неизменна. Потери в стали можно принять равными активной мощности, потребляемой трансформатором на х.х.

Переменные потери - это потери в меди обмоток:

$$p_M = p_{1M} + p_{2M} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2,$$

т.к. $I_2 \approx I_1$ (при $I_0 \approx 0$), то

$$p_M = (r_1 + r_2) I_1^2 = r_K I_1^2.$$

Отсюда вытекает, что потери в обмотках при $I_1 = I_{1\text{ном}}$ равны активной мощности в опыте к.з. для $I_{1\text{ном}}$. КПД трансформатора

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - p_c - p_M) / P_1 = 1 - (p_c + p_M) / P_1,$$

где P_1 и P_2 - потребляемая и отдаваемая активная мощность. На х.х. $P_2 = 0$ и

$\eta = 0$. С ростом P_2 КПД растет, достигает максимального значения и затем начинает уменьшаться. Уменьшение при больших нагрузках объясняется сильным увеличением потерь в обмотках, т.к. они растут пропорционально квадрату тока. Максимум КПД имеет место при $p_c = p_M$. Трансформатор конструируется так, чтобы η_{max} достигалось при наиболее вероятной нагрузке, равной (0,5-0,75) $P_{2\text{ном}}$. $\eta_{\text{ном}}$ при $P_2 = P_{2\text{ном}}$ близко к максимальному η и достигает в больших трансформаторах 98-99%.

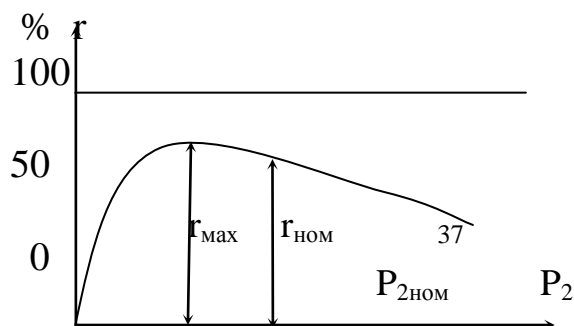


Рис. 32. КПД трансформатора в зависимости от нагрузки.

Лекция-10:

Группы соединения обмоток трансформатора

Цель: Ознакомить студентов со схемами соединений обмоток трансформаторов.

План:

1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов.
2. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы.
3. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

До сих пор при построении векторных диаграмм трансформатора считалось, что ЭДС фазы обмотки ВН \dot{E}_{AX} и обмотки НН \dot{E}_{ax} совпадают по фазе. Но это справедливо лишь при условии намотки первичной и вторичной обмоток трансформатора в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих обмоток, как показано на рис. 2.1, а. Если же в трансформаторе изменить направление обмотки НН или же переставить обозначения ее выводов, то ЭДС \dot{E}_{ax} окажется сдвинутой по фазе относительно ЭДС \dot{E}_{AX} на 180° (рис. 10.1, б). Сдвиг фаз между ЭДС \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} принято выражать группой соединения. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Угол смещения вектора линейной ЭДС обмотки НН по отношению к вектору линейной ЭДС обмотки ВН определяют умножением числа, обозначающего группу соединения, на 30° . Угол смещения отсчитывают от вектора ЭДС обмотки ВН по часовой стрелке до вектора ЭДС обмотки НН. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор ЭДС НН отстает по фазе от вектора ЭДС ВН на угол $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор ЭДС обмотки ВН соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН — часовой стрелке (рис. 10.2). При этом необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} , эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12). Кроме того, следует помнить, что за положительное направление вращения векторов ЭДС принято их вращение против часовой стрелки.

Таким образом, в однофазном трансформаторе возможны лишь две группы соединения: группа 0, соответствующая совпадению по фазе \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} , группа 6, соответствующая сдвигу фаз между \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} на 180° . Из этих групп ГОСТ предусматривает лишь группу 0, она обозначается I/I—0.

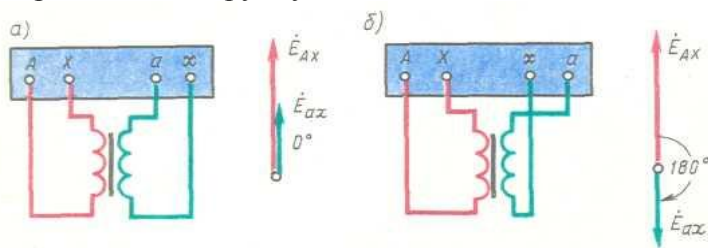


Рис. 10.1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:
а — группа I/I — 0; б — группа I/I — 6



Рис. 10.2. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения.

Применением разных способов соединения обмоток в *трехфазных* трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда — звезда» (рис. 10.3, а). Векторные диаграммы ЭДС показывают, что сдвиг между линейными ЭДС \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} в данном случае равен нулю. В этом можно убедиться, совместив точки *A* и *a* при наложении векторных диаграмм ЭДС обмоток ВН и НН. Следовательно, при указанных схемах соединения обмоток имеет место группа 0; обозначается Y/Y—0. Если же на стороне НН в нулевую точку соединить зажимы *a*, *b* и *c*, а снимать ЭДС с зажимов *x*, *y* и *z*, то ЭДС \dot{E}_{ab} изменит фазу на 180° и трансформатор будет принадлежать группе 6 (Y/Y — 6) (рис. 10.3, б).

При соединении обмоток «звезда — треугольник», показанном на рис. 10.4, а, имеет место группа 11 (Y/Δ —11). Если же поменять местами начала и концы фазных обмоток НН, то вектор \dot{E}_{ab} повернется на 180° и трансформатор будет относиться к группе 5 (Y/Δ —5) (рис. 10.4, б).

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например Y/Y и Δ/Δ, получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах, например Y/Δ или Δ/Y, — нечетные. Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) называют *основными*. Из каждой основной группы соединения методом круговой перемаркировки выводов на одной стороне трансформатора, например на стороне НН (без изменения схемы соединения), можно получить по две производные группы. Например, если в трансформаторе с группой соединения Y/Y—0 (рис.10.3, а) выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности *abc* принять последовательность *cab*, то вектор ЭДС \dot{E}_{ab} повернется на 120°, при этом получим группу соединения Y/Y—4. Если же выводы обмоток НН перемаркировать в последовательность *bca*, то вектор \dot{E}_{ab} повернется еще на 120°, а всего на 240°; получим группу Y/Y—8.

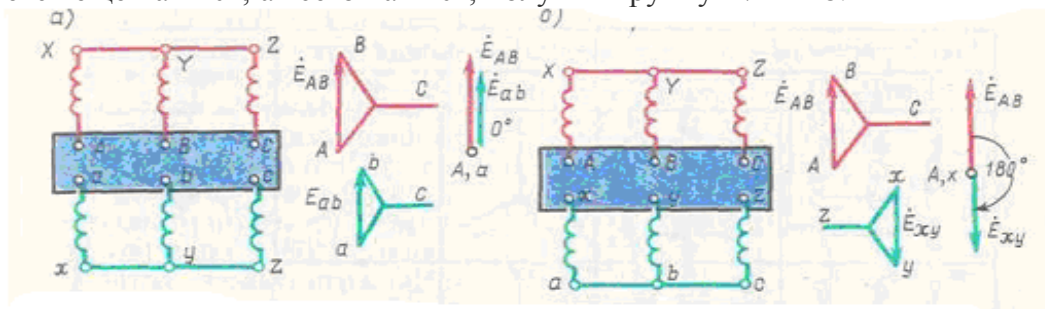
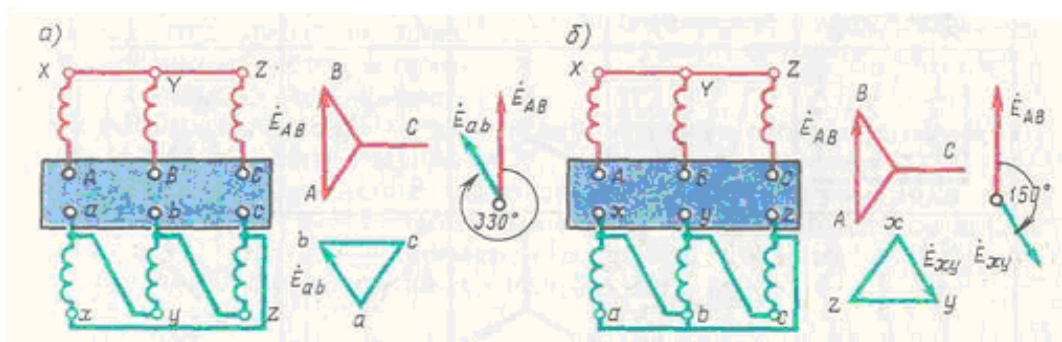


Рис.10.3.Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а-для группы Y/Y—0; б-для группы Y/Y-6



**Рис. 10.4. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы:
 а — для группы У/Д — 11; б — для группы У/Д — 5**

Аналогично от основной группы 6 путем круговой перемаркировки получают производные группы 10 и 2, от основной группы 11 — производные группы 3 и 7, от основной группы 5 — производные группы 9 и 1.

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений. Однако не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах. ГОСТ определяет схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения (рис. 10.5).

Соединяя обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник, можно получить практически любой угол сдвига фаз между ЭДС обмоток ВН и НН. Этого достигают разделением обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях, а следовательно, и с различным значением угла. При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки, но наиболее распространены методы фазометра и вольтметра.

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	

Рис. 10.5. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Лекция-11:

Параллельная работа трансформатора

Цель: Ознакомить студентов с параллельной работой и условиями работы трансформаторов.

План:

1. Параллельная работа двухобмоточных трансформаторов.
2. Условия работы трансформаторов.
3. Распределение нагрузок.

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис. 11.1, а).

Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта. Это также целесообразно при работе трансформаторной подстанции с переменным графиком нагрузки, например, когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении мощности нагрузки можно отключить один или несколько трансформаторов для того, чтобы нагрузка трансформаторов, оставшихся включенными, была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и $\cos\varphi_2$) будут достаточно высокими.

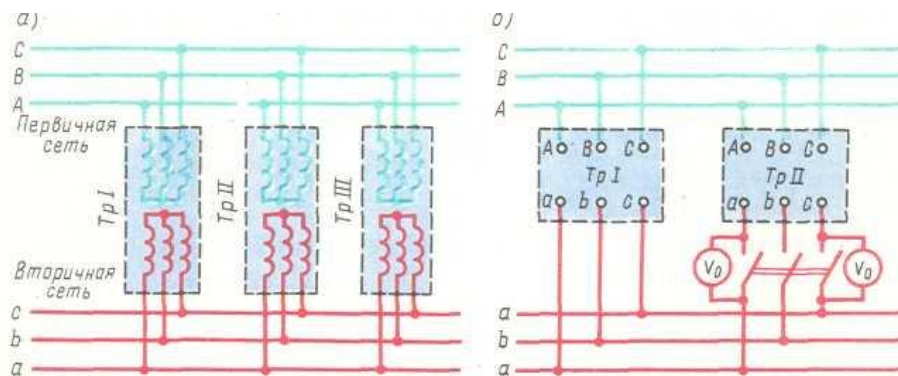


Рис. 11.1. Включение трансформаторов на параллельную работу

Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях:

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны. Другими словами, трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации: $k_1 = k_{11} = k_{111} = \dots$. При несоблюдении этого условия, даже в режиме х. х., между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнительный ток, обусловленный разностью вторичных напряжений трансформаторов (рис.11.2, а):

$$i_{ур} = \Delta \dot{U} / (Z_{k1} + Z_{k11}) \quad (11.1)$$

где Z_{k1} и Z_{k2} — внутренние сопротивления трансформаторов.

При нагрузке трансформаторов уравнительный ток накладывается на нагрузочный. При этом трансформатор с более высоким вторичным напряжением х.х. (с меньшим коэффициентом трансформации) оказывается перегруженным, а трансформатор равной мощности, но с большим коэффициентом трансформации — недогруженным. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то приходится снижать общую нагрузку. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов становится практически невозможной.

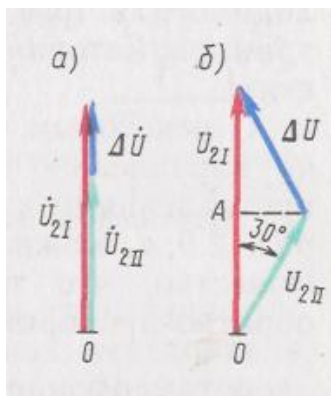


Рис.11.2.Появление напряжения ΔU при несоблюдении условий включения трансформаторов на параллельную работу

Однако ГОСТ допускает включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если разница коэффициентов трансформации не превышает $\pm 0,5\%$ их среднего значения:

$$\Delta k = [(k_1 - k_{11}) / k] 100 \% \leq 0,5 \% \quad (11.2)$$

где $k = \sqrt{k_1 k_{11}}$ — среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения. При несоблюдении этого условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга и в цепи трансформаторов

появится разностное напряжение ΔU , под действием которого возникнет значительный уравнивающий ток. Так, если включить на параллельную работу два трансформатора с одинаковыми коэффициентами трансформации, но один из них принадлежит к нулевой ($Y/Y-0$), а другой — к одиннадцатой ($Y/\Delta-11$) группам соединения, то линейное напряжение U_{21} первого трансформатора будет больше линейного напряжения U_{211} второго трансформатора в $\sqrt{3}$ раз $U_{21}/U_{211}=\sqrt{3}$. Кроме того, векторы этих напряжений окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга на угол 30° (рис. 11.2, б). В этих условиях во вторичной цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU . Для определения величины ΔU воспользуемся построениями рис. 11.2,б: отрезок OA равен $\sqrt{3} U_{11}/2$ или, учитывая, что $U_{211}=U_{21}/\sqrt{3}$, получим $OA=0,5U_{21}$. Следовательно, треугольник, образованный векторами напряжений равнобедренный, а поэтому разностное напряжение $\Delta U=U_{211}$. Появление такого разностного напряжения привело бы к возникновению во вторичной цепи трансформаторов уравнивающего тока, в 15—20 раз превышающего номинальный ток нагрузки, т.е. возникла бы аварийная ситуация. Величина ΔU становится еще большей, если трансформаторы принадлежат нулевой и шестой группам соединения ($\Delta U=2U_2$), так как в этом случае векторы линейных вторичных напряжений окажутся в противофазе.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к. з.: $u_{k1}=u_{k11}=u_{k111}\dots$. Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

С некоторым приближением, пренебрегая токами х.х., можно параллельно включенные трансформаторы заменить их сопротивлениями к.з. Z_{k1} и Z_{k11} и тогда от схемы, показанной на рис.11.3, а, можно перейти к эквивалентной схеме (рис. 11.3, б). Известно, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям:

$$I_1/I_{11} = Z_{k11}/Z_{k1}. \quad (11.3)$$

Умножим обе части равенства (11.3) на $I_{11}U_{ном}/(I_{1ном}U_{ном})$, левую часть — на $U_{ном}/U_{ном}$ а правую часть — на $100/100$, получим

$$\frac{I_1 I_{11} U_{ном} U_{ном}}{I_{11} I_{1ном} U_{ном} U_{ном}} = \frac{Z_{k11} I_{11} U_{ном} 100}{Z_{k1} I_{1ном} U_{ном} 100}.$$

Затем преобразуем полученное равенство, имея в виду следующее: $I_{1ном}U_{ном}=S_1$ и $I_{11ном}U_{ном}=S_{11}$ — фактическая нагрузка первого и второго трансформаторов соответственно, В.А; $I_{1ном}U_{ном}=S_{1ном}$ и $I_{11ном}U_{ном}=S_{11ном}$ — номинальные мощности этих трансформаторов, В.А; $(I_{1ном}Z_{k1}/U_{ном})100=u_{1k}$ и $(I_{11ном}Z_{k11}/U_{ном})100=u_{11k}$ — напряжения к.з. трансформаторов, %. В результате получим

$$(11.4) \text{ или}$$

$$(S_1/S_{1ном}) : (S_{11}/S_{11ном}) = u_{k11}/u_{k1},$$

$$S'_1/S'_i = u_{k11}/u_{k1}, \quad (11.5)$$

где $S'_1 = S_1 / S_{1ном}$, $S'_{11} = S_{11} / S_{11ном}$ — соответственно относительные мощности (нагрузки) первого и второго трансформаторов.

Из соотношения (11.5) следует, что относительные *мощности (нагрузки) параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям к.з.* Другими словами, при неравенстве напряжений к.з. параллельно работающих трансформаторов больше нагружается трансформатор с меньшим напряжением к. з. В итоге это ведет к перегрузке одного трансформатора (с меньшим u_k) и недогрузке другого (с большим u_k). Чтобы не допустить перегрузки трансформатора, необходимо снизить общую нагрузку. Таким образом, неравенство напряжений к.з. не допускает полного использования параллельно работающих трансформаторов по мощности.

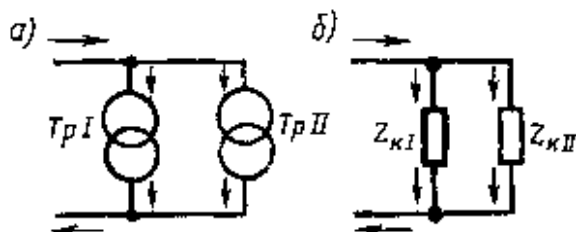


Рис. 11.3. К понятию о распределении нагрузки при параллельной работе трансформаторов

Учитывая, что практически не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми напряжениями к. з., ГОСТ допускает включение трансформаторов на параллельную работу при разнице напряжений к. з. не более чем 10% от их среднего арифметического значения. Разница в напряжениях к.з. трансформаторов тем больше, чем больше эти трансформаторы отличаются друг от друга по мощности. Поэтому » ГОСТ рекомендует, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных параллельно, было не более чем 3:1.

Помимо соблюдения указанных трех условий необходимо перед включением трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов.

Соблюдение всех перечисленных условий проверяется *фазировкой трансформаторов*, сущность которой состоит в том, что одну пару, противоположно расположенных зажимов на рубильнике (см. рис. 11.1, б) соединяют проводом и вольтметром V_0 (нулевой вольтметр) измеряют напряжение между оставшимися несоединенными парами зажимов рубильника. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра V_0 равны нулю. В этом случае трансформаторы можно подключать на параллельную работу. Если вольтметр V_0 покажет некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено. Необходимо устранить это нарушение и вновь провести фазировку трансформаторов. Следует отметить, что при нарушении порядка следования фаз вольтметр V_0 покажет двойное линейное напряжение. Это необходимо учитывать при подборе вольтметра, предел измерения которого должен быть не менее двойного линейного напряжения на вторичной стороне трансформаторов.

Общая нагрузка всех включенных на параллельную работу трансформаторов S не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов: $S \leq \sum S_{номx}$

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется следующим образом:

$$S_x = S \cdot S_{номx} / [u_{кx} \sum (S_{номx} / u_{кx})] \quad (11.6)$$

где S_x — нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, $кВ \cdot А$; S — общая нагрузка всей параллельной группы, $кВ \cdot А$; $u_{кx}$ — напряжение к. з. данного трансформатора, %; $S_{номx}$ — номинальная мощность данного трансформатора, $кВ \cdot А$.

Лекция-12: Трехобмоточные трансформаторы

Цель: Изучить принцип работы и устройства трехобмоточного трансформатора.

План:

1. Применение трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой.
2. Значение и применение трехобмоточного трансформатора.

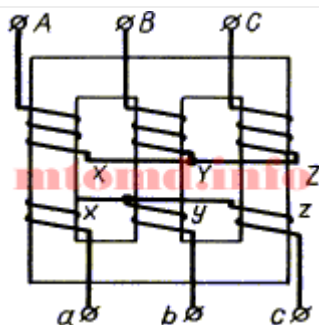
Для трансформирования энергии в трехфазных системах используют либо группу из трех однофазных трансформаторов (именно так и работают мощные однофазные трансформаторы, устанавливаемые на крупных электростанциях), у которых первичные и вторичные обмотки соединяются звездой или треугольником, либо один трехфазный трансформатор с общим магнитопроводом.

Трехфазные трансформаторы могут иметь различные схемы соединения первичных и вторичных обмоток. Все начала первичных обмоток трансформатора обозначают большими буквами: А, В, С; начала вторичных обмоток — малыми буквами: а, б, с. Концы обмоток обозначаются соответственно: X, Y, Z и x, y, z. Зажим выведенной нулевой точки при соединении звездой обозначают буквой O.

Наибольшее распространение имеют соединения обмоток по схеме «звезда» (Y) и «треугольник» (D), причем первичные и вторичные обмотки могут иметь как одинаковые, так и различные схемы. Если при соединении обмоток «звездой» нулевая точка выводится, то такое соединение называют «звезда с нулем» (Yo).

Самым простым и дешевым из них является соединение обеих обмоток трансформатора звездой (Y/Y), при котором каждая из обмоток и ее изоляция (при глухом заземлении нейтральной точки) должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток; так как число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то, следовательно, соединение обмоток звездой требует в каждой из обмоток меньшего количества витков, но большего сечения проводников с изоляцией, рассчитанной лишь на фазное напряжение.

Схема трехфазного трансформатора



На рисунке приведено **устройство трехфазного трансформатора** при соединении обеих обмоток звездой (Y/Y). Такое соединение широко применяют для трансформаторов небольшой и средней мощности (примерно до 1800 кВ-А). Соединение звездой является наиболее желательным для высокого напряжения, так как при нем изоляция обмоток рассчитывается лишь на фазное напряжение. Чем выше напряжение и меньше ток, тем относительно дороже обходится соединение обмоток треугольником.

Соединение обмоток треугольником конструктивно удобнее при больших токах. По этой причине соединение Y/D широко применяется для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не требуется нейтрального провода.

При трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений $U_{1\phi}/U_{2\phi}$ всегда приближенно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток w_1/w_2 ; что же касается линейных напряжений, то их отношение зависит от способа соединения обмоток трансформатора. При одинаковом способе соединения (Y/Y или D/D) отношение линейных напряжений также равно коэффициенту трансформации. Однако при различном способе соединения (Y/D или D/Y) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в $\sqrt{3}$ раз. Это дает

возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением способа соединения его обмоток

В трехобмоточном трансформаторе на каждую трансформируемую фазу приходится три обмотки. 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.

Существуют трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками.

Рассмотрим основные уравнения, особенности работы и область применения трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой, имеющего наибольшее распространение (рис. 12.1, а). 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 \dot{E}_2 и \dot{E}_3 . Аналогично двухобмоточному трансформатору запишем для трехобмоточного трансформатора уравнение МДС:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 = \dot{I}_0 w_1 \quad (12.1)$$

Разделив (12.1) на w_1 , получим уравнения токов:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0 \quad (12.2)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / k_{12}; \dot{I}'_3 = \dot{I}_3 / k_{13} \quad (12.3)$$

Здесь $k_{12} = w_1/w_2$ — коэффициент трансформации между обмотками w_1 и w_2 ; $k_{13} = w_1/w_3$ — коэффициент трансформации между обмотками w_1 и w_3 .

Пренебрегая током х.х. \dot{I}_0 , получим упрощенное уравнение токов трехобмоточного трансформатора:

$$\dot{I}_1 \approx -(\dot{I}'_2 + \dot{I}'_3) \quad (12.4)$$

Экономическую целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов можно объяснить тем, что, как это следует из (12.4), первичный ток трехобмоточного трансформатора равен не арифметической, а геометрической сумме приведенных вторичных токов. Учитывая это равенство, а также и то, что нагрузка на вторичные обмотки достигает номинального значения не одновременно, первичную обмотку трехобмоточного трансформатора рассчитывают на мощность, меньшую арифметической суммы номинальных мощностей обеих вторичных обмоток. Еще одно достоинство трехобмоточного трансформатора состоит в том, что он фактически заменяет два двухобмоточных.

Обмотки трехобмоточного трансформатора располагают на стержне обычно концентрически (рис. 12.1,б), при этом целесообразнее двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной, тогда первичной является обмотка 2, а вторичными — обмотки 1 и 3. В этом случае взаимное влияние вторичных обмоток заметно ослабевает.

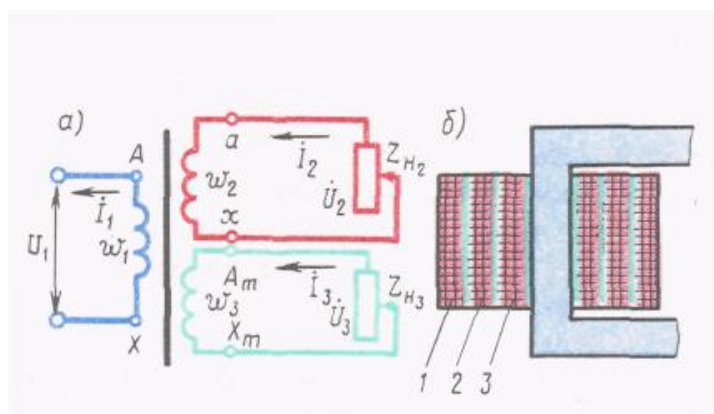


Рис. 12.1. Трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками

На крупных электростанциях иногда применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками (к каждой из них подключается генератор) и одной вторичной (от нее отходит линия электропередачи). Обычно это установки большой мощности, а поэтому в них применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трансформаторную группу.

Лекция-13:

Автотрансформаторы

Цель: Подробно изучить и рассмотреть принцип работы автотрансформатора.

План:

1. Достоинства и недостатки автотрансформаторов. Мощности автотрансформатора.
2. Коэффициент трансформации автотрансформатора.
3. Трехфазный автотрансформатор.

Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и электрическая связь. Обмотки обычного трансформатора можно включить по схеме автотрансформатора, для чего выход X обмотки w_{AX} соединяют с выводом a обмотки w_{ax} (рис. 12.2). Если выводы AX подключить к сети, а к выводам ax подключить нагрузку Z_H , то получим п о н и ж а ю щ и й автотрансформатор. Если же выводы ax подключить к сети, а к выводам Ax подключить нагрузку Z_H то получим п о в ы ш а ю щ и й автотрансформатор.

Рассмотрим подробнее работу понижающего автотрансформатора. Обмотка w_{ax} одновременно является частью первичной обмотки и вторичной обмоткой. В этой обмотке проходит ток I_{12} . Для точки a запишем уравнение токов:

$$I_2 = I_1 + I_{12} \quad (13.1)$$

или

$$I_{12} = I_2 - I_1 \quad (13.2)$$

т. е. по виткам w_{ax} проходит ток I_{12} , равный разности вторичного I_2 и первичного I_1 токов. Если коэффициент трансформации автотрансформатора $k_a = w_{AX}/w_{ax}$ немногим больше единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить витки w_{ax} проводом уменьшенного сечения.

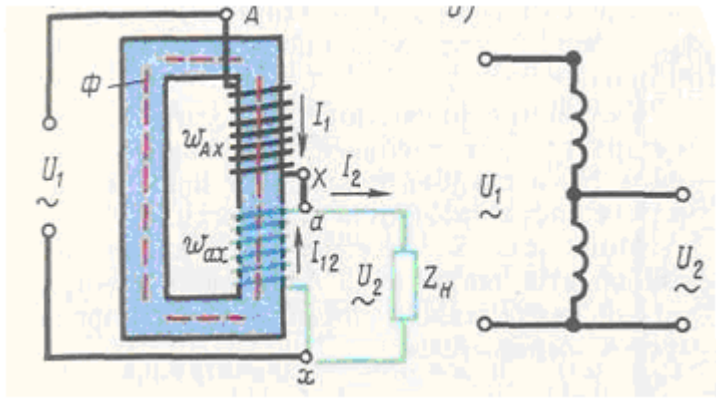


Рис.13.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы однофазного понижающего автотрансформатора

Введем понятие *проходной мощности* автотрансформатора, представляющей собой всю передаваемую мощность $S_{пр} = U_2 I_2$ из первичной цепи во вторичную. Кроме того, различают еще *расчетную мощность* $S_{расч}$, представляющую собой мощность, передаваемую из первичной во вторичную цепь магнитным полем. Расчетной эту мощность называют потому, что размеры и вес трансформатора зависят от величины этой мощности. В трансформаторе вся проходная мощность является расчетной, так как между обмотками трансформатора существует лишь магнитная связь. В автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями помимо магнитной связи существует еще и электрическая. Поэтому расчетная мощность составляет лишь часть проходной мощности, другая ее часть передается между цепями без участия магнитного поля. В подтверждение этого разложим проходную мощность автотрансформатора $S_{пр} = I_2 U_2$ на составляющие. Воспользуемся для этого выражением (13.1). Подставив это выражение в формулу проходной мощности, получим

$$S_{пр} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_{расч} \quad (13.3)$$

Здесь $S_3 = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную благодаря электрической связи между этими цепями.

Таким образом, расчетная мощность в автотрансформаторе $S_{расч} = U_2 I_{12}$ составляет лишь часть проходной. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности.

Средняя длина витка обмотки также становится меньше; следовательно, уменьшается расход меди на выполнение обмотки I автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и I электрические потери, а КПД автотрансформатора повышается. V Таким образом автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и стоимостью. У автотрансформаторов большой мощности КПД достигает 99,7%.

Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем больше мощность S_3 , а следовательно, чем меньше расчетная часть проходной мощности.



Рис.13.2. Зависимость $S_3/S_{пр}$ от коэффициента трансформации автотрансформатора

Мощность S_3 , передаваемая из первичной во вторичную цепь благодаря электрической связи между этими цепями, определяется выражением

$$S_3 = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{пр} / k_A \quad (3.8)$$

т. е. значение мощности S_3 обратно пропорционально коэффициенту трансформации автотрансформатора k_A

Из графика (рис.13.2) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициента трансформации. Например, при $k_A=1$ вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ($S_3/S_{пр} = 1$)

Наиболее целесообразно применение автотрансформаторов с коэффициентом трансформации $k_A \leq 2$. При большом значении коэффициента трансформации преобладающее значение имеют недостатки автотрансформатора, состоящие в следующем:

1. Большие токи к.з. в случаях понижающего автотрансформатора: при замыкании точек a и x (см. рис. 13.1, a) напряжение U_1 подводится лишь к небольшой части витков Aa , которые обладают очень малым сопротивлением к. з. В этом случае автотрансформаторы не могут защитить сами себя от разрушающего действия токов к. з., поэтому токи к. з. должны ограничиваться сопротивлением других элементов электрической установки, включаемых в цепь автотрансформатора.

2. Электрическая связь стороны ВН со стороной НН; это требует усиленной электрической изоляции всей обмотки. *

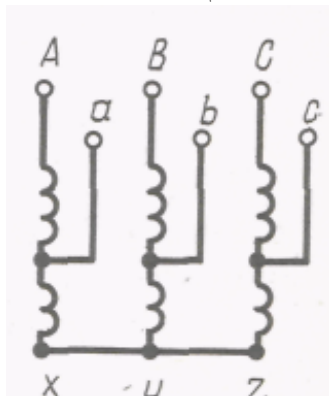


Рис.13.3. Трехфазный автотрансформатор

3. При использовании автотрансформаторов в схемах понижения напряжения между проводами сети НН и землей возникает напряжение, приблизительно равное напряжению между проводом и землей на стороне ВН.

4. В целях обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала нельзя применять автотрансформаторы для понижения напряжения сетей ВН до значений НН, подводимого непосредственно к потребителям.

Силовые автотрансформаторы широко применяют в линиях передачи и

распределения электроэнергии для связи сетей смежных напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и др. Такие автотрансформаторы обычно выполняют на большие мощности (до 500 МВ·А и выше). Обмотки трехфазных автотрансформаторов обычно соединяют в звезду (рис. 13.3).

Автотрансформаторы применяют в электроприводе переменного тока для уменьшения пусковых токов двигателей значительной мощности, а также для регулировки режимов работы электрометаллургических печей. Автотрансформаторы малой мощности применяют в устройствах радио, связи и автоматики.

Широко распространены *автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации*. В этом случае автотрансформатор снабжают устройством, позволяющим регулировать значение вторичного напряжения путем изменения числа витков w_{ax} . Осуществляется это либо переключателем, либо с помощью скользящего контакта (щетki), перемещаемого непосредственно по зачищенным от изоляции виткам обмотки. Такие автотрансформаторы, называемые регуляторами напряжения, могут быть однофазными и трехфазными.

Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства трехобмоточных трансформаторов?
2. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформаторов.
3. Зависят ли достоинства автотрансформатора от коэффициента трансформации?
4. Объясните устройство автотрансформатора с переменным коэффициентом трансформации.

Лекция-14

Специальные трансформаторы

Цель: Изучить и рассмотреть принцип работы специального трансформатора.

План:

1. Трансформаторы для выпрямительных установок
2. Сварочные трансформаторы
3. Трансформаторы тока и напряжения

Трансформаторы для выпрямительных установок

Во вторичные обмотки этих трансформаторов включены вентили — устройства, обладающие односторонней проводимостью.

Рассмотрим работу однофазного трансформатора в схеме *однополупериодного выпрямления* (рис. 5.3, а). Ток во вторичной обмотке этого трансформатора i_2 является пульсирующим, так как он создается только положительными полуволнами вторичного напряжения U_2 (рис. 5.3, б). Этот пульсирующий ток имеет две составляющие: постоянную

$$I_d = (\sqrt{2} / \pi)(U_2 / R_n) \quad (5.2)$$

и переменную

$$i_{nep} = i_2 - I_d \quad (5.3)$$

Пренебрегая током х.х. и учитывая (5.3), уравнение МДС рассматриваемого трансформатора можно записать в виде

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_1 w_1 + i_{nep} w_2 + I_d w_2 = 0. \quad (5.4)$$

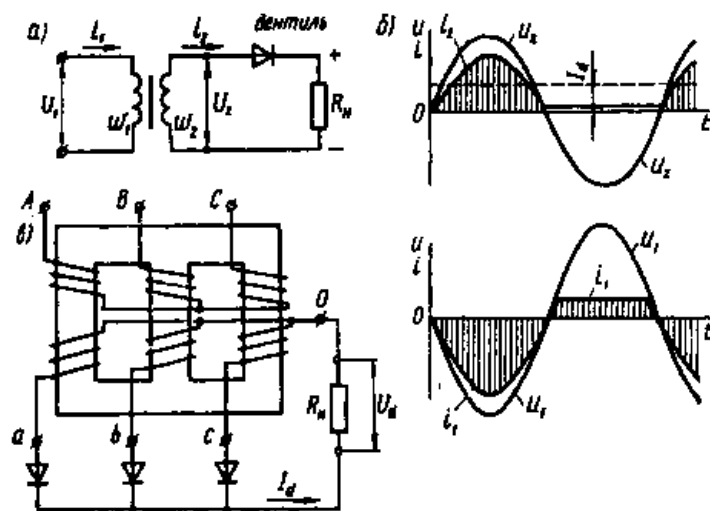


Рис. 5.3. Трансформатор в схеме выпрямления

В первичную обмотку трансформируется лишь переменная составляющая вторичного тока (5.3), поэтому МДС $I_d w_2$ остается неуравновешенной и создает в магнитопроводе трансформатора постоянный магнитный поток Φ_d , называемый *поток вынужденного намагничивания*. Этот поток вызывает дополнительное магнитное насыщение элементов магнитопровода; для того чтобы это насыщение не превышало допустимого значения, необходимо увеличить сечение сердечников и ярм. Эта мера приводит к увеличению расхода стали и меди, т. е. ведет к повышению габаритов, веса и стоимости трансформатора. Этот недостаток однофазной однополупериодной схемы распространяется и на трехфазную однополупериодную схему при соединении вторичной обмотки трансформатора по схеме «звезда—звезда с нулевым выводом» (рис. 5.3, в). В этом случае магнитный поток вынужденного намагничивания Φ_d значительно меньше, так как, действуя одновременно во всех трех стержнях магнитопровода, он замыкается вне магнитопровода — через медь, воздух, стенки бака — аналогично третьим гармоникам основного магнитного потока.

Однофазную однополупериодную схему применяют лишь для маломощных выпрямителей, что объясняется не только недостатком, вызванным наличием потока Φ_d , но и значительными пульсациями выпрямленного тока. Трехфазная однополупериодная схема соединения вторичной обмотки в звезду с нулевым выводом также ограничивается выпрямителями небольшой мощности. Если же вторичную обмотку соединить в равноплечий зигзаг с нулевым выводом (см. рис. 1.22), то недостатки однополупериодной схемы выпрямления, обусловленные возникновением потока Φ_d , устраняются. Объясняется это тем, что при соединении в равноплечий зигзаг (см. § 1.8) на каждом стержне оказываются две вторичные катушки со встречным соединением.

При трехфазной однополупериодной схеме ток I_d проходя по всем фазам вторичной обмотки, создает в каждом стержне два потока $\Phi_d/2$, но так как эти потоки направлены в разные стороны, то они взаимно уравновешиваются. Это достоинство схемы соединения обмоток в зигзаг позволяет применять трехфазную однополупериодную схему при значительных мощностях.

В *двухполупериодных* схемах, когда ток во вторичной цепи трансформатора создается в течение обоих полупериодов, условия работы трансформатора оказываются намного лучше и неуравновешенной МДС не возникает.

Другим обстоятельством, нежелательно влияющим на работу трансформаторов в схемах выпрямления, является несинусоидальная форма токов в обмотках. В результате в первичной и вторичной обмотках появляются токи высших гармоник, ухудшающие эксплуатационные показатели трансформатора, в частности снижающие его КПД.

Количественно влияние различных причин на работу трансформаторов в схемах выпрямления зависит от ряда факторов: схем выпрямления, наличия сглаживающего фильтра, характера нагрузки.

В связи с тем что первичный и вторичный токи трансформаторов имеют разные действующие значения (из-за их несинусоидальности), расчетные мощности первичной и вторичной обмоток одного и того же трансформатора неодинаковы ($S_{1ном} \neq S_{2ном}$). Поэтому для оценки мощности трансформатора, работающего в выпрямительной схеме, вводятся понятия типовой мощности

$$S_T = 0,5(S_{1ном} + S_{2ном}) = 0,5(I_{1ном} U_{1ном} + I_{2ном} U_{2ном}) \quad (5.5)$$

и коэффициента типовой мощности

$$k_T = S_T / P_{днно} \quad (5.6)$$

где выходная мощность, т. е. мощность, поступающая в потребитель постоянного тока,

$$P_{днно} = U_{днно} I_{днно} \quad (5.7)$$

в номинальном режиме (при номинальных напряжениях $U_{днно}$ и токе $I_{днно}$).

Типовая мощность трансформатора всегда больше его выходной мощности, т.е. $k_T > 1$. Объясняется это тем, что при любой схеме выпрямления $U_2 > U_d$ и $I_2 > I_d$

Из этого следует, что габариты и вес трансформаторов для выпрямителей всегда больше, чем у трансформаторов такой же выходной мощности, но при синусоидальных токах в обмотках. Это объясняется тем, что в трансформаторах, работающих в выпрямительных схемах, полезная мощность определяется постоянной составляющей вторичного тока I_d а нагрев обмоток — полным вторичным I_2 и первичным I_1 токами, содержащими высшие гармонические.

При выборе трансформатора для выпрямительной установки или же при его проектировании необходимо знать значение коэффициента k_T .

Значение переменного напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора, необходимого для получения заданного номинального значения постоянного напряжения $U_{днно}$, определяется выражением

$$U_{2ном} = k_U U_{днно} \quad (5.8)$$

где k_U — коэффициент напряжения.

Значения коэффициентов напряжения k_U и типовой мощности k_T для некоторых наиболее распространенных схем выпрямления приведены ниже.

Схемы выпрямления	k_U	k_T
Однофазная однополупериодная	2,22	3,09
Однофазная двухполупериодная мостовая	1,11	1,23
Однофазная двухполупериодная с нулевым выводом	1,11	1,48
Трехфазная с нулевым выводом	0,855	1,345
Трехфазная мостовая	0,427	1,05

Сравнение различных схем выпрямления показывает, что лучшее использование трансформатора обеспечивается в мостовых схемах выпрямления, для которых коэффициент k_T имеет минимальные значения.

Сварочные трансформаторы

Сварочный трансформатор — это аппарат, преобразующий переменное напряжение сети в переменное напряжение для сварки (как правило, понижает переменное напряжение до

значения менее 141 В). Устройство однопостового сварочного трансформатора с подвижными обмотками приведено на рисунке ниже.



Рисунок. Устройство сварочного трансформатора (с подвижными обмотками)
 Регулирование силы тока в таком сварочном трансформаторе осуществляется с помощью подвижной обмотки.

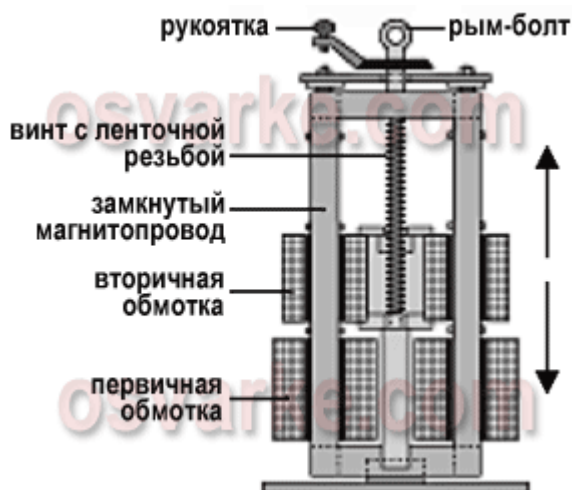


Рисунок. Схема регулирования тока в сварочном трансформаторе с подвижными обмотками

Серийно производят сварочные трансформаторы для ручной дуговой сварки и сварочные трансформаторы для автоматической сварки под флюсом.

Виды сварочных трансформаторов

- сварочные трансформаторы амплитудного регулирования с нормальным магнитным рассеянием – с дросселем с воздушным зазором или с дросселем насыщения;
- сварочные трансформаторы амплитудного регулирования с увеличенным магнитным рассеянием – с подвижными или разнесенными обмотками, с реактивной обмоткой, с подвижным магнитным или подмагничиваемым шунтом, с конденсатором или с импульсным стабилизатором;
- тиристорные сварочные трансформаторы (фазового регулирования) – с импульсной стабилизацией или с подпиткой.

Сварочные трансформаторы амплитудного регулирования

В сварочном трансформаторе амплитудного регулирования режим сварки настраивается изменением сопротивления трансформатора или изменением напряжения холостого хода без искажения синусоидальной формы переменного тока.

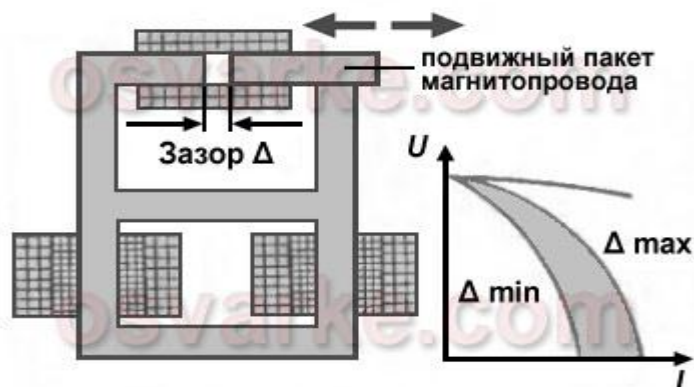


Рисунок. Трансформатор с нормальным рассеянием и отдельной реактивной катушкой (дресселем)

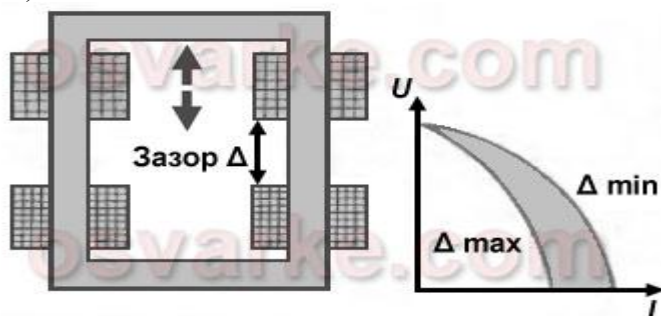


Рисунок. Трансформатор с увеличенным рассеянием и подвижными катушками

Трансформаторы тока и напряжения.

Для того чтобы привести параметры тока и напряжения к требуемым нормам, используют специальные электротехнические устройства, называемые трансформаторами. В зависимости от назначения, устройства и класса точности трансформаторы тока и напряжения, подразделяются на несколько типов. В этой статье рассмотрим измерительные трансформаторы напряжения и тока, которые устанавливают в цепях учета электроэнергии.

Трансформатор тока: общие понятия

В цепи учета устанавливают трансформаторы тока (ТТ) класса точности не ниже 0,5 номинальная мощность которых подбирается в соответствии с параметрами сети. Назначение этого устройства – обеспечение контроля потребления электроэнергии. Типы трансформаторов тока: ТПЛ, ТОЛ 10, ТПОЛ, Т-0,66, ТФЗМ и другие.

Трансформаторы тока ТПОЛ-10 с первичной обмоткой 1000 А. Конструкция трансформаторов тока обладает следующими особенностями. Первичная обмотка выполняется в виде толстой шины (количество витков минимизировано). Такая конструкция позволяет оптимизировать коэффициент трансформации и улучшить работу трансформатора. Провод вторичной обмотки наматывается на основу, изготовленную из магнитного материала с большой площадью поперечного сечения. Ток вторичной обмотки обычно равен 5А (иногда – 1А).

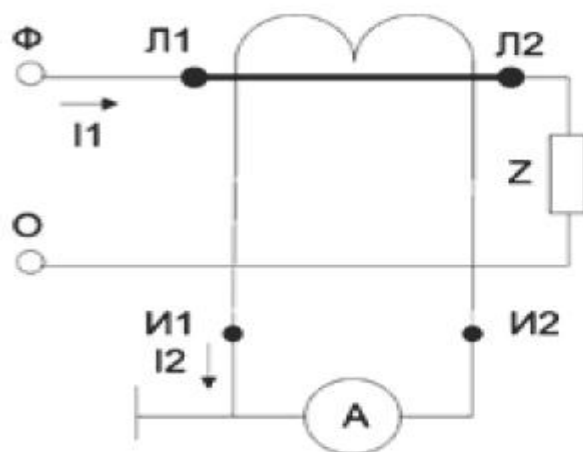


Рис.1. Подключение измерительного трансформатора тока

Л1, Л2 – контактные зажимы первичной обмотки;
 И1, И2 – контактные зажимы вторичной обмотки;
 Ф – фазный провод;
 О – нулевой провод;
 А – амперметр;
 Z – суммарная нагрузка силовой цепи;
 I1, I2 – соответственно первичный и вторичный токи.

Виды трансформаторов тока

Следует выделить три основных вида.

1. Сухие трансформаторы: у них первичная обмотка имеет физическую связь со вторичной. Значение вторичного тока непосредственно зависит от коэффициента трансформации.
2. Торoidalные: устанавливаются на шину или кабель и потому не имеют первичной обмотки. Первичный ток протекает по проводнику в середине корпуса. Такие трансформаторы с раздвоенным ядром (могут открываться без отключения первичной цепи) могут выполнять защитную функцию (от КЗ сети).
3. Высоковольтные (масляные или газовые): могут быть с первичной обмоткой или без нее (шинного типа). Кроме измерительной могут иметь дополнительную вторичную обмотку – для обеспечения работы релейной защиты.

Трансформаторы напряжения:

Устройство трансформаторов тока и напряжения во многом сходно: вокруг стального сердечника, набранного из листовой стали, наматываются первичные и вторичные обмотки. Трансформаторы напряжения (ТН) бывают одно- и трехфазными. Их назначение – снижение напряжения до необходимого уровня. В измерительной трехфазной сети устанавливают группу однофазных (на каждую фазу) или трансформатор, в корпусе которого собраны три первичной обмотки и три вторичной. Выходное напряжение трехфазных измерительных ТН – 100 В. Номинальное напряжение первичной обмотки зависит от параметров сети (35 кВ, 10 кВ, 6 кВ).



Трансформаторы напряжения, кроме измерительных, используются для:

- подключения измерительных приборов и другого оборудования для обеспечения его безопасной эксплуатации;
- для расширения пределов измерения подключенных приборов;
- для обеспечения работы противопожарной автоматики и релейной защиты.

Трансформаторы тока и напряжения, схемы включения которых ничем не отличаются от понижающих трансформаторов, являются измерительными, если расположены перед счетчиками и имеют класс точности не менее 0,5 (для коммерческого учета).



Трансформатор напряжения в ячейке

Некоторые типы трансформаторов напряжения

1. КНФ-110: масляный трансформатор, состоящий из двух каскадов на общем магнитопроводе.
2. НОМ-35 или ЗНОМ-35: конструкция таких трансформаторов герметична, внутри корпуса – масло, уровень которого находится на 25-30 мм ниже крышки. Маслорасширителем они не снабжены.
3. НТМИ-6: трансформатор с изолированной нейтралью. Активная его часть состоит из однофазных трансформаторов, помещенных в общий корпус. Внутри корпуса – масло, для доливки которого на крышке находится специальная пробка. Кроме того, на крышке находятся клеммы первичной и вторичных обмоток. Дополнительная вторичная обмотка служит для подключения сигнализации и защиты. Срабатка происходит при замыкании любой из фаз первичных обмоток на землю.
4. НАМИ-10: изготавливаются на напряжение первичной обмотки 10 и 6 кВ, на вторичной – 100 В.
5. НТМК-6(10): конструкция с трехстержневым магнитопроводом. На стержнях находятся обмотки высокого и низкого напряжения, соединенных «звездой», при этом нулевая точка имеет свой вывод. Обмотка разомкнутого треугольника не предусмотрена. Предназначен НТМК-6(10) только для цепей учета электроэнергии.

Лекция-15:

Измерительного трансформатора.

Цель: Ознакомить студентов с особенностями работы измерительного трансформатора.

План:

1. Назначение измерительных трансформаторов.
2. Измерительные трансформаторы напряжения. Общие сведения и схемы соединения.
3. Измерительные трансформаторы тока. Назначение измерительных преобразователей.

Назначение измерительных трансформаторов.

Трансформатор тока представляет собой аппарат, первичная обмотка которого включена в цепь последовательно. А вторичная обмотка, будучи замкнута на некоторую цепь (“вторичную цепь”) отдаёт в неё ток, пропорциональный первичному току.

В трансформаторах тока высокого напряжения первичная обмотка изолирована от вторичной (и от земли) на полное рабочее напряжение.

Вторичная обмотка в эксплуатации имеет потенциал, близкий к потенциалу земли, так как один конец этой обмотки обычно заземляется.

Таким образом, трансформатор тока позволяет измерять и учитывать ток высокого напряжения приборами низкого напряжения, доступными для непосредственного наблюдения обслуживающим персоналом. При этом во вторичную цепь трансформатора тока включаются амперметры, токовые обмотки ваттметров, счётчиков и т.д.

Часто один и тот же трансформатор тока может быть использован как для целей измерения, так и для целей защиты.

Измерительные трансформаторы напряжения (ТН) являются важными элементами любой высоковольтной сети. Основное назначение трансформаторов напряжения – это понижение высокого напряжения, необходимого для питания измерительных цепей, цепей релейной защиты, автоматики и учета (далее вторичных цепей). С помощью трансформаторов напряжения осуществляется измерение напряжения в высоковольтных сетях, питание катушек реле минимального напряжения, обмоток напряжения защит, ваттметров, фазометров, счетчиков, а также контроль состояния изоляции сети.

Измерительные трансформаторы напряжения. Общие сведения и схемы соединения.

Трансформатор напряжения предназначен для понижения высокого напряжения до стандартного значения 100 В и для отделения цепей измерения и релейной защиты от первичных цепей высокого напряжения. Схема включения однофазного трансформатора напряжения показана на рис. 1; первичная обмотка включена на напряжение сети U_1 , а ко вторичной обмотке (напряжение U_2) присоединены параллельно катушке измерительных приборов и реле. Для безопасности обслуживания один выход вторичной обмотки заземлен.

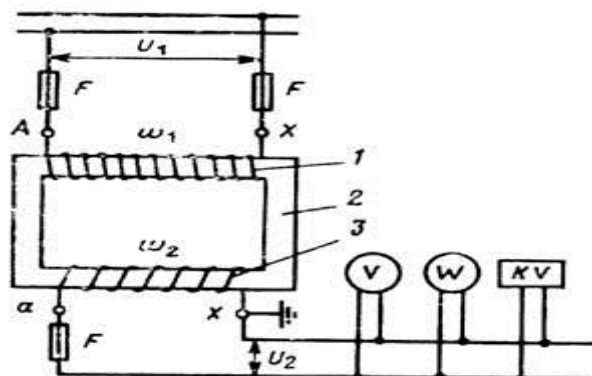


Рис.1 Схема включения трансформатора напряжения :

1- первичная обмотка; 2- магнитопровод; 3- вторичная обмотка;

Номинальный коэффициент трансформации определяется следующим выражением:

$$K_U = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}$$

где $U_{1ном}$, $U_{2ном}$ – номинальные первичное и вторичное напряжение соответственно.

Рассеяние магнитного потока и потери в сердечнике приводят к погрешности измерения

$$\Delta U\% = \frac{K_U U_2 - U_1}{U_1}$$

Так же как и трансформаторах тока, вектор вторичного напряжения сдвинут относительно вектора первичного напряжения не точно на угол 180. Это определяет угловую погрешность.

В зависимости от номинальной погрешности различают классы точности 0,2; 0,5; 1; 3.

Погрешность зависит от конструкции магнитопровода, магнитной проницаемости стали и от $\cos \varphi$ вторичной нагрузки. В конструкции трансформаторов напряжения предусматривается компенсация погрешности по напряжению путем некоторого уменьшения числа витков первичной обмотки, а также компенсация угловой погрешности за счет специальных компенсирующих обмоток.

Суммарное потребление обмоток измерительных приборов и реле, подключенных ко вторичной обмотке ТН, не должно превышать номинальную мощность ТН, т.к. в противном случае это приведет к увеличению погрешностей.

«В зависимости от назначения могут применяться ТН с различными схемами соединения обмоток. Для измерения трех междуфазных напряжений можно использовать два однофазных двухобмоточных трансформатора НОМ, НОС, НОЛ, соединенных по схеме открытого треугольника (рис. 2, а), а также трехфазный двухобмоточный трансформатор НТМК, обмотки которого соединены в звезду (рис.2,б). Для измерения напряжения относительно земли могут применяться 3 однофазных трансформатора, соединенных по схеме Y0/Y0, или трехфазный трехобмоточный трансформатор НТМИ (рис.2, в). В последнем случае обмотка, соединенная в звезду, используется для присоединения измерительных приборов, а к обмотке, соединенной в разомкнутый треугольник, присоединяется реле защиты от замыканий на землю. Таким же образом в трехфазную группу соединяются однофазные трехобмоточные трансформаторы типа ЗНОМ и каскадные трансформаторы НКФ.»

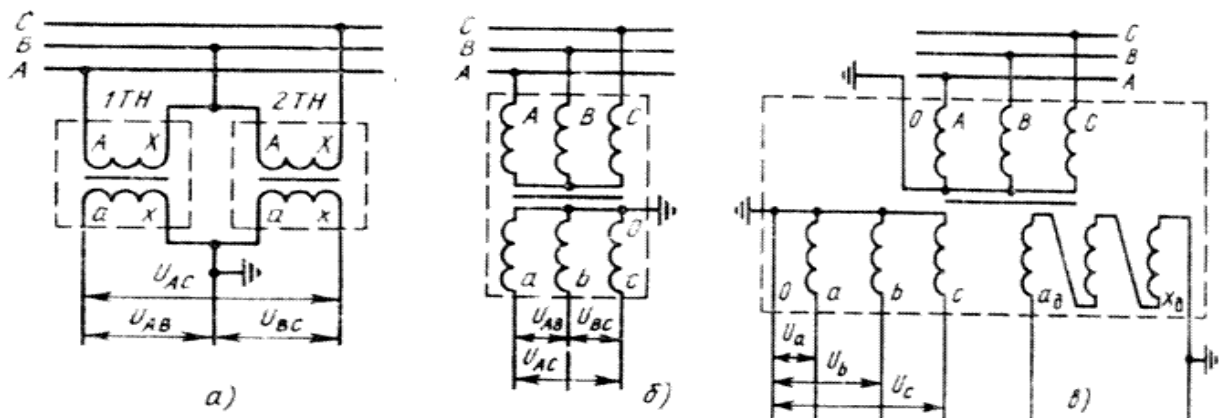


Рис. 2. Схемы соединения обмоток трансформаторов напряжения.

Измерительные трансформаторы тока. Назначение измерительных преобразователей.

«Измерительный преобразователь тока (ИПТ) это – устройство предназначенное для преобразования первичного тока в такой выходной сигнал, информативные параметры которого функционально связаны с информативными параметрами первичного тока. Для создания ИПТ можно использовать различные физические явления. В настоящее время ИПТ обычно создаются на основе широко применяемого в электротехнике трансформаторного эффекта — в виде трансформатора.» [3]

Трансформатором тока (ТТ), являющимся наиболее широко применяемым ИПТ, называется такой трансформатор, в котором при нормальных условиях работы выходной сигнал является током, практически пропорциональным первичному току и при правильном включении сдвинутым относительно него по фазе на угол, близкий к нулю.

Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь последовательно (в рассечку токопровода), а вторичная замыкается на некоторую нагрузку (измерительные приборы и реле), обеспечивая в ней ток, пропорциональный току в первичной обмотке.

В трансформаторах тока высокого напряжения первичная обмотка изолирована от вторичной (земля) на полное рабочее напряжение. Один конец вторичной обмотки обычно заземляется. Поэтому она имеет потенциал, близкий к потенциалу земли.

Трансформаторы тока по назначению разделяются на трансформаторы тока для измерений и трансформаторы тока для защиты. В некоторых случаях эти функции совмещаются в одном ТТ.

Трансформаторы тока для измерений предназначаются для передачи информации измерительным приборам. Они устанавливаются в цепях высокого напряжения или в цепях с большим током, т. е. в цепях, в которых невозможно непосредственное включение измерительных приборов. Ко вторичной обмотке ТТ для измерений подключаются амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчиков и аналогичных приборов. Таким образом, трансформатор тока для измерений обеспечивает:

1) преобразование переменного тока любого значения в переменный, ток, приемлемый для непосредственного измерения с помощью стандартных измерительных приборов;

2) изолирование измерительных приборов, к которым имеет доступ обслуживающий персонал, от цепи высокого напряжения.

«Трансформаторы тока для защиты предназначаются для передачи измерительной информации в устройства защиты и управления. Соответственно этому трансформатор тока для защиты обеспечивает:

1) преобразование переменного тока любого значения в переменный ток, приемлемый для питания устройств релейной защиты;

2) изолирование реле, к которым имеет доступ обслуживающий персонал, от цепи высокого напряжения.»

Трансформаторы тока в установках высокого напряжения необходимы даже в тех случаях, когда уменьшения тока для измерительных приборов или реле не требуется.

Классификация ИПТ.

В зависимости от рода тока ИПТ разделяются на ИП переменного и ИП постоянного тока. В работе будут рассматриваться ИПТ переменного тока для установок и сетей с номинальной частотой тока 50 Гц.

По назначению ИПТ разделяются на ИПТ для измерений и ИПТ для защиты. Последние могут предназначаться для работы только в установившихся (статических) режимах либо в установившихся и переходных (динамических) режимах.

В зависимости от вида преобразования ИПТ делятся на преобразователи тока в ток, тока в напряжение (например, трансреакторы, магнитные трансформаторы тока), тока в

неэлектрическую величину (например, в световой поток). При этом по способу представления выходной информации ИПТ подразделяются на аналоговые и дискретные.

Одновитковые ТТ (рис. 3 [см. приложение 3]) имеют две разновидности: без собственной первичной обмотки; с собственной первичной обмоткой. Одновитковые ТТ, не имеющие собственной первичной обмотки, выполняются встроенными, шинными или разъёмными.

Встроенный трансформатор тока представляет собой магнитопровод с намотанной на него вторичной обмоткой. Он не имеет, собственной первичной обмотки. Ее роль выполняет токоведущий стержень проходного изолятора. Этот трансформатор тока не имеет изоляционных элементов между первичной и вторичной обмотками. Их роль выполняет изоляция проходного изолятора.

В шинном трансформаторе тока роль первичной обмотки выполняют одна или несколько шин распределительного устройства, пропускаемые при монтаже сквозь полость проходного изолятора. Последний изолирует такую первичную обмотку от вторичной.

«Многовитковые трансформаторы тока (рис. 3) изготавливаются с катушечной первичной обмоткой надеваемой на магнитопровод; с петлевой первичной обмоткой, состоящей из нескольких витков; со звеньевой первичной обмоткой, выполненной таким образом, что внутренняя изоляция трансформатора тока конструктивно распределена между первичной и вторичной обмотками, а взаимное расположение обмоток напоминает звенья цепи.»

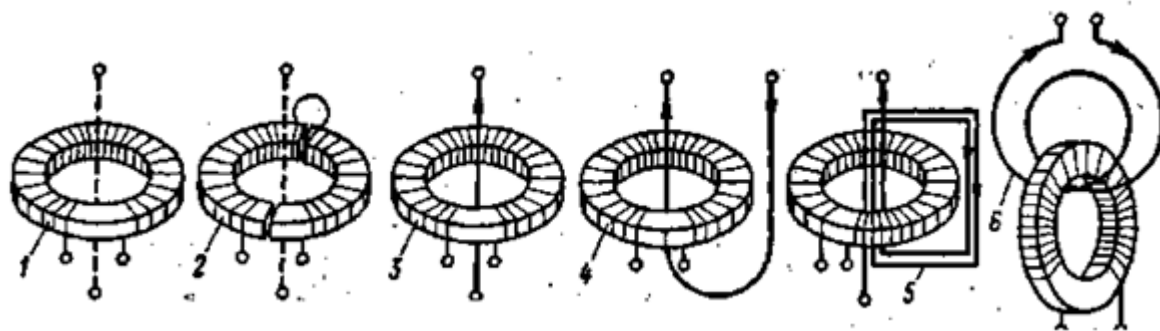


Рис. 3. Схема трансформатора тока;
_____ собственная первичная обмотка ТТ;
----- токоведущий стержень проходного изолятора (шина).

Лекция-16:

Сварочные трансформаторы

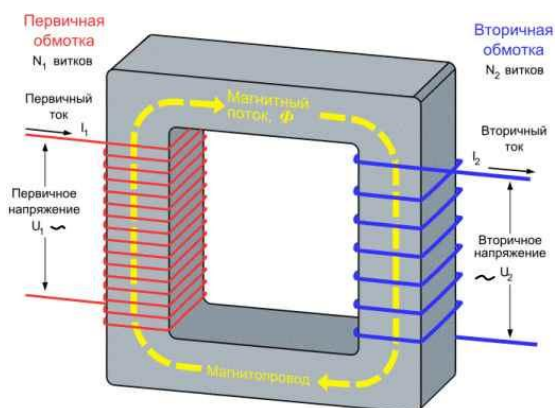
Цель: Ознакомить студентов с особенностями работы измерительного трансформатора.

План:

1. Принцип работы сварочного трансформатора
2. Трансформаторы для дуговой электросварки.
3. Специфика работы сварочного трансформатора.

Сварочный трансформатор – это простейшее устройство, с помощью которого можно выполнять сварочные работы с помощью покрытого электрода. Конструкция этого устройства настолько простая.

Чтобы понять принцип действия сварочного трансформатора, обратим внимание на простейшую конструкцию, состоящую из 2-х обмоток и работающую с однофазным током. В этом нам поможет схема сварочного трансформатора:



Как видно из рисунка, конструкция максимально простая – основа и две обмотки. Магнитопровод — это элемент с замкнутым контуром, созданный из ферромагнитного сплава. Благодаря этому сопротивление контура снижается, а электромагнитная связь контуров увеличивается. Это простейшая схема сварочного трансформатора, есть еще различные модификации с дросселем и другие разновидности. Первичная обмотка подключается к сети, а вторичная уходит на нагрузку, в нашем случае это держатель электрода и масса. При подаче напряжения на первичный контур в нем проходит переменный ток, создающий магнитный поток в основе, который индуцирует в обеих обмотках ЭДС. Возникшие силы можно пропорционально соотнести с числом витков обмотки, а если опустить незначительные (до 5%) потери напряжения, то получаем соотношение:

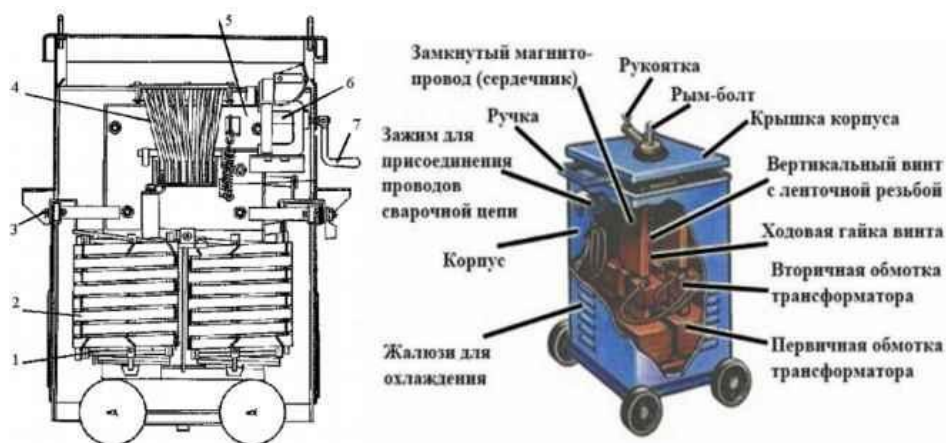
$N_1 \backslash N_2 = U_1 \backslash U_2$ — это значение называют коэффициент трансформации.

Соотношение количества витков может быть больше 1, тогда трансформатор выполняет понижение напряжения и называется понижающим. Если коэффициент меньше 1, то это трансформатор повышающий.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Представим, что в нашем случае первая обмотка состоит из 100 витков, а вторичная из 5, $100/5=20$ коэффициент трансформации. Подключив такое устройство к стандартной сети 220 В, на выходе получим $220/20=11$ В. Данный коэффициент правдив не только для преобразования напряжения, но и силы тока, при потреблении первичной обмоткой 5 А, на контактах получим все 100А. Силу тока можно регулировать в процессе сваривания, для этого изменяют зазор магнитопровода. Рост или снижение этого расстояния уменьшает сопротивление и соответственно, на величину магнитного потока. Увеличив зазор мы снижаем силу тока, а для увеличения сварного тока зазор сокращают. Зная соотношение количества витков обмотки и напряжения сети можем подобрать число витков вторичной обмотки, чтобы получить требуемые значения напряжения и силы тока. Нормальное напряжение холостого хода сварочного трансформатора считается 60В, что соответствует трансформаторному коэффициенту, равному 3.6.

Устройство и конструкция трансформатора Для более простого понимания работы устройства, рассмотрим его основные составляющие на примере существующего трансформатора. На картинке отмечены его основные узлы:



- 1- Первичный контур обмотки, покрытый изоляцией.
- 2- Вторичный контур обмотки без изоляции, с воздушными каналами для вентиляции обмотки;
- 3- Подвижный сердечник трансформатора;
- 4- Система подвеса, сохраняющая устройство от повреждений;
- 5- Система управления, отвечает за изменение зазора в магнитопроводе, а также за регулировку воздушного зазора обмотки;
- 6- Винт регулировки воздушного зазора;
- 7- Рычаг винта.

Это только один из вариантов исполнения данной конструкции. Как видно, в целом сам сварочный трансформатор устройством мало чем отличается от понижающего трансформатора. Сварщик орудует для управления основными действиями системой управления, регулируя тем самым сварочный ток и степень вентиляции обмоток с помощью специального винта. Таким образом, конструкция является максимально простой и интуитивно понятной для работы.

Трансформатор для дуговой электросварки, обычно называемый сварочным трансформатором, представляет собой однофазный двухобмоточный понижающий трансформатор, преобразующий напряжение сети 220 или 380 В в напряжение 60—70 В, необходимое для надежного зажигания и устойчивого горения электрической дуги между металлическим электродом и свариваемыми деталями.

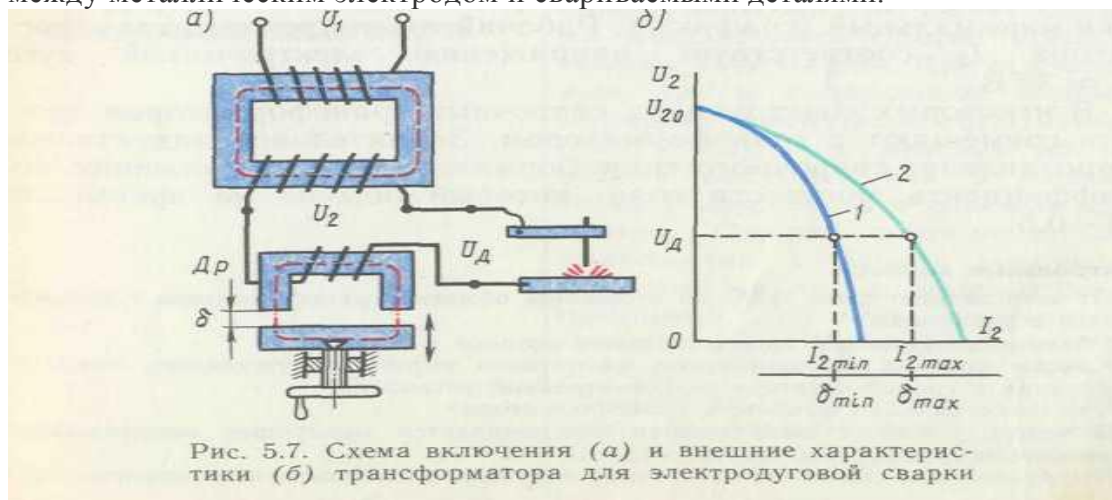


Рис. 5.7. Схема включения (а) и внешние характеристики (б) трансформатора для электродуговой сварки

Специфика работы сварочного трансформатора состоит в прерывистом режиме его работы: зажиганию электрической дуги предшествует короткое замыкание вторичной цепи трансформатора, а обрыв дуги создает режим холостого хода. Номинальный режим работы трансформатора соответствует устойчивому горению электрической дуги. Для ограничения тока в сварочном трансформаторе приняты меры, суть которых сводится к увеличению индуктивного сопротивления. С этой целью

первичную; обмотку трансформатора располагают на одном стержне, а вторичную — на другом. Это ведет к росту магнитного рассеяния, а следовательно, к увеличению индуктивного сопротивления обмоток. Другой мерой является включение во вторичную цепь трансформатора последовательно индуктивной катушки — дросселя, представляющего собой катушку из медного провода прямоугольного сечения, расположенную на стальном магнитопроводе. Дроссель снабжен устройством типа «винт — гайка», позволяющим вращением винта перемещать ярмо так, что воздушный зазор δ между ярмом и стержнями меняется от $\delta = \delta_{\max}$. При этом минимальному значению δ соответствует: наибольшее индуктивное сопротивление дросселя, а следовательно, минимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2\min}$, а максимальному значению $\delta = \delta_{\max}$ — наименьшее индуктивное сопротивление дросселя и максимальное значение рабочего тока $I_2 = I_{2\max}$. Повышенное индуктивное сопротивление обмоток и наличие дросселя Dp обеспечивают сварочному трансформатору круто падающие внешние характеристики $U_2 = f(I_2)$, необходимые для устойчивого горения электрической дуги. Изменяя величину воздушного зазора δ в дросселе Dp можно плавно менять угол наклона внешних характеристик, при $\delta \approx 0$ наклон характеристики наибольший (график 1), а при $\delta \approx \delta_{\max}$ наклон характеристики минимальный (график 2). Рабочий ток сварочного трансформатора I_2 соответствует напряжению электрической дуги $U_d \approx 30$ В.

В некоторых конструкциях сварочных трансформаторов дроссель совмещают с трансформатором. Значительное индуктивное сопротивление сварочного трансформатора ведет к снижению его коэффициента мощности $\cos\phi$, который обычно не превышает 0,4—0,5.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит фаза ЭДС во вторичной обмотка трансформатора с подвижным сердечником?
2. Объясните взаимодействие магнитных потоков в ТРПШ.
3. Какова причина возникновения магнитного потока вынужденного намагничивания в трансформаторе выпрямительной установки?
4. Что такое типовая мощность трансформатора?
5. В каких условиях выпрямления обеспечивается наилучшее использование мощности трансформатора?
6. Что делают для снижения остаточной индукции в импульсном трансформаторе?

Лекция-17:

Способ охлаждения трансформатора

Цель: Рассмотреть способы и процессы охлаждения трансформаторов.

План:

1. Способы охлаждения трансформаторов при различных температурах.
2. Процесс нагревания.

Электрическая энергия, теряемая в трансформаторе при его работе, выделяется в виде тепла в обмотках, магнитопроводе, деталях конструкции и в других частях трансформатора. При этом трансформатор нагревается, и температура его отдельных частей может превысить допустимую температуру.

Металлические части трансформатора могут без повреждения длительное время выдерживать довольно высокие температуры, а изоляция трансформатора и, в частности, изоляция обмоточных проводов не может. Установлено, что электрическая прочность бумажной изоляции, которая в современных масляных трансформаторах играет основную роль, не снижается до тех пор, пока сохраняется ее механическая прочность. При работе трансформатора бумажная изоляция постепенно изнашивается, стареет. Старение изоляции сопровождается уменьшением ее эластичности и

механической прочности. Причем чем выше температура обмоток, тем интенсивнее происходит старение изоляции.

Сильно состарившаяся изоляция становится настолько неэластичной и хрупкой, что под влиянием вибраций и динамических усилий, имеющих в трансформаторе, начинает растрескиваться и ломаться, т. е. механически повреждается. Следствием этого может быть резкое снижение электрической прочности, пробой и повреждение трансформатора.

Время, в течение которого изоляция изнашивается настолько, что становится непригодной к дальнейшей работе, зависит от температуры ее нагрева. С увеличением температуры при прочих равных условиях срок службы трансформатора уменьшается.

Для трансформаторов отечественного производства принята такая допустимая температура нагрева изоляции, при которой обеспечивается срок службы трансформаторов 20—25 лет. Опытным путем установлено, что наивысшая температура, которую выдерживает в масле бумажная изоляция без заметного снижения своих изоляционных свойств, 105°C .

Исходя из этого, ГОСТ 11677—75 установил, что у трансформаторов, предназначенных для мест с наибольшей температурой окружающего воздуха 40°C , превышение средней (определяемой по сопротивлению) температуры обмоток над температурой воздуха не должно быть больше $105^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = 65^{\circ}\text{C}$. Однако температура окружающего воздуха как в течение года, так и в течение суток никогда не бывает постоянной, также колеблется и нагрузка. Следовательно, температура обмоток (и изоляции) никогда не будет равной 105°C .

Установлено, что если бы в процессе эксплуатации среднюю температуру обмоток каким-либо способом удалось поддерживать все время 105°C , то срок службы трансформатора едва бы превысил 2 года. Поэтому температуру обмоток 105°C надо понимать как наибольшую среднюю температуру, допустимую для безопасной работы трансформатора в течение нескольких часов в сутки в те немногие дни, когда температура окружающего воздуха достигает максимума (40°C).

Как уже указывалось, при работе трансформатора обмоточные провода, стальные пластины магнитопровода и различные металлические детали конструкции нагреваются и вследствие этого являются постоянными источниками тепловой энергии. Поэтому в магнитопроводе и обмотках происходит постоянный процесс передачи тепла от более нагретых внутренних частей к наружным поверхностям, отдающим тепло. Учитывая это, трансформаторы строят таким образом, чтобы размеры наружных поверхностей были достаточны для отвода тепла.

В трансформаторах мощностью в несколько киловольт-ампер поверхность охлаждения обмоток и магнитопровода достаточна для отвода того небольшого количества тепла, которое выделяется при их работе. Малые трансформаторы охлаждаются в окружающем их более холодном воздухе путем естественного излучения тепла. Никаких специальных устройств для охлаждения не предусматривается. Такие трансформаторы называют *сухими*.

По мере увеличения мощности потери в трансформаторе возрастают, причем они растут пропорционально его массе, т. е. приблизительно пропорционально кубу его линейных размеров. В то же время поверхность охлаждения растет пропорционально квадрату линейных размеров, т. е. потери в трансформаторе увеличиваются быстрее, чем поверхность, отводящая тепло.

Начиная с какой-то определенной мощности, этой поверхности оказывается недостаточно и приходится между частями обмоток, катушками, секциями делать специальные каналы, увеличивая омываемые воздухом поверхности охлаждения. Однако и такое увеличение оказывается достаточным только для трансформаторов мощностью 630—1000 кВ·А. При больших мощностях приходится делать специальные обдувные установки для увеличения теплоотдачи сухих трансформаторов.

Более действенным средством для отвода тепла трансформатора является применение минерального (трансформаторного) масла. Трансформатор погружают в наполненный маслом стальной бак. Слои масла, непосредственно соприкасающиеся с обмоткой и магнитопроводом, нагреваются, и нагретые частицы, имея меньшую плотность, поднимаются вверх; их место занимают поступающие снизу более холодные частицы масла. Поднявшиеся вверх нагретые частицы масла соприкасаются со стенками и крышкой бака и отдают им свое тепло, рассеивающееся затем в окружающий воздух. Охладившиеся частицы масла опускаются вниз, а их место занимают другие, нагретые частицы.

Таким образом, в баке происходит непрерывный процесс нагревания и охлаждения масла, циркулирующий поток которого является как бы переносчиком тепла от нагретых частей трансформатора к стенкам бака. Конечно, температура масла не остается одинаковой по высоте бака: внизу она самая низкая, в середине бака средняя, а верхние слои масла нагреты до наибольшей температуры.

Согласно нормам (ГОСТ 11677—75) в верхних слоях допустимо превышение температуры масла над температурой окружающего воздуха 60°C , если масло в баке полностью защищено от соприкосновения с окружающим воздухом (герметизированное исполнение трансформатора), и 55°C — во всех остальных случаях. Этот перегрев можно установить, если из температуры верхних слоев масла, определенной по термометру, вычесть температуру окружающего воздуха в момент измерения. Например, температура верхних слоев масла составляет по термометру 75°C . В момент измерения температура воздуха была 25°C , следовательно, перегрев масла $75^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$, что ниже допустимого.

Применение трансформаторного масла в качестве теплопередающей среды исключительно эффективно. По опытным данным теплоотдача от единицы поверхности при масляном охлаждении в 6—8 раз больше, чем при отдаче тепла непосредственно воздуху. При масляном охлаждении поверхности обмоток и магнитопровода можно сделать значительно меньшими, чем у такого же по мощности сухого трансформатора с воздушным охлаждением.

Однако поверхность бака, с которого тепло отводится в воздух, должна быть при этом достаточно большой, иначе температура масла станет выше допустимой. Таким образом, у масляных трансформаторов для улучшения охлаждения надо подбирать бак трансформатора с достаточно большой поверхностью.

Самый простой путь — это увеличение линейных размеров (длины, ширины, высоты) бака. Но этот путь ведет к увеличению общих размеров трансформатора и поэтому не экономичен. Более правильный путь — это увеличение поверхности бака путем применения волнистых стенок, труб, ввариваемых в его стенки, или трубчатых охладителей (радиаторов), специально пристраиваемых к баку трансформатора.

У трансформаторов мощностью до 6300 кВ-А такое увеличение поверхности бака позволяет успешно отводить тепло и не допускать увеличения температуры масла над воздухом выше допустимой величины. У этих трансформаторов происходит, как говорят, естественное охлаждение с помощью масла и циркуляции воздуха. У трансформаторов большой мощности естественное охлаждение оказывается недостаточным. В этих случаях применяют искусственное охлаждение масла. Существует несколько способов принудительного охлаждения трансформаторов. Рассмотрим наиболее распространенные.

Первый способ — это вид охлаждения трансформатора с использованием принудительного ускорения движения воздуха, охлаждающего радиаторы, с помощью вентиляторов. Этот способ называют дутьевым (Д) охлаждением.

Устанавливая вентиляторы под радиаторами и создавая таким образом принудительную циркуляцию воздуха вдоль их наружной поверхности, можно увеличить эффективность (теплоотдачу) радиаторов на 40—50% по сравнению с

естественным охлаждением. Вообще система дутьевого охлаждения рассчитывается так, чтобы при снижении нагрузки до 50—60% можно было бы отключить вентиляторы, т. е. вернуться к естественному масляному охлаждению.

Второй способ — это вид охлаждения трансформатора с использованием принудительного ускорения движения как трансформаторного масла, так и воздуха. Этот способ называют системой охлаждения ДЦ.

Обычно для системы ДЦ применяют специальные охладители, собранные из трубок, через которые встроенные в трубопровод насосы прогоняют нагретое масло. Необходимое число вентиляторов создает направленные потоки воздуха, обдувающие поверхность трубок

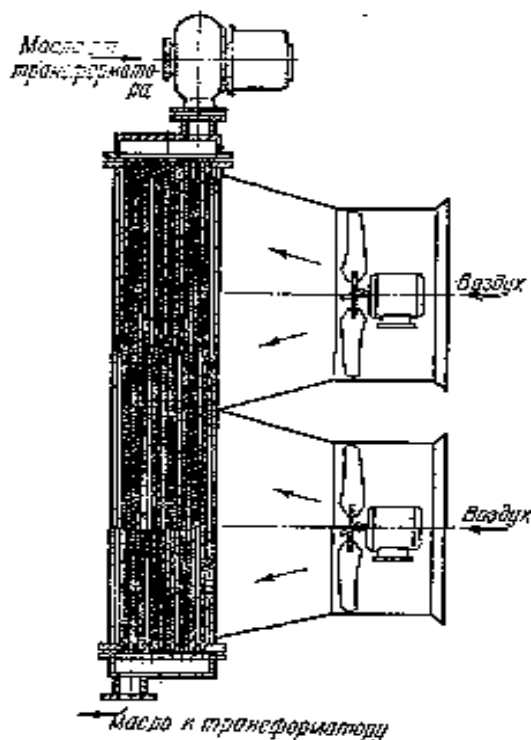


Рис.17.1.Схема охладителя системы ДЦ.

Третий способ — это вид охлаждения трансформатора, при котором нагретое масло принудительно (с помощью насоса) прогоняется через ряд труб охладителя, заключенных в «рубашку», в которой циркулирует вода. Такой способ называют масляно-водяной системой или охлаждением вида Ц. Водяное охлаждение — одно из наиболее эффективных. Объясняется это тем, что коэффициент теплоотдачи от масла в воду значительно выше, чем в воздух. Поэтому такие охладители получаются значительно компактнее, чем в системе ДЦ. Это обстоятельство часто является определяющим при выборе системы охлаждения. Особенно важно это для специальных (например, электропечных) трансформаторов, устанавливаемых внутри производственных помещений, где габариты трансформатора существенно влияют на стоимость строительных работ и всего предприятия в целом.

Принудительная циркуляция масла очень эффективна. Во-первых, она значительно улучшает (выравнивает) распределение температуры масла по высоте бака, т. е. снижает температуру наиболее нагретых верхних слоев масла. Во-вторых, ускоренное движение масла улучшает теплоотдачу нагретых элементов конструкции трансформатора.

Особенно эффективна принудительная циркуляция в тех случаях, когда масло с повышенной скоростью проходит не только между активной частью и баком, но и непосредственно в каналах обмоток и магнитопровода трансформатора.

Для обеспечения такого «направленного» движения масла в конструкции

предусматривают специальные перегородки и другие устройства, направляющие масло именно в те места, где это необходимо.

Лекция-18: Защита трансформатора.

Цель: Ознакомить студентов с видами перенапряжений трансформаторов.

План:

1. Общие сведения о релейной защите.
2. **Повреждения и ненормальные режимы работы трансформаторов**
3. **Виды и назначение автоматических устройств трансформатора**
4. **Токowe защиты трансформаторов**
5. **Газовая защита трансформатора**
6. **Продольная дифференциальная токовая защита трансформатора**

Общие сведения о релейной защите

Все электроустановки оборудуются устройствами релейной защиты, предназначенными для отключения защищаемого участка в цепи или элемента в случае его повреждения, если это повреждение влечет за собой выход из строя элемента или электроустановки в целом. Релейная защита срабатывает и тогда, когда возникают условия, угрожающие нарушением нормального режима работы электроустановки.

В релейной защите электроустановок защитные функции возложены на реле, которые служат для подачи импульса на автоматическое отключение элементов электроустановки или сигнала о нарушении нормального режима работы оборудования, участка электроустановки, линии и т. д.

Реле представляет собой аппарат, реагирующий на изменение какой-либо физической величины, например тока, напряжения, давления, температуры. Когда отклонение этой величины оказывается выше допустимого, реле срабатывает и его контакты, замыкаясь или размыкаясь, производят необходимые переключения с помощью подачи или отключения напряжения в цепях управления электроустановкой.

К релейной защите предъявляют следующие требования:

селективность (избирательность) — отключение только той минимальной части или элемента установки, которая вызвала нарушение режима;

чувствительность — быстрая реакция на определенные, заранее заданные отклонения от нормальных режимов, иногда самые незначительные;

надежность — безотказная работа в случае отклонения от нормального режима; надежность защиты обеспечивается как правильным выбором схемы и аппаратов, так и правильной эксплуатацией, предусматривающей периодические профилактические проверки и испытания.

Необходимая скорость срабатывания реле определяется проектом в зависимости от характера технологического процесса. Иногда для сведения до минимума ущерба от возникших повреждений релейная защита должна обеспечивать полное отключение в течение сотых долей секунды.

По своему назначению реле разделяют на реле управления и реле защиты.

Реле управления обычно включают непосредственно в электрические цепи и срабатывают они при отклонениях от технологического процесса или изменениях в работе механизмов. Реле защиты включают в электрические цепи через измерительные трансформаторы и только иногда непосредственно. Они срабатывают при неформальных или аварийных режимах работы установки. Реле характеризуется следующими показателями:

уставка — сила тока, напряжение или время, на которые отрегулировано данное реле для его срабатывания;

напряжение (или ток) срабатывания — наименьшее или наибольшее значение, при котором реле полностью срабатывает;

напряжение (или ток) отпускания — наибольшее значение, при котором реле отключается (возвращается в исходное положение); коэффициент возврата — отношение напряжения (или тока) отпускания к напряжению (или току) срабатывания.

По времени срабатывания различают реле мгновенного действия и с выдержкой времени.

Повреждения и ненормальные режимы работы трансформаторов

К повреждениям трансформаторов относят:

междуфазные к.з. на выводах и в обмотках (последние возникают гораздо реже, чем первые);

однофазные к.з. (на землю и между витками обмотки, т. е. витковые замыкания);

«пожар стали» сердечника.

К ненормальным режимам относятся:

перегрузки, вызванные отключением, например, одного из параллельно работающих трансформаторов. Токи перегрузки относительно невелики, и поэтому допускается перегрузка в течение времени, определяемого кратностью тока перегрузки по отношению к номинальному;

возникновение токов при внешних к. з., представляющих собой опасность в основном из-за их теплового действия на обмотки трансформатора, поскольку эти токи могут существенно превосходить номинальные. Длительное прохождение тока внешнего к. з. может возникнуть при неотключившемся повреждении на отходящем от трансформатора присоединении;

недопустимое понижение уровня масла, вызываемое значительным понижением температуры и другими причинами.

Повреждения и ненормальные режимы работы предъявляют определенные требования к устройствам автоматического управления трансформаторами, рассматриваемые ниже.

Виды и назначение автоматических устройств трансформатора

На трансформаторах устанавливаются следующие защиты:

защита от коротких замыканий, действующая на отключение поврежденного трансформатора и выполняемая без выдержки времени (для ограничения размеров повреждения, а также для предотвращения нарушения бесперебойной работы питающей энергосистемы). Для защиты мощных трансформаторов применяются продольные дифференциальные токовые защиты, а для маломощных трансформаторов — токовые защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени. Кроме того, при всех повреждениях внутри бака и понижениях уровня масла применяется газовая защита, работающая на неэлектрическом принципе;

защита от токов внешних к. з., основное назначение которой заключается в предотвращении длительного прохождения токов к. з. в случае отказа выключателей или защит смежных элементов путем отключения трансформатора. Кроме того, защита может работать в качестве основной (на трансформаторах малой мощности, а также при к. з. на шинах, если отсутствует специальная защита шин). Защиты от внешних к. з. обычно выполняются токовыми или (значительно реже) дистанционными — с выдержками времени;

защита от перегрузок, выполняемая с помощью одного максимального реле тока, поскольку перегрузка обычно является симметричным режимом. Поскольку перегрузка допустима в течение длительного промежутка времени (десятки минут при токе не больше $1,5I_{T,ном}$), то защита от перегрузки при наличии дежурного персонала должна выполняться с действием на сигнал, а при отсутствии персонала — на разгрузку или на отключение трансформатора.

На трансформаторах предусматриваются следующие устройства автоматики:

автоматическое повторное включение, предназначенное для повторного включения трансформатора после его отключения максимальной токовой защитой. Требования к АПВ (автоматическое повторное включение) и способы его осуществления аналогичны рассмотренным ранее устройствам АПВ линий. Основная особенность заключается в запрещении действия АПВ трансформаторов при внутренних повреждениях, которые отключаются дифференциальной или газовой защитой;

автоматическое включение резервного трансформатора, предназначенное для автоматического включения секционного выключателя при аварийном отключении одного из работающих трансформаторов или при потере питания одной из секций по другим причинам;

автоматическое отключение и включение одного из параллельно работающих трансформаторов, предназначенное для уменьшения суммарных потерь электроэнергии в трансформаторах;

автоматическое регулирование напряжения, предназначенное для обеспечения необходимого качества электроэнергии у потребителей путем изменения коэффициента n трансформации понижающих трансформаторов подстанций, питающих распределительную сеть. Для изменения n под нагрузкой трансформаторы оборудуются устройствами РПН (регулятором переключения отпаек обмотки трансформатора под нагрузкой). Автоматическое изменение n осуществляется специальным регулятором коэффициента трансформации (АРКТ), воздействующим на РПН..

Токowe защиты трансформаторов

Трансформаторы малой мощности до 750 кВ*А при напряжении 10 кВ и до 3200 кВ*А при напряжении 35 кВ тупиковых подстанций, а также цеховые трансформаторы обычно коммутируют выключателями нагрузки ВМП. Для защиты таких трансформаторов от внутренних к. з. допускается применение (рис. 1) предохранителей (например, типа ПК). Номинальный ток плавкой вставки $I_{вс,ном}$ выбирается из тех же условий, что и для линий. Кроме того, необходимо учитывать возможность нежелательного срабатывания предохранителей при бросках тока намагничивания, вызванных включением трансформатора под напряжение. С учетом указанных условий $I_{вс,ном} = (1,5...2,5)I_{т,ном}$. Селективность защиты обеспечивается согласованием время-токовой характеристики предохранителя с характеристиками защит отходящих присоединений со стороны низшего напряжения трансформатора.

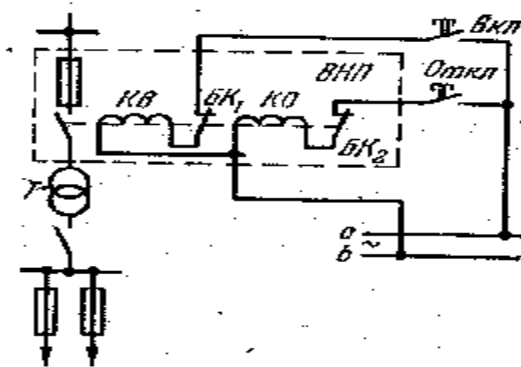


Рис. 1. Защита трансформатора малой мощности с помощью предохранителей.

Для упрощения и удешевления подстанций систем электроснабжения, подключаемых ответвлением к линии электропередачи, применяются открытые плавкие вставки (ОП), а также управляемые предохранители.

Недостатками защит трансформаторов, выполненных с помощью плавких вставок, являются:

нестабильность их защитных характеристик, которая может привести к недопустимому увеличению времени отключения трансформатора при некоторых видах внутренних повреждений;

трудность согласования с защитами смежных участков.

Токовая защита трансформаторов выполняется с использованием вторичных максимальных реле тока (прямого или косвенного действия). При этом следует иметь в виду, что трансформаторы малой мощности представляют для токов к. з. относительно большое сосредоточенное сопротивление. Поэтому защитоспособность первой ступени (отсечки без выдержки времени) получается удовлетворительной. Учитывая это, защиту обычно выполняют двухступенчатой. Первой ступенью защиты является токовая отсечка, ток срабатывания которой выбирается большим максимального тока при к. з. за трансформатором. Чувствительность первой ступени считается удовлетворительной, если $k_{\text{ч}} = 2$ при к. з. на стороне высшего напряжения трансформатора. Вторая ступень представляет собой максимальную токовую защиту, выдержка времени которой согласована с выдержками времени защит отходящих присоединений. Чувствительность максимальной токовой защиты проверяется по току при к. з. на стороне низшего напряжения. Работа токовой защиты как резервной проверяется при к. з. в конце элементов, присоединенных к шинам низшего напряжения (при этом желательно иметь $k_{\text{ч}} \geq 1.2$).

При параллельной работе двух трансформаторов следует иметь в виду, что в случае к. з. на низшей стороне максимальные токовые защиты (вторые ступени) трансформаторов могут отключить оба трансформатора. Если имеется секционный выключатель, то этот недостаток устраняется тем, что установленная на нем защита имеет меньшую выдержку времени.

Для повышения чувствительности максимальная токовая защита дополняется пуском от реле напряжения обратной последовательности (при несимметричных к. з.) и от реле минимального напряжения (при симметричных к. з.) (рис. 2).

При несимметричном к. з. на выходе фильтра ФНОП появляется напряжение, пропорциональное напряжению обратной последовательности, максимальное реле напряжения 2РН срабатывает и обуславливает срабатывание минимального реле напряжения 3РН. Если при этом для реле 1РТ $I_{\text{р}} > I_{\text{с.р}}$, то защита срабатывает. При симметричном к. з. срабатывает 3РН и реле тока 1РТ.

Ток срабатывания защиты при этом выбирается по условию отстройки от номинального тока, а не от тока самозапуска электродвигателей, питаемых от защищаемого трансформатора, что и обуславливает повышение чувствительности защиты.

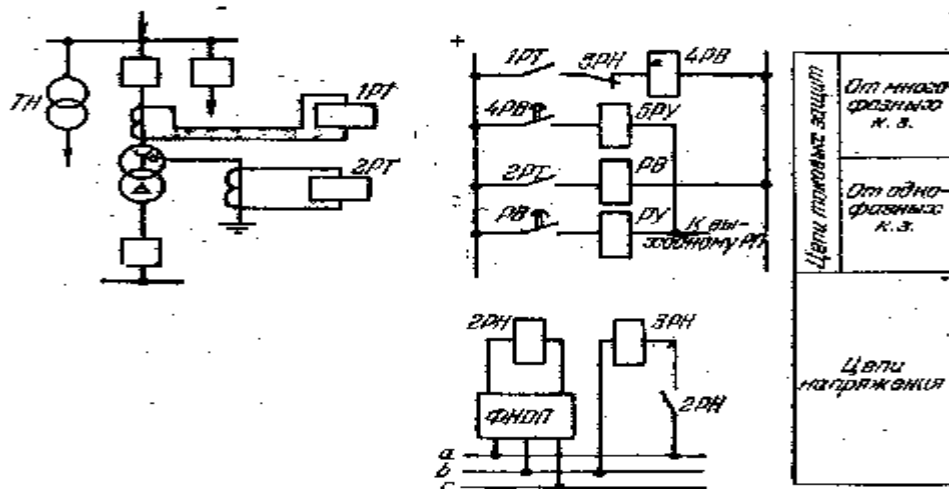


Рис. 2. Защита трансформатора от внешних к. з. и перегрузок.

Напряжение срабатывания 2РН отстраивается от напряжения небаланса $U_{\text{нб, раб}}$ на выходе фильтра ФНОП в рабочем режиме:

$$U_{c,2PH} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} U_{нб,раб}; U_{нб,раб} \approx 0,1 \frac{U_{ном}}{K_U},$$

где $k_{отс}$ и $k_{в}$ — коэффициенты отстройки и возврата реле; $U_{ном}$ и K_U — номинальное напряжение и коэффициент трансформации трансформатора напряжения ТН.

Если трансформатор с высшим напряжением 110 кВ имеет глухозаземлённую нейтраль, то при однофазном к. з. в сети 110 кВ через нейтраль трансформатора будут проходить токи нулевой последовательности, для отключения которых на трансформаторе устанавливается специальная токовая защита нулевой последовательности. Измерительный орган защиты, которая устанавливается только при наличии питания со стороны НН или СН, состоит из одного реле тока 2РТ (рис. 2), подключенного к ТТ, установленному в цепи заземления нейтрали трансформатора. Ток срабатывания защиты выбирается из условия надежной отстройки от тока небаланса в заземляющей цепи при внешних междуфазных к. з. и согласуется с токами срабатывания защит от однофазных к. з., установленных на линиях, примыкающих к защищаемому трансформатору. Значение тока срабатывания обычно находится в пределах 100—200А. Время срабатывания защиты (реле РВ) должно быть на ступень селективности больше времени срабатывания наиболее медленно действующей защиты от однофазных к. з. примыкающих к трансформатору лин-ий электропередачи, При питании трансформатора только со стороны высшего напряжения защита обычно не устанавливается.

На трехобмоточных трансформаторах с односторонним питанием защита от перегрузки устанавливается со стороны питания. При существенно различных мощностях обмоток устанавливается дополнительно защита на питаемой обмотке меньшей мощности.

Газовая защита трансформатора

Обмотки большинства трансформаторов помещены в бак, залитый маслом, которое используется как для изоляции обмоток, так и для их охлаждения. При возникновении внутри бака электрической дуги к. з., а также при перегреве обмоток масло разлагается, что сопровождается выделением газа. Это явление и используется для создания газовой защиты.

Защита выполняется с помощью газового реле, установленного в трубе, соединяющей бак трансформатора с расширителем. Газовое реле состоит из кожуха и двух расположенных внутри него поплавков, снабженных ртутными контактами, замыкающимися при изменении их положения. Оба поплавок шарнирно укреплены на вертикальной стойке. Один из них расположен в верхней части, а второй — в центральной. При слабом газообразовании (газ скапливается в верхней частей кожуха реле), а также при понижении уровня масла верхний поплавок опускается, что приводит к замыканию его контактов. При бурном газообразовании потоки масла устремляются в расширитель, что приводит к замыканию контактов обоих поплавков. Контакты верхнего поплавка носят название сигнальных, а нижнего — основных контактов газового реле.

Движение масла через газовое реле, вызванное к. з. внутри бака трансформатора, обычно является толчкообразным: Поэтому замыкание основных контактов может быть ненадежным (перемежающимся), что учитывается, при выполнении схемы газовой защиты трансформатора.

На рис. 3 изображена схема газовой защиты на переменном оперативном токе. Выходное промежуточное реле защиты РП самоудерживается до отключения выключателя 1В со стороны питания.

Поскольку газовая защита может сработать ложно, например, вследствие выхода воздуха из бака трансформатора после доливки свежего масла, в схеме защиты предусмотрены переключающее устройство ПУ и резистор R, с помощью которых действие газовой защиты может быть переведено на сигнал.

Достоинствами газовой защиты являются простота выполнения, срабатывание при всех видах повреждения внутри бака трансформатора, высокая чувствительность.

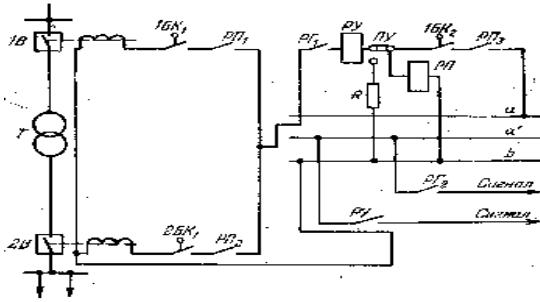


Рис. 3. Принципиальная схема газовой защиты трансформатора,

Однако газовая защита, естественно, не срабатывает при повреждениях вне бака трансформатора. Поэтому она не может быть единственной основной защитой трансформатора.

Трансформаторы мощностью 1 МВ*А и более обычно поставляются комплектно с газовой защитой.

Продольная дифференциальная токовая защита трансформатора

На трансформаторах мощностью более 7,5 МВ*А в качестве основной защиты устанавливается продольная дифференциальная токовая защита. Принцип действия защиты аналогичен защите линий электропередачи. Однако особенности трансформатора как объекта защиты приводят к тому, что $I_{нб}$ в дифференциальной защите трансформатора значительно больше, чем в дифференциальных защитах других элементов системы электроснабжения. Основными факторами, которые необходимо учитывать при выполнении дифференциальной защиты трансформатора, являются следующие.

Бросок тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения внешнего к. з. Ток намагничивания трансформатора (рис. 4, а) $I_{нам} = I_{1п} - I_{2п}$ в нормальном режиме работы невелик и составляет 2—3% номинального тока $I_{т,ном}$. После отключения внешнего к. з., как и при включении трансформатора под напряжение, возникающий бросок тока намагничивания может превышать номинальный ток $I_{т,ном}$ в 6—8 раз.

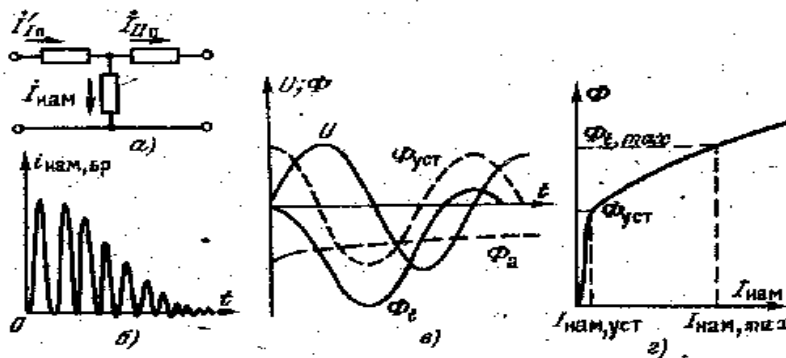


Рис. 4. Изменение потока и тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение.

а — поясняющая схема; б — изменение тока намагничивания; в — изменения напряжения и магнитного потока; г — характеристика намагничивания.

Значение тока при броске зависит от момента включения трансформатора под напряжение. Наибольшее значение бросок тока намагничивания имеет при включении трансформатора в момент, когда мгновенное значение напряжения U равно нулю (рис. 4,

в, г). В этом случае магнитный поток Φ_t в сердечнике трансформатора в начальный период времени содержит большую аperiodическую составляющую Φ_a и превышает при переходном процессе установившееся значение $\Phi_{уст}$ практически в 2 раза. Поскольку зависимость $\Phi = f(I_{нам})$ нелинейна, то $i_{нам}$ увеличивается по отношению к установившемуся значению в сотни раз, но остается обычно меньшим максимальных переходных токов внешних (сквозных) к. з. Бросок тока намагничивания может содержать большую аperiodическую составляющую, а также значительный процент высших гармоник (прежде всего второй). Затухание броска происходит медленнее, чем тока к. з. В результате кривая броска тока намагничивания $i_{нам,бр}$ (рис. 4, б) может оказаться смещенной по одну сторону оси времени.

Указанные характерные особенности броска тока намагничивания используются для обеспечения отстроенности дифференциальной токовой защиты трансформатора, поскольку при отстройке защиты по току срабатывания она имеет очень низкую защитоспособность, а при отстройке по времени — теряет быстроту срабатывания.

Схемы соединения обмоток трансформатора. Если обмотки высшего и низшего напряжения трансформатора соединены не по схеме Y/Y-12, а по какой-то другой схеме, то между токами фаз трансформатора на сторонах высшего и низшего напряжения существует фазовый сдвиг. Так, при широко распространенной схеме соединения обмоток трансформатора Y/D-11 фазовый сдвиг составляет $\Delta I_{1п} I_{1п} = 30$ эл. град. Поэтому при одинаковых схемах соединения вторичных обмоток групп 1ТТ и 2ТТ трансформаторов тока (на сторонах высшего и низшего напряжения) в дифференциальной цепи защиты при внешнем к. з. проходит значительный ток, равный примерно половине вторичного тока ТТ при внешнем к. з. •

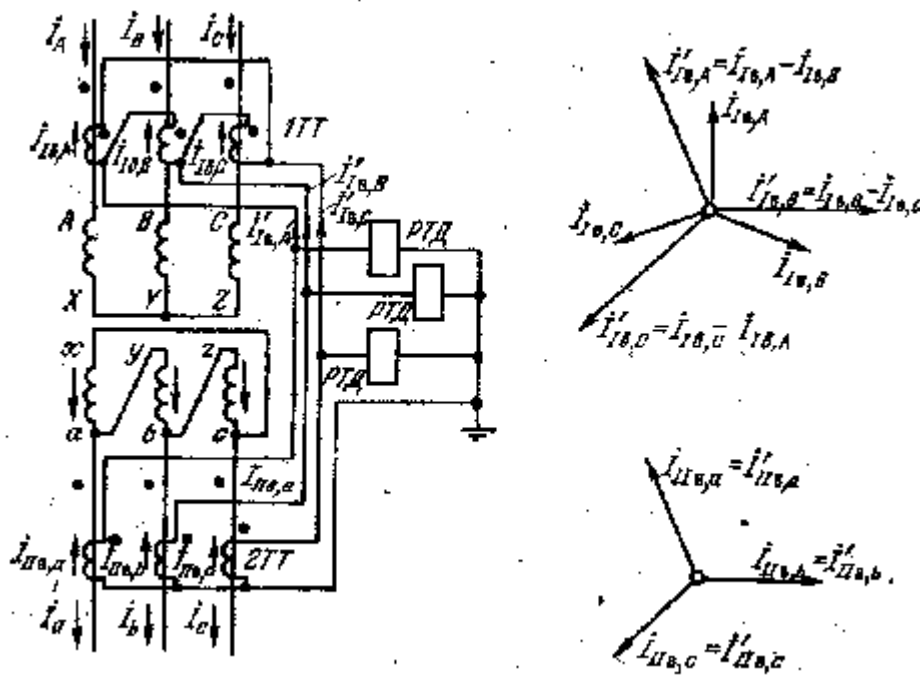


Рис. 5. Схема соединения ТТ дифференциальной токовой защиты трансформатора Y/D-11 и векторные диаграммы.

Регулирование коэффициента трансформации трансформатора. При регулировании коэффициента трансформации трансформатора соотношение между первичными, а следовательно, и между вторичными токами 1ТТ и 2ТТ изменяется, что также приводит к появлению тока небаланса в дифференциальной цепи защиты. Различия типов ТТ, их нагрузок и кратностей токов внешнего к. з. Трансформаторы тока ТТ дифференциальной защиты трансформатора устанавливаются на сторонах трансформатора, имеющих различное напряжение, поэтому они не могут быть одинаковыми. Кроме того, схемы

соединения вторичных обмоток ТТ также различны, а следовательно, трансформаторы тока имеют разную нагрузку. Различны у разных групп ТТ (особенно в случае трехобмоточного трансформатора) и кратности тока внешнего к.з. по отношению к их номинальным токам. Все это обуславливает разные погрешности у разных групп ТТ, что приводит к появлению повышенных токов небаланса в дифференциальной цепи защиты при внешних к. з.

Рассмотренные выше факторы обуславливают применение защит различной сложности и с использованием разных способов обеспечения их защитоспособности и отстроенности. В простейшем случае в качестве РТД (рис, 5) используют обычное реле тока без замедления (такую защиту называют дифференциальной отсечкой). Однако защитоспособность ее мала из-за того, что защита получается весьма грубой. Для повышения чувствительности применяют реле и схемы, основные из которых (реле с промежуточными насыщающимися трансформаторами в дифференциальной цепи, реле с торможением) были рассмотрены применительно к продольной дифференциальной защите линий. В ряде случаев применяются и более сложные принципы (особенно для обеспечения отстроенности защиты от бросков тока намагничивания трансформатора).

2-ЧАСТЬ
ЛЕКЦИЯ № 1

Принцип работы асинхронных машин.

Цель: Изучение основных режимов и конструктивное исполнение асинхронных машин.

План:

1. Двигательный режим
2. Генераторный режим
3. Режим торможения противовключением
4. Устройство асинхронных двигателей



В соответствии с принципом обратимости электрических машин асинхронные машины могут работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. Кроме того, возможен еще и режим электромагнитного торможения противовключением.

Двигательный режим. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой ротора, наводит в ней ЭДС. При этом в стержнях обмотки ротора появляются токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем на роторе возникают электромагнитные силы. Совокупность этих сил создает электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор асинхронного

двигателя приходит во вращение с частотой $n_2 < n_1$ в сторону вращения поля статора. Если вал асинхронного двигателя механически соединить с валом какого-либо исполнительного механизма ИМ (станка, подъемного крана и т. п.), то вращающий момент двигателя M , преодолев противодействующий (нагрузочный) момент $M_{\text{нагр}}$ исполнительного механизма, приведет механизм во вращение. Следовательно, электрическая мощность P_1 , поступающая в двигатель из сети, в основной своей части преобразуется в механическую мощность P_2 и передается исполнительному механизму ИМ (рис. 1.1,б).

Весьма важным параметром асинхронной машины является *скольжение* — величина, характеризующая разность частот вращения ротора и вращающегося поля статора:

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \quad (1.1)$$

Скольжение выражают в долях единицы либо в процентах. В последнем случае величину, полученную по (1.1), следует умножить на 100.

Вполне очевидно, что с увеличением нагрузочного момента на валу асинхронного двигателя частота вращения ротора n_2 уменьшается. Следовательно, скольжение асинхронного двигателя зависит от механической нагрузки на валу двигателя и может изменяться в диапазоне $0 < s \leq 1$.

При включении асинхронного двигателя в сеть в начальный момент времени ротор под влиянием сил инерции неподвижен ($n_2 = 0$). При этом скольжение s равно единице. В режиме работы двигателя без нагрузки на валу (режим холостого хода) ротор вращается с частотой лишь немного меньшей синхронной частоты вращения n_1 и скольжение весьма мало отличается от нуля ($s \approx 0$). Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют *номинальным скольжением* $s_{\text{ном}}$. Для асинхронных двигателей общего назначения $s_{\text{ном}} = 1 \div 8\%$, при этом для двигателей большой мощности $s_{\text{ном}} = 1\%$, а для двигателей малой мощности $s_{\text{ном}} = 8\%$.

Преобразовав выражение (1.1), получим формулу для определения асинхронной частоты вращения (об/мин):

$$n_2 = n_1(1-s). \quad (1.2)$$

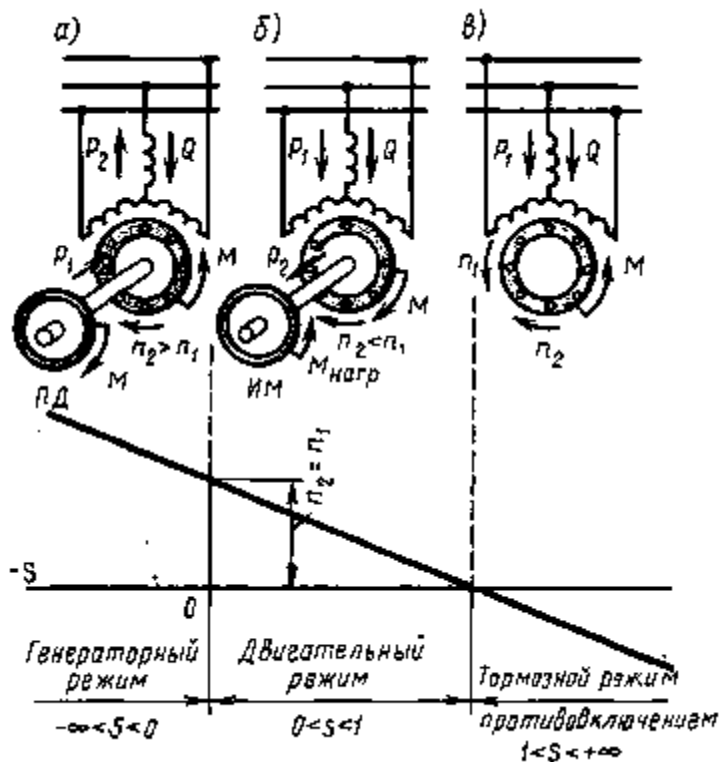


Рис.1.1 Режимы работы асинхронной машины.

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 **о б г о н я т ь** поле статора. При этом скольжение станет отрицательным, а ЭДС, наведенная в обмотке ротора, изменит свое направление. Электромагнитный момент на роторе M также изменит свое направление, т. е. будет направлен встречно вращающемуся магнитному полю статора и станет тормозящим по отношению к вращающемуся моменту приводного двигателя M (рис. 1.1, о). В этом случае механическая мощность приводного двигателя в основной своей части будет преобразована в электрическую активную мощность P_2 переменного тока. Особенность работы асинхронного генератора состоит в том, что вращающееся магнитное поле в нем создается реактивной мощностью Q трехфазной сети, в которую включен генератор и куда он отдает вырабатываемую активную мощность P_2 . Следовательно, для работы асинхронного генератора необходим источник переменного тока, при подключении к которому происходит возбуждение генератора, т. е. в нем возбуждается вращающееся магнитное поле.

Скольжение асинхронной машины в генераторном режиме может изменяться в диапазоне $-\infty < s < 0$, т. е. оно может принимать любые отрицательные значения.

Режим торможения противовключением. Если у работающего трехфазного асинхронного двигателя поменять местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов, то вращающееся поле статора изменит направление вращения 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 (рис. 1.1, в). Этот режим работы асинхронной машины называется *электромагнитным торможением противовключением*. Активная мощность, поступающая из сети в машину при этом режиме, частично затрачивается на компенсацию механической мощности вращающегося ротора, т. е. на его торможение.

В режиме электромагнитного торможения частота вращения ротора является отрицательной, а поэтому скольжение приобретает положительные значения больше единицы:

$$s = [n_1 - (-n_2)] / n_1 = (n_1 + n_2) / n_1 > 1 \quad (1.3)$$

Скольжение асинхронной машины в режиме торможения противовключением может изменяться в диапазоне $1 < s < +\infty$ т. е. оно может принимать любые положительные значения больше единицы.

Обобщая изложенное о режимах работы асинхронной машины, можно сделать вывод: характерной особенностью работы асинхронной машины является неравенство частот вращения магнитного поля статора n_1 и ротора n_2 , т. е. наличие скольжения, так как только в этом случае вращающееся магнитное поле наводит в обмотке ротора ЭДС и на роторе возникает электромагнитный момент. При этом каждому режиму работы асинхронной машины соответствует определенный диапазон изменений скольжения, а следовательно, и частоты вращения ротора.

Из рассмотренных режимов работы наибольшее практическое применение получил двигательный режим асинхронной машины, т. е. чаще используют асинхронные двигатели, которые составляют основу современного электропривода, выгодно отличаясь от других электродвигателей простотой конструкции и высокой надежностью. Поэтому теорию асинхронных машин принято излагать применительно к асинхронным

двигателям.

Устройство асинхронных двигателей

Как уже отмечалось, асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором: неподвижного статора и вращающегося ротора. Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора — вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками.

По своей конструкции асинхронные двигатели разделяются на два вида: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Рассмотрим устройство *трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором* (рис. 1.2). Двигатели этого вида имеют наиболее широкое применение.

Неподвижная часть двигателя — статор — состоит из корпуса 11 и сердечника 10 с трехфазной обмоткой. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава или из чугуна либо делают сварным. Рассматриваемый двигатель имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому поверхность его корпуса имеет ряд продольных ребер, назначение которых состоит в том, чтобы увеличить поверхность охлаждения двигателя.

В корпусе расположен сердечник 10 статора, имеющий шихтованную конструкцию: отштампованные листы из тонколистовой электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм покрыты слоем изоляционного лака, собраны в пакет и скреплены специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности пакета. Такая конструкция сердечника способствует значительному уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора, соединенные в определенном порядке лобовыми частями, находящимися за пределами сердечника по его торцовым сторонам.

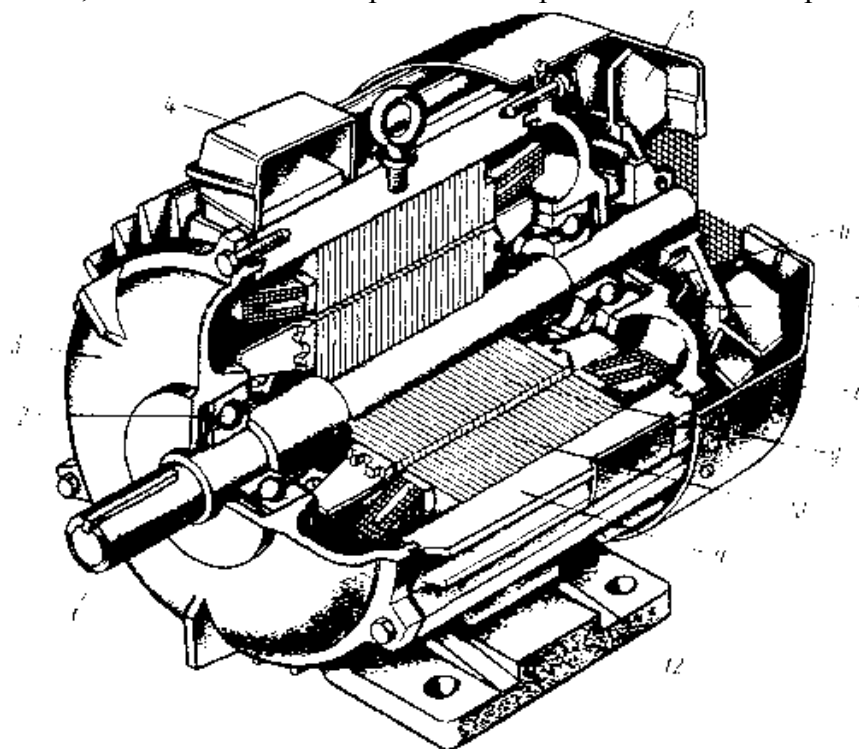


Рис.1.2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1-вал; 2,6-подшипники; 3,7-подшипниковые щиты; 4-коробка выводов; 5-вентилятор; 8-кожух вентилятора; 9-сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 10-сердечник статора с обмоткой; 11-корпус; 12-лапы

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала 1 и сердечника 9 с короткозамкнутой обмоткой. Такая обмотка, называемая «белочье колесо», представляет собой ряд металлических (алюминиевых или медных) стержней, расположенных в пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон коротко замыкающими кольцами (рис. 1.3, а). Сердечник ротора также имеет шихтованную конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, а имеют на своей поверхности тонкую пленку окисла. Это является достаточной изоляцией, ограничивающей вихревые токи, так как величина их невелика из-за малой частоты перемагничивания сердечника ротора. Например, при частоте сети 50 Гц и номинальном скольжении 6 % частота перемагничивания сердечника ротора составляет 3 Гц.

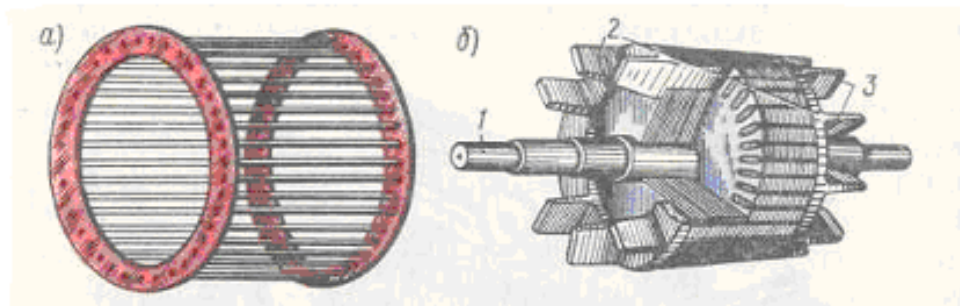


Рис.1.3. Короткозамкнутый ротор:

а-обмотка «белочья клетка»; б-ротор с обмоткой, выполненной методом литья под давлением; 1-вал; 2-короткозамыкающие кольца; 3-вентиляционные лопатки.

Короткозамкнутая обмотка ротора в большинстве двигателей выполняется заливкой собранного сердечника ротора расплавленным алюминиевым сплавом. При этом одновременно со стержнями обмотки отливаются короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки (рис. 1.3, б).

Вал ротора вращается в подшипниках качения 2 и 6, расположенных в подшипниковых щитах 3 и 7.

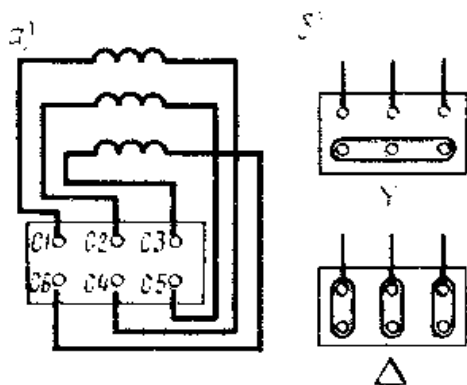


Рис.1.4. Расположение выводов обмотки статора (а) и положение перемычек при соединении обмотки статора звездой и треугольником (б).

Охлаждение двигателя осуществляется методом обдува наружной оребренной поверхности корпуса. «Поток воздуха создается центробежным вентилятором 5, прикрытым кожухом 8. На торцевой поверхности этого кожуха имеются отверстия для забора воздуха. Двигатели мощностью 15 кВт и более помимо закрытого делают еще и защищенного исполнения с внутренней самовентиляцией. В подшипниковых щитах этих двигателей имеются отверстия (жалюзи), через которые воздух посредством вентилятора прогоняется через внутреннюю полость двигателя.

При этом воздух «омывает» нагретые части (обмотки, сердечники) двигателя и охлаждение получается более эффективным, чем при наружном обдуве.

Концы обмоток фаз выводят на зажимы коробки выводов 4. Обычно асинхронные двигатели предназначены для включения в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающиеся в 3 раз. Например, двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжения 380/660 В. Если в сети линейное напряжение 660 В, то обмотку статора следует соединить звездой, а если 380 В, то треугольником. В обоих случаях напряжение на обмотке каждой фазы будет 380 В. Выводы обмоток фаз располагают на панели таким образом, чтобы соединения обмоток фаз было удобно выполнять посредством перемычек, без перекрещивания последних (рис. 1.4). В некоторых У двигателях небольшой мощности в коробке выводов имеется лишь три зажима. В этом случае двигатель может быть включен в сеть на одно напряжение (соединение обмотки статора такого двигателя звездой или треугольником выполнено внутри двигателя).

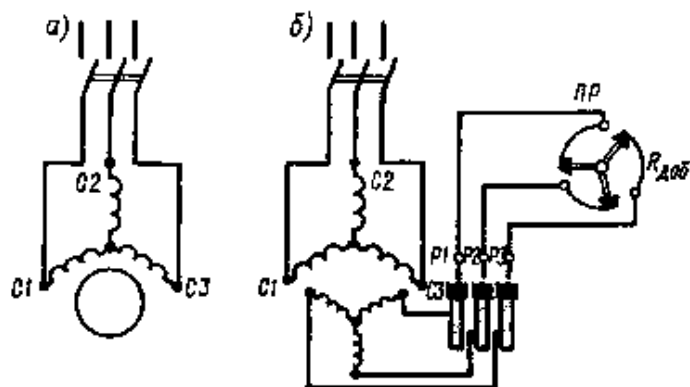


Рис.1.5.принципиальные схемы включения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором

Монтаж двигателя в месте его установки осуществляется либо посредством лап 12 (см. рис. 1.2), либо посредством фланца. В последнем случае на подшипниковом щите (обычно со стороны выступающего конца вала) делают фланец с отверстиями для крепления двигателя на рабочей машине. Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения электрическим током двигатели снабжаются болтами заземления (не менее двух). Принципиальная схема включения в трехфазную сеть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором показана на рис. 1.5, а.

Другая разновидность трехфазных асинхронных двигателей — *двигатели с фазным ротором* — конструктивно отличается от рассмотренного двигателя главным образом устройством ротора. Статор этого двигателя также состоит из корпуса 3 и сердечника 4 с трехфазной обмоткой. У него имеются подшипниковые щиты 2 и 6 с подшипниками качения 1 и 7. К корпусу 3 прикреплены лапы 10 и коробка выводов 9. Однако ротор имеет более сложную конструкцию. На валу 8 закреплен шихтованный сердечник 5 с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоединяют к трем контактными кольцам 11, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала. Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося ротора на каждое контактное кольцо 1 (рис. 1.7). накладывают обычно две щетки 2, располагаемые в щеткодержателях 3. Каждый щеткодержатель снабжен пружинами, обеспечивающими прижатие щеток к контактному кольцу с определенным усилием.

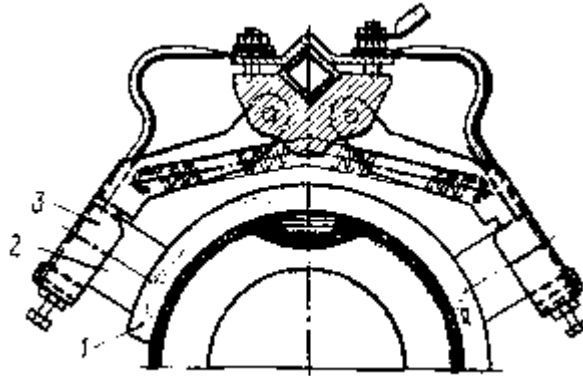


Рис.1.7. Расположение щеткодержателей.

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Принципиальная схема включения в трехфазную сеть асинхронного двигателя с фазным ротором показана на рис. 1.5,б. Обмотка ротора этого двигателя соединена с пусковым реостатом *ПР*, создающим в цепи ротора добавочное сопротивление $R_{доб}$.

На корпусе асинхронного двигателя прикреплена табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска и номинальные данные (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

Контрольные вопросы

1. Что такое скольжение асинхронной машины?
2. Каков диапазон изменения скольжения асинхронной машины в различных режимах ее работы?
3. С какой целью обмотку статора асинхронного генератора подключают к сети трехфазного тока?
4. Каким образом асинхронный двигатель можно перевести в режим электромагнитного торможения?
5. Объясните конструкцию короткозамкнутого и фазного роторов.

Лекция-2:

Потери и КПД асинхронного двигателя

Цель: Рассмотреть режимы работы и основные потери асинхронного двигателя.

План:

1. Потери мощности в асинхронном двигателе.
2. Электромагнитный момент в двигателе
3. Скольжение асинхронного двигателя
4. КПД асинхронного двигателя

Потери мощности в асинхронном двигателе.

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронной машине сопряжено с потерями энергии, поэтому полезная мощность на валу двигателя P_2 всегда меньше потребляемой из сети мощности P_1 на величину потерь SP :

$$P_2 = P_1 - SP$$

Потери SP преобразуются в теплоту, что приводит к нагреву машины. Потери в электрических машинах разделяют на *основные* и *добавочные*. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Магнитные потери P_m в асинхронном двигателе вызваны потерями на гистерезис и на вихревые токи, возникающие в магнитопроводе при его перемагничивании. Величина магнитных потерь пропорциональна частоте перемагничивания $P_m \propto f^b$, где b лежит в пределах 1,3–1,5. Частота перемагничивания магнитопровода статора равна частоте сети f_1 . Частота перемагничивания магнитопровода ротора $f_2 = f_1 s$ не превышает в номинальном режиме нескольких герц, поэтому магнитные потери ротора малы, и в практических расчетах они не учитываются.

Электрические потери $P_{э}$ в асинхронном двигателе вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами:

$P_{э1} = m_1 R_1 I_1^2$ и $P_{э2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_2 \Phi_2^2$. Электрические потери пропорциональны квадрату тока в обмотке.

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ передается электромагнитным путем через воздушный зазор от статора к ротору:

$P_{эм} = P_1 - (P_m + P_{э1}) = \frac{P_{э2}}{s}$. Электрические потери пропорциональны скольжению, поэтому предпочтительными являются режимы с малыми скольжениями.

В асинхронных машинах с фазным ротором имеются также потери в щеточном контакте:

$$P_{э.щ} = \frac{1}{2} m_2 I_2 D U_{щ}$$

Механические потери P_m – это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию.

Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора ($P_m \propto n_2^2$). В асинхронных двигателях с фазным ротором механические потери происходят еще и за счет трения между щетками и контактными кольцами ротора.

Добавочные потери $P_{д}$ включают в себя все виды трудноучитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. В соответствии со стандартом добавочные потери асинхронных двигателей принимают равными 0,5 % от подводимой к двигателю мощности P_1 .

При расчете добавочных потерь для режима, отличного от номинального следует пользоваться выражением

$$P_{д\phi} = P_{д} b^2, \text{ где } b = \frac{I_1}{I_{1ном}} \text{ – коэффициент нагрузки.}$$

Коэффициент полезного действия асинхронной машины:

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

КПД трехфазных асинхронных двигателей общего назначения при номинальной нагрузке: для двигателей мощностью от 1 до 10 кВт составляет 75–85 %, для двигателей мощностью более 10 кВт – 90–94 %.

Электромагнитный момент в двигателе

Электромагнитный момент асинхронной машины создается в результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Связь между моментом и скоростью вращения ротора можно получить из [уравнения механической](#)

мощности. Если в него подставить выражение для тока ротора, то с учетом того, что

$$\Omega = (1 - s) \frac{2\pi f_1}{P}$$

угловая частота вращения равна $\frac{2\pi f_1}{P}$, получим

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 R'_2}{2\pi f_1 s [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

Все величины, входящие в это выражение константы, кроме скольжения s . Взяв производную dM/ds и приравняв ее нулю, найдем экстремумы функции $M(s)$. Они наступают при критическом скольжении

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \approx \pm \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} = \pm \frac{R'_2}{X_K}$$

К приближенному равенству для критического скольжения можно перейти с учетом того, что $R_1 \ll X_1 + X'_2$. Подставляя критическое скольжение в выражение $M(s)$, получим значение максимального момента

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 s [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]}$$

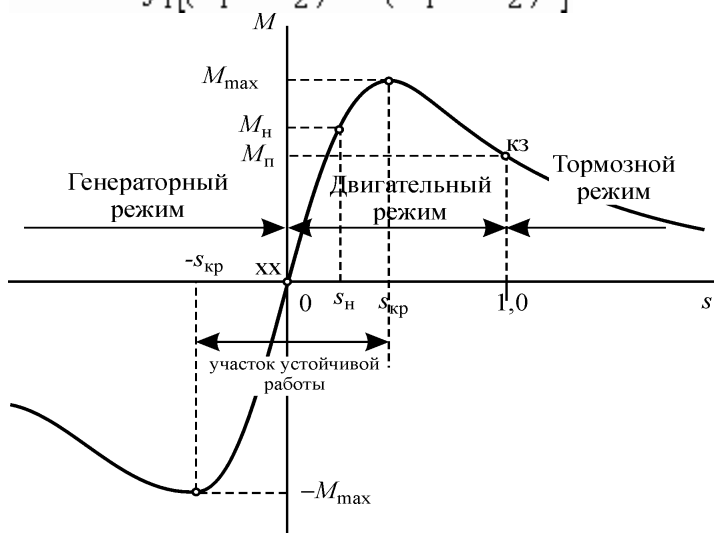
Знак плюс в этих выражениях соответствует двигателю, а минус – генераторному.

Из выражения для M_{max} следует, что максимальный момент в генераторном режиме больше, чем в двигателю. Однако, пренебрегая R_1 также, как это было сделано для $s_{кр}$, мы получим упрощенное выражение для максимального момента более удобное для качественного анализа –

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 s (X_1 + X'_2)} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 s X_K}$$

Полагая $s = 1$ в выражении $M(s)$, получим выражение для пускового момента асинхронного двигателя

$$M_{п} = \frac{m_1 p U_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$



Полученная зависимость $M(s)$ представлена на рисунке. Точка $s = 0 : M = 0$ соответствует идеальному холостому ходу машины. Этот режим может быть получен только за счет внешнего вращающего момента. Точка $s = 1 : M = M_{п}$ соответствует пусковому режиму или режиму короткого замыкания. Устойчивая работа машины возможна только в пределах

скольжений от $-s_{кр}$ до $s_{кр}$, т.к. вне этого участка при увеличении скольжения момент двигателя уменьшается, что приводит к дальнейшему увеличению скольжения (снижению скорости) и этот процесс будет развиваться до полной остановки двигателя. Переход на участок неустойчивой работы называется "опрокидыванием" двигателя. Это происходит, если момент нагрузки больше или равен максимальному, поэтому максимальный момент называют также опрокидывающим.

Номинальный режим работы двигателя соответствует скольжению $s_n < s_{кр}; M_n < M_{max}$. Отношение $\lambda = \frac{M_{max}}{M_n} = 1,7 \dots 2,5$ называется перегрузочной способностью. Превышение максимального момента над номинальным является необходимым условием надежной работы двигателя.

Если за счет внешнего вращающего момента вал двигателя раскручивается до скорости выше синхронной n_1 , то скольжение становится отрицательным и машина переходит в генераторный режим.

При скольжениях $s > 1$ скорость вращения будет отрицательной, т.е. ротор двигателя будет вращаться в направлении противоположном направлению вращения магнитного поля и машина перейдет в тормозной режим или режим противовключения.

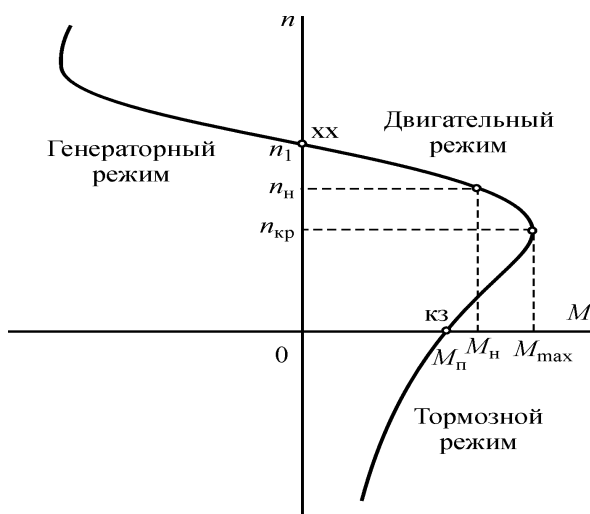
На рисунке $M(s)$ для наглядности критическое скольжение составляет около 0,5. Такие значения в реальных машинах нормального исполнения не бывают. Они находятся в пределах от 0,1 до 0,02, причем меньшие значения соответствуют машинам большей мощности. Поэтому рабочий участок характеристики $M(s)$ практически линейный и

$$M = \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 R_2'} s = Cs$$

может быть заменен прямой

Выражение $M(s)$ не позволяет анализировать свойства характеристики в общем виде. Однако, если его разделить на M_{max} , то получится удобное выражение в относительных единицах, называемое по имени автора формулой Клосса

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$



В теории электрических машин и электропривода вместо характеристики $M(s)$ принято пользоваться механической характеристикой. Механическая характеристика двигателя это зависимость скорости вращения от момента нагрузки на валу, т.е. $n(M)$. Эту характеристику легко можно получить из характеристики $M(s)$, если учесть, что $n = n_1(1 - s)$, т.е. она

получается смещением оси момента в точку $s = 1$ и изменением масштаба оси скольжений. При этом в новой системе координат режимы работы машины (генераторный, двигательный и тормозной) оказываются в различных квадрантах

плоскости $n - M$, а режимы холостого хода и короткого замыкания – в точках пересечения механической характеристики с осями координат.

Линеаризованная механическая характеристика рабочего участка примет вид

$$n = n_1 - 60 \frac{2\pi f_1^2 R_2'}{m_1 p^2 U_1^2} M = n_1 - aM$$

Скольжение асинхронного двигателя

В результате взаимодействия магнитного поля с токами в роторе асинхронного двигателя создается вращающий электромагнитный момент, стремящийся уравнять скорость вращения магнитного поля статора и ротора.

Разность скоростей вращения магнитного поля статора и ротора асинхронного двигателя характеризуется **величиной скольжения** $s = (n_1 - n_2) / n_2$, где n_1 - синхронная скорость вращения поля, об/мин, n_2 - скорость вращения ротора асинхронного двигателя, об/мин. При работе с номинальной нагрузкой скольжение обычно мало, так для электродвигателя, например, с $n_1 = 1500$ об/мин, $n_2 = 1460$ об/мин, скольжение равно: $s = ((1500 - 1460) / 1500) \times 100 = 2,7\%$.

Асинхронный двигатель не может достичь синхронной скорости вращения даже три отсоединенном механизме, так как при ней проводники ротора не будут пересекаться магнитным полем, в них не будет наводиться ЭДС и не будет тока. Асинхронный момент при $s = 0$ будет равен нулю.

В начальный момент пуска в обмотках ротора протекает ток с частотой сети. По мере ускорения ротора частота тока в нем будет определяться **скольжением асинхронного двигателя**: $f_2 = s \times f_1$, где f_1 - частота тока, подводимого к статору.

Сопротивление ротора зависит от частоты тока в нем, причем чем больше частота, тем больше его индуктивное сопротивление. С увеличением индуктивного сопротивления ротора увеличивается сдвиг фаз между напряжением и током в обмотках статора.

При пуске асинхронных двигателей коэффициент мощности поэтому значительно ниже, чем при нормальной работе. Величина тока определяется **эквивалентным значением сопротивления электродвигателя** и приложенным напряжением.

Величина эквивалентного сопротивления асинхронного двигателя с изменением скольжения изменяется по сложному закону. При уменьшении скольжения в пределах 1 - 0,15 сопротивление увеличивается, как правило, не более чем в 1,5 раза, в пределах от 0,15 до 0,05 в 5-7 раз по отношению к начальному значению при пуске.

Ток по величине изменяется обратно пропорционально изменению эквивалентного сопротивления. Таким образом, при пуске до скольжения порядка 0,15 ток падает незначительно, а в дальнейшем быстро уменьшается.

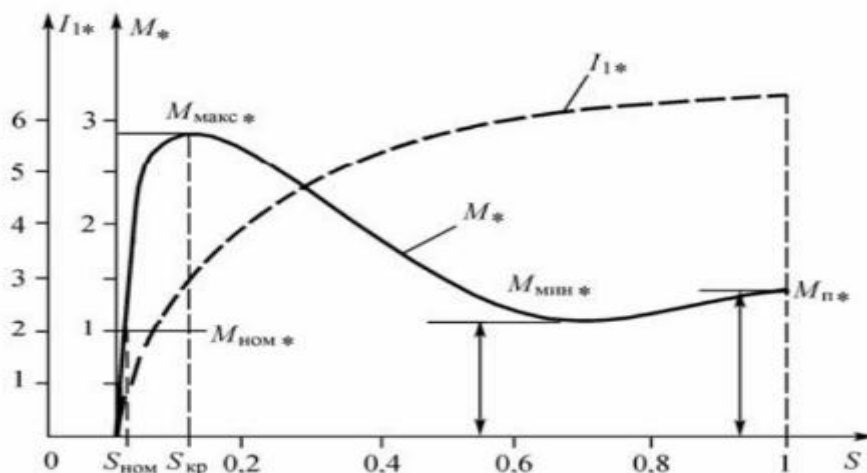
Момент вращения электродвигателя определяется величиной магнитного потока, током и угловым сдвигом между ЭДС и током в роторе. Каждая из этих величин в свою очередь зависит от скольжения, поэтому для исследования рабочих характеристик асинхронных двигателей устанавливается зависимость момента от скольжения и влияния на него подводимого напряжения и частоты.

Момент вращения может быть также определен по электромагнитной мощности на валу как отношение этой мощности к угловой скорости ротора. **Величина момента пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна квадрату частоты.**

Характерными значениями момента в зависимости от скольжения (или скорости) являются **начальное значение момента** (когда электродвигатель еще неподвижен), **максимальное значение момента** (и соответствующее ему скольжение, называемое критическим) и **минимальное значение момента в пределе скоростей от неподвижного состояния до номинальной.**

Значения момента для номинального напряжения приводятся в каталогах для электрических машин. Знание минимального момента необходимо при расчете допустимости пуска или самозапуска механизма с полной нагрузкой механизма. Поэтому его значение для конкретных расчетов должно быть либо определено, либо получено от завода-поставщика.

Величина максимального значения момента определяется индуктивным сопротивлением рассеяния статора и ротора и не зависит от величины сопротивления ротора.



Зависимость тока и момента от скольжения

Критическое скольжение определяется отношением сопротивления ротора к эквивалентному сопротивлению (обусловлено активным сопротивлением статора и индуктивным сопротивлением рассеяния статора и ротора). Увеличение только активного сопротивления ротора сопровождается увеличением критического скольжения и перемещением максимума момента в область более высоких скольжений (меньшей скорости вращения). Таким путем может быть достигнуто изменение характеристик моментов.

Изменение скольжения возможно увеличением сопротивления ротора или потока. Первый вариант осуществим только для асинхронных двигателей с фазным ротором (от $S=1$ до $S=S_{ном}$), но не экономичен. Второй вариант осуществим при изменении питающего напряжения, но только в сторону уменьшения. Диапазон регулирования мал, так как S возрастает, но одновременно уменьшается перегрузочная способность асинхронного двигателя. По экономичности оба варианта, примерно, равноценны.

В асинхронных двигателях с фазным ротором изменение момента при различных скольжениях осуществляется с помощью сопротивления, вводимого в цепь обмотки ротора. В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором изменение момента может быть достигнуто за счет применения двигателей с переменными параметрами или с помощью частотных преобразователей.

КПД асинхронного двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1} \quad (13.10)$$

Электрические потери в обмотках P_{Σ} и $P_{\Sigma 2}$ являются переменными потерями, так как их величина зависит от нагрузки двигателя, т. е. от значений токов в обмотках статора и ротора [см. (13.2) и (13.3)]. Переменными являются также и добавочные потери (13.8). Что же касается магнитных P_{Σ} и механических $P_{\Sigma 2}$, то они практически не зависят от

нагрузки (исключение составляют двигатели, у которых с изменением нагрузки в широком диапазоне меняется частота вращения).

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя с изменениями нагрузки также меняет свою величину: в режиме холостого хода КПД равен нулю, а затем с ростом нагрузки он увеличивается, достигая максимума при нагрузке $(0,7 \div 0,8) \cdot P_{ном}$. При дальнейшем увеличении нагрузки КПД незначительно снижается, а при перегрузке ($P_2 > P_{ном}$) он резко убывает, что объясняется интенсивным ростом переменных потерь $(P_{э1} + P_{э2} + P_{доб})$, величина которых пропорциональна квадрату тока статора, и уменьшением коэффициента мощности. График зависимости КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$ Для асинхронных двигателей имеет вид, рис. 62.

КПД трехфазных асинхронных двигателей общего назначения при номинальной нагрузке составляет: для двигателей мощностью от 1 до 10 кВт $\eta_{ном} = 75 = 88\%$, для двигателей мощностью более 10 кВт $\eta_{ном} = 90 = 94\%$.

Коэффициент полезного действия является одним из основных параметров асинхронного двигателя, определяющим его энергетические свойства – экономичность в процессе эксплуатации. Кроме того, КПД двигателя, а точнее величина потерь в нем, регламентирует температуру нагрева его основных частей и в первую очередь его обмотки статора. По этой причине двигатели с низким КПД (при одинаковых условиях охлаждения) работают при более высокой температуре нагрева обмотки статора, что ведет к снижению их надежности и долговечности.

Лекция-3:

Механические характеристики асинхронных двигателей.

Рабочее состояние двигателя. Влияние напряжения сети на механические характеристики

Магнитные цепи и уравнение асинхронного двигателя

Цель: Изучить механических характеристик асинхронных двигателей. **План:**

1. Механические характеристики асинхронных двигателей
2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.
3. Влияние напряжения сети на механические характеристики

Механические характеристики асинхронных двигателей

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения ротора от момента на валу $n = f(M_2)$. Так как при нагрузке момент холостого хода мал, то $M_2 \approx M$ и механическая характеристика представляется зависимостью $n = f(M)$. Если учесть взаимосвязь $s = (n_1 - n) / n_1$, то механическую характеристику можно получить, представив ее графическую зависимость в координатах n и M (рис. 1).

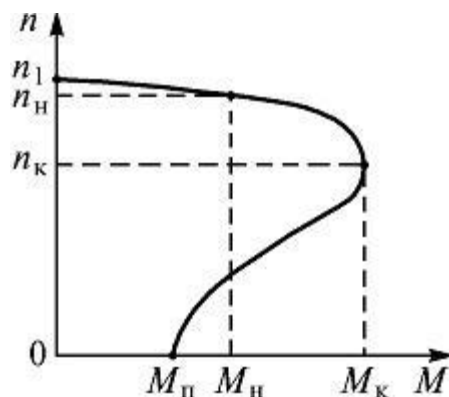


Рис. 1. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. **Искусственные характеристики** получаются, если включены какие-либо дополнительные элементы: резисторы, реакторы, конденсаторы. При питании двигателя не номинальным напряжением характеристики также отличаются от естественной механической характеристики.

Механические характеристики являются очень удобным и полезным инструментом при анализе статических и динамических режимов электропривода.

Пример расчета механической характеристики асинхронного двигателя

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от сети с напряжением = 380 В при = 50 Гц. Параметры двигателя: $P_H = 14$ кВт, $n_H = 960$ об/мин, $\cos\varphi_H = 0,85$, $\eta_H = 0,88$, кратность максимального момента $k_M = 1,8$.

Определить: номинальный ток в фазе обмотки статора, число пар полюсов, номинальное скольжение, номинальный момент на валу, критический момент, критическое скольжение и построить механическую характеристику двигателя.

Решение. Номинальная мощность, потребляемая из сети

$$P_{1H} = P_H / \eta_H = 14 / 0,88 = 16 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток, потребляемый из сети

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} U_{1H} \cos\varphi_H} = \frac{16 \cdot 10^3}{\sqrt{3} 380 \cdot 0,85} = 28 \text{ А.}$$

Число пар полюсов

$$p = 60 f / n_1 = 60 \times 50 / 1000 = 3,$$

где $n_1 = 1000$ – синхронная частота вращения, ближайшая к номинальной частоте $n_H = 960$ об/мин.

Номинальное скольжение

$$s_H = (n_1 - n_H) / n_1 = (1000 - 960) / 1000 = 0,04$$

Номинальный момент на валу двигателя

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{P_H}{\frac{\pi n_H}{30}} = \frac{14000}{\frac{\pi \cdot 960}{30}} = 139,3 \text{ Н·м.}$$

Критический момент

$$M_K = k_M \times M_H = 1,8 \times 139,3 = 250,7 \text{ Н·м.}$$

Критическое скольжение находим подставив $M = M_H$, $s = s_H$ и $M_K / M_H = k_M$.

$$s_K = k_M s_H + \sqrt{(k_M s_H)^2 - s_H^2} = s_H (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}) = 0,04 (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,132$$

Для построения механической характеристики двигателя с помощью $n = (n_1 - s)$ определим характерные точки: точка холостого хода $s = 0$, $n = 1000$ об/мин, $M = 0$, точка номинального режима $s_H = 0,04$, $n_H = 960$ об/мин, $M_H = 139,3$ Н·м и точка критического режима $s_K = 0,132$, $n_K = 868$ об/мин, $M_K = 250,7$ Н·м.

Для точки пускового режима $s_p = 1$, $n = 0$ находим

$$M_{п} = \frac{2 \cdot M_{к}}{\frac{s_{к}}{s_{п}} + \frac{s_{п}}{s_{к}}} = \frac{2 \cdot 250,7}{\frac{0,132}{1} + \frac{1}{0,132}} = 65 \text{ Н.м.}$$

По полученным данным строят механическую характеристику двигателя. Для более точного построения механической характеристики следует увеличить число расчетных точек и для заданных скольжений определить моменты и частоту вращения.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n_2 , КПД асинхронного двигателя η , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi$, и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ $f_1 = \text{const}$.

Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя

Скоростная характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота вращения ротора асинхронного двигателя $n_2 = n_1(1 - s)$.

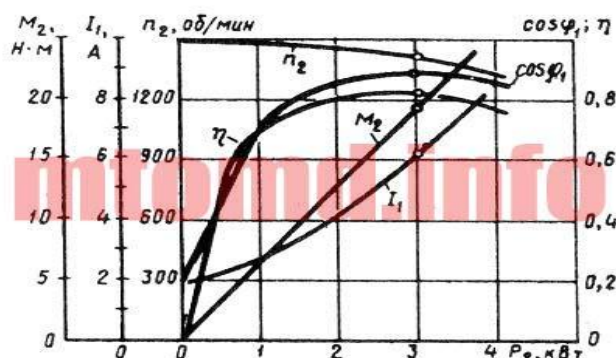
Скольжение $s = P_{\Sigma 2}/P_{\Sigma \text{эм}}$, то есть скольжение асинхронного двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности. Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, можно принять $P_{\Sigma 2} = 0$, а поэтому $s \approx 0$ и $n_2 \approx n_1$.

По мере увеличения нагрузки на валу асинхронного двигателя отношение $s = P_{\Sigma 2}/P_{\Sigma \text{эм}}$ растет, достигая значений 0,01 — 0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при увеличении активного сопротивления ротора двигателя r_2' угол наклона этой кривой увеличивается. В этом случае изменения частоты асинхронного двигателя n_2 при колебаниях нагрузки P_2 возрастают. Объясняется это тем, что с увеличением r_2' возрастают электрические потери в роторе.

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента на валу асинхронного двигателя M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением $M_2 = P_2/\omega_2 = 60 P_2/(2\pi n_2) = 9,55 P_2/n_2$, где P_2 — полезная мощность, Вт; $\omega_2 = 2\pi f_2/60$ — угловая частота вращения ротора.

Из этого выражения следует, что если $n_2 = \text{const}$, то график $M_2 = f_2(P_2)$ представляет собой прямую линию. Но в асинхронном двигателе с увеличением нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, а поэтому полезный момент на валу M_2 с увеличением нагрузки возрастает не столько быстрее нагрузки, а следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя



Зависимость $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. В связи с тем что ток статора асинхронного двигателя 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 электродвигателя I_0 при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной части является реактивным ($I_1 \approx I_0$). В результате сдвиг по фазе тока статора относительно напряжения получается значительным ($\varphi_1 \approx \varphi_0$), лишь немногим меньше 90° .

Коэффициент мощности асинхронных двигателей в режиме холостого хода обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока I_1 и коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшего значения (0,80 — 0,90) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее увеличение нагрузки на валу двигателя сопровождается уменьшением $\cos \varphi_1$ что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора (x_2s) за счет увеличения скольжения, а следовательно, и частоты тока в роторе.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей чрезвычайно важно, чтобы двигатель работал всегда или по крайней мере значительную часть времени с нагрузкой, близкой к номинальной. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности двигателя. Если же двигатель работает значительную часть времени недогруженным, то для повышения $\cos \varphi_1$, целесообразно подводимое к двигателю напряжение U_1 уменьшить. Например, в двигателях, работающих при соединении обмотки статора треугольником, это можно сделать пересоединив обмотки статора в звезду, что вызовет уменьшение фазного напряжения в раз. При этом магнитный поток статора, а следовательно, и намагничивающий ток уменьшаются примерно в раз. Кроме того, активная составляющая тока статора несколько увеличивается. Все это способствует повышению коэффициента мощности двигателя.

Лекция-4:

Режимы работы асинхронного двигателя

..

Цель: Определение основных моментов режимов работ асинхронных двигателей.

План:

1. Режимы работы асинхронного двигателя.
2. Режим двигателя асинхронной машины.
3. Режим генератора асинхронной машины.
4. Электромагнитный тормозной режим асинхронной машины

Режимы работы асинхронного двигателя.

Во всех режимах работы асинхронный машин всегда присутствует вращающееся магнитное поле статора. Оно создаётся тремя обмотками, сдвинутыми в пространстве относительно друг друга на 120 градусов, скорость этого вращения равна:

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

где:

n_1 – Скорость вращения магнитного поля статора;

f – Частота питающей сети (50Гц);

p – Количество пар полюсов ($\max 12 \min 2$);

Из формулы понятно, что скорость вращения магнитного поля статора асинхронной машины зависит от: частоты питающей сети, на территории стран СНГ она постоянна и равняется 50Гц, от количества пар полюсов в статоре асинхронной машины. Скорость

вращения ротора синхронной машины напрямую зависит от скорости вращения магнитного поля статора.

Так же известно, что в их конструкции присутствует ротор, вращающаяся часть, которая может вращаться с различными скоростями. В целом можно сказать, что в асинхронных машинах скорость вращения изменяется только у ротора. Многочисленные наблюдения показали, что в зависимости от частоты вращения ротора асинхронной машины, с ней происходят различные явления. Для упрощения понимания этого вопроса, был введен параметр **скольжение S** – разность скоростей вращения магнитного поля статора, от скорости вращения ротора:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Эти скорости обозначают буквенно: **n** – скорость вращения ротора; **n₁** – скорость вращения магнитного поля.

Режим работы асинхронной машины зависит именно от этого значения разности скоростей вращения магнитного поля статора и скорости вращения ротора.

Различают следующие режимы работы асинхронных машин:

- Режим двигателя;
- Режим генератора;
- Режим электромагнитного тормоза;
- Режим динамического торможения;

Режим двигателя

Асинхронные двигатели стали очень популярна и наиболее часто применяемая в электроприводах. Режим электродвигателя применяется для приведения во вращение различные устройства, механизмы, насосы, лебедки, редуктора и т.д. путем преобразования электрической энергии в механическую. Как уже многим известно, что её принцип действия объясняется взаимодействием двух магнитных полей статора и ротора. Магнитное поле статора создается системой трехфазных обмоток и магнитопровода, расположенных непосредственно на статоре (корпусе асинхронной машины). Это поля является вращающимся, так как в трех фазной цепи, ток протекает из фазы А в фазу В, из фазы В в фазу С, а из фазы С обратно в фазу А. Обмотки каждой фазы располагают на статоре так, что бы равномерно заполнить всю окружность, т.е. окружность занимает 360 градусов, имея три обмотки, делим 360/3 получаем 120 градусов на каждую обмотку.

Расположение обмоток



обмотки статора

Это вращающееся магнитное поле пронизывая ротор, индуцирует в нем ЭДС, так как ротор короткозамкнутый, то по нему протекает ток. Протекание тока вызывает образование у ротора собственного магнитного поля. Поле статора, которое вращается с скоростью **n₁** взаимодействует с полем ротора, которое является неподвижным, и старается остановить, затормозить поле статора. Так как ротор закреплен на подшипниках, он способен свободно вращаться вокруг своей оси. Получается, что магнитное поля статора притягивает поле ротора, увлекает его за собой с определенной силой, в результате чего и сам ротор начинает вращаться.

Особенностью этого режима является то, что скорость вращения магнитного поля статора и скорость вращения ротора не должны быть равными, тем более, скорость ротора всегда меньше. Если же каким-либо образом их скорости будут равными, то исходя из явления электромагнитной индукции, обязательна разность магнитного потока, пересекающего тот или иной контур, что и обеспечивается отставанием ротора от магнитного поля статора. Если же все-таки их скорости сравняются, по короткозамкнутой обмотке ротора перестанет протекать электрический ток, исчернит его магнитное поле и ротор не будет увлекаться полем статора. Скольжение в режиме электродвигателя должно быть положительным числом и не равным нулю.

Стоит добавить, что режим двигателя у асинхронных машин является самым часто используемым.

Режим генератора

Режим генератора у асинхронных машин является полной противоположностью режиму двигателя. Самым главным отличием является то, что при режиме двигателя, асинхронная машина потребляет из сети электрическую энергию. А в режиме генератора наоборот отдает в сеть выработанную электрическую энергию.

Режим генератора возможен только тогда, когда скорость вращения ротора n будет выше скорости вращающегося магнитного поля статора. В этом случае скольжение S будет отрицательным. Для этого необходимо ускорить ротор синхронной машины, то есть посадить на вал ротора, какой-либо механизм (турбина, редуктор, другой двигатель).



режим генератора

Допустим ротор мы разогнали до 3500 оборотов в минуту, а скорость магнитного поля статора 3000 оборотов в минуту, определим скольжение:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - 3500}{3000} = \frac{-500}{3000} = -0.17$$

Режим генератора у асинхронных машин не является часто используемым, и может применяться в узких специализированных областях, в маломощных электростанциях.

Стоит отметить, что при таком режиме работы, отдаваемая в сеть электроэнергия совпадает по частоте с частотой самой сети. Так как она зависит только от частоты вращения магнитного поля статора, которая как мы знаем не изменяется.

В использовании таких генераторов есть огромный плюс, в его устройстве отсутствуют скользящие контакты, вращающиеся обмотки, это обеспечивает надежную и долговременную эксплуатацию. Так же эти генераторы мало восприимчивы к коротким замыканиям в сети. Еще не маловажным условием работы является, наличие остаточной намагниченности ротора, которое усиливается конденсаторными установками, включенными в цепи статорных обмоток.

Режим электромагнитного торможения

Режим электромагнитного торможения является еще более специфичным специализированным. Вся суть этого режима в том, что если вращение ротора асинхронной машины не совпадает с направлением вращения магнитного поля статора, то ротор будет затормаживаться под действием этого магнитного поля статора. Такой режим возможен только при реверсивном подключении асинхронной машины, так как путем переключения двух фаз достигается изменение направления вращения магнитного поля статора, и используется в различных грузоподъемных и транспортировочных устройствах. Этот режим часто называют режимом торможения противотоком или противовключением. При таком режиме, если нам необходимо остановить двигатель, при полной остановке, статор необходимо отключить от сети, так как вал начнет вращаться в обратном направлении.

Режим динамического торможения

В таком режиме, асинхронная машина отключается от трех фазной сети, и на обмотки статора подается постоянный ток. Таким образом на статоре образуется постоянное магнитное поле (постоянный магнит), которое тормозит ротор двигателя.

Все выше представленные режимы работы асинхронных машин, кроме режима двигателя, являются специализированными, и используются только в определенных установках, устройствах, станках и т.д.

Лекция-5:

Тема: Пуск двигателей с фазным и коротко замкнутым ротором

Цель: Изучение пусков асинхронного двигателя

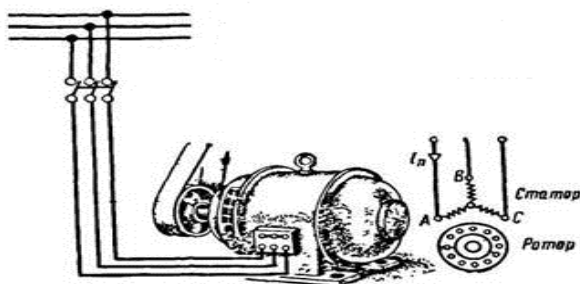
План:

1. Способы пуска асинхронных двигателей
2. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.
3. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Способы пуска асинхронных двигателей

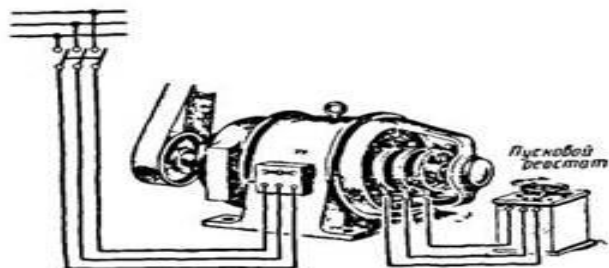
Пуск асинхронных двигателей можно производить при полном напряжении (прямой пуск) и при пониженном напряжении. Прямой пуск осуществляется при помощи рубильников, переключателей, пакетных выключателей, магнитных пускателей, контакторов и контроллеров. При прямом пуске к двигателю подается полное напряжение сети. Недостатком этого способа пуска являются большие пусковые токи, которые в 2—7 раз больше номинальных токов двигателей.

Наиболее простым является прямой пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск и останов таких двигателей производится включением или отключением рубильника (магнитного пускателя) и т. п. На фиг. 399 показана схема прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя.



Фиг. 399. Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

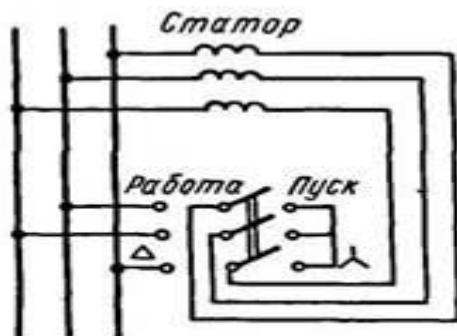
В конце пуска реостат плавно выводится и закорачивается. Наличие активного сопротивления в цепи ротора при пуске приводит к уменьшению пускового тока и увеличению пускового момента. На фиг. 400 дана схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором.



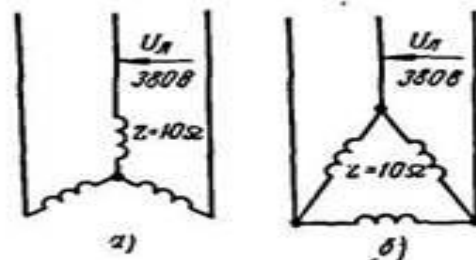
Фиг. 400. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

Для уменьшения пусковых токов асинхронных двигателей уменьшают напряжение, подводимое к обмоткам статора двигателя. Рассмотрим два способа пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении: с помощью переключателя со звезды на треугольник и с помощью автотрансформатора.

Пуск при помощи переключателя со звезды на треугольник. На фиг. 401 дана принципиальная схема включения обмотки статора с переключателем со звезды на треугольник. При пуске обмотка статора с помощью рубильника соединяется звездой и, как только двигатель разовьет максимально возможную для этого соединения скорость вращения, рубильник откидывается влево, обмотка статора оказывается включенной треугольником и двигатель получает возможность развить полную скорость. При этом способе пуска двигателя пусковой ток уменьшается в три раза. Поясним это на примере.



Фиг. 401. Переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске двигателя



Фиг. 402. Включение обмотки статора двигателя:
а — звездой, б — треугольником

На фиг. 402, а схематически изображена обмотка статора, соединенная при пуске звездой. Пусть напряжение между линейными проводами двигателя равно 380 В, а следовательно, напряжение, приходящееся на фазу двигателя при пуске, будет:

$$U_{\Phi Y} = \frac{U_{\Delta Y}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ в.}$$

Так как кажущееся сопротивление фазной обмотки двигателя равно 10 ом, то ток фазы будет:

$$I_{\Phi Y} = \frac{U_{\Phi Y}}{z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ а.}$$

При соединении звездой $I_{\Delta Y} = I_{\Phi Y}$. Поэтому ток, потребляемый двигателем в конце пуска (без учета пусковых токов), будет также равен 22 а.

На фиг. 402, б схематически показан тот же двигатель, если обмотка его соединена треугольником и включена на линейное напряжение 380 в. В этом случае $U_{\Delta \Delta} = U_{\Phi \Delta}$, а поэтому ток фазы двигателя будет:

$$I_{\Phi \Delta} = \frac{U_{\Phi \Delta}}{z} = \frac{380}{10} = 38 \text{ а.}$$

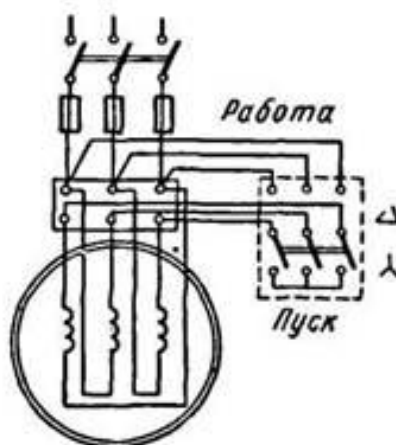
Так как при соединении треугольником

$$I_{\Delta \Delta} = I_{\Phi \Delta} \sqrt{3},$$

то двигатель в этом случае будет потреблять из сети линейный ток:

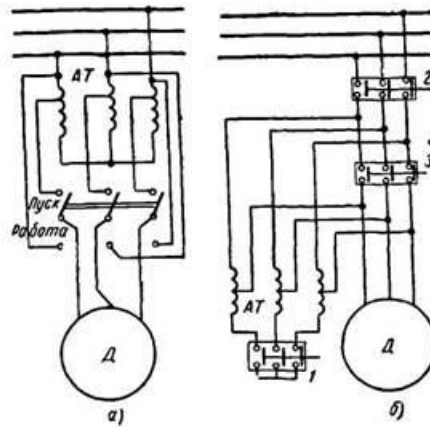
$$I_{\Delta \Delta} = 38 \cdot \sqrt{3} = 66 \text{ а.}$$

Как видно из приведенного примера, линейный ток двигателя при соединении обмоток статора звездой в три раза меньше линейного тока двигателя, статорная обмотка которого соединена треугольником. На фиг. 403 показана схема включения переключателя со звезды на треугольник в цепи статора асинхронного двигателя.



Фиг. 403. Схема включения в цепь статора асинхронного двигателя переключателя со звезды на треугольник

Рассмотренный нами способ пуска двигателя уменьшает пусковой ток в три раза, а так как согласно доказанному выше момент двигателя пропорционален току ротора и, стало быть, приближенно и току статора, то одновременно пусковой момент двигателя уменьшается также в три раза. Поэтому двигатели с таким способом пуска можно применять только в тех случаях, когда их пускают вхолостую или слабо нагруженными. Само собой разумеется, что переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске можно применять только для двигателей, нормально работающих по схеме треугольник. Пуск при помощи автотрансформатора. Уменьшить напряжение, подводимое к двигателю, а вместе с этим уменьшить пусковой ток двигателя можно также при помощи автотрансформатора.



Фиг. 404. Пуск с помощью автотрансформатора:
а — низковольтного двигателя, б — высоковольтного двигателя

На фиг. 404, а показана схема пуска низковольтного асинхронного двигателя Д при помощи автотрансформатора АТ. Фиг. 404, б изображает схему пуска высоковольтного двигателя. Здесь автотрансформатор АТ имеет размыкаемую нулевую точку. Для пуска двигателя Д в ход включают масляный выключатель 1, замыкая тем самым нулевую точку автотрансформатора. Затем включают главный масляный выключатель 2; к двигателю через автотрансформатор подается из сети пониженное напряжение и двигатель трогается с места. При достижении двигателем максимально возможной (при данном соединении) скорости выключается масляный выключатель 1 и включается масляный выключатель 3. отчего двигатель получает полное напряжение сети и развивает нормальную скорость вращения. При пуске автотрансформаторы понижают напряжение на 50—80%.

Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором

Пуск в ход асинхронных двигателей существенно отличается от условий нормальной работы. Момент двигателя при пуске должен превышать момент сопротивления нагрузки, роль играет пусковой момент. Второй важной пусковой характеристикой является пусковой ток. Кратность пускового тока для двигателей с короткозамкнутым ротором достигает 5-7, что может быть недопустимо для двигателя или для сети и может иметь значение плавность пуска.

Пуск в ход двигателя с фазным ротором осуществляется через 3х фазный реостат, каждая фаза которого включена через щётки и кольца в одну из фаз ротора. В начале пуска реостат введён полностью, к концу пуска он выводится и все три фазы ротора замыкаются накоротко. Число ступеней реостата берётся больше двух и процесс переключений при пуске обычно автоматизируется. Введение активных сопротивлений в цепь фазного ротора увеличивает момент и делает пуск плавным и ограничивает пусковой ток. Этот способ пуска имеет ряд достоинств, но применим только для двигателей с фазным ротором.

В короткозамкнутый ротор ввести сопротивления невозможно, поэтому пусковая характеристика неизменна в течении всего времени пуска. Наиболее распространён пуск непосредственным включением двигателя в сеть без каких-либо

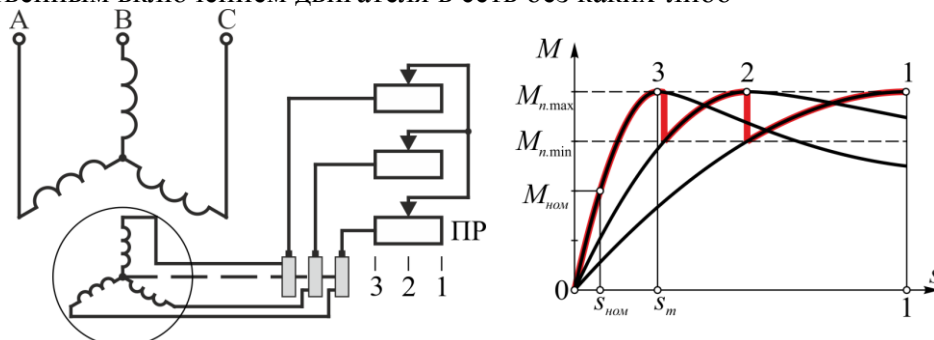


Рис. 8.1. Включение реостата в цепь фазного ротора.

устройств, понижающих пусковой ток. Применяется в случаях, когда не требуется плавность пуска и мощность двигателя невелика в сравнении с мощностью сети. В случаях, когда мощность двигателя соизмерима с мощностью питающей сети, применяются различные схемы понижения напряжения, подводимого к двигателю при пуске, за счёт чего уменьшается пусковой ток. Понижение напряжения при пуске вызывает нежелательное уменьшение пускового момента.

Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором обычно пускаются в ход прямым включением в сеть с номинальным напряжением $U_1 = U_{ном}$. Процесс разбега ротора двигателя от неподвижного состояния до номинальной частоты вращения $n_{2ном}$ определяется его механической характеристикой $M = f(W)$ и механической характеристикой нагрузки $M_g = f(W)$ согласно уравнению механического движения:

$$M + M_g = J \frac{dW}{dt}, \text{ где } J - \text{ момент инерции вращающихся частей, приведенный к ротору.}$$

Время пуска определяется путем интегрирования:

$$t_n = \int_0^{W_{ном}} \frac{J}{M + M_g} dW$$

Требования к механическим характеристикам асинхронных двигателей регламентируются стандартами. Для двигателей общепромышленного применения в зависимости от их мощности и частоты вращения предъявляются следующие требования:

максимальный вращающий момент $M_{m^*} = \frac{M_m}{M_{ном}}$ должен находиться в пределах 1,7–2,2; пусковой момент $M_{n^*} = \frac{M_n}{M_{ном}}$ – в пределах 0,7–2; минимально допустимый вращающий момент при пуске $\frac{M_{min}}{M_{ном}}$ – в пределах 0,6 – 1.

Время пуска t_n невелико и лежит в пределах от долей секунд до нескольких секунд, но сопровождается значительными пусковыми токами и может вызвать падение напряжения сети. При необходимости уменьшения пускового тока двигателя применяют пуск при пониженном напряжении. Этот способ реализуется переключением на время пуска обмоток с треугольника на звезду, либо пуском через реактор или автотрансформатор.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

В короткозамкнутую обмотку ротора нельзя ввести во время пуска дополнительное сопротивление, но пусковые характеристики двигателя можно улучшить, если использовать для увеличения активного сопротивления обмотки ротора поверхностный эффект в стержнях обмотки. Поверхностный эффект наиболее выражен в начале пуска, когда частота тока в роторе $f_2 = f_1 s$ близка к частоте сети f_1 .

В асинхронных двигателях с глубокими пазами на роторе высота стержней из алюминия составляет 40–60 мм, что позволяет получить при частоте 50 Гц 3–4-кратное увеличение сопротивления.

Асинхронные двигатели с двойной беличьей клеткой обладают еще более высокими пусковыми свойствами. На роторе двигателя имеются две короткозамкнутые обмотки, стержни которых расположены в полузакрытых пазах на различной глубине, отделенные друг от друга узким шлицем

Широкое распространение имеют также обмотки со стержнями колбообразного *b* и трапецеидального *4* профиля, особенно для быстроходных и мощных двигателей.

На рисунке для сравнения показаны механические характеристики асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами различного исполнения.

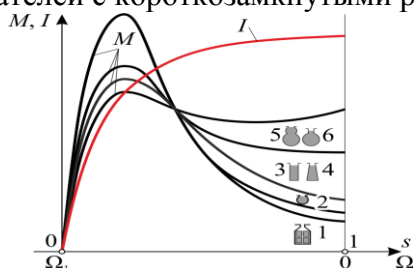


Рис. Механические характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми свойствами: 1 – двигатель с фазным ротором; 2 – короткозамкнутая обмотка с круглыми стержнями; 3 – прямоугольные стержни в глубоких пазах; 4 – стержни трапецеидального профиля; 5 – двойная беличья клетка; 6 – стержни колбообразного профиля.

Увеличение пускового момента в короткозамкнутых двигателях с улучшенными пусковыми свойствами сопровождается снижением максимального момента M_m на 15–25 % и коэффициента мощности на 4–6 % по сравнению с двигателями с круглыми пазами на роторе по причине связя с возрастания индуктивного сопротивления рассеяния X_2 обмотки ротора.

Лекция-6

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

Цель: Изучить скорость вращения и регулирования асинхронного двигателя.

План:

1. Методы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.
2. Метод изменения числа пар полюсов.
3. Изменение скорости со скольжением

Методы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель является наиболее массовым электрическим двигателем. Эти двигатели выпускаются мощностью от 0,1 кВт до нескольких тысяч киловатт и находят применение во всех отраслях хозяйства. Основным достоинством асинхронного двигателя является простота его конструкции и невысокая стоимость. Однако по принципу своего действия асинхронный двигатель в обычной схеме включения не допускает регулирования скорости его вращения. Особое внимание следует обратить на то, что во избежание значительных потерь энергии, а, следовательно, для короткозамкнутых асинхронных двигателей во избежание перегрева его ротора, двигатель должен работать в длительном режиме с минимальными значениями скольжения.

Рассмотрим возможные способы регулирования скорости асинхронных двигателей (см. рис.1). Скорость двигателя определяется двумя параметрами: скоростью вращения электромагнитного поля статора ω_0 и скольжением s :

$$\omega = \omega_0 - S_{abc}$$

$$\omega = \omega_0 - \omega_0 S \quad (6.1)$$

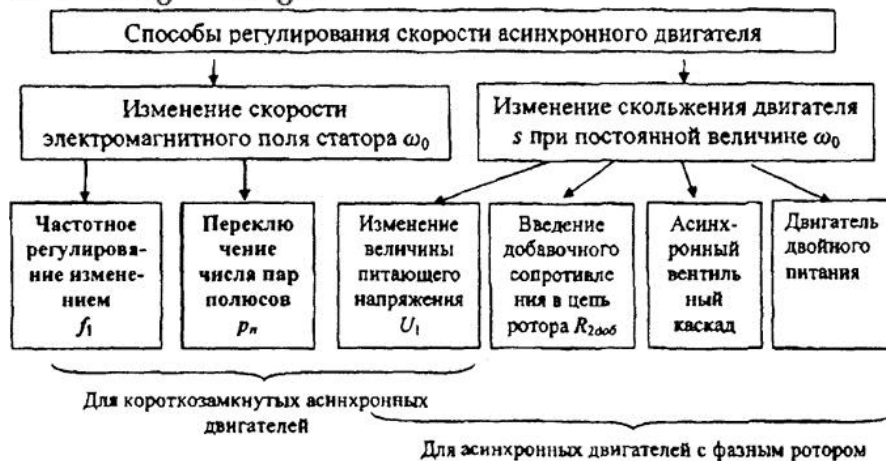


Рис.1. Классификация способов регулирования асинхронных двигателей

Исходя из (1) принципиально возможны два способа регулирования скорости: регулирование скорости вращения поля статора и регулирование скольжения при постоянной величине ω_0 .

Скорость вращения поля статора определяется двумя параметрами (см.3.3): частотой напряжения, подводимого к обмоткам статора f_1 , и числом пар полюсов двигателя p_n . В соответствии с этим возможны два способа регулирования скорости: изменение частоты питающего напряжения посредством преобразователей частоты, включаемых в цепь статора двигателя (частотное регулирование), и путем изменения числа пар полюсов двигателя.

Регулирование скольжения двигателя при постоянной скорости вращения поля статора для короткозамкнутых асинхронных двигателей возможно путем изменения величины напряжения статора при постоянной частоте этого напряжения. Для асинхронных двигателей с фазным ротором, кроме того, возможны еще два способа: введение в цепь ротора добавочных сопротивлений (реостатное регулирование) и введение в цепь ротора добавочной регулируемой э.д.с. посредством преобразователей частоты, включаемых в цепь ротора (асинхронный вентильный каскад и двигатель двойного питания).

В настоящее время благодаря развитию силовой преобразовательной техники созданы и серийно выпускаются различные виды полупроводниковых преобразователей частоты, что определило опережающее развитие и широкое применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Основными достоинствами этой системы регулируемого электропривода являются:

- плавность регулирования и высокая жесткость механических характеристик, что позволяет регулировать скорость в широком диапазоне;
- экономичность регулирования, определяемая тем, что двигатель работает с малыми величинами абсолютного скольжения, и потери в двигателе не превышают номинальных.

Недостатками частотного регулирования являются сложность и высокая стоимость (особенно для приводов большой мощности) преобразователей частоты и сложность реализации в большинстве схем режима рекуперативного торможения.

Подробно принципы и схемы частотного регулирования скорости асинхронного двигателя рассмотрены ниже.

Изменение скорости переключением числа пар полюсов асинхронного двигателя позволяет получать несколько (от 2 до 4) значений рабочих скоростей, т.е. плавное регулирование скорости и формирование переходных процессов при этом способе невозможно.

Поэтому данный способ имеет определенные области применения, но не может рассматриваться, как основа для построения систем регулируемого электропривода.

Регулирование скорости изменением первичной частоты

Регулирование скорости изменением первичной частоты (частотное регулирование) требует применения источников питания с регулируемой частотой (синхронные генераторы с переменной скоростью вращения, ионные или полупроводниковые преобразователи частоты и др.). Поэтому данный способ регулирования используется главным образом в случаях, когда для целых групп двигателей необходимо повышать ($n > 3000$ об/мин.) скорости вращения или одновременно и плавно их регулировать. С развитием полупроводниковых преобразователей все более перспективным становится также индивидуальное частотное регулирование скорости вращения двигателей. Схему короткозамкнутого асинхронного двигателя с частотным управлением при помощи полупроводниковых преобразователей можно получить, если заменить явнополюсный ротор на ротор с обмоткой в виде беличьей клетки и питать эту схему от сети переменного тока через полупроводниковый преобразователь (рисунок 4.6). Управление инвертором при этом производится особым преобразователем частоты вне зависимости от положения ротора двигателя. Напряжение регулируется с помощью выпрямителя.

Частотное регулирование электроприводов

Основным недостатком синхронных и асинхронных с короткозамкнутым ротором электродвигателей является постоянная частота вращения ротора электродвигателя, практически не зависящая от нагрузки. С развитием силовой полупроводниковой и микропроцессорной техники стало возможным создание устройства частотного регулирования электроприводом, которое позволяет точно управлять скоростью и моментом электродвигателя по заданным параметрам в точном соответствии с характером нагрузки. Это в свою очередь, позволяет осуществлять точное регулирование практически любого процесса в наиболее экономичном режиме, без тяжёлых переходных процессов в технологических системах и электрических сетях.

Из питающей сети 1 переменное напряжение промышленной частоты поступает на вход выпрямителя 2. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя устанавливается фильтр 3.

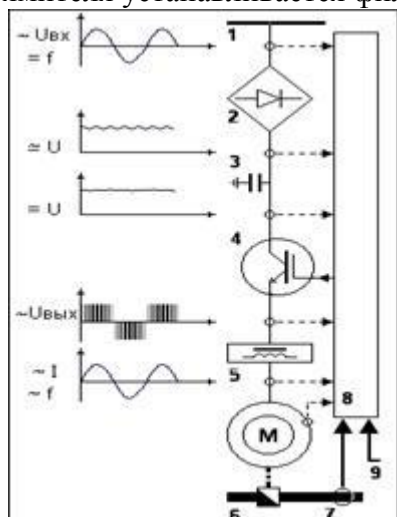


Рисунок 4.6 - Состав элементов частотно-регулируемого электропривода, их работа и назначение

И уже постоянное (сглаженное) напряжение подаётся на вход управляемого импульсного инвертора тока 4.

Электронные ключи инвертора по сигналам системы управления 8 открываются и запираются таким образом, что формируемые при этом различные по длительности

импульсы тока складываются в результирующую кривую синусоидальной формы с необходимой частотой.

Для сглаживания пульсаций, на выходе инвертора может устанавливаться дополнительный высокочастотный фильтр 5.

Затем напряжение подаётся на обмотки электродвигателя (М), который является приводом механизма технологической системы 6.

Подлежащий регулированию параметр технологической системы измеряется датчиком 7, управляющий сигнал от которого подаётся в систему управления ЧРП 8. Либо внешняя система управления 9 собирает информацию о многих параметрах, характеризующих работу технологической системы, обрабатывает её и подаёт результирующий сигнал в систему управления приводом.

В зависимости от величины, иногда и скорости изменения этого сигнала микропроцессорная система управления ЧРП формирует и подаёт управляющие импульсы на электронные ключи выпрямителя и инвертора.

Для самоконтроля и защиты система управления собирает и обрабатывает сигналы о наличии или величине ряда параметров, характеризующих работу собственных подсистем. Контролируются токи и напряжения на входе, выходе преобразователя и в магистрали постоянного тока. Измеряется температура элементов и регулируется производительность системы охлаждения преобразователя. Контролируется состояние отдельных элементов вплоть до отдельного ключа. При наличии специального датчика в корпусе электродвигателя измеряется, а при отсутствии датчика рассчитывается по электрическим характеристикам потребляемой двигателем энергии температура двигателя.

Преобразователи частоты (иначе - частотно-регулируемый электропривод или ЧРП) представляет из себя статическое преобразовательное устройство, предназначенное для изменения скорости вращения трехфазных асинхронных электродвигателей. Асинхронные электродвигатели имеют значительное преимущество перед электродвигателями постоянного тока за счет простоты конструкции и удобства обслуживания. Это обуславливает их однозначное преобладание и повсеместное применение практически во всех отраслях промышленности, энергетики и городской инфраструктуре. Известно, что регулирование скорости вращения исполнительного механизма можно осуществлять с помощью различных устройств (способов), среди которых наиболее известны и распространены следующие: механический вариатор, гидравлическая муфта, электромеханический преобразователь частоты (системы Генератор-Двигатель), дополнительно вводимые в статор или фазный ротор сопротивления, статический преобразователь частоты. Регулирование скорости вращения асинхронного электродвигателя в этом случае производится путем изменения частоты и величины напряжения питания двигателя. КПД такого преобразования составляет около 98 %, из сети потребляется практически только активная составляющая тока нагрузки, микропроцессорная система управления обеспечивает высокое качество управления электродвигателем и контролирует множество его параметров, предотвращая возможность развития аварийных ситуаций. На рисунке показан состав силовой части такого преобразователя : входной неуправляемый выпрямитель - звено постоянного тока с LC-фильтром - автономный инвертор напряжения.

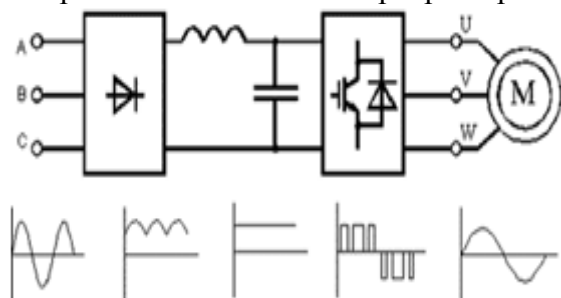


Рисунок 4.7 - Принципиальная схема ЧРП

Регулирование скорости изменением числа пар полюсов p

Регулирование скорости изменением числа пар полюсов p используется обычно для двигателей с короткозамкнутым ротором, так как при этом требуется изменять p только для обмотки статора. Изменять p можно двумя способами:

1) применением на статоре нескольких обмоток, которые уложены в общих пазах и имеют разные числа пар полюсов p ;

2) применением обмотки специального типа, которая позволяет получить различные значения p путем изменения (переключения) схемы соединений обмотки. Предложено значительное количество различных схем обмоток с переключением числа пар полюсов, однако широкое распространение из них получили только некоторые. Применение нескольких обмоток невыгодно, так как при этом из-за ограниченного места в пазах сечение проводников каждой из обмоток нужно уменьшать, что приводит к снижению мощности двигателя. Использование обмоток с переключением числа пар полюсов вызывает усложнение коммутационной аппаратуры, в особенности, если с помощью одной обмотки желают получить более двух скоростей вращения. Несколько ухудшаются также энергетические показатели двигателей.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются многоскоростным.

Регулирование скорости уменьшением первичного напряжения

В связи с пониженным КПД и трудностями регулирования напряжения рассматриваемый метод применяется только для двигателей малой мощности. При этом для регулирования U_1 можно использовать регулируемые автотрансформаторы или сопротивления, включенные последовательно в первичную цепь. В последние годы для этой цели все чаще применяют реакторы насыщения, регулируемые путем подмагничивания постоянным током. При изменении значения постоянного тока подмагничивания индуктивное сопротивление реактора изменяется, что приводит к изменению напряжения на зажимах двигателя. Путем автоматического регулирования тока подмагничивания можно расширить зону регулирования скорости и получить при этом жесткие механические характеристики.

Лекция №7

Типы синхронного генератора, принципы работы, реакция якоря, основные уравнения и векторные диаграммы.

Цель: Изучить основные принципы синхронного генератора, принципы работы, реакция якоря, основные уравнения и векторные диаграммы.

План:

1. Типы синхронных машин и их устройство
2. Турбогенераторы
3. Принцип действия синхронного генератора
4. Характеристики синхронного генератора
5. Синхронный двигатель

Типы синхронных машин и их устройство

Синхронная машина состоит из неподвижной части — статора — и вращающейся части — ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от

статоров асинхронных двигателей, т. е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габаритов машины. Так, в многополюсных машинах большой мощности при наружном диаметре сердечника статора более 900 мм пластины сердечника делают из отдельных сегментов, которые при сборке образуют цилиндр сердечника статора. Корпуса статоров крупногабаритных машин делают разъемными, что необходимо для удобства транспортировки и монтажа этих машин.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: явнополюсную и неявнополюсную.

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных (приводных) двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: паровые турбины, гидравлические турбины либо двигатели внутреннего сгорания (дизели). Применение любого из перечисленных двигателей принципиально влияет на конструкцию синхронного генератора.

Если приводным двигателем является *гидравлическая турбина*, то синхронный генератор называют *гидрогенератором*. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60—500 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Роторы гидрогенераторов имеют *явнополюсную* конструкцию, т. е. с явно выраженными полюсами, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и полюсной катушки 3 (рис. 13.1, а). Все полюсы ротора закреплены на ободке 4, являющемся также и ярмом магнитной системы машины, в котором замыкаются потоки полюсов. Гидрогенераторы обычно изготавливаются с вертикальным расположением вала (рис. 13.2).

Паровая турбина работает при большой частоте вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый *турбогенератором*, является быстроходной синхронной машиной. Роторы этих генераторов выполняют либо двухполюсными ($n_1=3000$ об/мин), либо четырехполюсными ($n_1=1500$ об/мин).

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют *неявнополюсный* ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения (см. рис. 13.1, б). Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же делают сборным. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь $\frac{2}{3}$ его поверхности (по периметру). Оставшаяся $\frac{1}{3}$ поверхности образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.

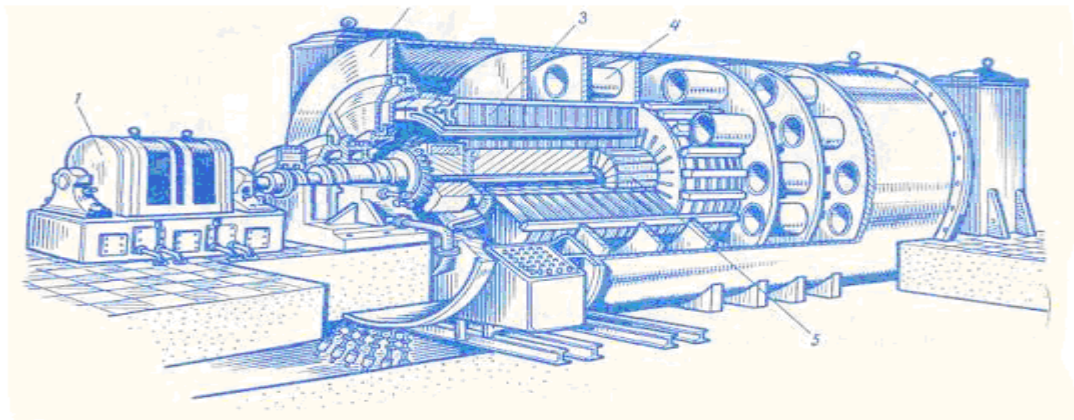


Рис.13.1. Турбогенератор:

1-возбудитель; 2-корпус; 3-сердечник статора; 4-секции водородного охлаждения; 5-ротор.

Турбогенераторы (рис.13.3) и дизель-генераторы изготавливают с горизонтальным расположением вала. Дизель-генераторы рассчитывают на частоту вращения 600—1500 об/мин и выполняют с явнополюсным ротором .

Большую группу синхронных машин составляют *синхронные двигатели*, которые обычно изготавливаются мощностью до нескольких тысяч киловатт и предназначены для привода мощных вентиляторов, мельниц, насосов и других устройств, не требующих регулирования частоты вращения. Рассмотрим устройство синхронного двигателя серии СДН2 (рис. 13.5). Двигатели этой серии изготавливаются мощностью от 315 до 4000 кВт при частотах вращения от 300 до 1000 об/мин и предназначены для включения в сеть частотой 50 Гц при напряжении 6 кВ.

Сердечник статора 4, запрессованный в стальной корпус, состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для лучшего охлаждения двигателя пакеты разделены радиальными вентиляционными каналами шириной по 10 мм. Обмотка статора 12 двухслойная с укороченным шагом. Сердечники полюсов 11 ротора крепятся к остову 3 шпильками 5. обмотка ротора состоит из полюсных катушек. Контактные кольца 8 крепятся на конце вала. На роторе имеются лопатки 6 центрожежного вентилятора. Стояковые подшипники скольжения 2 и 7 установлены на подшипниковых полуцинтах 1 и 9. двигатель с торцовых сторон прикрыт стальными щитами13. в обшивке 10 корпуса имеются вентиляционные окна, прикрытые жалюзи. На боковой поверхности корпуса расположена коробка выводов 14. Возбуждение двигателей осуществляется от тиристорных преобразователей с автоматическим регулированием тока возбуждения при пуске и остановке двигателей.

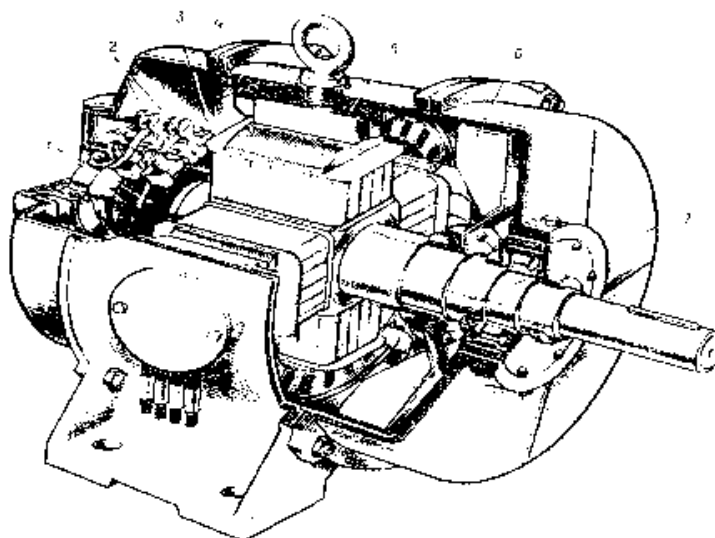


Рис.13.4 Синхронный генератор (дизель-генератор):1-контактные кольца; 2-щеткодержатели; 3-полюсная катушка ротора; 4-полюсный наконечник; 5-сердечник статора; 6-вентилятор; 7-вал

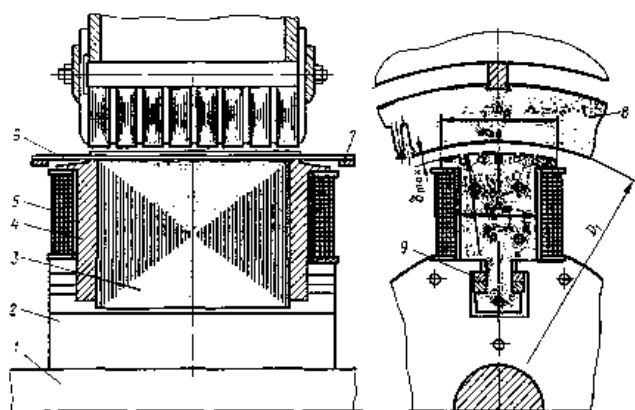


Рис.13.6. Полюс синхронного двигателя.

На рис. 13.6 показано более подробно устройство элемента синхронного двигателя, характерное для большинства конструкций. На вал *1* посажен шихтованный обод *2*, на котором посредством Т-образного хвостовика крепится сердечник полюса *3*, выполненный заодно с полюсным наконечником. Сердечники полюсов изготовлены из штампованных листов конструкционной стали толщиной 1,0 или 1,5 мм. Хвостовик полюса, запирается в продольном пазе обода посредством клиньев *9*. Возможно также крепление полюсов к ободу посредством «ласточкина хвоста» или шпилек (см. рис. 13.5). Стальные щеки *4*, стягиваемые шпильками, предотвращают распушение пакета полюса ротора. Щеки имеют заплечики, удерживающие полюсную катушку ротора *5*.

В пазах полюсных наконечников расположены латунные или медные стержни *6* пусковой (успокоительной) обмотки, замкнутые с двух сторон сегментами *7*.

Между наружной поверхностью полюсного наконечника и внутренней поверхностью сердечника статора *8* имеется воздушный зазор. По оси полюса этот зазор δ минимален, а на краях — максимален δ_{\max} . Такая конфигурация полюсного наконечника необходима для синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. Она достигается тем, что поверхность полюсного наконечника имеет радиус $R < (D_1 - 2\delta)/2$, где D_1 — диаметр расточки сердечника статора.

Синхронные машины, так же как и асинхронные, являются машинами переменного тока. В отличие от асинхронных машин, которые используются главным образом как двигатели, синхронные машины применяют в качестве генераторов и двигателей.

Синхронные генераторы служат основным источником электрической энергии в промышленных сетях энергоснабжения, на транспорте, передвижных электростанциях и т.д.

Синхронные генераторы приводятся во вращение паровыми, газовыми и гидравлическими турбинами. В первых случаях синхронные генераторы называются турбогенераторами, во втором - гидрогенераторами. Мощность современных синхронных генераторов на электростанциях достигает 1200 МВт. На автономно работающих электростанциях синхронные генераторы имеют небольшую мощность и приводятся во вращение дизельными двигателями и газовыми турбинами.

Синхронные двигатели имеют постоянную частоту вращения и используются там, где нет необходимости в регулировании частоты или где она должна быть постоянной. Синхронные двигатели имеют большую мощность (50-100 кВт и более) и применяются на металлургических заводах, в шахтах и других предприятиях для приведения в движение насосов, компрессоров, вентиляторов и др. механизмов. Имеются также специальные синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт, используемые в схемах автоматики, электрочасы, автоматические самописцы и т.п., где требуется строгое постоянство частоты вращения.

Синхронные машины в отличие от асинхронных могут работать с различной реактивной мощностью-индуктивной или емкостной. Они позволяют улучшать коэффициент мощности предприятия. На крупных подстанциях устанавливают специальные машины, работающие в режиме холостого хода отдающие в сеть только реактивную мощность, которая необходима для асинхронных двигателей. Эти машины называют синхронными компенсаторами.

Статор синхронных машин конструктивно изготавливается аналогично статору асинхронной машины. Его набирают из листовой стали, и в пазах размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° , которые соединяют с трехфазной сетью.

Ротор конструктивно выполняют явнополюсными (с явно выраженными полюсами) или неявнополюсными (с неявно выраженными полюсами) (рис. 14.1). На роторе располагают обмотку возбуждения, питаемую от источника постоянного тока. Ротор синхронной машины имеет свой магнитный поток, который определяет его полярность.

Явнополюсный ротор изготавливают из листовой стали. Он имеет большое число полюсов, на которых расположена обмотка возбуждения, и применяются в гидротурбинах. Гидротурбины-тихоходные машины, чтобы получить стандартную частоту напряжения $f=pn/60$ при малой частоте вращения, надо имеет большое число пар полюсов p . Например гидротурбина с частотой $n=68,2$ об/мин, имеет число пар полюсов $p=44$. В мощных гидротурбинах вал ротора расположен вертикально.

Ротор с неявно выраженными полюсами изготавливают из сплошной стальной поковки с выфрезерованными пазами. Пазы занимают около $2/3$ окружности ротора. В пазы закладывают обмотку и образуют два полюса ($p=1$). Такой ротор имеет горизонтально расположенный вал и применяются в турбогенераторах. Частоте вращения вала 3000 об/мин.

Синхронные двигатели и компенсаторы строят в горизонтальном исполнении при вращения 3000 об/мин. Они имеют ротор с неявно выраженными полюсами. При частоте от 100 до 1000 об/мин – с явновыраженными полюсами.

Для питания обмотки возбуждения применяют генератор постоянного тока, устанавливаемый на одном валу с ротором синхронной машины. Постоянный ток подается через щетки на кольца установленные на валу ротора, которые соединены с обмоткой возбуждения (рис.14.2). Также питание может осуществляться через выпрямительные системы. Обмотка возбуждения потребляет мощность относительно номинальной синхронной машины 0,25-2,5%.

14.2. Принцип действия синхронного генератора

Обмотки возбуждения создают неподвижный относительно ротора основной магнитный поток Φ_0 (рис.14.3), распределенный в воздушном зазоре между статором и ротором по синусоидальному закону. При вращении ротора поток Φ_0 вращается вместе с ним и пересекая обмотки статора индуцирует в нем трехфазную систему э.д.с.

$$E_\phi = E_0 = 4,44 f w k_\phi \Phi_0, \quad (14.1)$$

где w – число витков фазной обмотки статора, k_ϕ – обмоточный коэффициент.

Фазные э.д.с. \dot{E}_A , \dot{E}_B и \dot{E}_C равны по значению и отстают друг от друга по фазе на угол $2\pi/3$.

Если к этой обмотке присоединена нагрузка, то по ней протекает ток I создающий магнитный поток Φ_j . Воздействие магнитного потока статора (якоря) на основной магнитный поток созданный ротором называется реакцией якоря и зависит от характера нагрузки, т.е. от угла сдвига фаз между э.д.с и током статора. При активной нагрузке $\psi = 0$.

Магнитный поток статора $\Phi_{\text{я}}$ создается токами трех фаз и вращается с частотой $n=60f/p$, т.е. с той же частотой что и основной магнитный поток. Результирующий магнитный поток Φ ($\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{\text{я}}$) вращается с синхронной скоростью, и неподвижен по отношению ротора. Поток $\Phi_{\text{я}}$ при активной нагрузке обозначают $\Phi_{\text{яq}}$ и формула результирующего потока и э.д.с. имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{\Phi} &= \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{\text{яq}}, \\ \dot{E} &= \dot{E}_0 + \dot{E}_{\text{я}}.\end{aligned}\quad (14.2)$$

При индуктивной нагрузке когда $\psi = +\pi / 2$, в проводниках фазы А индуцируется максимальная э.д.с., а максимальный ток будет после поворота ротора на четверть периода и такой магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$ называется продольным и обозначают $\Phi_{\text{яд}}$. Поток $\Phi_{\text{яд}}$ направлен навстречу основному потоку Φ_0 и поэтому является размагничивающим. Т.е. индуктивная нагрузка уменьшает результирующий магнитный поток Φ и результирующую э.д.с. E . При емкостной нагрузке ток противоположен по фазе индуктивному току ($\psi = -\pi / 2$), то $\Phi_{\text{я}}$ противоположен по направлению потоку якоря при индуктивной нагрузке и является продольно намагничивающим потоком $\Phi_{\text{яд}}$. Здесь Φ и E увеличиваются за счет реакции якоря.

В общем случае когда нагрузка имеет активную и реактивную составляющие тока, поток якоря $\dot{\Phi}_{\text{я}} = \dot{\Phi}_{\text{яq}} + \dot{\Phi}_{\text{яд}}$. Если нагрузка RL , то реакция якоря размагничивающая, а если нагрузка RC намагничивающая.

С учетом магнитного потока рассеяния $\Phi_{\text{рас}}$ создаваемый ток якоря (статора), который сцепляется только с фазной обмоткой статора и создает в нем э.д.с. рассеяния можем получить упрощенное уравнение э.д.с. генератора

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jX_c \dot{I}, \quad (14.3)$$

где U – напряжение на зажимах обмотки статора или на нагрузке; E_0 – основная э.д.с.; X_c – синхронное индуктивное сопротивление ($X_{\text{я}} + X_{\text{рас}}$); $X_{\text{я}}$ и $X_{\text{рас}}$ – соответственно индуктивные сопротивления обусловленные магнитным потоком якоря и магнитным потоком рассеяния.

14.3. Характеристики синхронного генератора

Свойство синхронного генератора оценивается соответствующими характеристиками, как: характеристика холостого хода, внешняя характеристика и регулировочная характеристика.

Характеристика холостого хода, это зависимость э.д.с. статора E_0 от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при токе статора $I=0$, частоте вращения $n=const$. Э.д.с. $E_0=4,44k_{\text{об}}\omega f \Phi_0=c_e\Phi_0$, где $c_e=4,44 K_{\text{об}}\omega f=const$. Т.к. E_0 и Φ_0 линейно зависимы то характеристика холостого хода генератора $E_0=f(I_{\text{в}})$ имеет тот же вид что и $\Phi_0=f(I_{\text{в}})$ – кривой намагничивания (рис.14.4).

Внешняя характеристика, это зависимость напряжения обмотки статора от тока статора $U=f(I)$ при $I_{\text{в}}=const$, $\varphi=const$ и $f=const$. Выбирается такое значение $I_{\text{в}}$, чтобы при $I_{\text{ном}}$ напряжение тоже было $U_{\text{ном}}$ (рис.14.5). В дальнейшем при изменении тока от $I_{\text{ном}}$ до $I=0$ ток возбуждения остается неизменным.

Синхронные генераторы проектируют для работы с $\cos \varphi = 0,85 \div 0,9$ при токе, отстающем от напряжения по фазе. При уменьшении тока, имеющего индуктивную составляющую ($\varphi > 0$) напряжение повышается, а при холостом ходе ($I=0$) напряжение

$U_0 = E_0$. Изменение напряжения $\Delta U = (U_0 - U_{\text{ном}}) 100 / U_{\text{ном}}$ при этом достигает значения 30-50%.

При активной нагрузке ($\varphi = 0, \psi > 0$) изменение напряжения меньше. При активно-емкостной ($\varphi < 0$) с уменьшением тока уменьшается напряжение.

Регулировочная характеристика (рис.14.6) показывает, как следует изменять ток возбуждения I_B при изменении тока нагрузки I , чтобы напряжение U осталось постоянным: $I_B = f(I)$ при $U = \text{const}, \varphi = \text{const}, f = \text{const}$. Приведены характеристики для трех состояний нагрузки $\varphi > 0$ (активно-индуктивный), $\varphi = 0$ (активной) и $\varphi < 0$ (активно-емкостной). Из анализа во взаимосвязи с магнитным потоком следует, что так как при активно-индуктивной нагрузке с уменьшением тока от $I_{\text{ном}}$ до 0 напряжение увеличивается, то для поддержания его постоянным надо уменьшать результирующий магнитный поток путем уменьшения тока возбуждения. При активно-емкостной нагрузке наоборот.

14.4. Синхронный двигатель

Предположим, что синхронная машина подключена к сети с напряжением U_C в режиме генератора. Ротор этой машины приводится во вращение двигателем. До тех пор, пока ротор синхронной машины вращается с постоянной частотой $n = 60f_c / p$ и соблюдается равенство $\dot{U}_C = \dot{E}_0$ ток в обмотке статора равен нулю. Это режим идеального холостого хода синхронной машины.

Если отключить двигатель, вращающий ротор, то под действием сил трения ротор начнет тормозиться, вместе с ним начнет замедляться вращение магнитного потока Φ_0 и э.д.с. \dot{E}_0 начнет отставать по фазе от напряжения \dot{U}_C , условие ($\dot{U}_C = \dot{E}_0$) нарушается. Под действием $\Delta \dot{U} = \dot{E}_0 - \dot{U}_C$ составляющей \dot{E}_0 , в цепи статора потечет ток i , отстающий по фазе от $\Delta \dot{U}$. Этот ток имеет активную составляющую, противоположную по фазе э.д.с. E_0 . Следовательно, электрическая энергия поступает в синхронную машину из сети, т.е. машина переходит в режим двигателя. На рис.14.7 изображена схема замещения фазы синхронного двигателя. Приведены условные положительные направления напряжения сети \dot{U}_C и э.д.с. \dot{E}_0 . Направление тока i совпадает с направлением напряжения \dot{U}_C и противоположно э.д.с. \dot{E}_0 .

Трехфазная система токов в обмотке статора синхронного двигателя создает вращающийся магнитный поток подобно тому, как это имеет место в асинхронном двигателе. В результате взаимодействия магнитных потоков статора и ротора полюсы статора притягивают к себе полюсы ротора противоположной полярности, которые вращаются с той же частотой $n = 60f_c / p$. Таким образом, частота вращения синхронного двигателя остается постоянной при $f_c = \text{const}$.

Вращающийся магнитный поток статора $\dot{\Phi}_\sigma$ индуцирует в обмотке статора э.д.с. \dot{E}_σ . По второму закону Кирхгофа для рис.14.7 получим $\dot{U}_C = \dot{E}_0 - \dot{E}_\sigma$. Принимая $\dot{E}_\sigma = -jX_C i$, получим уравнение э.д.с. синхронного двигателя:

$$\dot{U}_C = \dot{E}_0 - jX_C i. \quad (14.4)$$

Результирующий магнитный поток $\dot{\Phi}$ также равен разности основного $\dot{\Phi}_0$ и потока якоря $\dot{\Phi}_\sigma$:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 - \dot{\Phi}_\sigma. \quad (14.5)$$

Электромагнитный момент синхронного двигателя прямо пропорционален электромагнитной мощности, так как

$$M_{эм} = P_{эм} / \Omega = 3U_c E_c \sin \theta / (\Omega X_c), \quad (14.6)$$

поэтому угловая характеристика $M_{эм}(\theta)$ совпадает с угловой характеристикой $P_{эм}(\theta)$, здесь θ - угол между осевыми линиями полюсов статора и ротора синхронной машины. В режиме идеального холостого хода $\theta = 0$. В режиме нагрузки угол θ увеличивается. Если в режиме генератора угол θ положительный, то в режиме двигателя он отрицательный.

Если обмотка возбуждения неподвижного ротора синхронного двигателя подключен к источнику постоянного тока, то она создает основной магнитный поток, который определяет полярность полюсов ротора (рис. 14.8). При включении обмоток статора (якоря) его трехфазная система токов создает вращающийся магнитный поток, частота вращения которого $n = 60f_c / p$ (при $p=1$ и $f_c = 50$ Гц $n=3000_{об}/мин$). При такой частоте вращения каждую 0,01 с меняется полярность статора по осевой линии неподвижного ротора, сила притяжения сменяется силой отталкивания и средний вращающий момент равен нулю, т.к. за это время ротор практически не успеет тронуться с места. Отсутствие пускового момента является недостатком синхронных двигателей и некоторое время, препятствовал их применению. Разработаны ряд способов пуска в ход синхронных двигателей.

Ознакомимся с асинхронным пуском. Здесь на роторе синхронного двигателя располагают специальную короткозамкнутую, пусковую обмотку 2 (рис.14.9). Эта обмотка после подключения к сети статора создает асинхронный вращающийся момент и разгоняется до n_2 , близкой к синхронной частоте n (n_2 на 3-5% меньше n).

Обмотку возбуждения 1 синхронного двигателя при пуске замыкают на реостат 3 сопротивление которого в 10-12 раз больше активного сопротивления самой обмотки.

Когда ротор достигнет частоты вращения близкой к синхронной, обмотку возбуждения переключают на источник постоянного тока. После этого полюсы ротора приобретают собственную полярность и в результате притягивания разноименных полюсов статора и ротора, и отталкивания одноименных ротор достигает синхронную частоту вращения $-n$. При остановке двигателя сначала отключают обмотку статора от сети, а затем замыкают обмотку возбуждения на реостат. Направление вращения синхронного двигателя изменяют так же, как асинхронного двигателя.

Пуск с помощью разгонного двигателя осуществляется только при холостом ходе синхронного двигателя. При этом его ротор приводят во вращение разгонным двигателем.

14.5. Характеристики синхронного двигателя

U – образные характеристики. Рассмотрим режим работы двигателя, когда тормозной момент на его валу $M_2 = const$, а ток возбуждения изменяется. Для синхронного двигателя, для которого $n = const$, постоянство момента M_2 означает, что мощность на его валу $P_2 = const$. Следовательно, потребляемая мощность P_1 и электромагнитная мощность $P_{эм}$ также постоянна:

$$P_1 = 3U_c I \cos \varphi = const ; \quad (14.7)$$

$$P_{эм} = 3U_c E_0 \sin \theta / X_c = const . \quad (14.8)$$

При $U_c = const$ из уравнений (14.7) и (14.8) следует, что

$$I \cos \varphi = I_a = const ; \quad (14.9)$$

$$E_0 \sin \theta = const, \quad (14.10)$$

где I_a – активная составляющая тока статора.

В соответствии с полученными выражениями (14.9) и (14.10) строится векторная диаграмма и проводится анализ. В результате получен вывод, что как при уменьшении, так и при увеличении тока возбуждения по сравнению с номинальным значением ток статора и угол φ увеличиваются, а $\cos \varphi$ уменьшается. Поэтому зависимости $I(I_B)$ и $\cos \varphi (I_B)$ имеют вид буквы U (рис.14.10) и называются U -образными. Их строят при условии $U_C = const, M_2 = const$. Двигатель имеет семейство U -образных характеристик для различных значений M_2 .

Рабочие характеристики. Они представляют собой зависимости частоты вращения n , вращающего момента M , тока статора I , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и к.п.д. η от мощности P_2 на валу двигателя при $U_C = const, f = const$ и $I_B = const$ (рис.14.11).

Выпускаемые промышленностью синхронные двигатели имеют номинальное значение $\cos \varphi = 0,8 \div 0,85$. При $f = const$ частота вращения n постоянна, а вращающий момент прямо пропорционален мощности P_2 . При холостом ходе $M = M_0$, т.е. моменту определяемому потерями в самом двигателе. Ток статора I с увеличением мощности P_2 растет.

И так рассмотрены назначение, устройство, принцип действия и основные эксплуатационные характеристики синхронных машин.

Контрольные вопросы

1. Какие основные качества определяют область применения синхронных машин?
2. В чем разница в конструкциях ротора асинхронной и синхронной машины?
3. Почему изготавливают роторы синхронных машин явнополюсными и неявнополюсными.
4. Каким образом индуцируется трехфазная э.д.с. синхронного генератора?
5. Какие особенности характеристик синхронных генераторов?
6. Когда синхронная машина переходит в режим двигателя?
7. Поясните U -образные характеристики двигателя.
8. В чем полезность рабочих характеристик синхронного двигателя?
9. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
10. Объясните назначение тиристорного преобразователя в системе самовозбуждения синхронного генератора.
11. Объясните устройство синхронного двигателя серии СДН2.

Лекция-8:

Основные характеристики автономного синхронного генератора.

Цель: Изучение основных характеристик автономного синхронного генератора

План:

1. Работа синхронного генератора в автономном режиме
2. Векторные диаграммы синхронного генератора.

Работа синхронного генератора в автономном режиме характеризуется:

- характеристикой холостого хода, показывающей изменение действующего значения ЭДС E_0 в зависимости от тока обмотки возбуждения I_B ;
- внешними характеристиками, показывающими характер изменения напряжения U от тока нагрузки I ;
- регулировочными характеристиками, показывающими, как следует изменять ток возбуждения I_B с ростом тока нагрузки I , чтобы напряжение U оставалось постоянным $U = const$.

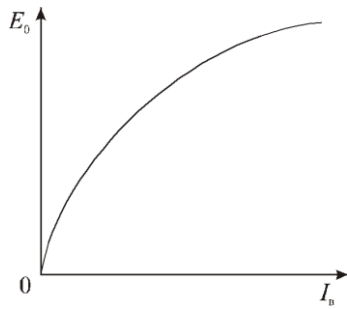


Рис. 5

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость действующего значения ЭДС E_0 от тока возбуждения I_b при номинальной частоте вращения ротора $\omega = const$. При разомкнутой обмотке статора и токе статора, равном нулю $I = 0$, магнитное поле машины создается только током, а напряжение на выводах обмотки U согласно (3) совпадает с E_0 . Регулируя ток возбуждения, можно изменять величину магнитного потока Φ_{0m} . Из соотношения (1) следует, что в этом случае величина ЭДС E_0 будет прямо пропорциональна амплитуде магнитного потока Φ_{0m} . При небольших токах возбуждения напряжение, проходящее по обмотке возбуждения ротора, линейно возрастает (рис. 5).

При больших токах возбуждения сказывается насыщение магнитной системы и пропорциональность между Φ_{0m} и I_b нарушается. Кривая характеристики холостого хода напоминает по форме кривую намагничивания.

Внешняя характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения на нагрузке от тока $U(I)$ при $I_b = const, \omega = const, \cos \phi = const$. Рассмотрим, как меняется напряжение на зажимах генератора с изменением тока нагрузки от нуля до номинального значения при различных характерах нагрузки. При активной нагрузке:

$$X_H = 0; \quad R_H \gg R; \quad \phi_0 \approx \arctg \frac{X_{\text{син}}}{R_H} \ll 1; \quad \phi = 0;$$

векторная диаграмма принимает вид, приведенный на рис. 6, а. значение ЭДС E_0 , индуцируемой в обмотке статора результирующим потоком, можно считать постоянным ($I_b = const$ по условию). При изменении тока изменяется длина вектора ЭДС, пропорциональная току, $E_{\text{син}} = X_{\text{син}} I$, точка **m** пересечения перпендикуляра, опущенного из точки **m** на вектор тока, с вектором напряжения смещается по окружности, диаметр которой совпадает с длиной отрезка **Om**. Из треугольника **Omnp** получаем

$$U = \sqrt{E^2 - E_{\text{син}}^2} = \sqrt{E^2 - X_{\text{син}}^2 I^2}$$

С ростом тока нагрузки I напряжение обмотки генератора будет уменьшаться незначительно (реакция якоря при активной нагрузке не приводит к сильному изменению результирующего магнитного поля). Соответствующая характеристика приведена на рис. 7, а (кривая 1).

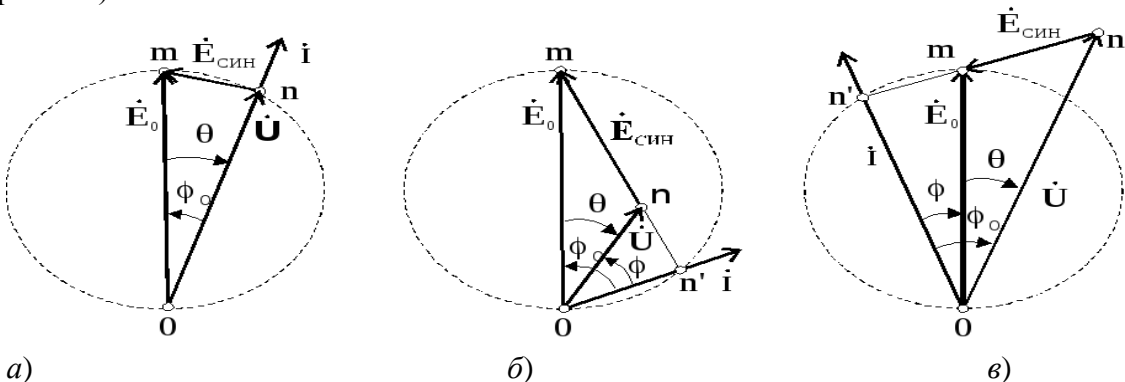


Рис. 6

При активно-индуктивном характере нагрузки:

$$X_H > 0; \quad \phi_0 > 0; \quad \phi > 0,$$

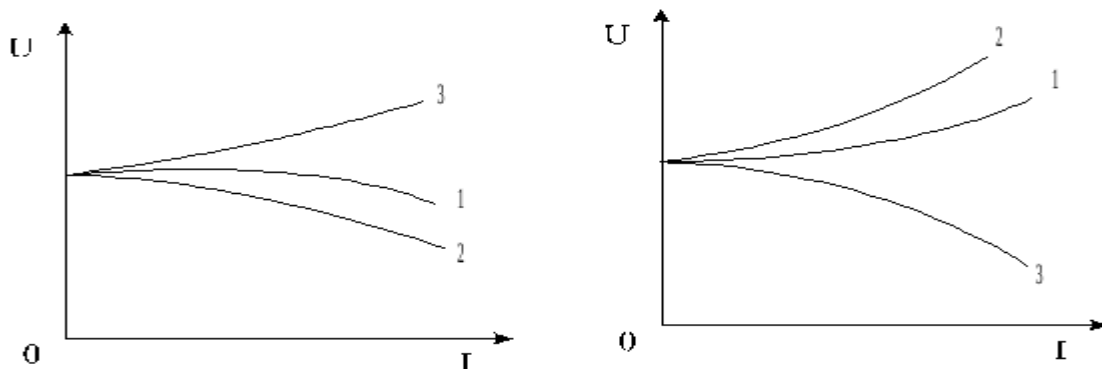
векторная диаграмма принимает вид, приведенный на рис. 6, б. В этом случае перпендикуляр, опущенный из точки на вектор тока, пересекает вершину вектора напряжения внутри окружности, вектор напряжения при тех же токах будет меньше и быстрее падает с ростом тока, чем при активной нагрузке (реакция якоря при активно-индуктивной нагрузке приводит к уменьшению результирующего магнитного поля). Соответствующая характеристика приведена на рис. 7, а (кривая 2).

При активно-емкостном характере нагрузки:

$$X_n < 0; \quad \phi_0 < 0; \quad \phi < 0,$$

векторная диаграмма принимает вид, приведенный на рис. 6, в. В этом случае перпендикуляр, опущенный из точки на вектор тока, пересекает вершину вектора напряжения вне окружности, вектор напряжения при тех же токах будет больше, чем при активной нагрузке и будет даже увеличиваться с ростом тока (реакция якоря при активно-емкостном характере нагрузки намагничивает машину). Соответствующая характеристика приведена на рис. 7, а (кривая 3).

Регулировочные характеристики, показывающие, как следует изменять ток возбуждения I_v с ростом тока нагрузки I , чтобы напряжение U оставалось постоянным: $U = const$, приведены на рис. 7, б для активной (1), индуктивной (2) и емкостной (3) нагрузок.



а)
Рис. 7

б)

Векторные диаграммы синхронного генератора.

Векторные диаграммы широко используются как при качественном, так и количественном анализе работы синхронных генераторов и двигателей. При качественном анализе используют упрощенные диаграммы, при количественном анализе — уточненные.

Векторная диаграмма неявнополюсного генератора. Э. д. с., наводимая в фазе обмотки статора,

$$\dot{E} = \dot{U} + jX_{\sigma a} \dot{I}_a + \dot{I}_a r_a, \quad (13.8)$$

где U — напряжение на зажимах фазы статора; $X_{\sigma a}$ — индуктивное сопротивление обмотки статора, обусловленное потоком рассеяния $\Phi_{\sigma a}$; r_a — активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Из (13.8) с учетом (13.5) имеем

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}X_{\sigma a} - \dot{I}_a r_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_a - j\dot{I}X_{\sigma a} - \dot{I}_a r_a, \quad (13.9)$$

откуда $\dot{E}_0 = \dot{U} - \dot{E}_a + j\dot{I}X_{\sigma a} + \dot{I}_a r_a$, или

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j\dot{I}X_a + j\dot{I}X_{\sigma a} + \dot{I}_a r_a = \dot{U} + j\dot{I}X_{\text{сн}} + \dot{I}_a r_a, \quad (13.10)$$

где $X_a + X_{\sigma a} = X_{\text{сн}}$ — полное, или

синхронное, индуктивное сопротивление машины; $\dot{E}_a = -j\dot{I}X_a$ — э. д. с., наведенная в фазе статора ненасыщенной машины потоком реакции якоря Φ_a . Активное сопротивление цепи

якоря r_a невелико по сравнению с сопротивлением $X_{сн}$, поэтому падением напряжения $I r_a$ в активном сопротивлении можно пренебречь, так как оно сравнительно невелико. Тогда уравнение (13.9) принимает вид

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jI X_a + jI X_{\sigma a} = \dot{U} + jI X_{сн}. \quad (13.11)$$

На рис. 13.9 показана векторная диаграмма, построенная согласно уравнениям (13.8) и (13.10) для ненасыщенного неявнополюсного генератора. Магнитный поток рассеяния $\Phi_{\sigma a}$ совпадает по фазе с током якоря, а э. д. с. рассеяния $E_{\sigma a}$ отстает от этого потока и тока на угол $\pi/2$. Основным сопротивлением на пути потока реакции якоря Φ_a является воздушный зазор, поэтому поток Φ_a совпадает по фазе с током якоря I и пропорционален ему. Э. д. с. E_a отстает от индуцирующего ее потока Φ_a на угол $\pi/2$. Угол ψ есть угол между векторами E_0 и I , а угол θ — угол между векторами E_0 и U_0 , называемый углом нагрузки. При работе синхронной машины в качестве генератора вектор напряжения U всегда отстает от вектора э. д. с. E и θ считается положительным. С увеличением нагрузки θ увеличивается,

На рис. 13.10 показана упрощенная векторная диаграмма синхронного неявнополюсного генератора, построенная в соответствии с уравнением (13.11). Эту диаграмму широко используют при качественном анализе работы синхронной машины.

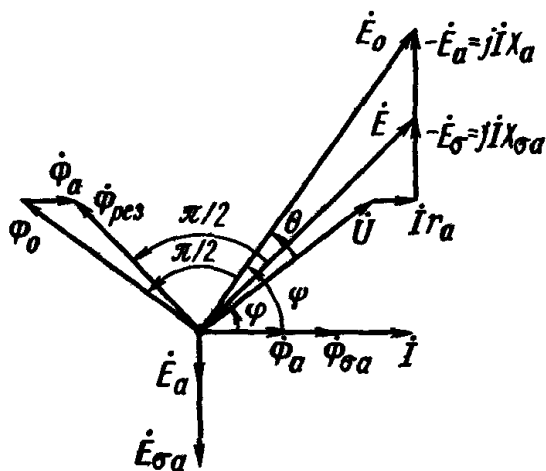


Рис. 13.9

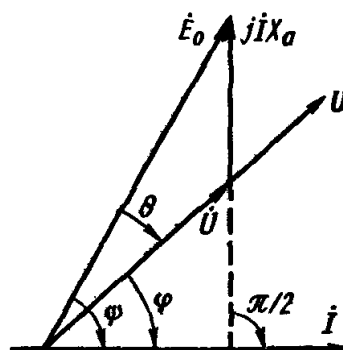


Рис. 13.10

Лекция 9

Параллельное подключение синхронной машины.

Цель: Изучение параллельное подключение синхронной машины.

План:

1. Особенности работы генератора на сеть большой мощности.
- 2.

Обычно электростанции имеют несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую сеть. Это увеличивает общую мощность электростанции (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней генераторов), повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, позволяющие наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии. Таким образом, для синхронной машины, установленной на электрической станции, типичным является

режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой мощность рассматриваемого генератора является очень малой. В этом случае с большой степенью точности можно принять, что генератор работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности, т.е. что напряжение сети U_c и ее частота f_c являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.

Рассмотрим условия включения генератора на параллельную работу с сетью и способы регулирования нагрузки.

Включение генератора на параллельную работу с сетью. При этом необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока в момент присоединения генератора к сети. В противном случае возможны срабатывание защиты, поломка генератора или первичного двигателя.

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети u_c и генератора u :

На практике осуществление сводится к выполнению трех равенств:

-величин напряжений сети и генератора $U_{cm} = U_m$ или $U_c = U$;

-частот $\omega_c = \omega_r$ или $f_c = f_r$;

-их начальных фаз $\alpha_c = \alpha_r$ (совпадение по фазе векторов \dot{U}_c и \dot{U}).

Кроме того, для трехфазных генераторов нужно согласовать порядок чередования фаз.

Совокупность операций, требуемых для подключения генератора к сети, называют *синхронизацией*. Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот $f_c \approx f_r$, а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжений $U_c = U$. Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ($\alpha_c = \alpha_r$) контролируется специальными приборами – ламповыми и стрелочными синхроскопами.

Ламповые синхроскопы применяют для синхронизации генераторов малой мощности и обычно используют в лабораторной практике. Этот прибор представляет собой три лампочки, включенные между фазами генератора и сети (рис. 1.31, а). На каждую лампу действует напряжение $\Delta u = u_c - u$, которое при $f_c \neq f_r$ изменяется с частотой $\Delta f = f_c - f_r$, называемой *частотой биений* (рис. 1.31, б). В этом случае лампы будут мигать. При $f_c \approx f_r$ разность Δu будет изменяться медленно, вследствие чего лампы будут постепенно загораться и погасать. Обычно генератор подключают к сети в момент, когда разность напряжений Δu на короткое время становится близкой нулю, т.е. в середине периода погасания ламп; в этом случае выполняется условие совпадения по фазе векторов \dot{U}_c и \dot{U} . Для более точного определения этого момента часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля. После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты вращения ротора, т.е. поддержание условия $n_2 = n_1$, происходит автоматически.

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных синхроскопов, работающих по принципу вращающегося магнитного поля. В этом приборе при $f_c \neq f_r$ стрелка вращается с частотой, пропорциональной разности частот $f_c - f_r$ в одну или другую сторону в зависимости от того, какая из этих частот больше. При $f_c = f_r$ она устанавливается на нуль; в этот момент и следует подключать генератор к сети. На электрических станциях обычно используют автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

Часто также применяют метод самосинхронизации, при котором генератор подключается к сети при отсутствии возбуждения (обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление). При самосинхронизации ротор разгоняется до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение s до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуктированием тока в успокоительной обмотке и замкнутой обмотке возбуждения.

После этого в обмотку возбуждения подается постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. При методе самосинхронизации в момент включения генератора возникает сравнительно большой толчок тока, который не должен превышать $3,5I_{a\text{ ном}}$.

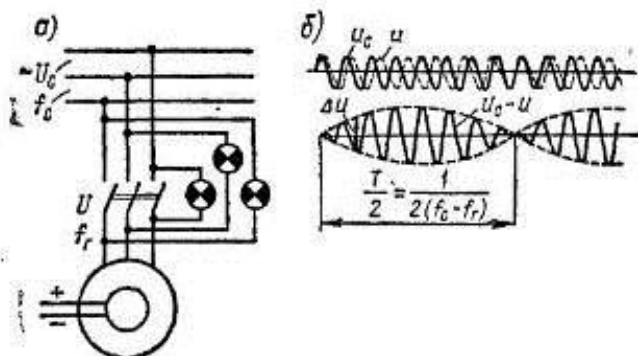


Рис. 1.31 – Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа (а) и кривые изменения напряжений u_c и u перед включением (б) генератора

Регулирование активной мощности. После включения генератора в сеть его напряжение U становится равным напряжению сети U_c . По отношению к внешней нагрузке напряжения U и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор – сеть» находятся в противо-фазе, т.е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$ (рис. 1.32, а). Так как перед включением в сеть генератор работал вхолостую, то при выполнении указанных ранее трех условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток I_a после подключения к сети также будет равен нулю. Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток I_a при работе генератора параллельно с сетью на примере неявно-полюсной машины.

Так как $\dot{U} = -\dot{U}_c = \text{const}$, то величину тока \dot{I}_a можно изменять только двумя способами: изменяя э.д. с. \dot{E}_0 по величине или по фазе.

Если к валу генератора приложить внешний момент, больший момента, необходимого для компенсации потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение, вследствие чего вектор \dot{E}_0 смещается относительно вектора \dot{U} на некоторый угол θ в сторону вращения векторов (рис. 1.32, б). При этом возникает разность векторов $\dot{E}_0 - \dot{U}$, приводящая согласно (1.30) к появлению тока \dot{I}_a . Вектор этого тока опережает на 90° вектор $-j\dot{I}_a x_{сн}$ и сдвинут относительно вектора \dot{U} на некоторый угол φ , меньший 90° . При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность $P = mUI_a \cos\varphi$ и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравнивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего частота вращения ротора остается неизменной. Чем больший внешний момент приложен к валу генератора, тем больше будет угол θ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

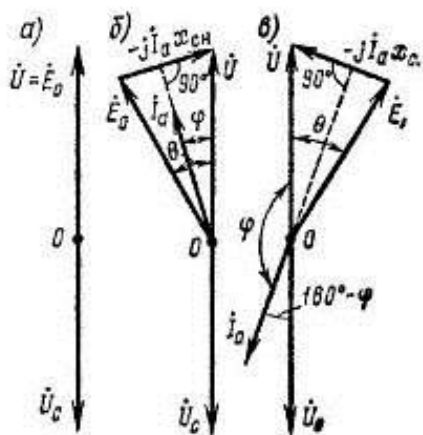


Рис. 1.32 – Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсной синхронной машины при параллельной работе с сетью в режимах:

а – холостого хода; б – генераторном; в – двигательном

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор \dot{E}_0 будет отставать от вектора напряжения \dot{U} на угол θ (рис. 1.32, в). При этом возникает ток \dot{I}_a , вектор которого опережает на 90° вектор $-j\dot{I}_a x_{сн}$ и сдвинут на некоторый угол φ относительно вектора напряжения \dot{U} . Так как угол $\varphi > 90^\circ$, активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением \dot{U} машины. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность $P = m\dot{U}\dot{I}_a \cos\varphi$ забирается из сети и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т.е. вращающий момент первичного двигателя), а для уменьшения нагрузки – уменьшать этот момент. При изменении направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного режима в двигательный.

Регулирование реактивной мощности. Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 1.33, а), увеличить ток возбуждения I_b , то возрастет э. д. с. E_0 (рис. 1.33, б) и по обмотке якоря будет проходить ток \dot{I}_a , величина которого согласно (1.30) определяется только индуктивным сопротивлением $x_{сн}$ машины. Следовательно, ток \dot{I}_a будет реактивным: он отстает по фазе от напряжения \dot{U} на угол 90° или опережает на тот же угол напряжение сети \dot{U}_c .

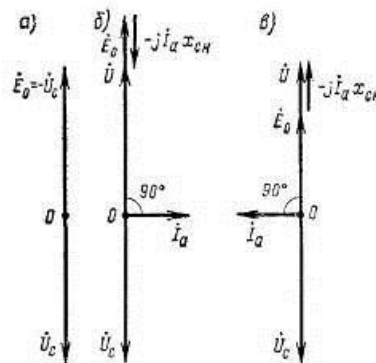


Рис. 1.33 – Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсной синхронной машины при параллельной работе с сетью, отсутствии активной нагрузки и изменении э. д. с. E_0 путем регулирования тока возбуждения:

а – при $E_0 = U_c$; б – при $E_0 > U_c$; в – при $E_0 < U_c$

При уменьшении тока возбуждения ток \dot{I}_a изменит свое направление: он будет опережать на 90° напряжение \dot{U} (рис. 1.33, в) и отставать на 90° от напряжения \dot{U}_c . Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока \dot{I}_a , т.е. реактивная мощность машины $Q = mUI_a \sin\varphi$. Активная составляющая тока \dot{I}_a в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность $P_{эл} = 0$, и машина работает в режиме холостого хода.

При работе машины под нагрузкой имеют место те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока \dot{I}_a , т.е. реактивная мощность машины Q . Режим возбуждения синхронной машины, при котором реактивная составляющая тока \dot{I}_a равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения. Если ток возбуждения I_b больше тока $I_{б.п.}$, при котором имеет место режим полного возбуждения, то ток \dot{I}_a содержит отстающую от \dot{U} реактивную составляющую, что соответствует активно-индуктивной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом перевозбуждения. Если ток возбуждения I_b меньше тока $I_{б.п.}$, то

ток I_a содержит реактивную составляющую, опережающую напряжение U , что соответствует активно-емкостной нагрузке генератора. Такой режим называют *режимом недовозбуждения*.

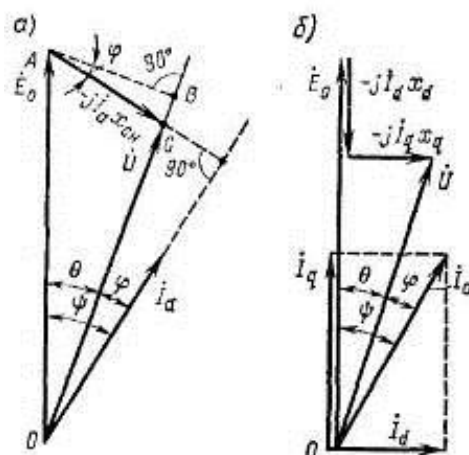


Рис. 1.34 – Определение активной и реактивной мощностей по упрощенным векторным диаграммам явнополюсного (а) и неявнополюсного (б) синхронных генераторов

Следовательно, если ток возбуждения I_B (т.е. поток Φ_B и э. д. с. E_0) становится большим, чем это требуется для полного возбуждения, то возникает отстающая составляющая тока I_a , которая создает размагничивающий поток реакции якоря Φ_a ; при I_B меньшем, чем необходимо для полного возбуждения, возникает опережающая составляющая тока I_a , которая создает подмагничивающий поток реакции якоря Φ_a . Во всех случаях суммарный поток машины $\Sigma\Phi$ автоматически поддерживается неизменным.

Лекция 10

Характеристики синхронного генератора.

План:

1. Синхронные генераторы и их характеристики.
2. Ресурсные характеристики обмотки статора синхронного генератора.
3. U-образная характеристика синхронного генератора.

Синхронные генераторы и их характеристики

На рис. 1 показаны внешние естественные характеристики трехфазного синхронного генератора, иллюстрирующие зависимость напряжения U_Γ на его зажимах от тока обмотки статора I_Γ при заданном коэффициенте мощности приемников $\cos \varphi = \text{const}$, неизменном токе возбуждения в обмотке ротора $I_B = \text{const}$ и постоянной частоте вращения ротора, чему отвечает неизменная частота переменного тока $f = \text{const}$. Эти характеристики могут исходить как из общей точки $(0, E_{ГХ})$, отвечающей режиму холостого хода, так и пересекаться в точке $(I_{\Gamma \text{ ном}}, U_{\Gamma \text{ ном}})$, соответствующей номинальной нагрузке. Первые характеристики

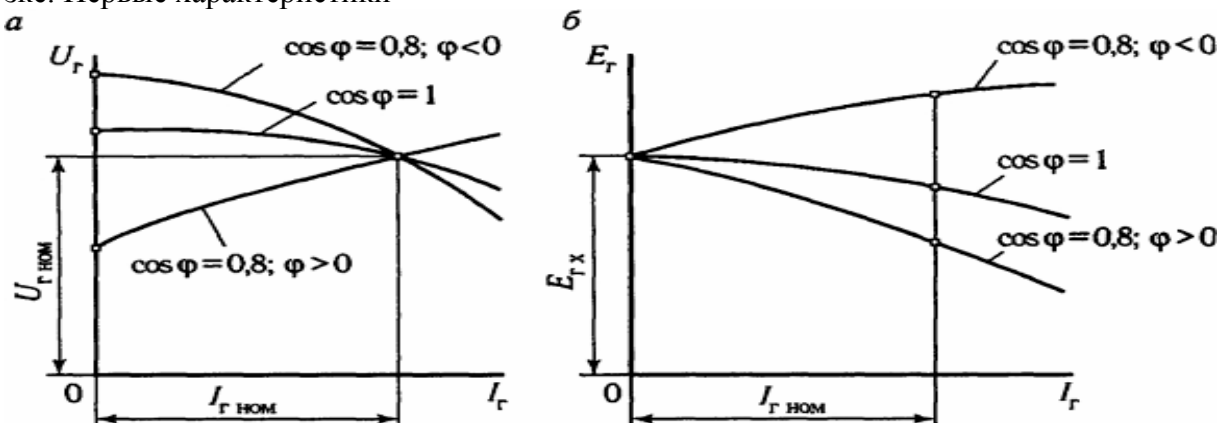


Рис. 1.1. Внешние характеристики трехфазного синхронного генератора при изменении нагрузки с заданным коэффициентом мощности нагрузки: а - от режима холостого хода до номинальной; б - от номинальной до режима холостого хода

позволяют определить изменение напряжения генератора при увеличении нагрузки от режима холостого хода до номинального тока, а вторые - при снижении нагрузки от номинальной до режима холостого хода.

Основной естественной внешней характеристикой синхронного генератора считают кривую $U_T(I_T)$, полученную при симметричном режиме, коэффициенте мощности приемников $\cos \varphi = 0,8$ и $\varphi > 0$.

Для поддержания напряжения синхронного генератора неизменным при переменной нагрузке приходится регулировать ток возбуждения I_B в обмотке ротора по закону, определяемому регулировочными характеристиками, крутизна которых зависит от характера нагрузки и ее коэффициента мощности (рис. 6.6). Так, при увеличивающемся токе нагрузки, отстающем по фазе от напряжения на угол $\varphi > 0$, возникает размагничивающее действие реакции якоря и соответствующая регулировочная характеристика поднимается, а при возрастающем токе нагрузки, опережающем по фазе напряжение на угол $\varphi < 0$, она снижается вследствие подмагничивающего действия реакции якоря.

Регулировочные характеристики дают возможность установить пределы изменения синхронного генератора и выбрать аппараты для регулирования напряжения. Регулировать ток возбуждения при изменении нагрузки генератора можно, изменяя сопротивление обмотки возбуждения.

Регулировать ток возбуждения при изменении нагрузки генератора, который на тепловозе работает в качестве возбудителя основного тягового генератора, можно не только воздействуя на регулирующий реостат R_p , но и автоматически, что особенно удобно при синхронных генераторах с самовозбуждением (рис. 1.3). Здесь при холостом ходе генератора вторичные обмотки вольтодобавочного трансформатора $T_{вд}$ играют роль дросселей, снижающих напряжение на зажимах согласующего трансформатора $T_{сг}$, через который питаются полупроводниковые диоды V . При увеличении нагрузки генератора в этих обмотках наводится ЭДС, в результате чего напряжение на диодах возрастает и увеличивается ток возбуждения генератора, что приводит к относительной стабилизации напряжения на его зажимах.

Электромагнитная мощность трехфазного синхронного генератора $P_{эм}$ - мощность, передаваемая электромагнитным путем обмотке статора вращаемым ротором и отличающаяся от мощности P_2 внешней цепи только на мощность $3R_2 I_T^2$ отвечающую потерям электрической энергии в обмотке статора, определяется выражением

$$P_{эм} = P_2 + 3R_2 I_T^2,$$

где R_2 - активное сопротивление фазы обмотки статора.

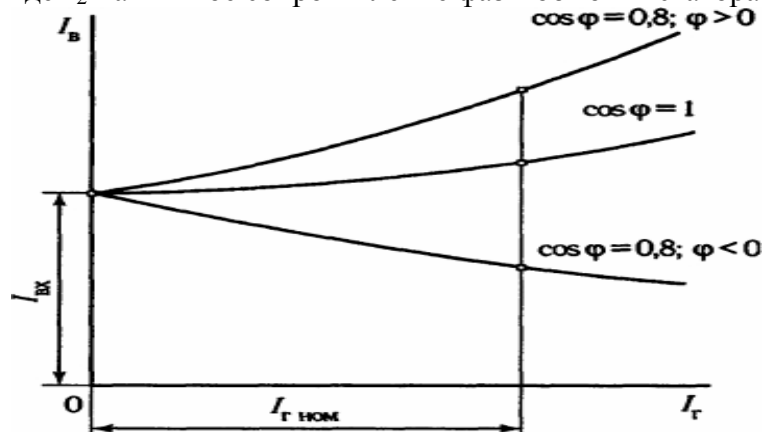


Рис. 1.2. Регулировочные характеристики трехфазного синхронного генератора при различном коэффициенте мощности приемников

Поскольку потери электрической энергии в обмотке статора незначительны, можно считать, что мощности $P_{эм}$ и P_2 практически одинаковы. Поэтому электромагнитную мощность находят:

Поскольку электромагнитная мощность $P_{эм}$ зависит от ЭДС холостого хода E_x , определяемой током возбуждения I_B , то некоторым перевозбуждением машины можно увеличить максимальную электромагнитную мощность, при этом повышается статическая устойчивость работы машины, но также усиливается нагрев обмотки ротора.

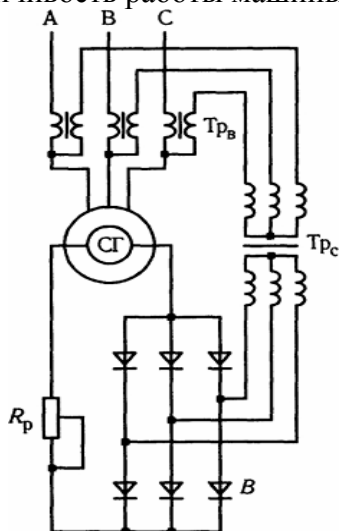


Рис. 1.3. Схема трехфазного синхронного генератора с самовозбуждением

Работа трехфазных синхронных машин в генераторном режиме сопровождается потерями энергии, которые аналогичны потерям в асинхронных машинах. Эффективность работы трехфазного синхронного генератора характеризует КПД, который при симметричной нагрузке находят по формуле

$$\eta = \frac{\sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi}{\sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi + \Delta P},$$

где $U_{л}$ и $I_{л}$ - действующие линейные напряжения и ток;

ΔP - суммарные потери, отвечающие данной нагрузке машины.

Максимальное значение КПД синхронного генератора отвечает нагрузке, близкой к номинальной, и составляет для машин средней мощности 0,88-0,92, а для генераторов большой мощности доходит до 0,96-0,99 (рис. 1.4).

Электромагнитный момент синхронного генератора определяется выражением

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{n} = \frac{pP_{эм}}{2\pi f}.$$

Особенности применения синхронных генераторов в передачах переменного тока тепловозов. В локомотивных передачах переменного тока используются синхронные генераторы, которые работают совместно с выпрямительной установкой. Для уменьшения пульсации выходного напряжения в статоре тягового синхронного генератора (ГС 501, ГС 504)

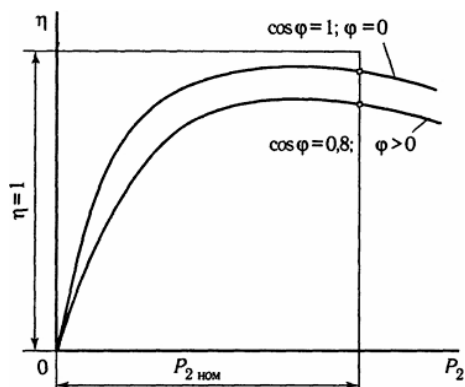


Рис. 1.3. Графики зависимости КПД трехфазного синхронного генератора от нагрузки и коэффициента мощности приемников

укладывают две трехфазные обмотки, сдвинутые относительно друг друга на 30 эл. градусов. Тепловозные синхронные генераторы представляют собой явнополюсную синхронную электрическую машину. Размеры дизельного помещения локомотива позволяют спроектировать синхронный генератор мощностью до 7500 кВт.

Синхронные генераторы по сравнению с генераторами постоянного тока (1111) имеют меньшую массу. Так, синхронный генератор ГС 504 мощностью 2750 кВт имеет массу 6500 кг, а генератор постоянного тока ГП 313Б мощностью 2700 кВт - 9000 кг. Отсюда следует, что масса синхронного генератора меньше массы генератора постоянного тока на 28-30 %. Выпрямительная установка имеет массу, равную ~10 % массы синхронного генератора. Поэтому общее снижение массы при переходе на синхронный генератор (СГ) и выпрямительную установку (ВУ) составляет 18-20 %.

При газотурбинном двигателе СГ является единственно целесообразным, поскольку между ними наличие механического редуктора необязательно, так как синхронный генератор выполняется на частоту вращения ротора газотурбинного двигателя. Совместная работа ГТП с газотурбинным двигателем без механического редуктора невозможна в виду малой механической прочности его якоря. На тепловозах и газотурбовозах с передачей переменного тока между тяговым синхронным генератором и асинхронными тяговыми двигателями возможно наличие неуправляемой выпрямительной установки (ВУ). При определении внешних характеристик силовой установки тепловоза (СГ с учетом ВУ) учитывают размагничивающее действие продольной реакции якоря синхронного генератора. Вследствие размагничивающего влияния продольной реакции и индуктивного сопротивления обмоток напряжение СГ при независимом возбуждении резко падает при постоянном токе независимой обмотки возбуждения и с увеличением тока нагрузки. Если номинальный ток возбуждения выбрать по $U_{Г \text{ max}}$, как в генераторах постоянного тока, то максимальный ток короткого замыкания (к.з.) оказывается намного меньше $I_{Г \text{ max}}$ требуемого по условиям использования сцепления колес с рельсом. Для увеличения тока к.з. генератора можно повышать значение о.к.з. (отношение короткого замыкания). Синхронный генератор, выполненный с повышенным о.к.з., имеет увеличенные габариты и массу. В режиме к.з. по обмотке статора протекает чисто реактивный ток, который практически не зависит от частоты вращения ротора СГ. Только при очень малой частоте вращения ротора СГ начинает проявляться значение активного сопротивления статора и ток к.з. интенсивно уменьшается. Тепловозные генераторы выполняются со значением о.к.з. = 2 и, кроме того, в режимах пуска должны допускать форсировку возбуждения. Это не приводит к увеличению сечений участков магнитной цепи генератора, так как поток в пусковых режимах мал. Ток возбуждения растет при пуске для компенсации реакции якоря и падения напряжения (рис. 1.4).

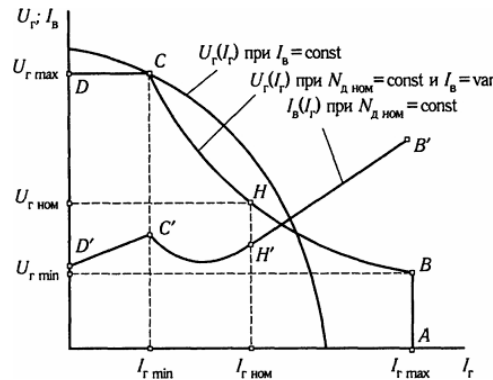


Рис 1.4 Регулировочная характеристика возбуждения тепловозного тягового генератора

Расчетная мощность, определяющая активные размеры СГ,

$$P_{гр} = 3U_r I_{г ном} = \frac{k_r P_{г ном}}{\cos\varphi},$$

где $k_r = U_{г max} - U_{г ном}$ - коэффициент регулирования генератора.

Расчетная мощность СГ больше, чем генератора постоянного тока, вследствие изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Тяговый генератор переменного тока имеет независимое возбуждение от специального возбудителя. Эксплуатация тепловозов (2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7, 2ТЭ121) показала надежность двух систем возбуждения тяговых синхронных генераторов: возбудителя переменного тока с самовозбуждением (2ТЭ121, ТЭП75, 2ТЭ116А, рис. 6.10, а); от синхронного возбудителя с регулированием напряжения посредством управляемого выпрямителя возбуждения (2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7, рис. 6.10, б).

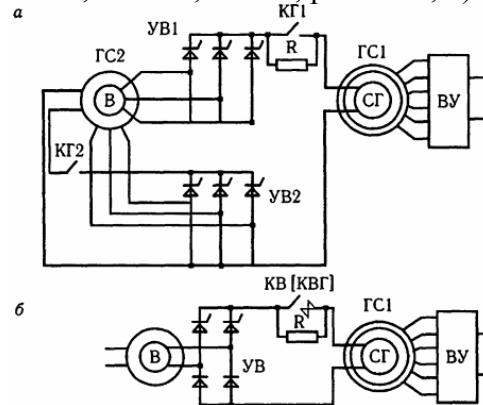


Рис. 1.5. Принципиальные схемы независимого возбуждения синхронного тягового генератора: а - от синхронного возбудителя с самовозбуждением (тепловозы 2ТЭ121, 2ТЭ116А, ТЭП75Л' б - от синхронного возбудителя через УВВ (тепловозы 2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7)

Совершенствование систем регулирования напряжения тяговых генераторов стало возможным в результате развития полупроводниковой техники, внедрения транзисторных и тиристорных преобразователей и усилителей. Тиристорные усилители обладают такими качествами, как малые габаритные размеры при большой мощности, высокий КПД и коэффициент усиления, большое быстродействие. Это позволило на тепловозах с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока применить более современную систему регулирования напряжения тягового генератора, содержащую вместо магнитного усилителя и генератора-возбудителя постоянного тока генератор-возбудитель переменного тока и тиристорный усилитель, питающий обмотку возбуждения тягового генератора. Но так как требуемые характеристики $U_r(I_{г подг})$ должны быть теми же самыми и при новой системе регулирования напряжения генератора, то естественно, что она тоже является комбинированной и построена на основе принципов регулирования по отклонению и возмущениям и содержит четыре регулятора напряжения

тягового генератора: по отклонению напряжения от заданного значения, току тягового генератора (или электродвигателей), частоте вращения вала дизель-генератора и положению органа топливоподачи дизеля.

2. Ресурсные характеристики обмотки статора синхронного генератора

Представим принятые в виде нормативного документа признаки предельного состояния обмотки статора, представленные в табл. 2.1. Данные таблицы показывают степень сложности ресурсных оценок в данном случае: показатели ресурса разнородные: и непрерывные, и дискретные; они существенно меняются в зависимости от наступления аварийных ситуаций.

Действительно, для таких показателей как пробой изоляции, междуфазные КЗ, течи полых проводников, обгорание лобовых частей (эти повреждения выявляются в результате аварийных отключений) могут быть рассмотрены временные ряды с применением методов прогноза, оценки доверительных интервалов и т.п. Их регистрация и обработка не требует особых методических разработок, но прогнозировать число междуфазных КЗ в лобовых частях или число поврежденных термодатчиков на дне паза и тем более оценивать момент достижения критического значения (например значения, равного 3) достаточно проблематично прежде всего в силу малого объема статистических данных для каждого конкретного объекта. Трудно ожидать, что построение временного ряда (например, по числу поврежденных термодатчиков или числу междуфазных КЗ) даст устойчивые оценки, поскольку представительные выборки здесь получить трудно.

Таблица 2.1.

Показатели необходимости полной замены обмотки статора турбогенератора (с терморезистивной изоляцией)

Вид нарушения	Показатель	Значение показателя при сроке эксплуатации		Примечание
		от 10 до 20 лет	более 20 лет	
1.Пробой изоляции на корпус	Число пробитых стержней	всего 3 или 2 нижних	всего 2	Кроме пробоев изоляции головок и верхних стержней из-за попадания стального предмета
2. Междуфазное КЗ в лобовых частях	Число замыканий	2	2	—
3.Течи полых проводников	Число стержней	4	2	—
4.Истирание изоляции лобовых частей	Число стержней	5	3	При глубине истирания более $\frac{1}{2}$ толщины изоляции
5.Изгибы стержней относительно выхода из пазов	Число пазов	3	3	Определяется невозможностью выбивания клиньев
6. Выход из строя термодатчиков	Число нижних пазов	3	3	Необходимость выемки стержней
7.Обгорание лобовых частей	Площадь обгорания	не менее 50% с одной стороны		—
8.Занос лобовых частей сажей или медью	Площадь заноса	не менее 50% с одной стороны		—

Поэтому здесь в настоящее время решения принимаются на основе экспертных оценок. Вместе с тем для таких показателей, как истирание изоляции, изгибы стержней, рост трещин и микротрещин, применение изложенных выше методов прогнозирования перспективно.

3. U-образная характеристика синхронного генератора

Ценной особенностью синхронного генератора, подключенного к электрической системе большой мощности, является возможность регулирования его реактивного тока посредством изменения тока возбуждения.

$$\left. \begin{aligned} I \cos \varphi &= I_a = \text{const}; \\ E_0 \sin|\theta| &= \omega \Psi_0 \sin|\theta| = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Если мощность синхронного генератора $P = \omega r M_{эм}$ и напряжение на шинах электрической системы U постоянны, то значения произведений сомножителей в (3.1) не зависят от тока возбуждения. Однако при изменении тока возбуждения изменяются значения создаваемого им потокосцепления с фазной обмоткой статора Ψ_0 и индуцированная этим потокосцеплением в фазной обмотке ЭДС \dot{E}_0 .

Из уравнения электрического состояния фазы статора (15.8) следует, что это возможно только при соответствующем изменении тока $\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p$ в фазной обмотке, а именно - реактивной составляющей тока \dot{I}_p .

При токах возбуждения меньше (больше) некоторого граничного значения $I_b < I_{в.гр}(P)$ [$I_b > I_{в.гр}(P)$] ток синхронного генератора имеет емкостную I_pC (индуктивную I_pL) реактивную составляющую $\varphi < 0$ ($\varphi > 0$) (см. рис. 3.2). Следовательно, при недозапуске (перезапуске) реактивная мощность генератора имеет емкостный ($Q_c = -3U I_p L$) [индуктивный ($Q_L = 3U I_p L$)] характер.

Если синхронный генератор подключен к электрической системе большой мощности $U = \text{const}$, то его эквивалентную схему замещения можно представить в виде параллельного соединения двух источников тока: источника активной составляющей тока генератора, зависящей от вращающего момента первичного двигателя, $I_a(M_{впр})$, и источника реактивной составляющей тока генератора, зависящей от момента вращения первичного двигателя и тока возбуждения, $I_p(I_b, M_{впр})$

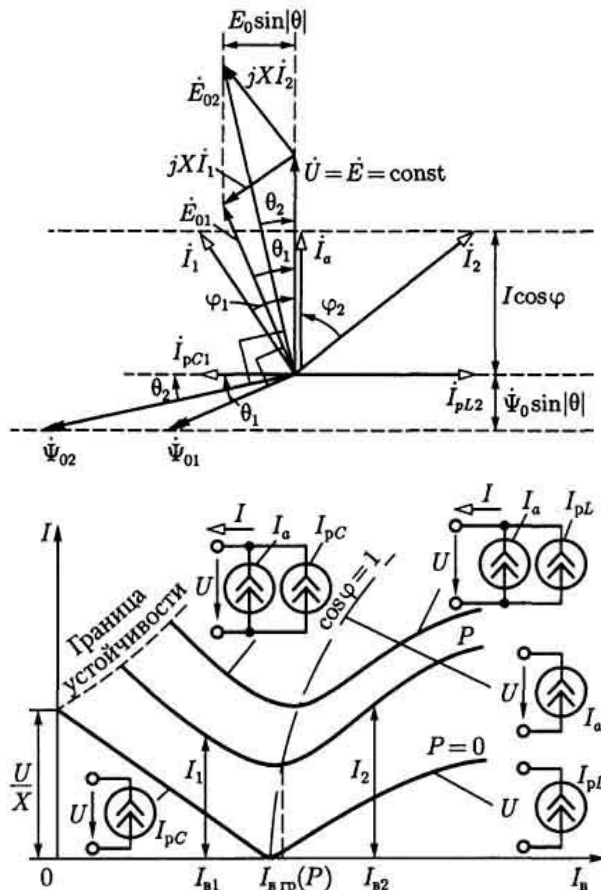


Рис. 3.1

Рис 3.2

Зависимость тока статора от тока возбуждения $I(I_B)$ при постоянном вращающем моменте первичного двигателя $M_{вр} = \text{const}$ называется U-образной характеристикой синхронного генератора (рис. 3.2). При некотором малом значении тока возбуждения угол $|\theta|$ (рис. 3.1) может превысить значение $\pi/2$ и устойчивость работы синхронного генератора нарушится. Чем больше значение активной мощности синхронного генератора, тем при больших значениях тока возбуждения наступит потеря устойчивости. На рис. 3.2 граница устойчивости синхронного генератора показана штриховой линией.

Если вращающий момент первичного двигателя равен нулю ($M_{вр} = 0$), то, пренебрегая всеми видами потерь, можно считать, что ток синхронного генератора реактивный (рис. 3.2, $P = 0$):

$$\dot{I}(I_B) = \dot{I}_p(I_B) = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jX} = \frac{j\omega\dot{\Psi}_0(I_B) - \dot{U}}{jX} \quad (3.2)$$

Ток генератора в этом случае зависит линейно от тока возбуждения. Линейность зависимости $I(I_B)$ нарушается лишь при больших значениях тока возбуждения вследствие насыщения магнитопровода машины.

Лекция 11

Физико-химические процессы в синхронных двигателях и их характеристики.

План:

1. Синхронных двигателях и их характеристики.
2. Синхронный компенсатор.

Синхронные двигатели имеют постоянную частоту вращения, и используется там, где нет необходимости в регулировании частоты или она должна быть постоянной. Синхронные двигатели имеют большую мощность (50–100 кВт и более) и применяется на металлургических заводах, в шахтах и других предприятиях для приведения в движение насосов, компрессоров и т.д. Достоинством синхронного двигателя является возможность его работы с емкостным (опережающим) током статора. Такой двигатель будет улучшать коэффициент мощности предприятия

Имеется также специальные синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт, используемые в схемах автоматики, звукозаписи, для вращения лент самопишущих приборов и в других случаях, требующих строгого постоянства частоты вращения.

Синхронная машина, работающая в режиме генератора или двигателя, может служить источником реактивной мощности.

Синхронный двигатель состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. В пазах статора размещена обмотка переменного тока, получающая питание от сети, а в роторе – обмотка постоянного тока.

В зависимости от мощности двигателя ротор выполняют с различной системой возбуждения. Синхронные двигатели средней и большой мощности выполняют с электромагнитным возбуждением. В этом случае расположенная на роторе обмотка возбуждения получает питание от источника постоянного тока через контактные кольца. Для двигателей малой мощности применяют постоянные магниты без обмотки возбуждения, что упрощает конструкцию ротора и повышает надежность двигателей.

Ротор синхронных двигателей выполняют с явновыраженными и неявновыраженными полюсами.

Явнополюсные, то есть с ровно выраженными полюсами, при котором каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного

наконечника и полюсной катушки. Все полюса закрепляют на ободке, являющимся также и ярмом, через которые закрепляются магнитные пятаки полюсов. Сердечники полюсов явнополюсного ротора обычно собирают из штамповой листовой конструкционной стали толщиной 1 - 1,5 мм. Обод явнополюсного ротора выполняют массивным (литым или сварным) или же шлихтованным из листов конструкционной стали 1-6 мм. Листы стягивают шпильками.

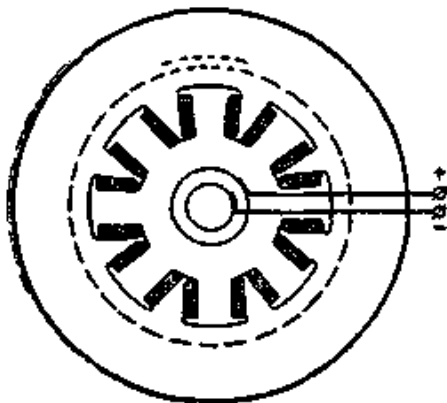


Рис.2 Явнополюсной ротор.

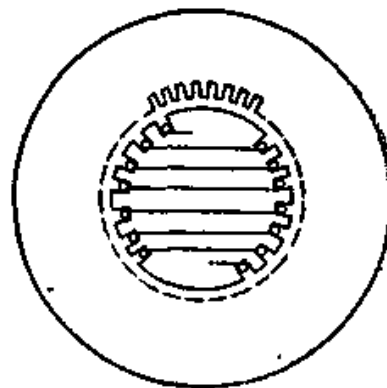


Рис.3 Неявнополюсной ротор.

Неявнополюсной ротор имеет вид удлиненного стального цилиндра. Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки в месте с хвостовиками или же делают сборными. Обмотки возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь две трети его поверхности (по периметру). Оставшееся одна треть внутренности двигателя остается для ротора. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывает стальными бандажными кольцами (каплями) изготовленными обычно из немагнитной стали.

Принцип действия синхронного двигателя

Оболочка статора синхронного двигателя подключается к сети переменного тока, а оболочка ротора к источнику постоянного тока. В синхронном двигателе момент на валу создается благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля статора и постоянного поля ротора. В отличие от асинхронного двигателя частота вращения ротора в синхронном двигателе не зависит от нагрузки и равна частоте вращения поля статора. Если ротор двигателя начнет вращаться с частотой, меньшей, чем частота поля статора, то в какой-то момент времени намагниченные полюса ротора расположатся против одноименных полюсов вращающегося поля статора. В этом случае нарушится связь между полюсами статора и ротора из-за их взаимного отталкивания.

Вращение ротора только с синхронной частотой – характерная особенность синхронных двигателей.

Для пуска синхронного двигателя в полюсных наконечниках ротора уложена пусковая обмотка, выполненная наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей. Наличие ее позволяет пускать двигатель как асинхронный. При достижении ротором угловой скорости в его обмотку подает постоянный ток, и двигатель входит в синхронизм.

Также для пуска синхронных двигателей используют генераторы постоянного тока (имеющие общий вал с двигателем) либо тиристорные выпрямители, обеспечивающую более высокую (по сравнению с электромашинными возбудителями) надежность работы двигателя.

Синхронные двигатели малой мощности (до 2 кВт) иногда возбуждают постоянными магнитами или реактивным током статора.

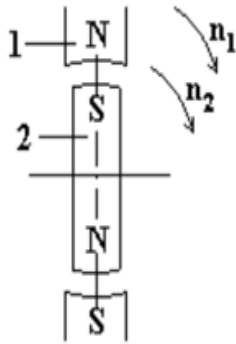


Рис.4 Принцип действия синхронного двигателя:

1 статор(катушка возбуждения);2 ротор.

Синхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы, т.е. они могут работать как в двигательном, так и генераторном режимах. Однако электропромышленность выпускает синхронные машины, предназначенные для работы только в генераторном или только в двигательном режиме, так как особенности работы машины в том или ином режиме предъявляют различные требования к конструкции машины. [6, с. 431]

Синхронные двигатели чаще работают в пусковых режимах и должны развивать больший пусковой момент, чем генераторы. Это накладывает определенные условия на конструкцию ротора: демпферную (пусковую) обмотку синхронных двигателей рассчитывают на большие токи и более длительный режим.

Для возбуждения синхронных двигателей используется электромашинная система возбуждения или тиристорная система возбуждения. В электромашинных системах возбуждения якорь возбуждителя — генератора постоянного тока — соединяется с валом синхронного двигателя жестко или в тихоходных машинах — через клиноременную передачу, которая обеспечивает увеличение частоты вращения возбуждителя и снижение его массы. Системы возбуждения синхронных двигателей принципиально не отличаются от систем возбуждения генераторов.

Уравнения синхронного двигателя отличаются от уравнений синхронного генератора лишь тем, что в них изменяется знак момента сопротивления.

Чтобы из генераторного режима перейти в двигательный, надо изменить знак момента сопротивления, приложенного к валу синхронной машины. Тогда изменится знак угла θ и направление активной мощности; машина начнет потреблять мощность из сети.

На угловой характеристике (рис. 6) область двигательного режима находится в зоне отрицательных углов θ . Устойчивой частью угловой характеристики в двигательном режиме является область от 0 до -90° . Номинальный момент, соответствующий $\theta_{\text{ном}}$, находится в области $20-30^\circ$. Двигатель с неявнополюсным ротором имеет максимум момента при $\theta = -90^\circ$:

$$M_{\text{эм макс}} = \frac{P_{\text{эм макс}}}{\omega_c} = \frac{mU E_0}{\omega_c x_d}. \quad (3)$$

Максимальный момент зависит от размера воздушного зазора двигателя. Чем больше зазор, тем меньше x_d и больше $M_{\text{эм макс}}$. Однако при большом зазоре растут габариты машины. Предел статической устойчивости

$$k_n = \frac{M_{\text{эм макс}}}{M_{\text{эм ном}}}. \quad (4)$$

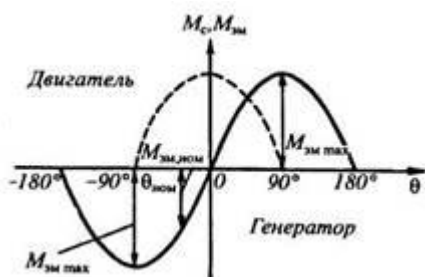


Рис. 6 Угловая характеристика синхронной машины

Удельный синхронизирующий момент, как и в генераторном режиме, максимален при $\theta = 0$ и равен нулю при $\theta = 90^\circ$.

Для явнополюсного двигателя зависимость $M_с, M_эм = f(\theta)$ имеет такой же вид, как и для генератора, но располагается в зоне отрицательных углов θ . [6, с. 432]

U-образные характеристики синхронных двигателей имеют тот же вид, что и для генераторов. При перевозбуждении синхронный двигатель по отношению к сети является емкостью, недо возбужденный двигатель потребляет из сети реактивную мощность, являясь по отношению к сети индуктивностью. При недо возбуждении реакция якоря в синхронном двигателе — подмагничивающая, при перевозбуждении — размагничивающая. Важное значение для исследования процессов преобразования энергии в синхронных двигателях имеют рабочие характеристики (рис. 7).

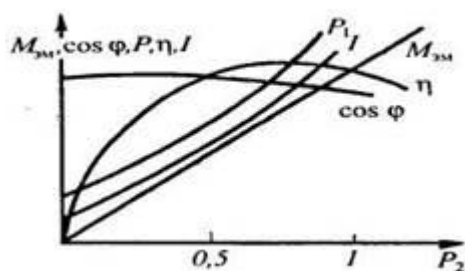


Рис. 7. Рабочие характеристики синхронного двигателя

С ростом нагрузки на валу двигателя увеличивается момент и ток в якоре, сначала по линейному закону, а затем из-за изменения параметров — по нелинейному закону. Если не изменяется I_f , $\cos \varphi$ может падать, расти или иметь максимум. Это зависит от значения I_f и может быть прослежено по U-образным характеристикам: при увеличении P_2 — переходе с одной U-образной характеристики на другую $\cos \varphi$ изменяется, так как из-за внутреннего падения напряжения кривая $\cos \varphi = 1$ смещается в область больших нагрузок. При изменении I_f можно получить постоянное значение $\cos \varphi$ при разных P_2 (рис. 8). Кривая 1 на рис. 8 соответствует работе синхронного двигателя с постоянным током возбуждения в зоне недо возбуждения на U-образных характеристиках, кривая 2 — работе синхронного двигателя с перевозбуждением; кривая 3 возможна при регулировании тока возбуждения.

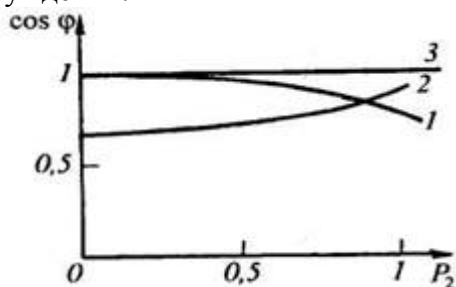


Рис. 8. Зависимости $\cos \varphi$ синхронного двигателя от нагрузки

Синхронные компенсаторы

Синхронным компенсатором называется синхронный двигатель облегченной конструкции, предназначенный для работы на холостом ходу.

Основные потребители электрической энергии, кроме активной мощности, потребляют от генераторов системы реактивную мощность. К числу потребителей, требующих большие намагничивающие реактивные токи для создания и поддержания магнитного потока, относятся асинхронные двигатели, трансформаторы, индукционные печи и другие. В связи с этим распределительные сети обычно работают с отстающим током.

Реактивная мощность, вырабатываемая генератором, получается с наименьшими затратами. Однако передача реактивной мощности от генераторов связана с дополнительными потерями в трансформаторах и линиях передач. Поэтому для получения реактивной мощности становится экономически выгодным применение синхронных компенсаторов, располагаемых на узловых подстанциях системы или непосредственно у потребителей.

Синхронные двигатели благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с $\cos = 1$ и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе, с перевозбуждением отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Синхронные компенсаторы предназначены для компенсации коэффициента мощности сети и поддержания нормального уровня напряжения сети в районах сосредоточения потребительских нагрузок.

Синхронным компенсатор - синхронная машина, работающая в двигательном режиме без нагрузки на валу при изменяющемся токе возбуждения.

В перевозбужденном режиме ток опережает напряжение сети, т. е. является по отношению к этому напряжению емкостным, а в недовозбужденных — отстающим, индуктивным. В таком режиме синхронная машина превращается в компенсатор — в генератор реактивного тока.

Нормальным являемся перевозбужденный режим работы синхронного компенсатора, когда он отдает в сеть реактивную мощность.

Синхронные компенсаторы лишены приводных двигателей и с точки зрения режима своей работы в сущности являются синхронными двигателями, работающими на холостом ходу.

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

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

Для того чтобы улучшить коэффициент мощности и соответственно уменьшить угол сдвига между током и напряжением от значения $\cos \varphi_{св}$ до $\cos \varphi_k$ нужна реактивная мощность:

$$Q_k = P \cdot (\tan \varphi_{св} - \tan \varphi_k) \cdot a$$

где P — средняя активная мощность, квар; $\varphi_{св}$ — сдвиг фаз, соответствующий средневзвешенному коэффициенту мощности; φ_k — сдвиг фаз, который должен быть получен после компенсации; a — коэффициент, равный около 0,9, вводимый в расчеты с целью учета возможного повышения коэффициента мощности, без установки компенсирующих устройств.

Помимо компенсации реактивных токов индуктивных промышленных нагрузок, синхронные компенсаторы необходимы на ЛЭП. В длинных ЛЭП при малых нагрузках преобладает емкость линии, и они работают с опережающим током. Для того чтобы компенсировать этот ток, синхронный компенсатор должен работать с отстающим током, т. е. недовозбужденным.

При значительной нагрузке ЛЭП, когда преобладает индуктивность потребителей электроэнергии, ЛЭП работает с отстающим током. В этом случае синхронный компенсатор должен работать с опережающим током, т. е. перевозбужденным.

Изменение нагрузки на ЛЭП вызывает изменение потоков реактивных мощностей по величине и фазе, приводит к значительным колебаниям напряжения в линии. В связи с этим возникает необходимость его регулирования.

Синхронные компенсаторы обычно устанавливают на районных подстанциях.

Для регулирования напряжения в конце или середине транзитных ЛЭП могут быть созданы промежуточные подстанции с синхронными компенсаторами, которые должны регулировать либо поддерживать напряжение неизменным.

Работа таких синхронных компенсаторов автоматизируется, в связи с чем создается возможность плавного автоматического регулирования величины вырабатываемой реактивной мощности и напряжения.

Для осуществления асинхронного пуска все синхронные компенсаторы снабжаются пусковыми обмотками в полюсных наконечниках или их полюсы делаются массивными. При этом используется способ прямого, а в необходимых случаях — способ реакторного пуска.

В некоторых случаях мощные компенсаторы пускаются в ход также с помощью пусковых фазных асинхронных двигателей, укрепляемых с ними на одном валу. Для синхронизации с сетью при этом обычно используется метод самосинхронизации.

Так как синхронные компенсаторы не развивают активной мощности, то вопрос о статической устойчивости работы для них теряет остроту. Поэтому они изготавливаются с меньшим воздушным зазором, чем генераторы и двигатели. Уменьшение зазора позволяет облегчить обмотку возбуждения и удешевить машину.

Номинальная полная мощность синхронного компенсатора соответствует его работе с перевозбуждением, т.е. номинальной мощностью синхронного компенсатора считается его реактивная мощность при опережающем токе, которую он может длительно нести в рабочем режиме.

Наибольшие значения тока и мощности в недовозбужденном режиме получаются при работе в реактивном режиме.

В большинстве случаев в недовозбужденном режиме требуются меньшие мощности, чем в перевозбужденном, но в некоторых случаях необходима большая мощность. Этого можно достигнуть увеличением зазора, однако это приводит к удорожанию машины, и поэтому в последнее время ставится вопрос об использовании режима с отрицательным током возбуждения. Поскольку синхронный компенсатор по активной мощности загружен только потерями, то, согласно он может работать устойчиво также с небольшим отрицательным возбуждением.

В ряде случаев в маловодные периоды для работы в режиме компенсаторов используются также генераторы гидроэлектростанций.

В конструктивном отношении компенсаторы принципиально не отличаются от синхронных генераторов. Они имеют такую же магнитную систему, систему возбуждения, охлаждения и др. Все синхронные компенсаторы средней мощности имеют воздушное охлаждение и выполняются с возбуждателем и подвозбудителем.

В связи с тем, что синхронные компенсаторы не предназначены для выполнения механической работы и не несут активной нагрузки на валу, они имеют механически облегченную конструкцию. Компенсаторы выполняются как сравнительно тихоходные машины (1000 — 600 об/мин) с горизонтальным валом и явнополюсным ротором.

В качестве синхронного компенсатора может быть использован генератор, работающий холостую при соответствующем возбуждении. В перевозбужденном генераторе появляется уравнивающий ток, являющийся чисто индуктивным относительно напряжения генератора и чисто емкостным относительно сети.

Следует иметь в виду, что перевозбужденная синхронная машина независимо от того, работает ли она генератором или двигателем, может рассматриваться относительно сети как емкость, а недо возбужденная — как индуктивность.

Для того чтобы перевести генератор, включенный в сеть, в режим синхронного компенсатора, достаточно закрыть доступ пара (или воды) в турбину. В таком режиме перевозбужденный турбогенератор начинает потреблять небольшую активную мощность из сети только для покрытия потерь вращения (механических и электрических) и отдает реактивную мощность в сеть.

В режиме синхронного компенсатора генератор может работать длительное время и зависит лишь от условий работы турбины.

При необходимости турбогенератор может быть использован в качестве синхронного компенсатора как при вращающейся турбине (вместе с турбиной), так и при отсоединенной, т. е. при разобранной муфте сочленения.

Вращение паровой турбины со стороны генератора, перешедшего в двигательный режим, может вызвать перегрев хвостовой части турбины.

Лекция-12

Конструкция машин постоянного тока

Цель: Изучить основные принципы работы и их конструкции генератора и двигателя постоянного тока.

План:

1. Коллекторные машины
2. Принцип действия двигателя постоянного тока
3. Назначение, устройство и принцип действия машины постоянного тока

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них коллектора — механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рис. 13.1 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора — якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) — источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка $absd$, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки A и B , осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением R .

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой $e = 2Blv$, а направление для положения якоря, изображенного на рисунке, указано стрелками.

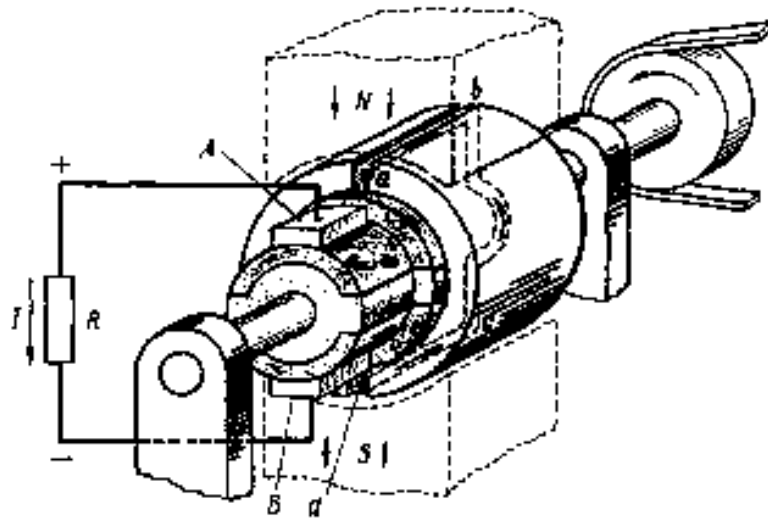


Рис.13.1. Упрощенная модель коллекторной машины.

В процессе работы генератора якорь вращается и виток $abcd$ занимает разное пространственное положение, поэтому в *обмотке якоря наводится переменная ЭДС*. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке R) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в *пульсирующий ток* во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 13.1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки A к щетке B ; следовательно, щетка A является положительной, а щетка B — отрицательной. После поворота якоря на 180° (рис. 13.2, *a*) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 13.2, *б*). Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой A всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой B — пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабевают при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе.

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора \mathcal{A} и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке A подключить зажим «плюс», а к щетке B — «минус», то в обмотке якоря появится ток I , направление которого показано на рис. 24.3. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{эм}$, создающие на якоре электромагнитный момент M и вращающие его против часовой стрелки. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока — изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

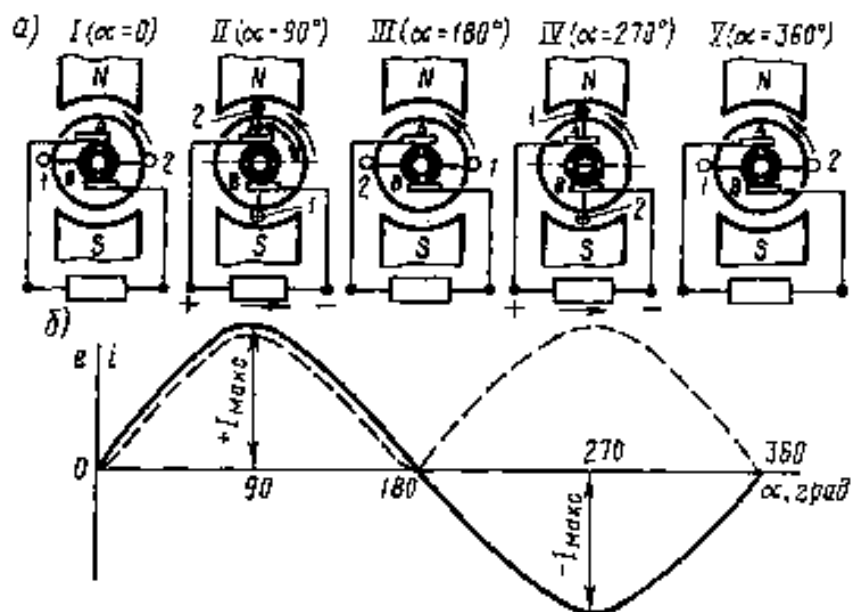


Рис.13.2. К принципу действия генератора постоянного тока: _____ ЭДС и ток в обмотке якоря; _____ ЭДС и ток во внешней цепи генератора

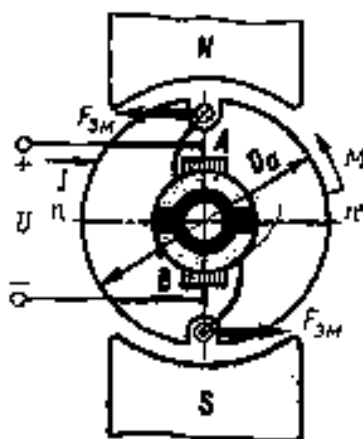


Рис.13.3.К принципу действия двигателя постоянного тока

Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, так как при прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтральной оси nn' (рис. 13.3) электромагнитные силы $F_{эм} = 0$ (магнитная индукция в середине межполюсного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

Назначение, устройство и принцип действия машины постоянного тока

Электрические машины постоянного тока по своему назначению делятся на электрические генераторы и электрические двигатели.

Генераторы и двигатели постоянного тока находят применение в различных отраслях народного хозяйства. Преимуществами двигателей постоянного тока является удобство регулирования в широких пределах скорости вращения и большой пусковой момент. Поэтому широко применяются в качестве исполнительных звеньев в системах

регулирования и в качестве тяговых двигателей крановых установок, станков, на электротранспорте и т.п.

Генераторы низкого напряжения (6-12 В) применяют для питания электролитических ванн (токи до 10 000 А), зарядки аккумуляторных батарей, высококачественной сварки (напряжение 20-70 В).

Диапазон мощностей машин постоянного тока колеблется – от единиц ватт до 9000 кВт.

Наиболее распространены машины общепромышленного применения, выпускаемые как двигатели или как генераторы на мощности 0,15-200 кВт, частоты вращения 2870-550 об/мин (более мощные машины-тихоходные), напряжения 110-460 В.

Однако имеют существенные недостатки. При определенных условиях щетки-коллектор могут искрить. Это снижает надежность. Их нельзя использовать во взрывоопасных средах. Кроме того коллектор усложняет и удорожает ее конструкцию и эксплуатацию по сравнению с бесколлекторными машинами.

Устройство машины постоянного тока. Магнитная система двухполюсной машины и картина поля в ней показана на рис 12.1. Основными частями машины являются статор 1 с магнитными полюсами 2, ротор 3 с обмоткой 4 и щеточно-коллекторное устройство. На магнитные полюсы насаживаются катушки обмотки возбуждения. Катушки соединяются последовательно так, чтобы полюсы N_0-S_0 на статоре чередовались. Обмотка возбуждения, питается постоянным током.

Магнитное поле создается током возбуждения I_e в катушках обмотки возбуждения (реже постоянными магнитами). Магнитная система и поле машины симметричны относительно продольных осей полюсов N_0-S_0 . Линии, проходящие посередине между смежными полюсами, называют поперечными магнитными осями, а их следы на поверхности якоря – геометрическими нейтралами. Обмотка якоря состоит из уложенных на поверхности (в пазах) ротора «активных» проводников, соединенных в витки (секции) так, что она всегда представляет собой замкнутый контур. Соединение ее с внешней цепью осуществляется скользящим контактом с помощью неподвижных электрографитовых щеток 5.

Пусть якорь приводится во вращение с постоянной угловой скоростью Ω . Внешняя цепь отключена. При вращении якоря в проводниках лежащих в пазах наводятся э.д.с.

$$e = Bl \cdot \vartheta \quad (12.1)$$

где l – длина проводника; ϑ - линейная скорость проводников; B - магнитная индукция в зазоре между полюсом и якорем.

Под северным и южным полюсами направление э.д.с. противоположны. В проводниках, проходящих геометрические нейтралы, э.д.с. не наводится, т.к. здесь $B=0$.

Обмотка якоря представляет собой замкнутый контур. На рис.12.2 изображена простейшая обмотка якоря – бесконечной спирали на тороиде. Однако ток в контуре не возникает, т.к. алгебраическая сумма мгновенных значений э.д.с. e всех последовательно соединенных проводников обмотки равна нулю. Если установить неподвижные щетки для создания скользящего контакта с проводниками, проходящими геометрические нейтралы (рис. 12.2) то между щетками будут находиться проводники с одинаково направленными э.д.с. e , сумма которых максимальна и постоянна (при сдвиге щеток эта сумма уменьшается).

В действительности щетки касаются не проводников а соединенных с ними соответствующих пластин коллектора.

Если соединить щетки к внешней цепи, то обмотка якоря по отношению к его зажимам оказывается разделенной на параллельно соединенные ветви с одинаковыми э.д.с. E и сопротивлением R_a , а R_{Σ} – эквивалентное сопротивление параллельных ветвей (рис.12.3, а). Если к зажимам якоря генератора присоединить внешнюю электрическую

цепь, то э.д.с. якоря создает в цепи ток якоря. В двигателе ток создается внешним источником.

Обычно машины постоянного тока выполняются многополюсной. При этом возрастает число пар щеток и параллельных ветвей якоря.

Статор (станину) машины отливают или свертывают в цилиндр из толстой листовой стали и сваривают по шву. Полюсы отковывают из мягкой стали или набирают из стальных пластин. Якорь представляет собой стальной барабан, для уменьшения потерь от вихревых токов при перемагничивании его набирают из дисков электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Широко применяется барабанная обмотка. Тут все проводники укладываются в пазы и соединяются с коллекторными пластинами. Стороны витка располагаются под разноименными полюсами так, что э.д.с. в них складывается.

Принцип действия генератора. Пусть якорь машины вращается в магнитном поле. В проводниках вращающегося якоря возникает э.д.с. Если к зажимам якоря подключить приемник, то э.д.с. якоря вызовет в цепи ток. В проводниках якоря возникают электромагнитные силы. Они создают момент, противодействующий вращению якоря. Если Ω - скорость якоря постоянна то вращающий момент приводного двигателя $M_{вр}$ - равен противодействующему электромагнитному моменту $M_{пр}$ генератора: $M_{вр} = M_{пр} = M$.

В соответствии со схемой замещения цепи якоря (рис.12.3,б) запишем уравнение ее электрического состояния:

$$E = U + R_{я} I_{я}. \quad (12.2)$$

Умножив это выражение на $I_{я}$, получим уравнение баланса мощности цепи якоря:

$$E I_{я} = U I_{я} + R_{я} I_{я}^2. \quad (12.3)$$

Мощность приемника $P = U I_{я}$ и мощность электрических потерь в якоре $\Delta P_{ЭЯ} = R_{я} I_{я}^2$ составляют электромагнитную мощность $E I_{я} = P_{ЭМ}$ развиваемую генератором и равную механической мощности приводного двигателя:

$$E I_{я} = P_{ЭМ} = M \Omega = P_{мех}. \quad (12.4)$$

Принцип действия двигателя. Если на зажимы неподвижного якоря подать напряжение, то оно вызовет ток в цепи якоря. Появившиеся электромагнитные силы создают вращающий момент. Здесь также уместно $M_{вр} = M_{пр} = M$. Во вращающемся якоре наводится э.д.с. противоположно направлению току. Часть ее называют противо-э.д.с. По схеме замещения (рис.12.3,в) найдем выражение для тока якоря:

$$I_{я} = (U - E) / R_{я}. \quad (12.5)$$

Уравнение баланса мощности цепи якоря двигателя:

$$U I_{я} = E I_{я} + R_{я} I_{я}^2. \quad (12.5,а)$$

Отсюда видно что электрическая мощность $P_{Э} = U I_{я}$ превращается в электромагнитную мощность $P_{ЭМ} = E I_{я}$ и мощность потерь в обмотке якоря. Электромагнитная мощность равна механической мощности как в генераторе $E I_{я} = P_{ЭМ} = M \Omega$.

Электромагнитный момент. Если общее число проводников якоря равно N , число параллельных ветвей $2a$, то э.д.с. якоря может быть выражена из (12.1) после некоторых преобразований как:

$$E = \frac{pN}{2\pi a} \Omega \Phi = c \Omega \Phi, \quad (12.6)$$

где $c = pN / 2\pi a$; p - число пар полюсов; a – число пар параллельных ветвей; Ω -угловая скорость якоря; Φ -магнитный поток полюса.

Если использовать частоту вращения якоря n , $n = 60 \Omega / 2\pi$ об.мин, то обозначив $c_E = pN / 60 a$, получим выражение для э.д.с якоря

$$E = \frac{pN}{60 a} n \Phi = c_E n \Phi . \quad (12.7)$$

Таким образом, э.д.с. якоря пропорциональна частоте его вращения и магнитному потоку полюсов машины.

Электромагнитная сила F , действующая на проводник с током в магнитном поле равна :

$$F = BIl.$$

В поле одного полюса находится $N/2p$ проводников якоря с одинаковым током параллельной ветви $I_a = I_j / 2a$. Все силы одинаково направлены по касательным к окружности якоря. Используя обозначения получения формулы э.д.с. E можем получить выражение электромагнитного момента машины

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_j = c_M \Phi I_j , \quad (12.8)$$

причем

$$c_M = \frac{pN}{2\pi a} = c .$$

Таким образом, электромагнитный момент машины постоянного тока пропорционален потоку полюсов и току якоря. Он является тормозящим, в генераторе и вращающим в двигателе.

Искрение щеток на коллекторе. В процессе работы машины происходит искрение между краями щеток и коллекторными пластинами. Оно вызывается либо неудовлетворительным состоянием щеточно - коллекторного узла, либо неудовлетворительным процессом коммутации.

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую. Коммутируемые секции, проходя геометрические нейтралы, замыкаются щеткой накоротко, а затем размыкаются. При нагрузке ток в проводниках якоря создает магнитное поле якоря. Магнитная ось N_a-S_a этого поля проходит через геометрические нейтралы. Коммутируемая секция оказывается в интенсивном магнитном поле B_a якоря и в ней наводится э.д.с. $e_a = B_a l \vartheta$.

При замыкании щеткой секции э.д.с. e_a вызывает в ней ток секции $i_k = e_a / R_c$ (R_c – сопротивление секции), который затем при размыкании прерывается. Происходящий обрыв тока вызывает искрение. Искрение ослабляется путем установления между основными полюсами на геометрических нейтралах добавочных полюсов, поле которых, компенсируют поле якоря. Их катушки подключаются последовательно в цепь якоря так, что их магнитный поток направлен на встречу потоку якоря. Все машины постоянного тока мощностью от 1 кВт и выше имеют добавочные полюсы.

Лекция-13:

Принцип работы машин постоянного тока в режиме генератора

Цель: Определение основных режимов работы машин постоянного тока.

План:

1. Генераторный режим машин постоянного тока.
2. Обмоток и элементы якоря постоянного тока.

Генераторный режим машин постоянного тока.

Основной характеристикой генератора постоянного тока (ГПТ) как источника питания ЭЭ является зависимость его напряжения u от тока нагрузки i ; называемая внешней характеристикой: $u = u(i)$. Цепь якоря генератора описывается уравнением источника напряжения e с внутренней ЭДС e и внутренним сопротивлением r_a , равным сумме сопротивлений всех последовательно включенных элементов цепи якоря (например, обмотки якоря r_a и дополнительных полюсов r_d):

$$u = e - r_{\Sigma} i. \quad (8.8)$$

Здесь принято обычное для автономного источника совпадение направлений ЭДС e и тока i .

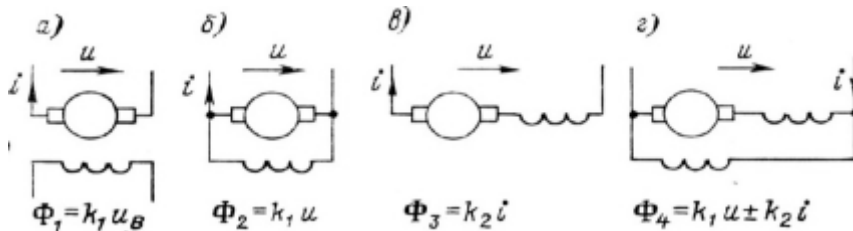


Рис. 8.8. Схемы МПТ с независимым (а), параллельным (б), последовательным (в) и смешанным (г) возбуждением

Внешняя характеристика в значительной мере определяется зависимостью ЭДС e от тока нагрузки i , которая, в свою очередь, определяется схемой питания обмоток главных полюсов. У МПТ используются четыре основных варианта включения обмоток возбуждения (рис. 8.8):

- на независимый источник напряжения $u_в$ (машины независимого возбуждения);
- параллельно цепи якоря с напряжением u (машины параллельного возбуждения, или шунтовые);
- последовательно в цепь якоря с током i (машины последовательного возбуждения, или серийные);
- одной обмотки параллельно цепи якоря с напряжением u , а другой — последовательно в цепи якоря с током i (машины смешанного возбуждения, или компаундные).

У обычных МПТ сопротивление обмотки параллельного возбуждения (шунтовой) $r_{ш}$ в несколько десятков раз больше сопротивления номинальной нагрузки генератора $r_{НОМ} = u_{НОУ} / i_{НОУ}$, а сопротивление обмотки последовательного возбуждения (серийной) $r_{с}$ в несколько десятков раз меньше $r_{НОМ}$. Сопротивление обмотки якоря r_a и добавочных полюсов r_d также не превышает нескольких процентов $r_{НОУ}$.

Генераторы с независимым возбуждением от источника постоянного напряжения $u_в$ при изменении тока нагрузки i сохраняют постоянство потока Φ , так как $\Phi = k^1 u_в = const$. Эти зависимости справедливы для магнитопровода в ненасыщенном состоянии, т.е. при ограниченных значениях $u_в$. Пренебрежение влиянием реакции якоря на магнитный поток Φ , не полностью устраняемым дополнительными полюсами, позволяет внешние характеристики генераторов с независимым возбуждением

$$u = u_x - r_{\Sigma} i,$$

описывать согласно (8.8) прямой:

где $u = c\Phi$. — напряжение (ЭДС e) генератора в режиме ХХ (рис. 8.9).

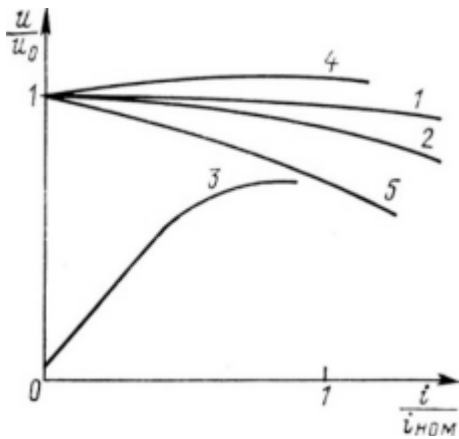


Рис. 8.9. Внешние характеристики ГПТ с независимым возбуждением (1) и самовозбуждением при параллельном (2), последовательном (3) и смешанном включении обмоток: согласном (4) и противовключении (5)

В режиме внезапного КЗ ток генератора быстро увеличивается до значений (15—20) $i_{НОУ}$, а затем снижается, продолжая оставаться в 8—10 раз большим, чем $i_{НОМ}$. Режим КЗ ГПТ особенно опасен при независимом возбуждении. Возникают значительные ЭДС, которые вызывают механическое повреждение элементов конструкции генератора. Кроме того, КЗ сопровождается возникновением искрения по всему коллектору, называемого «круговым огнем», которое вызывает обгорание поверхности коллектора и щеток.

Генераторы с самовозбуждением и обмоткой параллельного возбуждения (см. рис. 8.8,б) имеют магнитный поток, зависящий от напряжения u и, следовательно, тока нагрузки i , так как $u = iR$. Поэтому внешняя характеристика таких генераторов «мягче», чем у генераторов с независимым возбуждением (рис. 8.9), в особенности в области токов перегрузок ($i > i_{НОМ}$). Установившийся ток КЗ самовозбуждающегося генератора не превосходит номинального значения $i_{НОУ}$.

При необходимости поддерживать у генератора постоянное напряжение u используют регулирование его тока возбуждения. Значения тока возбуждения, обеспечивающего $u = const$ при различных токах нагрузки, описываются регулировочной характеристикой $i_B = f(i)$ (рис. 8.10,а). Принципиальные схемы регулирования тока возбуждения i_B показаны на рис. 8.10,б,в.

Генераторы последовательного возбуждения используются редко. В них имеет место значительная взаимная зависимость изменения напряжения u и тока нагрузки i , так как поток пропорционален току нагрузки: $\Phi = kI$.

Форма внешней характеристики генераторов последовательного возбуждения показана на рис. 8.9. Нарушение ее линейности при больших токах происходит из-за насыщения магнитной цепи в результате усиления действия реакции якоря.

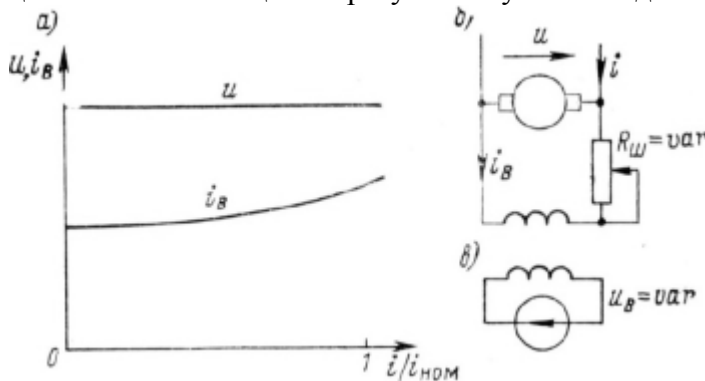


Рис. 8.10. Регулировочная характеристика ГПТ (а) и схемы управления возбуждением при самовозбуждении (б) и независимом возбуждении (в)

Генераторы со смешанным возбуждением имеют две обмотки на каждом полюсе, одна из которых обтекается током, пропорциональным напряжению генератора или

постороннего источника напряжения возбуждения, а вторая — током якоря. При отсутствии насыщения магнитопровода при смешанном возбуждении справедлива формула $\Phi_4 = \kappa_1 u + \kappa_2 I$. Знаки \pm показывают, что вторая, последовательная (сериесная) обмотка может быть включена так, чтобы либо усилить МП параллельной (шунтовой) обмотки, либо его ослаблять. Использование последовательной обмотки с согласным или встречным включением позволяет существенно влиять на внешнюю характеристику ГИТ (соответственно кривые 4 и 5 на рис. 8.9). Согласное включение, обеспечивает большее постоянство напряжения генератора в широком диапазоне токов нагрузки (приближение к характеристике идеального источника напряжения). Встречное включение ограничивает предельные значения тока нагрузки вплоть до режима КЗ (приближение к характеристике идеального источника тока).

Автономные ГПТ должны обладать свойством начального самовозбуждения — свойством перехода от состояния $i_B = 0$ и $u = 0$ при $Q = 0$ к состоянию $i_B > 0$ и $u = u_{100}$ при $P_{\text{яом}}$ без использования дополнительных источников питания. Физически такой переход реализуем, если в генераторе при $i_B = 0$ существует *остаточное* МП. Соответствующий этому полю остаточный поток и создаваемая им остаточная ЭДС e_0 (см. рис. 8.5) могут обеспечить самовозбуждение генератора только при выполнении во всем диапазоне значений $0 < i_B < i_{B1}$ неравенства $i_B r_B < e = f(i_B)$, где $e = f(i_B)$ — характеристика ХХ. Переходный процесс начального самовозбуждения описывается с помощью уравнения, составленного для контура возбуждения (рис. 8.11,б):

$$L_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = f(i_B),$$

решение которого определяет закон нарастания тока возбуждения во времени до установившегося режима, определяемого точкой А (рис. 8.11,а). Если сопротивление контура возбуждения настолько велико (например, z'), что нарушается неравенство $i_B r_B < e$, то процесс начального самовозбуждения прекращается при малых значениях e (точка В на рис. 8.11, а).

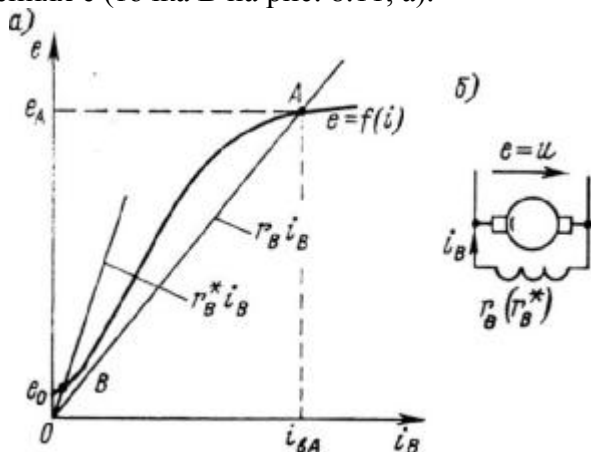


Рис. 8.11. Характеристика ХХ (а) и схема возбуждения генератора (б)

Обмотки якоря постоянного тока.

При выполнении обмотки проводники, расположенные в пазах якоря, следует соединять таким образом, чтобы э. д. с. в них складывалась. Для этого два проводника, образующие виток обмотки, должны соединяться так, как указано на рис. 92, а, т. е. проводник А, расположенный под северным полюсом, должен соединяться с проводником Б, расположенным под южным полюсом. Расстояние между проводниками, составляющими виток, должно быть равно или незначительно отличаться от полюсного деления? — расстояния между осями соседних полюсов. При этом условии виток будет охватывать весь магнитный поток полюса и э. д. с., возникающая в нем при вращении якоря, будет иметь наибольшее значение.

Для наглядного изображения обмоток цилиндрическую поверхность якоря вместе с обмоткой разворачивают в плоскость и все соединения проводников изображают в виде прямых линий на плоскости чертежа (рис. 92, б).

Обмотка якоря состоит из отдельных секций. *Секцией* называют часть обмотки, расположенную между двумя коллекторными пластинами, следующими одна за другой по ходу обмотки. Число секций S в обмотке равно числу коллекторных пластин K . Секция может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных витков. В первом случае секции называют *одновитковыми* (рис. 93, а, см. рис. 85, б), во втором — *многовитковыми* (рис. 93, б, см. рис. 85, а). Одновитковые секции состоят из двух *активных проводников*, которые непосредственно пересекают магнитный поток; активные проводники расположены в пазах якоря и соединяются *лобовыми частями*, лежащими вне сердечника якоря. Лобовые части в индуцировании э. д. с. практически не участвуют. Многовитковые секции состоят из двух активных сторон, каждая из которых объединяет несколько активных проводников. В некоторых машинах большой мощности применяют якорные катушки, выполненные из разрезных секций (см. рис. 85, в). Обмотка якоря, состоящая из таких секций, называется *стержневой*.

В ряде случаев по конструктивным соображениям и для уменьшения потерь мощности в обмотке якоря при изготовлении секций вместо одного сплошного проводника требуемого поперечного сечения берут несколько проводников меньшего сечения. Эти проводники обычно располагают в пазу друг над другом и присоединяют к одним и тем же коллекторным пластинам. Все секции обмотки обычно имеют одинаковое число витков. На схемах обмотки секции для простоты всегда изображают одновитковыми. Секцию обмотки укладывают в пазы таким образом, чтобы одна из ее активных сторон находилась в верхнем слое, а другая — в нижнем. На схемах стороны секции, расположенные в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а в нижнем слое — штриховыми.

При объединении нескольких секций в якорную катушку каждую из сторон якорной катушки в большинстве случаев укладывают в один общий паз. Для того чтобы э. д. с. индуцированные в отдельных секциях, складывались, при соединении их руководствуются тем же правилом, что и при соединении проводников в витки: расстояние между соединяемыми частями секций должно быть приблизительно равно расстоянию между осями полюсов.

Обмотки якоря подразделяются на две основные группы: *петлевые (параллельные)* и *волновые (последовательные)*.

Простая волновая обмотка. При простой волновой обмотке секции, лежащие под разными полюсами, соединяют последовательно (рис. 94). При этом после одного обхода окружности якоря, т. е. после последовательного соединения p секций приходят к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной. Например, начало секции 1 присоединяют к коллекторной пластине КП1, а ее конец соединяют с коллекторной пластиной КП10 и началом секции 2, которая расположена под следующей парой полюсов; затем конец секции 2 соединяют с другой коллекторной пластиной и с началом

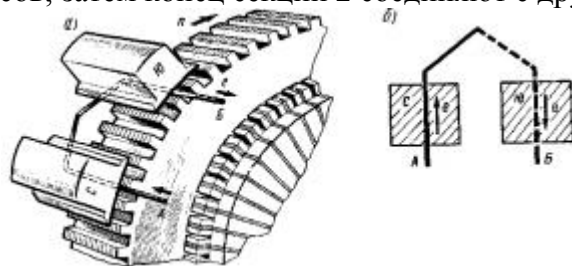


Рис. 92. Принцип выполнения обмотки барабанного якоря

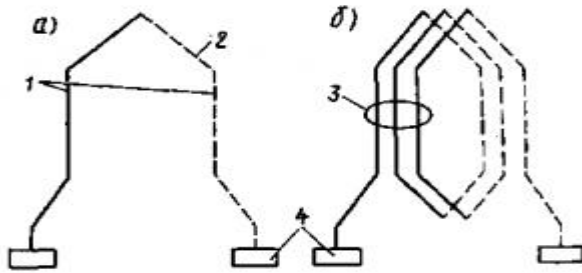


Рис. 93. Схемы одновитковой (а) и многовитковой (б) секций: 1 — активные проводники; 2 — лобовая часть; 3 — активная сторона; 4 — коллекторные пластины

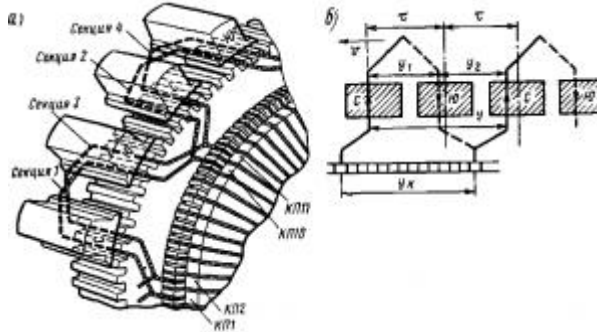


Рис. 94. Общий вид волновой обмотки (а) и схема соединения ее секций (б)

следующей секции. После завершения полного обхода окружности якоря конец соответствующей секции соединяют с коллекторной пластиной КП2 и началом секции 3, затем таким же образом с коллекторной пластиной КП1 и секцией 4 и т. д. до тех пор, пока обмотка не замкнется, т. е. пока не придут к началу секции 1. Якорная катушка в волновой обмотке имеет форму волны (рис. 95, а), откуда получила это название.

Для выполнения обмотки необходимо знать ее результирующий шаг u (см. рис. 94, б), первый u_1 и второй u_2 частичные шаги, а также шаг по коллектору u_k . Указанные шаги обычно выражают в числе пройденных секций (шаг по коллектору выражается в этих же единицах, так как число коллекторных пластин равно числу секций).

В простой волновой обмотке число параллельных ветвей обмотки $2a$ всегда равно двум и не зависит от числа полюсов:

$$2a = 2 \quad (56)$$

На рис. 96, а приведена в качестве примера развернутая в плоскость схема простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины, имеющей 19 секций, а на рис. 96, б — эквивалентная схема этой обмотки, показывающая последовательность соединения ее секций и образующиеся параллельные ветви. Цифрами 1, 2, 3 и т. д. обозначены активные проводники, лежащие в верхнем слое каждого паза, а 1', 2', 3' и т. д. — в нижнем слое. При волновой обмотке в машине можно устанавливать только два щеточных пальца. Однако это делают лишь в машинах малой мощности; в более мощных машинах обычно ставят полный комплект ($2p$) щеточных пальцев для уменьшения плотности тока под щетками и улучшения токосъема.

Простая петлевая обмотка. При простой петлевой обмотке каждую секцию присоединяют к соседним коллекторным пластинам (рис. 97). Например, начало 1-й секции присоединяют к коллекторной пластине КП1, а конец ее соединяют с соседней коллекторной пластиной КП2 и началом рядом лежащей 2-й секции. Далее

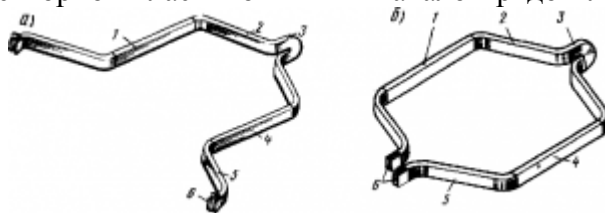


Рис. 95. Форма якорных катушек при волновой (а) и петлевой (б) обмотках: 1, 4 — пазовые части (верхняя и нижняя стороны); 2, 5 — задняя и передняя лобовые части; 3 — задняя головка; 6 — концы секций, припаиваемые к коллектору

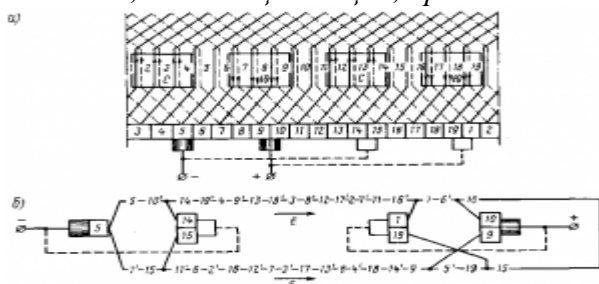


Рис. 96. Схемы простой волновой обмотки четырехполюсной машины

конец 2-й секции присоединяют к следующей коллекторной пластине и к началу соседней секции и т. д. до тех пор, пока обмотка не замкнется, т. е. пока не придут к началу 1-й секции. В этой обмотке каждая последующая секция расположена рядом с предыдущей, а якорная катушка имеет форму петли (рис. 95,б), откуда получила название обмотки.

В простой петлевой обмотке секции, расположенные под каждой парой полюсов, образуют две параллельные ветви, поэтому число параллельных ветвей по всей обмотке $2a$ равно числу полюсов $2p$:

$$2a = 2p \quad (56')$$

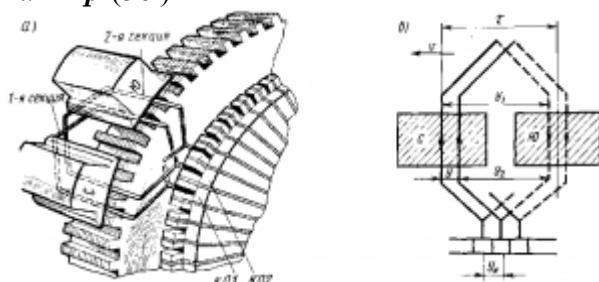


Рис. 97. Общий вид петлевой обмотки (а) и схема соединения ее секций (б)

Условие $2a=2p$ выражает основное свойство простой петлевой обмотки: чем больше число полюсов, тем больше параллельных ветвей имеет обмотка, следовательно, тем больше щеточных пальцев должно быть в машине. На рис. 98, а приведена в качестве примера развернутая в плоскость схема простой петлевой обмотки якоря четырехполюсной машины, имеющей 24 секции, а на рис. 98, б — эквивалентная схема этой обмотки, показывающая последовательность соединения ее секций и образующиеся параллельные ветви (обозначение проводников и коллекторных пластин такое же, как и на рис. 96).

Лекция 14

ЭДС обмоток. Электромагнитный момент

План:

1. ЭДС обмоток.
2. Электромагнитный момент

В соответствии с законом электромагнитной индукции в каждом отдельном проводнике обмотки якоря независимо от режима работы машины, индуцируется ЭДС

$$e_x = B_x l v$$

где e_x — ЭДС произвольно взятого проводника обмотки якоря;
 B_x — магнитная индукция в месте размещения данного проводника;
 l — длина якоря;
 v — линейная скорость движения проводника.

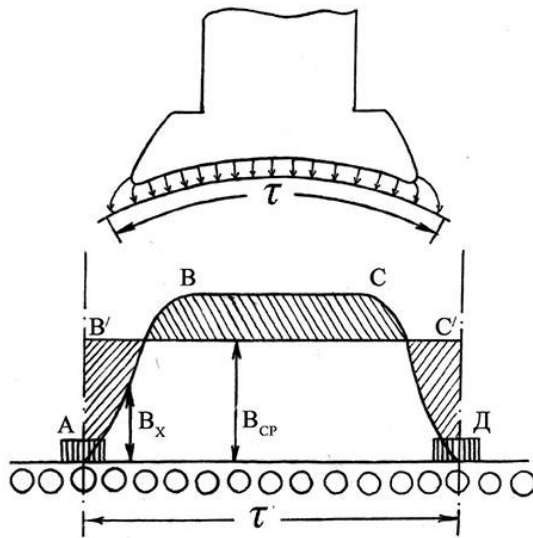


Рис.1 — Распределение индукции в воздушном зазоре на одном полюсном делении

Распределение индукции в воздушном зазоре на одном полюсном делении τ имеет примерно трапециидальный характер (рисунок 1), поэтому для определения ЭДС удобно воспользоваться средним значением магнитной индукции, приняв его равным высоте прямоугольника $AB'C'D$ с основанием τ , площадь которого равна площади фигуры $ABCD$ (см. рисунок)

$$B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_x dx$$

Тогда среднее значение ЭДС, индуктируемой в одном проводнике равно

$$E_{cp} = B_{cp} l V$$

Обмотка якоря состоит из N проводников, однако, как было показано выше, ЭДС обмотки на зажимах якоря равна ЭДС одной параллельной ветви, в которую входит $N/2a$ последовательно соединенных проводников. Поэтому ЭДС обмотки якоря

$$E = E_a = E_{cp} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} l V \cdot \frac{N}{2a}$$

где

$$V = \frac{\pi D_a n}{60}$$

– линейная скорость вращающегося якоря;

n – частота вращения якоря, об/мин;

D_a – диаметр якоря.

Длину окружности якоря можно выразить $\pi D_a = 2p\tau$. Тогда

$$V = \frac{\tau \cdot 2p \cdot n}{60}$$

Подставив значение V в формулу для ЭДС получим

$$E = E_a = E_{cp} \cdot \frac{N}{2a} = B_{cp} l V \cdot \frac{N}{2a}$$

Здесь произведение $l \cdot \tau = S$ представляет собой площадь, которую пронизывает магнитный поток Φ под одним полюсом. Поэтому

$$B_{cp} l \cdot \tau = B_{cp} \cdot S = \Phi$$

Следовательно

$$E = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n$$

где

$$\frac{pN}{60a} = C_e$$

– для данной машины есть величина постоянная.

Отсюда

$$E = C_e \Phi n$$

Таким образом, ЭДС машины, индуцируемая в проводниках обмотки якоря зависит от магнитного потока и частоты вращения якоря. Изменяя их, можно изменять величину ЭДС.

В соответствии с законом электромагнитных сил на каждый отдельный проводник обмотки якоря независимо от режима работы машины действует сила равная

$$f_x = B_x \cdot l \cdot i_a$$

где f_x – сила действующая на произвольно взятый проводник обмотки якоря;

B_x – магнитная индукция в месте размещения данного проводника;

l – длина активной стороны проводника якоря;

i_a – ток секции якоря.

Сила f_x создает на валу машины момент, который равен

$$M_x = f_x \cdot \frac{D_a}{2} = B_x \cdot l \cdot i_a \cdot \frac{D_a}{2}$$

В реальной машине под каждым полюсом находится $N/2p$ проводников, поэтому общий момент будет равен сумме всех моментов, создаваемых каждым проводником под полюсом умноженным на число полюсов $2p$

$$M_a = 2p \int_{x=1}^{N/2p} M_x = 2pl i_a \int_{x=1}^{N/2p} B_x$$

При достаточно большом числе проводников величина суммы $\int_{x=1}^{N/2p} B_x$ равна среднему значению индукции B_{cp} , умноженному на число проводников под одним полюсным делением

$$\int_{x=1}^{N/2p} B_x = B_{cp} \frac{N}{2p}$$

где по аналогии с ЭДС

$$B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_x dx$$

Кроме того, известно, что

$$i_a = \frac{I_a}{2a}$$

Подставим выражения в формулу момента

$$M_a = 2pl \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{D_a}{2} \cdot B_{cp} \cdot \frac{N}{2p}$$

В этом выражении можно заменить

$$B_{cp} l \tau = B_{cp} \cdot S = \Phi \text{ и } \pi D_a = 2 p \tau$$

откуда

$$D_a = \frac{2 p \tau}{\pi}.$$

Тогда момент машины будет

$$M_a = \frac{pN}{2\pi \cdot a} \cdot I_a \cdot \Phi$$

где

$$\frac{pN}{2\pi \cdot a} = C_m$$

– для данной машины величина постоянная, зависящая от конструкции.

Следовательно

$$M_a = C_m \cdot I_a \cdot \Phi.$$

Таким образом, из полученного выражения видим, что электромагнитный момент машины постоянного тока зависит от тока в якоре, магнитного потока и постоянной величины C_m .

Лекция 15

Реакция якоря в машинах постоянного тока. Магнитная поля в режиме без нагрузок. Магнитная поля в режиме с нагрузкой.

План:

1. Реакция якоря в машинах постоянного тока.
2. Магнитная поля в режиме без нагрузок. Магнитная поля в режиме с нагрузкой.

Реакция якоря в машинах постоянного тока.

Магнитный поток в машине постоянного тока создается всеми ее обмотками, по которым протекает ток. В режиме холостого хода по обмотке якоря генератора ток не протекает, а по обмотке якоря двигателя протекает ток холостого хода, небольшой по значению. Поэтому в машине существует только основной магнитный поток Φ_0 , создаваемый обмоткой возбуждения полюсов и симметричный относительно их осевой линии (рис. 1, а).

На рис. 1, а (коллектор не показан) щетки расположены рядом с проводниками обмотки якоря, от которых идут отпайки к тем коллекторным пластинам, с которыми в данный момент соединены щетки. Такое положение щеток называется положением на геометрической нейтрали, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и проводники обмотки, в которых индуцируемая основным магнитным потоком э. д. с. равна нулю. Геометрическая нейтраль перпендикулярна осевой линии полюсов.

Когда к обмотке якоря генератора присоединена нагрузка R_n или когда на вал двигателя действует тормозной момент, по обмотке протекает ток якоря I_a , который создает магнитный поток якоря Φ_a (рис. 1, б). Магнитный поток якоря направлен по линии, на которой расположены щетки. Если щетки расположены на геометрической нейтрали, то поток якоря направлен перпендикулярно основному магнитному потоку и поэтому называется поперечным магнитным потоком.

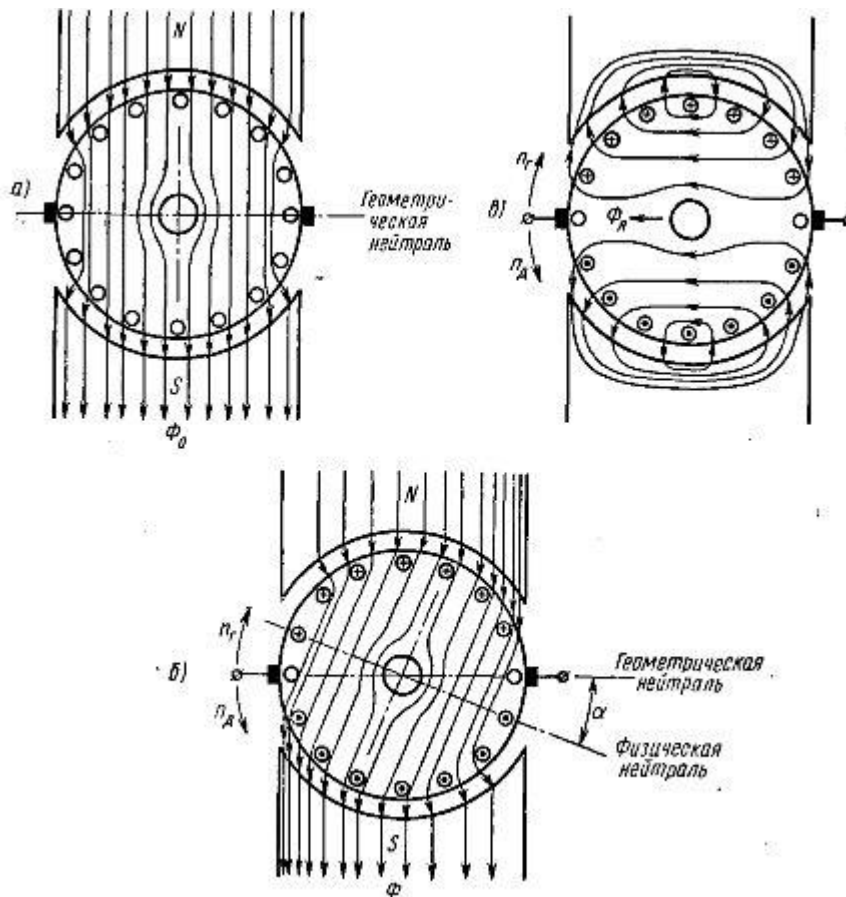


Рис. 1. Магнитные потоки в машине постоянного тока: а — магнитный поток полюсов; б — магнитный поток обмотки якоря; в — результирующий магнитный поток

Влияние магнитного потока якоря на основной магнитный поток называется реакцией якоря. В генераторе постоянного тока под «сбегающим» краем полюса магнитные потоки складываются, под «набегающим» — вычитаются. У двигателя — наоборот. Таким образом под одним краем полюса результирующий магнитный поток Φ увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком, под другим краем полюса — уменьшается. В результате он становится несимметричным по отношению к осевой линии полюсов (рис. 1, в).

Физическая нейтраль — линия, проходящая через центр якоря и проводники обмотки якоря, в которых индуцируемая результирующим магнитным потоком э. д. с. равна нулю, поворачивается на угол α по отношению к геометрической нейтрали (в сторону опережения у генераторов, в сторону отставания — у двигателей). При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В результате реакции якоря магнитная индукция в зазоре машины становится еще более неравномерной. В проводниках якоря, находящихся в точках повышенной магнитной индукции, индуцируется большая э. д. с., что приводит к увеличению разности потенциалов между соседними пластинами коллектора и к возникновению искрения на коллекторе. Иногда электрическая дуга перекрывает весь коллектор, образуя «круговой огонь».

Кроме того, реакция якоря приводит к уменьшению э. д. с. якоря, если машина работает в области, близкой к насыщению. Это связано с тем, что когда основной магнитный поток Φ_0 создает насыщенное состояние магнитопровода, то увеличение магнитного потока на $+\Delta\Phi$ под одним краем полюса будет меньшим, чем уменьшение на $-\Delta\Phi$ под другим (рис. 2). Это приводит к уменьшению суммарного потока полюса и э. д. с. якоря, так как

$$E = c_e \cdot n \cdot \Phi$$

Отрицательное влияние реакции якоря можно уменьшить, сдвигая щетки на физическую нейтраль. При этом поток якоря поворачивается на угол α и встречный поток под набегающим краем полюса генератора уменьшается. Сдвиг щеток осуществляют у генератора по направлению вращения якоря, а у двигателя — против направления вращения якоря. Угол α меняется с изменением тока якоря I_a . На практике щетки обычно устанавливают на угол, соответствующий средней нагрузке.

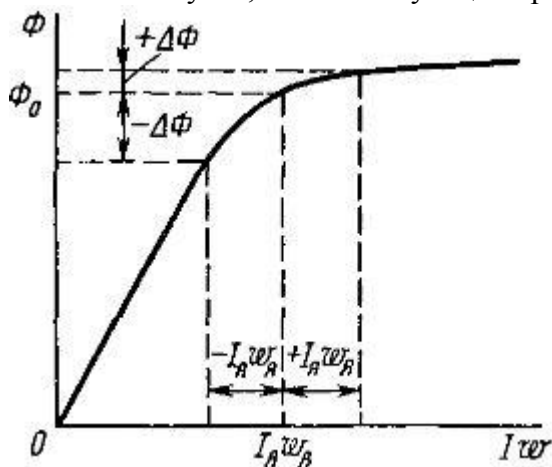


Рис. 2. Влияние степени намагничивания на результирующий магнитный поток ($I_B \cdot w_B$ — м.д.с обмотки возбуждения; $I_A \cdot w_A$ — м.д.с обмотки якоря).

В машинах средней и большой мощностей применяют компенсационную обмотку, расположенную в пазах главных полюсов и включаемую последовательно с обмоткой якоря так, чтобы ее магнитный поток Φ_k был противоположен магнитному потоку Φ_A . Если при этом $\Phi_k = \Phi_A$, то магнитный поток в воздушном зазоре из-за реакции якоря практически не искажается.

Магнитная поля в режиме без нагрузок и магнитная поля в режиме с нагрузкой.

При холостом ходе машины тока в якоре нет и магнитное поле создается намагничивающей силой полюсов. Это магнитное поле симметрично относительно оси полюсов и распределяется примерно равномерно в воздушном зазоре (рис. 150, а). Положим, что щетки установлены на геометрической нейтрали, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси полюсов.

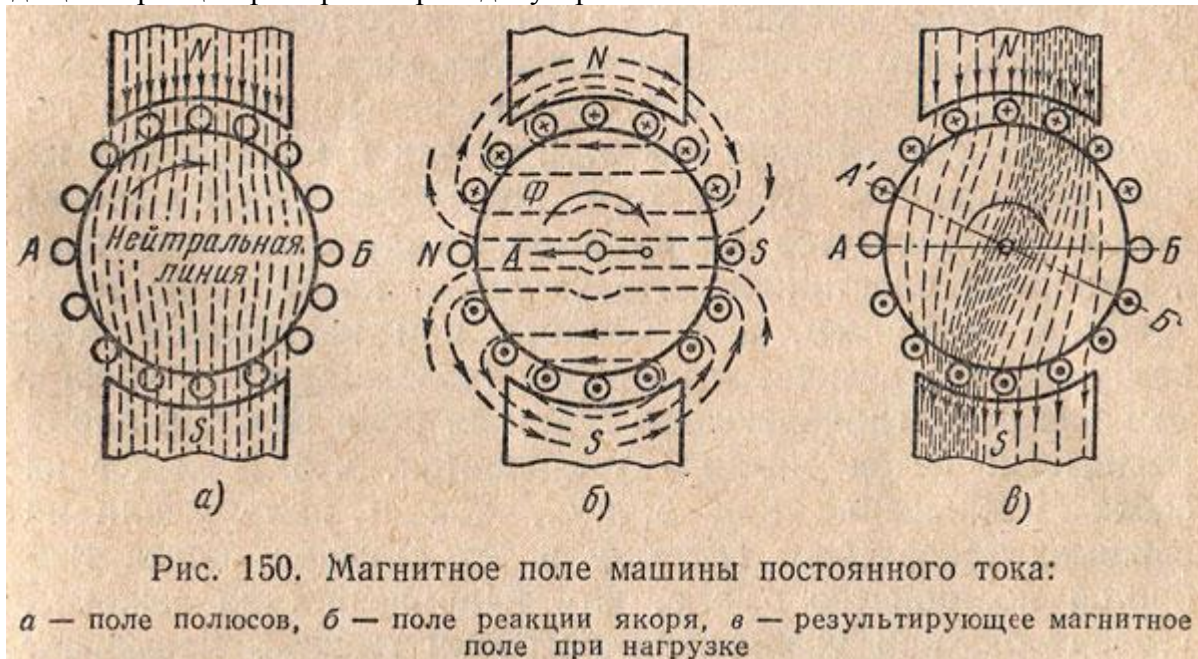


Рис. 150. Магнитное поле машины постоянного тока:

а — поле полюсов, б — поле реакции якоря, в — результирующее магнитное поле при нагрузке

При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле. Поле якоря, действуя на магнитное поле полюсов, изменяет и искажает его. При нагрузке машины по магнитной цепи замкнется результирующий

магнитный поток Φ_p , создаваемый совместным действием намагничивающих сил полюсов и якоря.

Результирующий магнитный поток Φ_p не равен потоку полюсов Φ_n , созданному намагничивающими силами обмотки возбуждения, или при холостом ходе. Воздействие поля, возбуждаемого током в якоре при нагрузке машины, на магнитное поле полюсов называется *реакцией якоря*.

Если по проводникам обмотки якоря невозбуждаемой машины пропустить от постороннего источника такой ток, который будет при нагрузке машины, то будет создано магнитное поле якоря (рис. 150, б). Это поле якоря замыкается поперек оси полюсов и называется поперечным *полем реакции якоря*.

Намагничивающая сила якоря под одним краем полюса (под набегающим для генератора и под сбегающим для двигателя) направлена встречно намагничивающей силе полюсов, а под другим краем полюса (под сбегающим для генератора и под набегающим для двигателя) — согласно намагничивающей силе полюсов. Следовательно, под одним краем полюса происходит уменьшение, а под другим увеличение магнитной индукции.

Таким образом, при нагрузке машины результирующее магнитное поле будет несимметрично относительно оси полюсов (рис. 150, в), т. е. поперечное поле реакции якоря перераспределяет магнитное поле полюсов, ослабляя его под одним краем и усиливая под другим краем полюса.

Если магнитная система машины не насыщена, то увеличение магнитного потока под одним краем полюса будет равно уменьшению магнитного потока под другим краем полюса и результирующий магнитный поток останется неизменным при изменении нагрузки.

Так как машины работают при сравнительно сильных магнитных полях, то вследствие насыщения стали увеличение магнитного потока под одним краем полюса будет меньше, чем уменьшение магнитного потока под другим краем полюса. Поэтому результирующий магнитный поток при нагрузке окажется меньше магнитного потока полюсов, т. е. магнитного потока при холостом ходе.

Изменение магнитного потока машины приводит в генераторах к изменению как э. д. с., так и напряжения на зажимах машины. Кроме того, под воздействием реакции якоря увеличивается напряжение между смежными коллекторными пластинами, что ухудшает коммутацию тока.

Если, например, в генераторе при неизменном токе возбуждения увеличится нагрузка (возрастет ток в якоре), то из-за размагничивающего действия поля реакции якоря магнитный поток машины уменьшится, что повлечет за собой уменьшение как э. д. с., так и напряжения на зажимах генератора. Поэтому в тех случаях, когда требуется постоянство э. д. с. или напряжения на зажимах генератора, при увеличении нагрузки машины повышают и ток возбуждения с тем, чтобы возрастание магнитного потока компенсировало размагничивающее действие реакции якоря. Кроме того, при нагрузке напряжение уменьшается в результате падения напряжения в якоре.

Лекция 16

Характеристики машин постоянного тока.

План:

1. Характеристики генератора постоянного тока с независимым колебанием.
2. Характеристики нагрузок.
3. Характеристики короткого замыкания.

Характеристики генератора показывают его рабочие свойства. Они представляют собой зависимости между основными величинами — э. д. с. в обмотке якоря E , напряжение на его зажимах U , ток в якоре I_a , ток возбуждения I_b и число оборотов якоря n .

Каждая из характеристик показывает зависимость между двумя из указанных основных

величин при неизменных остальных. Эти зависимости имеют различный вид для генераторов разных типов.

Снятие всех характеристик машины производится при постоянном числе оборотов якоря, так как при изменении скорости вращения значительно изменяются все характеристики генератора, а нормально большинство генераторов работает при постоянной скорости.

Характеристика холостого хода генератора показывает зависимость между э. д. с. в якоре и током возбуждения $E = f(I_B)$, снятую при отсутствии нагрузки ($I_H = 0$) и постоянном числе оборотов ($n = \text{const}$).

Для генераторов независимого возбуждения при отсутствии нагрузки (холостой ход) ток в якоре равен нулю ($I_A = 0$). Так как э. д. с., индуцированная в обмотке якоря, равна $E = C n \Phi$, то при постоянной скорости вращения э. д. с. окажется прямо пропорциональной магнитному потоку. Поэтому в измененном масштабе характеристика холостого хода представляет собой магнитную характеристику машины.

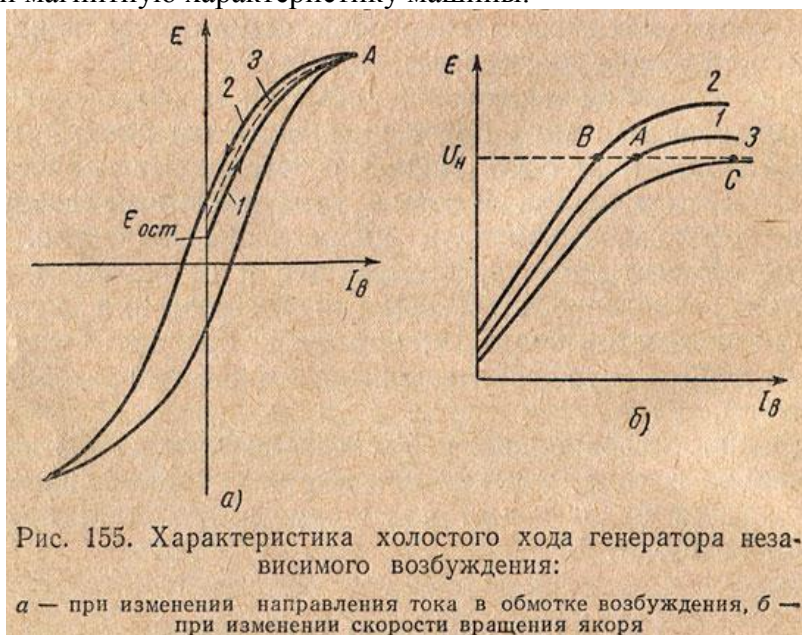


Рис. 155. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения:
а — при изменении направления тока в обмотке возбуждения, б — при изменении скорости вращения якоря

При $I_B = 0$ магнитная цепь машины (главным образом ярмо) имеет некоторый остаточный магнитный поток $\Phi_{\text{ост}}$, который индуцирует в обмотке якоря э. д. с. $E_{\text{ост}}$ (рис. 155, а). Эта э. д. с. составляет несколько процентов (2 — 5%) от номинального напряжения машины. С увеличением тока в обмотке возбуждения возрастает как магнитный поток, так и э. д. с., индуцированная в обмотке якоря. Таким образом, при постоянном постепенном увеличении I_B увеличивается и э. д. с. (кривая 1). Если после снятия восходящей ветви этой зависимости до точки А начать постепенно уменьшать ток возбуждения I_B , то э. д. с. также уменьшится, но под действием остаточного намагничивания стали нисходящая ветвь (кривая 2) пойдет несколько выше восходящей ветви этой характеристики. Изменяя I_B не только по величине, но и по направлению, можно определить весь цикл перемагничивания стали машины. Практически восходящая и нисходящая ветви магнитной характеристики имеют часто незначительное расхождение и за основную характеристику можно принять среднюю зависимость (кривая 3).

На рис. 155, б показаны характеристики холостого хода, снятые при различных скоростях вращения якоря генератора.

Кривая 1 соответствует вращению якоря машины с номинальной скоростью n_n , указанной в паспорте генератора. Для всех машин нормального типа точка номинального напряжения (точка А) находится на перегибе магнитной характеристики, что соответствует наиболее удачным рабочим и регулировочным свойствам генератора.

Выбор точки номинального напряжения на линейном ненасыщенном участке магнитной характеристики приводит к резким колебаниям напряжения на зажимах

генератора при изменениях нагрузки, так как незначительные приращения намагничивающей силы вызывают резкие изменения э. д. с. Выбор этой точки на насыщенном пологом участке магнитной характеристики приводит к ограничению регулирования напряжения на зажимах генератора, так как для изменения э. д. с. требуются очень большие изменения тока возбуждения.

При изменении скорости вращения якоря генератора изменит свое положение характеристика холостого хода, так как э. д. с. пропорциональна скорости. При $n' > n_n$ характеристика холостого хода пойдет выше (кривая 2), а при $n'' < n_n$ — ниже (кривая 3), чем при номинальной скорости.

Следовательно, при изменении скорости вращения якоря точка номинального напряжения окажется либо на линейном (точка В), либо на пологом (точка С) участке магнитной характеристики, что вызовет изменение всех характеристик генератора. Поэтому скорость первичного двигателя для вращения якоря генератора надо выбрать так, чтобы она была близкой к номинальной скорости генератора.

Для генераторов параллельного возбуждения при холостом ходе ток в якоре равен току возбуждения ($I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$). Так как этот ток составляет малую величину (несколько процентов номинального тока генератора), то напряжение на зажимах машин при холостом ходе будет примерно равным э. д. с. и характеристика холостого хода этого генератора практически совпадет с характеристикой генератора независимого возбуждения. Однако весь цикл перемагничивания в генераторах параллельного возбуждения снять нельзя, так как при изменении направления тока в обмотке возбуждения магнитный поток ее будет направлен встречно потоку остаточного магнетизма и самовозбуждение генератора окажется невозможным.

Для генератора последовательного возбуждения характеристика холостого хода смысла не имеет, так как при холостом ходе в якоре и обмотке возбуждения ток равен нулю и характеристика может быть снята только по схеме независимого возбуждения. Для этого обмотка возбуждения генератора а должна быть включена в сеть какого-либо независимого источника тока.

Для генераторов смешанного возбуждения характеристика холостого хода совпадает с характеристикой генератора параллельного возбуждения.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора оттока нагрузки:

$$U = f(I).$$

Эта характеристика соответствует естественным условиям работы машины, т. е. машина нерегулируема (сопротивление цепи возбуждения $r_{\text{в}}$ постоянно), и снимается при неизменном числе оборотов.

Для генераторов независимого возбуждения при постоянном $r_{\text{в}}$ неизменен также и ток возбуждения $I_{\text{в}}$. Внешние характеристики такого генератора показаны на рис. 156.

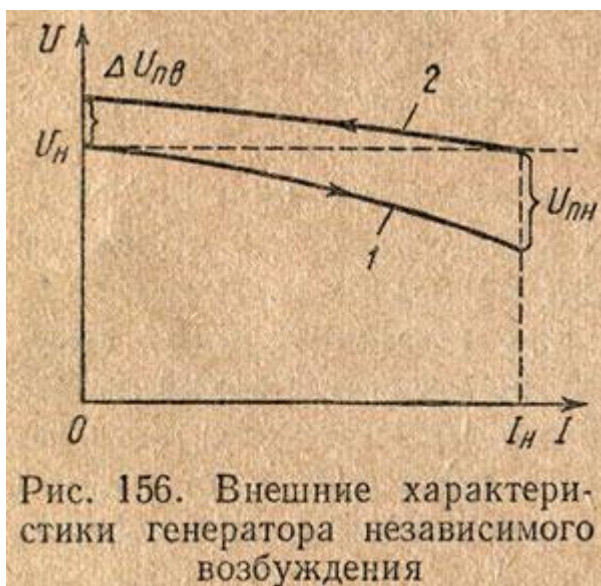


Рис. 156. Внешние характеристики генератора независимого возбуждения

Кривая 1 представляет собой внешнюю характеристику, снятую на понижение напряжения. Для снятия этой характеристики устанавливается такой ток в обмотке возбуждения (I_B), чтобы при холостом ходе генератора ($I = 0$) напряжение на его зажимах было равно номинальному (U_n). Затем нагрузка генератора увеличивается при неизменном токе в обмотке возбуждения. С увеличением нагрузки (тока в якоре генератора I_A) увеличивается как падение напряжения в сопротивлении его обмотки, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает понижение напряжения. При изменении нагрузки от нуля до номинальной напряжение на зажимах генератора уменьшится на величину $\Delta U_{пн}$.

При снятии характеристики на повышение напряжения (кривая 2) устанавливается такой ток возбуждения, чтобы при номинальной нагрузке генератора ($I = I_n$) напряжение на его зажимах было равно номинальному (U_n), после чего нагрузка генератора уменьшается.

При уменьшении нагрузки (тока в якоре) также уменьшается как падение напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает повышение напряжения. При изменении нагрузки от I_n до 0 напряжение на зажимах генератора увеличится на величину $\Delta U_{пв}$. За счет насыщения стали повышение напряжения будет меньше, чем понижение ($\Delta U_{пв} < \Delta U_{пн}$), так как размагничивающее действие реакции якоря будет сказываться тем сильнее, чем меньше степень насыщения стали машины.

В генераторах параллельного возбуждения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения r_B ток возбуждения не остается постоянным, так как он зависит от напряжения на зажимах генератора, которое при изменении нагрузки меняется. Если в генераторах независимого возбуждения увеличение нагрузки вызывает понижение напряжения за счет падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 1 на рис. 157), то в генераторах параллельного возбуждения при уменьшении напряжения также уменьшается ток возбуждения, что вызывает уменьшение магнитного потока и понижение напряжения. Следовательно, при увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора этого типа уменьшается в большей мере (кривая 2), чем в генераторах независимого возбуждения.

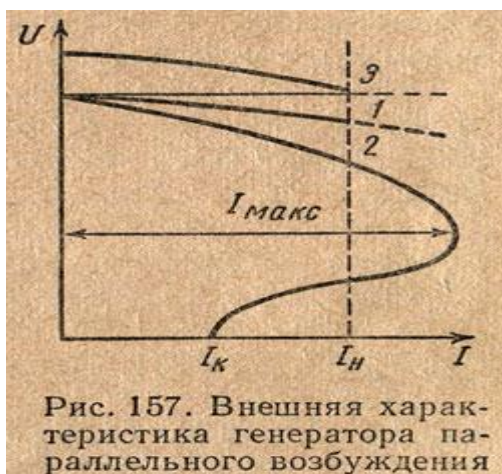


Рис. 157. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Уменьшение сопротивления нагрузки вызывает увеличение тока до некоторого значения $I_{\text{макс}}$, не превышающего номинальный ток более чем в 2 — 2,5 раза. При дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления ток уменьшается и при коротком замыкании будет значительно меньше номинального ($I_k < I_n$). Уменьшение сопротивления нагрузки вызывает уменьшение тока возбуждения, так как напряжение генератора понижается. Если ток возбуждения уменьшился настолько, что машина оказалась размагниченной, то э. д. с. уменьшается в большей степени, чем сопротивление нагрузки, что вызывает уменьшение тока в якоре.

При коротком замыкании генератора параллельного возбуждения ток I_v равен нулю и обмотка возбуждения не создает магнитного потока. Поэтому в обмотке якоря будет э. д. с. только от остаточного магнитного потока $E_{\text{ост}}$, имеющая малое значение, и, следовательно, ток короткого замыкания I_k будет также мал.

Несмотря на малое значение установившегося тока короткого замыкания, нельзя сказать, что для генератора этого типа режим короткого замыкания не представляет опасности.

При внезапном коротком замыкании такого генератора ток в обмотке возбуждения мгновенно уменьшится до нуля не может, так же как и магнитный поток. Поэтому в обмотке якоря в момент короткого замыкания индуцируется большая э. д. с. и протекает ток во много раз больше номинального, вследствие чего создается интенсивное искрение под щетками, переходящее в круговой огонь, разрушающий коллектор, и машина может быть выведена из строя.

Внешняя характеристика на повышение напряжения у генератора параллельного возбуждения (кривая 3) имеет такой же вид, как у генератора независимого возбуждения.

Для генератора последовательного возбуждения внешняя характеристика показана на рис. 158. В генераторах этого типа ток возбуждения равен току якоря ($I_v = I_a$) и при холостом ходе ($I_a = 0$) в обмотке якоря создается э. д. с. за счет остаточного магнетизма $E_{\text{ост}}$. С увеличением нагрузки также увеличится ток в обмотке возбуждения, что вызывает увеличение э. д. с. (кривая 1). Напряжение на зажимах генератора при нагрузке меньше э. д. с. вследствие падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 2).

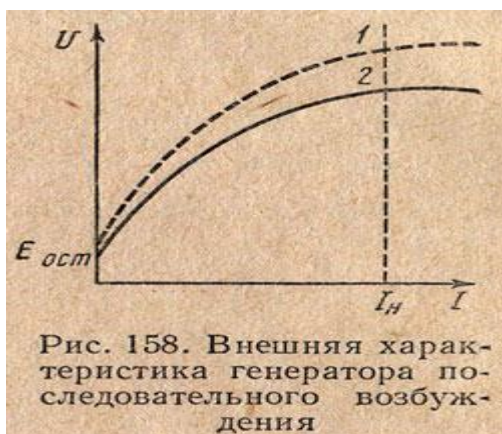


Рис. 158. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

Таким образом, у генераторов последовательного возбуждения, напряжение резко меняется с изменением нагрузки поэтому они не нашли широкого применения.

В генераторах смешанного возбуждения возможно согласное и встречное включение последовательной и параллельной обмоток.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующая намагничивающая сила, создающая магнитный поток, равна сумме намагничивающих сил параллельной и последовательной обмоток, а при встречном включении — разности этих намагничивающих сил.

На рис. 159 показаны внешние характеристики генераторов смешанного возбуждения.

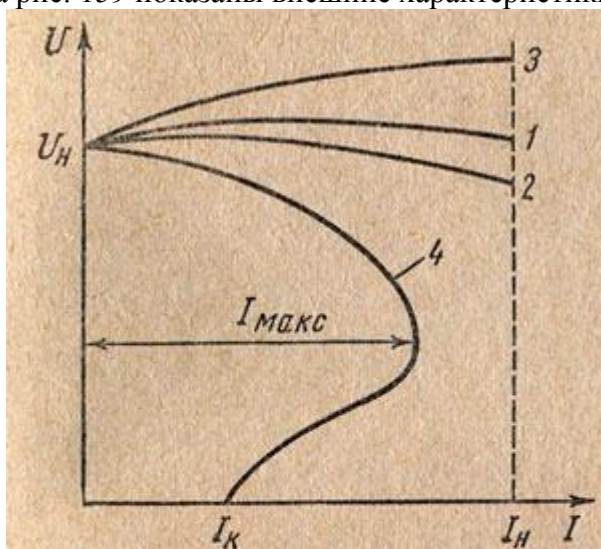


Рис. 159. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения:

1 — при нормальном возбуждении, 2 — при недовозбуждении, 3 — при перевозбуждении, 4 — при встречном включении обмоток возбуждения

Увеличение нагрузки такого генератора вызывает уменьшение напряжения на его зажимах за счет падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря. Однако с увеличением нагрузки увеличивается также ток в последовательной обмотке возбуждения. Поэтому при согласном включении обмоток с увеличением нагрузки увеличивается магнитный поток и э. д. с. обмотки якоря. Если э. д. с. с увеличением нагрузки возрастает на величину, равную понижению напряжения генератора за счет падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря, то результирующее напряжение на зажимах генератора будет практически оставаться неизменным при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (кривой 1). Такой генератор, называемый нормально возбужденным, не требует изменения тока возбуждения при

изменениях нагрузки. При уменьшении числа витков последовательной обмотки э. д. с. с возрастанием нагрузки будет увеличиваться в меньшей степени и не будет компенсировать понижения напряжения, так что напряжение на зажимах генератора будет уменьшаться (кривая 2), т. е. генератор недовозбужден. Если число витков последовательной обмотки возбуждения больше, чем то, которое соответствует нормальному возбуждению машины, то генератор окажется перевозбужденным и напряжение на его зажимах повысится с увеличением нагрузки (кривая 3).

Наиболее часто применяют генераторы нормально возбужденные, а также и перевозбужденные, позволяющие компенсировать падение напряжения в линии, соединительных проводах и т. д. с тем, чтобы напряжение на нагрузке оставалось постоянным при изменении тока.

Генераторы со встречным включением обмоток возбуждения не обеспечивают постоянства напряжения (кривая 4) и широкого применения они не нашли. Но их применяют в тех случаях, когда необходимо ограничить токи коротких замыканий (например, при электросварке, так как при соприкосновении электродов во время сварки внешняя цепь генератора представляет собой очень малое сопротивление, для генератора такой режим работы будет близок к короткому замыканию).

Регулировочная характеристика генератора показывает, в какой мере следует изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным при изменении тока нагрузки.

Таким образом, регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки, снимаемую при постоянном напряжении на зажимах генератора.

В генераторах независимого и параллельного возбуждения с увеличением тока нагрузки необходимо увеличить ток возбуждения для того, чтобы скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины и размагничивающее действие потока реакции якоря для обеспечения постоянства напряжения на зажимах генератора.

В генераторах смешанного возбуждения (нормально возбужденных) напряжение при изменении нагрузки не претерпевает изменений и, следовательно, необходимость регулирования тока возбуждения отпадает, т. е. регулировочная характеристика в таких генераторах не имеет смысла, так как ток возбуждения постоянен при изменениях тока нагрузки.

Лекция 17

Общая понятия об машинах переменного тока. Основные типы.

Активные части.

Машины переменного тока бывают двух видов. Это синхронные машины и асинхронные. У синхронных машин скорость вращения ротора строго зависит от частоты переменного тока. Можно сказать скорость вращения "синхронна" с частотой тока. Не трудно догадаться, что у асинхронных машин частота вращения в общем случае зависит от нагрузки на валу, а не от частоты питающего тока. Кроме деления на синхронные и асинхронные электрические машины еще делятся по назначению. Это могут быть генераторы. То есть такая машина, которая преобразует механическую энергию вращения в переменный электрический ток. Машина, которая преобразует электрическую энергию в механическую называется двигателем. Также существует еще один класс электрических машин. Они преобразуют электрическую энергию, тоже в электрическую, но другой частоты или напряжения. Синхронной машиной переменного тока называют такую машину, в которой: основное магнитное поле то есть поле статора создается постоянным током. В частном случае это может быть даже постоянный магнит. А вращение ротора происходит с частотой изменения тока.

Формула 1 — зависимость частоты вращения ротора синхронной машины от частоты переменного тока. где n это частота, с которой вращается ротор, измеряется в оборотах в минуту. То есть, сколько полных оборотов совершит ротор за одну минуту. f частота питающего переменного тока p количество пар полюсов у магнитной системы машины

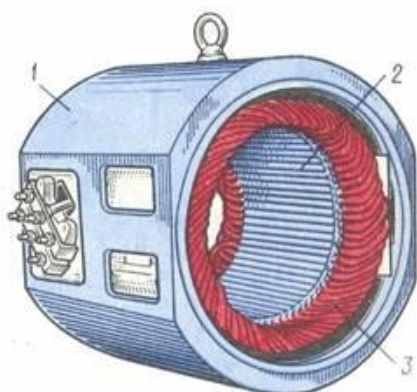
В настоящее время асинхронные машины используются в основном в режиме двигателя. Машины мощностью больше 0.5 кВт обычно выполняются трёхфазными, а при меньшей мощности – однофазными.

Впервые конструкция трёхфазного асинхронного двигателя была разработана, создана и опробована нашим русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1889-91 годах. Демонстрация первых двигателей состоялась на Международной электротехнической выставке во Франкфурте на Майне в сентябре 1891 года. На выставке было представлено три трёхфазных двигателя разной мощности. Самый мощный из них имел мощность 1.5 кВт и использовался для приведения во вращение генератора постоянного тока. Конструкция асинхронного двигателя, предложенная Доливо-Добровольским, оказалась очень удачной и является основным видом конструкции этих двигателей до настоящего времени.

За прошедшие годы асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надёжность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота обслуживания. Неподвижная часть машины называется **статор**, подвижная – **ротор**. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. На рис. 2.1 показан сердечник статора в сборе. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается **трёхфазная обмотка** (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия.

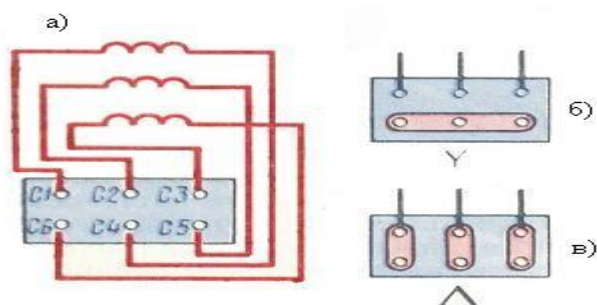
Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых фазами. Начала фаз обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 , концы – c_4, c_5, c_6 .



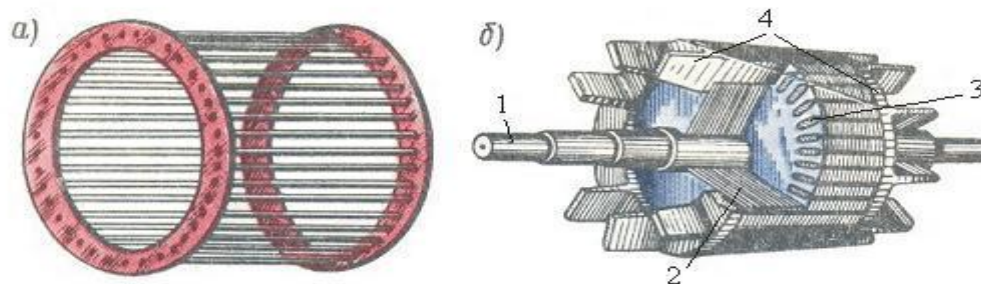
Начала и концы фаз выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема

соединения обмотки статора. Например, 660/380, Y/Δ. Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{л}=660В$ по схеме звезда или в сеть с $U_{л}=380В$ – по схеме треугольник.

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



Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: **короткозамкнутая** и **фазная**. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).



Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из стержней 3, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами 4. Такая обмотка напоминает “белчье колесо” и называют её типа “белчьей клетки”. Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.

Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент. Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка – сильно закороченный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

Одnofазные асинхронные двигатели.

Асинхронный двигатель является простейшей из электрических машин. Как и любая электрическая машина, он имеет две основные части: статор и ротор.

Статор (рис. 6.1) состоит из чугунной станины 1, в которой закреплен магнитопровод 2 в виде полого цилиндра. Между станиной и сердечником обычно оставляют зазор, через который проходит охлаждающий воздух. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирают из тонких (0,5 мм) листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком.

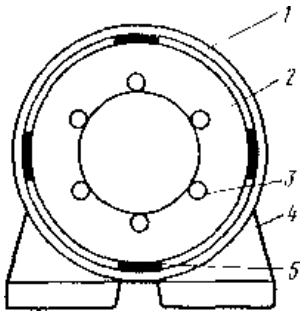


Рис. 6.1. Конструкция статора асинхронного двигателя:

1 — станина; 2 — сердечник; 3 — обмотка;

4 — лапа; 5 — прокладка

В пазы, вырезанные по внутренней окружности статора, укладывают обмотку 3. У двухполюсной машины обмотка статора состоит из трех катушек, сдвинутых на углы 120° , у четырехполюсной — из шести катушек, сдвинутых на 60° , у шестиполюсной — из девяти катушек и т. д. Обмотку в пазах статора закрепляют клиньями.

Ротор также набирают из тонких листов электротехнической стали. В пазах ротора размещают обмотку, которая может быть короткозамкнутой или фазной (рис. 6.2). Короткозамкнутая обмотка типа

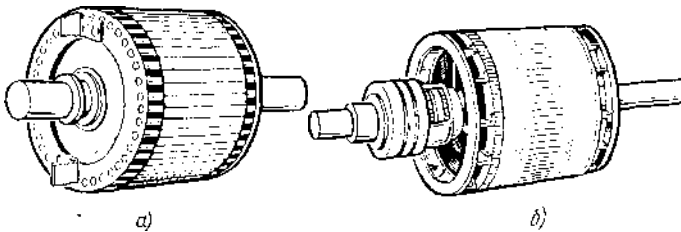


Рис. 6.2. Общий вид ротора асинхронного двигателя с коротко- замкнутой (а) и фазной (б) обмотками

«беличья клетка» изображена на рис. 6.3. Она состоит из толстых проводящих стержней (медь, алюминий), соединенных по торцам медными или алюминиевыми кольцами. Короткозамкнутая обмотка не изолируется от ротора. Иногда ее изготовляют заливкой расплавленного алюминия в пазы ротора.

Контактные кольца 1, изготовленные из латуни или меди, укрепляют на валу двигателя с помощью изолирующих прокладок. Щеткодержатель с угольными или медно-графитовыми щетками 2 крепят на подшипниковом щите.

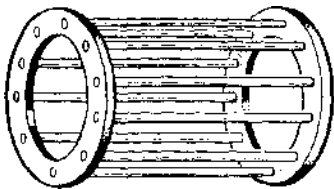


Рис. 6.3. Общий вид коротко- замкнутой обмотки типа «беличья клетка»

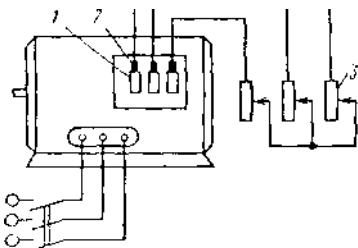


Рис. 6.4. Схема соединения фазной обмотки ротора с регулировочными реостатами:
1 — контактные кольца, 2 — щетки; 3 — реостаты

Общий вид асинхронного двигателя показан на рис. 6.5.

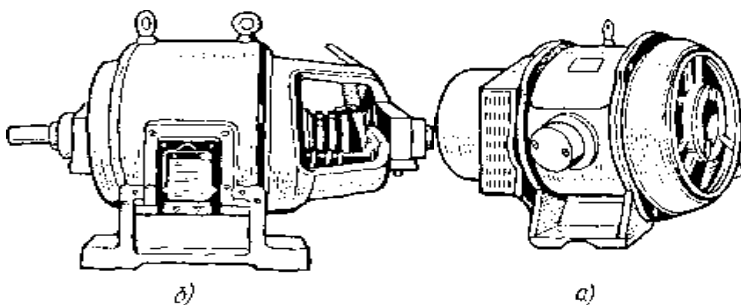


Рис. 6.5. Общий вид асинхронного двигателя с короткозамкнутой (а) и фазной (б) обмотками ротора

Принцип действия асинхронного двигателя.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля и основных законов электротехники.

При включении двигателя в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают стержни или катушки обмотки ротора. При этом, согласно закону электромагнитной индукции, в обмотке ротора индуцируются ЭДС, пропорциональные частоте пересечения силовых линий. Под действием индуцированной ЭДС в короткозамкнутом роторе возникают значительные токи.

В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуцированный ток, т. е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями вращающегося поля. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки ротора магнитными силовыми линиями.

Достичь частоты вращения поля в реальных условиях ротор не может, так как тогда стержни его обмотки оказались бы неподвижными относительно магнитных силовых линий и индуцированные токи в обмотке ротора исчезли бы. Поэтому ротор вращается с частотой, меньшей частоты вращения поля, т. е. несинхронно с полем, или асинхронно.

Если силы, тормозящие вращение ротора, невелики, то ротор достигает частоты, близкой к частоте вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя частота вращения ротора уменьшается, токи в обмотке ротора увеличиваются, что приводит к увеличению вращающего момента двигателя. При некоторой частоте вращения ротора устанавливается равновесие между тормозным и вращающим моментами.

Синхронный двигатель

Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит (рис. 6.6).

Принцип работы синхронного двигателя поясняется рис. 6.7. Внутри магнита $N_1 S_1$ помещен магнит NS. Если магнит $N_1 S_1$ вращать, то он потянет за собой магнит NS. В стационарном режиме частоты вращения обоих магнитов одинаковы.

К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита $N_1 S_1$. При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены и ротор остановится.

В реальном двигателе поле магнита $N_1 S_1$ заменено вращающимся магнитным полем статора; при этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем статора, отставая на угол, либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения магнитного поля статора:

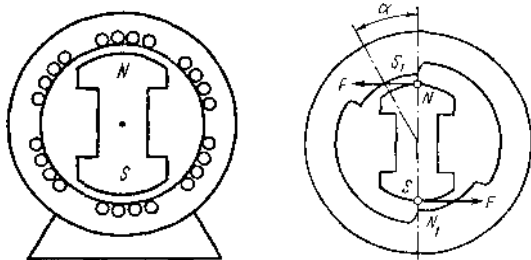


Рис. 6.6. Схематическое изображение работы синхронного двигателя Рис. 6.7. К пояснению принципа синхронного двигателя

Постоянство частоты вращения — важное достоинство синхронного двигателя. Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука. Недостаток синхронного двигателя — трудность пуска: для пуска нужно раскрутить ротор в сторону вращения поля статора. Для этого чаще всего применяют специальную короткозамкнутую обмотку, вделанную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора приближается к частоте вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обесточенной, так как частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

В настоящее время существует тенденция замены на подвижных объектах (корабли, самолеты, автомобили) электрических цепей постоянного тока цепями переменного тока повышенной частоты (200, 400 Гц и выше). Возможность использования бесколлекторных машин переменного тока, трансформаторов и магнитных усилителей позволяет повысить надежность работы цепи, а также уменьшить габариты и массу машин и аппаратов.

При оборудовании объекта сетью переменного тока широкое применение находит электропривод на переменном токе. Разработаны схемы с асинхронными и синхронными двигателями, которые позволяют выполнить все операции, осуществляемые ранее двигателями постоянного тока.

Преимущества асинхронных двигателей особенно заметны тогда, когда по условиям работы привода нет необходимости в плавном регулировании частоты вращения в широких пределах и больших пусковых моментах (привод насосов, вентиляторов и др.).

Синхронные двигатели особенно удобны для привода роторов гироскопов. В тех случаях, когда гироскоп используют для особо точных измерений (например, в баллистических ракетах), приводом ротора гироскопа служит синхронный двигатель. При этом частота вращения ротора зависит только от конструкции двигателя и частоты питающего тока, которую можно стабилизировать с очень высокой степенью точности.

Синхронный генератор

Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем (отсюда их название). Поскольку частоты вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока.

Устройство статора синхронной машины (рис. 6.8) практически не отличается от устройства статора асинхронной машины.

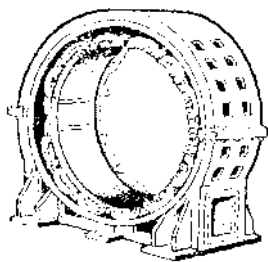


Рис. 6.8. Общий вид статора

Рис 6.8. Общий вид статора синхронного генератора.

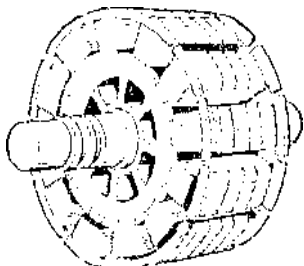


Рис 6.9. Общий вид неявнополюсного ротора синхронного генератора.

Роторы синхронных генераторов могут быть явнополюсными (рис. 6.9) и неявнополюсными (рис. 6.10). В первом случае синхронные генераторы приводятся в действие тихоходными турбинами гидроэлектростанций, во втором — паровыми или газовыми турбинами теплоэлектростанций.

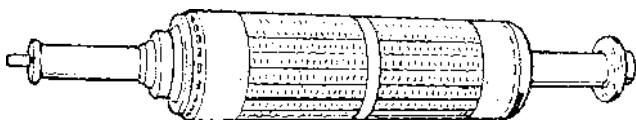


Рис. 6.10. Общий вид неявнополюсного ротора синхронного генератора

Используют различные способы возбуждения синхронных генераторов. Широкое распространение получил синхронный генератор с машинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока, расположенный на одном валу с синхронным генератором. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора можно регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекают сравнительно небольшие токи.

Находят также применение генераторы с самовозбуждением через полупроводниковые или механические выпрямители.

Из характеристик синхронного генератора наибольший практический интерес представляют внешние характеристики, выражающие зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных значениях тока возбуждения, частоты и коэффициента мощности.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Ознакомиться с конструкцией трансформатора и его паспортными данными.
2. Определить коэффициент трансформации, коэффициент полезного действия, потерю напряжения и напряжения короткого замыкания.
3. Снять внешнюю характеристику трансформатора.

II. ПРИБОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

1. Силовой трансформатор ТС-0,4-220В/42В -1 шт
2. Амперметр Э365-0-3А 1шт.
3. Амперметр Э365-0-10А 1шт.
4. Вольтметр Э365-0-250В 1шт.
5. Вольтметр Э365-0-50В 1шт.
6. Ваттметр 0-1000 Вт 1 шт.
7. ЛАТР – 9А – 220 В 1 шт.
8. Двухполюсноавтоматический выключатель АП – 50 $I_n = 4А$ 1 шт.

III. ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ:

Трансформатором называются электростатические аппараты, которые преобразуют напряжения переменного тока промышленной частоты в другие величины.

Принцип работы трансформатора основано на электромагнитной индукции. Силовые трансформаторы по режиму работы делятся:

- Режим холостого хода
- Нагрузочный режим
- Режим короткого замыкания

Опыт холостого хода трансформатора производится для определения мощности потерь в стали $\Delta P_{ст}$ коэффициента трансформации трансформатора K . При этом первичная обмотка трансформатора включается на напряжение сети, а вторичная обмотка трансформатора разомкнута, т. е. нагрузка не включена. Коэффициент трансформации трансформатора определяется по формуле:

$$K = \frac{U_1}{U_{20}}$$

где U_1 - напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора, В.

U_{20} - напряжение на вторичной обмотке трансформатора при холостом ходе, В.

Потери в стали, определяется по показанию ваттметра.

Опыт нагрузки трансформатора производится для определения коэффициента полезного действия η , потери напряжения в трансформаторе ΔU и для получения внешней характеристики $U_2 = f(I_2)$. Нагрузка трансформатора осуществляется проволочными реостатами, с помощью которых устанавливаются значения силы тока I_2 во вторичной обмотке, вычисляемые заранее по формуле:

$$I_2 = \beta \cdot I_{2н}$$

где β - коэффициент нагрузки трансформатора, равный 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

$I_{2н}$ - номинальный ток вторичной обмотки трансформатора по паспорту, А.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется двумя способами:

а) прямой способ:
$$\eta^I = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

где P_2 - нагрузка трансформатора (показание ваттметра, включенного во вторичную обмотку), Вт.

P_1 - мощность, потребляемая трансформатором из сети (показание ваттметра, включенного в первичную обмотку), Вт.

б) косвенный способ:

$$\eta^{II} = \frac{\beta \cdot P_{2н}}{\beta \cdot P_{2н} + \beta^2 \cdot \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{с1}}} \cdot 100 \%$$

где $P_{2н}$ - номинальная мощность трансформатора по паспорту, ВА.

$\Delta P_{\text{м}}$ - потери в меди, определяемые по показанию ваттметра в опыте короткого замыкания трансформатора, Вт.

$\Delta P_{\text{с1}}$ - потери в стали, определяемые по показанию ваттметра в опыте холостого хода, Вт.

ПРИМЕЧАНИЕ: Обычно на паспорте трансформатора указываются его полная или кажущаяся мощность $S_{\text{сн}}$, измеряемая в ВА. Чтобы получить активную мощность, измеряемую в Вт, необходимо кажущуюся мощность умножить на $\cos \varphi_{\text{с}}$ нагрузки. Так как в настоящей работе нагрузка трансформатора активная (реостаты), то $\cos \varphi_2 = 1$ и поэтому в формуле для К.П.Д. $S_{2н} = P_{2н}$

Потеря напряжения в трансформаторе определяется из выражения

$$\Delta U = \frac{U_1 - K \cdot U_2}{U_1} \cdot 100 \%$$

где: ΔU - потеря напряжения в процентах.

U_1 - напряжение на первичной обмотке трансформатора, В.

U_2 - напряжение на вторичной обмотке трансформатора, В.

Опыт короткого замыкания трансформатора производится для определения мощности потерь в меди $\Delta P_{\text{м}}$ и напряжения короткого замыкания $\ell_{\text{к}}$. При этом вторичная обмотка трансформатора замыкается на коротко через амперметр, а к первичной обмотке подается через потенциометр такое пониженное напряжение, при котором по первичной и вторичной обмоткам протекают номинальные токи. Напряжение короткого замыкания трансформатора определяется по формуле:

$$\ell_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к}}}{U_{1н}} \cdot 100 \%$$

где $U_{\text{к}}$ - пониженное напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора, В.

$U_{1н}$ - номинальное напряжение первичной обмотки по паспорту, В.

IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

- 1) Собрать схему (Рис.1.1)
- 2) Произвести опыт холостого хода трансформатора. Результаты измерений занести в таблицу
- 3) Произвести опыт нагрузки трансформатора. Результаты.
- 4) Собрать схему (Рис.2)

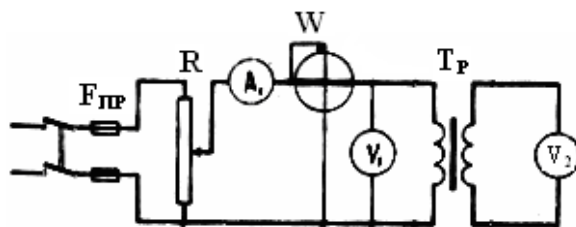


Рис 1.1

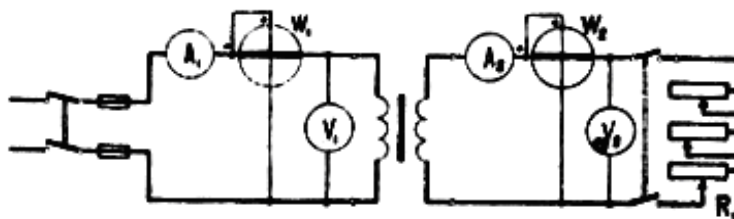


Рис 1.2.

Измерения				К	$\frac{I_0}{I_{1n}} \cdot 100 \%$
I_ϕ А	$P_{кт}$ Вт	U_1 В	U_2 В		

Измерения			e %	$\frac{\Delta P}{P_B} \cdot 100$
P_M Вт	U_1 В	U_K В		

№	измерения							вычисления		
	β	I_1 А	U_1 В	P_1 Вт	I_2 А	U_2 В	P_2 Вт	η %	η %	η %
1	0.2									
2	0.4									
3	0.6									
4	0.8									
5	1.0									

5) Произвести опыт короткого замыкания трансформатора. Результаты измерений занести в таблицу

6) Построить внешнюю характеристику трансформатора.

7) Сделать выводы по работе:

а) Сравнить полученные значения I_0 и ℓ_k со значениями этих величин, указанными в паспорте и в учебных пособиях.

б) При какой нагрузке к.п.д. трансформатора, получился наибольший и при какой нагрузке теоретически к.п.д. должен иметь максимальное значение.

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Как устроен однофазный трансформатор и какой принцип его действия?
2. Что такое коэффициент трансформации трансформатора и как его определить?
3. Какие потери возникают в трансформаторе при его работе?
4. Как выполняется опыт холостого хода трансформатора и какие величины определяются из этого опыта?
5. Как выполняется опыт короткого и замыкания трансформатора и какие величины при этом определяются?
6. Как определяется коэффициент полезного действия трансформатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- 1) Ознакомиться с конструкцией трехфазного двух обмоточного трансформатора и его паспортными данными.
- 2) Научиться определять коэффициент трансформации, коэффициент полезного действия, потерю напряжения и напряжение короткого замыкания трансформатора.
- 3) Исследовать трансформатор при работе на нагрузку и снять внешнюю характеристику.

II. ПРИБОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

1. Автомат вык АП50 $I_n=6,3$ А 1 шт.
2. Амперметр Э365 $I_r=1$ А 3 шт.
3. Ваттметр $I_n=1$ А $U_n=220$ В 1 шт.
4. Силовой трансформатор $S_n=200$ ВА -1 шт
5. Амперметр $I_n=0-5$ А 3 шт.
6. Реостат $R=50$ Ом $I_n=5$ А-3 шт.
7. Вольтметр Э365 $U_n=50$ В 1 шт.

III. ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ:

Соединения обмоток трансформатора:

- а) Звезда – звезда с выведенной нулевой точкой - $Y/Y_0 - 0$
- б) Звезда – треугольник $Y/\Delta - II$
- в) Звезда с выведенной нулевой точкой – треугольник. $Y_0/\Delta - II$

Для этих соединений коэффициенты трансформации определяются по следующим выражениям.

$$\text{При соединении } Y/Y \quad K = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_{1\Delta}}{U_{2\Delta}}$$

$$\text{При соединении } Y/\Delta \quad K = \frac{U_{1\Delta}}{U_{2\Delta}} = \frac{U_{1\phi} \cdot \sqrt{3}}{U_{2\phi}}$$

1. Опыт холостого хода.

Холостым ходом трансформатора называется такой режим его работы, когда к первичной обмотке (см. схему рис.2.1) подводится номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. При этом по первичной обмотке проходит ток холостого хода $I_0 = (5 - 8)\% I_{нн}$. При холостом ходе мощность, подводимая к трансформатору, расходуется в нем на потери в сердечнике от гистерезиса и вихревых токов – эти потери называются потерями в стали. Мощностью, затрачиваемой на нагрев первичных обмоток током холостого хода, можно пренебречь.

2. Основным режимом работы трансформатора является нагрузочный режим. В нагрузочном режиме по вторичным обмоткам подключена нагрузка. Исследование трансформатора при нагрузке производится путем изменения сопротивлений нагрузочных реостатов (см. схему рис.2.1)

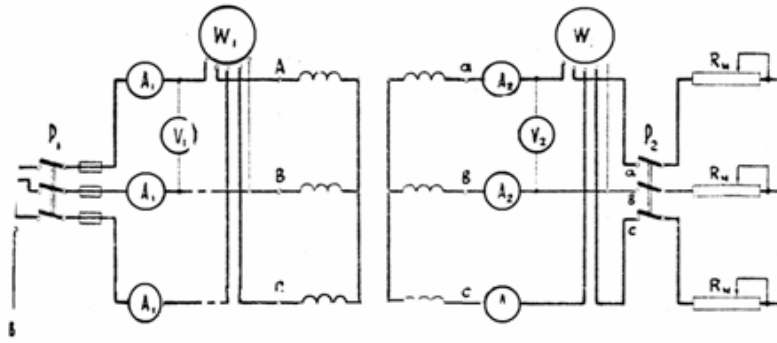


Рис 2.1. Электрическая схема проверки трёхфазного трансформатора.

Измерение фазных и линейных напряжений, фазных токов и мощности дает возможность определить следующие величины:

а) Коэффициент полезного действия трансформатора.

Прямой метод:

$$\eta^I = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

где P_2 - мощность нагрузки со стороны вторичных обмоток, определяемая по показаниям ваттметра W_2 , Вт.

P_1 - мощность, потребляемая по показаниям ваттметра W_1 , включенного в первичную обмотку, Вт.

Косвенный метод:

$$\eta^{II} = \frac{\beta \cdot P_{2н}}{\beta \cdot P_{2н} + \beta^2 \cdot \Delta P_M + \Delta P_{ст}} \cdot 100 \%$$

где β - коэффициент загрузки трансформатора, принимаемый равным 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

$P_{2н}$ - номинальная мощность трансформатора. На паспорте трансформатора указывается его номинальная мощность S в ВА. Так как в данной работе трансформатор исследуется при активной нагрузке (нагрузочные реостаты), то $S = P_{2М}$ Вт.

$\Delta P_{ст}$ - потери в стали, определяемые из опыта холостого хода, по показанию ваттметра W_1 , включенного в первичную обмотку, Вт.

ΔP_M - потери в меди, определяемые из опыта короткого замыкания, по показанию ваттметра W_1 , включенного в первичную обмотку, Вт.

б) Потери напряжения в трансформаторе.

Потери напряжения в трансформаторе определяется из выражения:

$$\Delta U = \frac{U_{1\varphi} - K \cdot U_{2\varphi}}{U_{1\varphi}} \cdot 100 \%$$

где $U_{1\varphi}$ - фазное напряжение первичной обмотки, В.

$U_{2\varphi}$ - фазное напряжение вторичной обмотки, В.

K - коэффициент трансформации трансформатора.

в) Коэффициент мощности трансформатора.

Коэффициент мощности определяется по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{1\Lambda} \cdot I_1}$$

где $U_{1\Lambda}$ - линейное напряжение первичной обмотки, В.

I_1 - ток первичной обмотки, А.

3) Опыт короткого замыкания трансформатора это такой режим его работы, когда вторичные обмотки замкнуты коротко, при котором в первичных обмотках проходят номинальные токи. Это пониженное напряжение называется напряжением короткого замыкания. Напряжение короткого замыкания обычно выражается в процентах от номинального, т.е.

$$U_K \% = \frac{U_{\varphi.н..з.}}{U_{\varphi1н}} \cdot 100 \%$$

где $U_{\varphi.н..з.}$ - фазное напряжение, подводимое к первичным обмоткам трансформатора в опыте короткого замыкания, В.

$U_{\varphi1н}$ - фазное номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора по паспорту, В.

Подводимая к трансформатору мощность в опыте короткого замыкания расходуется потерями в меди. ΔP_M . Потерями в стали при опыте короткого замыкания можно пренебречь, т. к. при малой величине напряжения короткого замыкания поток в сердечнике трансформатора будет незначительным.

Параметрами короткого замыкания трансформатора называются сопротивления:

1) Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = R_1 + R_2^1$$

где R_1 - активное сопротивление первичной обмотки, Ом.

R_2^1 - приведенное активное сопротивление вторичной обмотки, Ом.

2) Индуктивное сопротивление короткого замыкания.

$$X_K = X_1 + X_2^1$$

где X_1 - индуктивное сопротивление первичной обмотки, Ом.

X_2^1 - приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом.

3) Полное сопротивление короткого замыкания.

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

Эти сопротивления по данным опыта короткого замыкания определяются по следующим формулам:

$$Z_K = \frac{U_{\varphi.к.з.}}{I_{1н}}$$

где $U_{\varphi.к.з.}$ - фазное напряжение короткого замыкания, В.

$I_{1н}$ - номинальный ток первичной обмотки, А.

$$R_K = \frac{\Delta P_M}{I_{1н}^2}$$

где ΔP_M - потери в меди трансформатора по показанию ваттметра в опыте короткого замыкания, Вт.

$$X_M = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

1) Перед сборкой схемы переключатель II поставить в положение «О». Собрать схему по рис. 2.1 и провести опыт холостого хода, для чего отключить выключатель P_2 и включить выключатель P_1 , а переключатель II перевести в положение I (опыт холостого хода и нагрузочный режим). Измерить ток в первичной обмотке, линейное напряжение и

мощность, потребляемую из сети. Результаты измерений занести в таблицу.

2) Исследовать трансформатор в нагрузочном режиме. Для этого включить рубильник P_2 . С помощью нагрузочных реостатов изменять нагрузку трансформатора, равномерно нагружая все три фазы. Опыт производить при коэффициентах загрузки:

$$\beta = \frac{I_{\text{нагр}}}{I_{2\text{ном}}} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.$$

Полученные результаты измерений силы тока первичных и вторичных обмоток, напряжений и мощности, соответствующие каждому коэффициенту загрузки, занести в таблицу.

3) Опыт короткого замыкания. Перед сборкой схемы перевести переключатель Π в положение «О». Отключить рубильник P_1 и P_2 . После этого соединить на коротко клеммы (рис.2.1) нагрузки а, в, с. Поставить переключатель в положение 2 (режим короткого замыкания). После проверки схемы преподавателем или лаборантом и их разрешения включить рубильник P_1 . Показания приборов занести в таблицу.

4) По данным работам построить графики

$$U_2 = F_1(P_2); \eta^1 = F_2(P_2); \cos \varphi_1 = F_3(P_2);$$

5) Сделать выводы по работе – сравнить полученные данные с паспортными

б) данными трансформатора.

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Как устроен трехфазный трансформатор?
2. Почему сердечник трансформатора набирается из тонких листов электро-технической стали?
3. Каковы соединения обмоток трансформаторов по ГОСТУ и как они обозначаются?
4. Как определяется коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов?
5. Как определяются параметры короткого замыкания трансформатора?
6. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
7. Что называется потерей напряжения трансформатора и как ее определить?
8. Что называется К.П.Д. трансформатора, и какими способами он определяется?

Таблица 2.1

измерения			вычисления			
$I_{1H} A$	$U_{\phi} B$	$\Delta P_M B$	$U_K \%$	$Z_K Ом$	$R_K Ом$	$X_K Ом$

Таблица 2.2

измерения		
$I_{o\phi} A$	$U_{\phi} B$	$\Delta P Вт$

Таблица 2.3

<i>измерения</i>						<i>вычисления</i>				
β	$I_{1\phi} A$	$U_{1A} B$	$P_1 Bm$	$I_{2\phi} A$	$U_{2A} B$	$P_2 Bm$	$\eta^I \%$	$\eta^{II} \%$	$\cos \varphi$	$\Delta U \%$
0,2										
0,4										
0,6										
0,8										
1,0										

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ.

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Изучить принцип как соединяется обмотка и её работы.

II. ПРИБОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

1. Автомат вык АП50 $I_n=6,3$ А 1 шт.
2. Амперметр Э365 $I_r=1$ А 3 шт.
3. Ваттметр $I_n=1$ А $U_n=220$ В 1 шт.
4. Силовой трансформатор $S_n=200$ ВА -1 шт
5. Амперметр $I_n=0-5$ А 3 шт.

III. ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ:

1) Определение «начал» и «концов» обмоток трансформатора. Для разметки зажимов трехфазного трансформатора необходимо сначала произвольно обозначить два зажима одной из первичных обмоток как «начало» А и «конец» Х. Чтобы определить «начало» А и «конец» Х соответствующей вторичной обмотки следует согласно схеме (рис.) замерить напряжения U_{AX}, U_{mM}, U_{Am} . Если U_{Am}, U_{AX}, U_{mm} то зажимы А и m имеют одинаковую полярность и, следовательно, зажим m является началом вторичном обмотки и обозначается буквой А. Зажим n является концом вторичной обмотки и обозначается буквой Х. Если же $U_{Am} = U_{AX} + U_{mm}$, то зажимы А и m имеют различную полярность и, следовательно, зажим m является концом вторичной обмотки и обозначается буквой Х.

Выполнив разметку одной первичной и соответствующей вторичной обмоток, следует приступить к разметке остальных обмоток трансформатора. Нужно соединить последовательно первичную обмотку, у которой размечены зажимы с другой первичной обмоткой, а к третьей первичной обмотке присоединить вольтметр. (схема рис.). Если вольтметр покажет значительное напряжение, то, следовательно, конец Х первой обмотки соединен с началом В второй обмотки. Если же показание вольтметра близко к нулю, то это значит, что зажим Х первой обмотки соединен с зажимом У второй обмотки. После определения зажимов В и У второй обмотки на ее место выключается третья обмотка, а вольтметр присоединяется к зажимам второй обмотки и определяются зажимы С и Z.

Зажимы в, У и С, Z размечаются таким же образом, как были размечены зажимы А, Х.

2) Определение коэффициента трансформации для соединений обмоток трансформаторов $Y/Y_m - 0$ и Y/Δ - II производятся по схемам рис. и рис.. Данные измерений записываются в таблицу.

V. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

- 1 Собрать электрическую схему силового трансформатора. Показано на рис. 1.
- 2 С помощью вольтметра замерить напряжение в обмотках трансформатора.
- 3 Определить начало и концы обмоток силового трансформатора.
- 4.Собрать электрическую схему силового трансформатора как показано на рис. 2.
5. С помощью вольтметра замерить напряжение в обмотках трансформатора
- 6 Собрать электрическую схему силового трансформатора как показано на рис. 3.
- 7 С помощью вольтметра замерить напряжение в обмотках трансформатора.
- 8 Собрать электрическую схему силового трансформатора как показано на рис. 4.
- 9 С помощью измеренных напряжений определить коэффициент трансформаций.

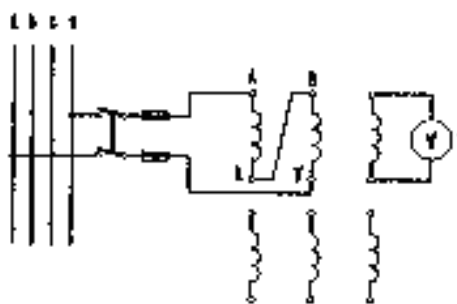


рис 2

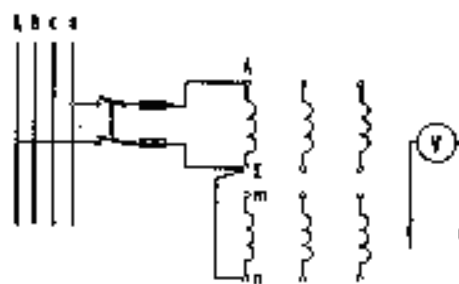


рис 1

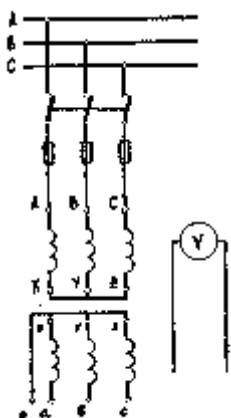


рис 3

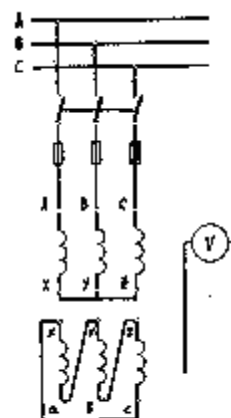


рис 4

Способ соединения	Измерения											К	
	U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	U_A В	U_B В	U_C В	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ac} В	U_a В	U_b В		U_c В
Y/Y ₀ -0													
Y/Δ -Н													

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен трехфазный трансформатор?
2. Почему сердечник трансформатора набирается из тонких листов электро-технической стали?
3. Как определяется коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Изучить принцип работы трансформатора тока и напряжения. Назначение и применение измерительных трансформаторов на станциях, подстанциях, снятие характеристик трансформаторов тока и напряжения, трансформаторов тока ТК-20, УТТ5 и др.

1. Начертить схемы внутренних соединений трансформаторов напряжения. Режим нейтрали.
2. Начертить схемы соединений вторичных обмоток трансформаторов тока и напряжения.
3. Занести в таблицу их характеристики.

II. ПРИБОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

1. Трансформатор тока УТТ-5М, ТК-20 – 3 шт.
2. Трансформатор напряжения ном 10 – 1 шт.
3. Разделяющий трансформатор ТС-220/125 – 1 шт.
4. ТР – 1 $U_n=220$ В $I_n=4$ А – 1 шт.
5. Амперметр Э365 $I_n=0-1$ А – 1 шт.
6. Амперметр Э365 $I_0=1-5$ А – 1 шт.
7. Вольтметр Э365 $U_n=220$ В – 1 шт.
8. Вольтметр Э365 $U_n=220$ В – 1 шт.

III. ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ:

Измерительные трансформаторы используют главным образом для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом электроизмерительные приборы оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того измерительные трансформаторы позволяют 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 измерительные трансформаторы служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов.

Измерительные трансформаторы подразделяются на два типа трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Первые служат для включения вольтметров и других приборов, реагирующих на значение напряжения (например, катушек напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле). Вторые служат для включения амперметров и токовых катушек указанных приборов.

Измерительные трансформаторы изготавливают мощностью от пяти до нескольких сотен вольт-ампер: они рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1: 2: 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и $100\sqrt{3}$ В).

ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ.

Измерительным трансформатором напряжения называют трансформатор, предназначенный для преобразования напряжения до значения, удобного для измерения. Применение трансформаторов напряжения обеспечивает безопасность людей, соприкасающихся с измерительными приборами, так как вторичное напряжение ТН равно

100В. Номинальный коэффициент трансформации $K = \frac{U_2}{U_1}$, следовательно, измеряемое

первичное напряжение определяется $U = \frac{U_2}{K}$, а погрешность ТН определяется по формуле. Трансформаторы напряжения имеют следующие классы точности в соответствии с допусковой погрешностью.

Таблица 3.1

Наименование класса точности	Наибольшая погрешность, в %	Наибольшая угловая погрешность (мин)
0,2	+0,2; -0,2	10
0,5	+0,5; -0,5	20
1,0	+1,0; -1,0	40
3,0	+3,0; -3,0	Не нормируется

ТН класса 0,2 применяется в качестве образцовых, а также для точных измерений в лабораториях, ТН предназначенные для подключения счётчиков должны быть класса 0,5. Для присоединения щитовых приборов используют ТН класса 1 и 3. В трёхфазной системе подлежат измерению: 1) линейные напряжения 2) фазные напряжения нулевой последовательности, возникающих при КЗ. Напряжение нулевой последовательности измеряется в разомкнутом трансформаторе

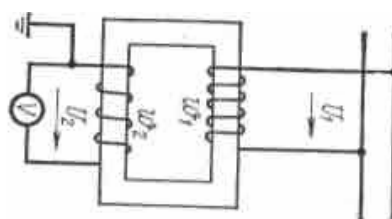
КОНСТРУКЦИЯ ТН.

Основные задачи, которые должны быть решены при конструировании ТН помимо точности измерения заключается в создании надёжной изоляции противостоять напряжению, обеспечению минимальных размеров и масс. Для напряжения класса 6-35 кВ применяются в основном трёхфазные ТН, а выше 35 кВ нашли применение однофазные трансформаторы. Рассмотрим конструкцию ТН на примере трансформатора НОМ-10.

Он имеет значительные размеры и массу 495мм и 36 кг. В новых ТН применяют однослойную изоляцию из бумаги, пропитанной маслом, что значительно уменьшает вес. В каскадных ТН каждая обмотка надёжно изолирована друг от друга. ТН каскадного типа имеют меньшую массу и стоимость относительно однокаскадных, однако их погрешность больше. Существуют также ёмкостные ТН, принцип действия которых основан на принципе делителя напряжения состоящих из двух конденсаторов, включённых последовательно.

Его выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора рис. 3.1.

Рис. 3.1. Электронная схема измерительного



напряжения.

однофазного трансформатора

Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку тщательно изолируют от первичной и заземляют. Условное обозначение трансформатора напряжения такое же как у двухобмоточного трансформатора.

Так как сопротивления обмоток вольтметров и других приборов, подключаемых к трансформатору напряжения, велики, то он практически работает в режиме холостого хода. В этом режиме можно с достаточной степенью точности считать, что $U_1 = U_2 = U_2 K$

В действительности ток холостого хода I_0

А также не большой ток нагрузки создаёт в трансформаторе падение напряжение, поэтому, как видно из векторной диаграммы $U_2 = U_1$ и между векторами этих напряжений имеется некоторый сдвиг по фазе δ_v . В результате при измерениях образуются некоторые погрешности.

В измерительных трансформаторах напряжения различают два вида погрешностей:

А) относительную погрешность напряжения

$$\gamma_v = [(U_2 K - U_1) / U_1] 100 \%$$

Б) угловую погрешность δ_v за ее значение принимают угол между векторами U_1 и U_2 . Она влияет на результаты измерений, выполненных с помощью ваттметров, счетчиков, фазометров и прочих приборов, показания которые зависят не только от силы тока и напряжения, но и от угла сдвига фаз между ними. Угловая погрешность считается положительной, если вектор U_2 опережает вектор U_1 . В зависимости от значения допускаемых погрешностей стационарные трансформаторы напряжения подразделяют на три класса точности 0,5; 1 и 3, а лабораторные на четыре класса 0,05; 0,1; 0,2; и 0,5. Обозначение класса соответствует значению относительной погрешности γ_v при номинальном напряжении $U_{ном}$. Угловая погрешность составляет 20...40 угл. мин.

Выпускаемые промышленностью трансформаторы напряжения сохраняют класс точности при измерении первичного напряжения от 80 до 120% номинального.

Для уменьшения погрешностей γ_v и δ_v сопротивления обмоток трансформатора Z_1 и Z_2 делают по возможности малыми, а магнитопровод выполняют из высококачественной стали достаточно большого поперечного сечения, чтобы в рабочем режиме он не был насыщен. Благодаря этому обеспечивается значительное уменьшение тока холостого хода.

ТРАНСФОРМАТОР ТОКА.

Измерительными ТТ называют трансформатор, предназначенный для преобразования значения тока до значения, удобного для измерения. Применяется для безопасности людей, работающих во вторичных цепях. Номинальный вторичный ток 5А (реже 10 или 1А). Первичную обмотку включают последовательно в цепь измеряемого тока, она имеет небольшое число витков, вторичная обмотка имеет большее количество витков.

Под номинальным первичным током понимают ток, для которого предназначен трансформатор. Под номинальным вторичным током понимается ток, на который рассчитаны приборы. Номинальный коэффициент погрешности определяется по формуле:

$$K_T = \frac{I_1}{I_2}$$

Под номинальной нагрузкой трансформатора понимается нагрузка, при которой погрешность не выходит за пределы допустимых. ТТ имеют следующие классы точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Различают две основные группы измерения: одновитковые и многovitковые. Одновитковые делятся на стержневые, встроенные и шинные. Стержневые изготавливаются для напряжений до 35 кВ и токов от 400 до 1500А. Примером может служить ТТ типа ТПОЛ-10 (П- проходной, О-одновитковый, Л- литый изоляцией). Шинные ТТ изготавливают до 20 кВ и током до 18000 А в классе точности 0,5. Встроенные трансформаторы устанавливаются на выводах 35 кВ и выше, класс точности их значительно ниже предыдущих.

Многovitковые трансформаторы тока изготавливают на весь ряд напряжений по классу точности. Для $U_n = 6 - 10 \text{ кВ}$ изготавливают катушечные или петлевые ТТ с эпоксидной изоляцией типа ТПЛ-10. Для напряжений 35-220кВ применяются ТТ типа

ТФЛ с масляной изоляцией (Ф-фарфоровый кожух, Н-наружная установка). Для напряжений 500, 750 и 330 кВ изготавливают каскадные ТТ типа ТРН-750, каждый из каскадов которых повторяет ТФН. Могут применяться соединения ТТ в звезду и в треугольник.

Его выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора рис.3.2(а). Или виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода рис.3.2(б).

В некоторых конструкциях магнитопровод и вторичная обмотка смонтированы на проходном изоляторе, служащем для ввода высокого напряжения в силовой трансформатор или другую электрическую установку. Первичной обмоткой трансформатора служит медный стержень, проходящий внутри изолятора.

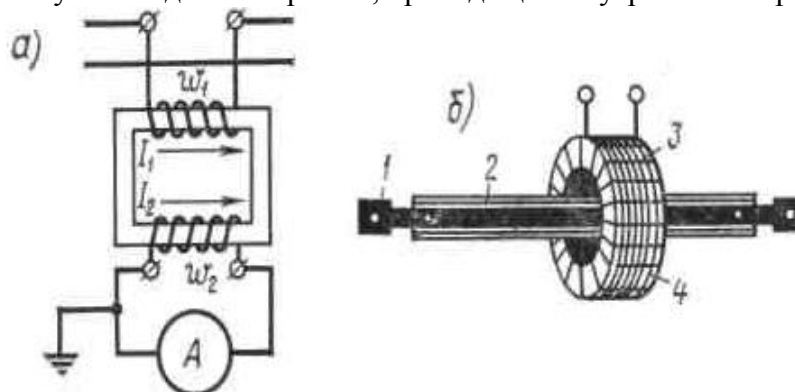


Рис.3.2. Трансформатор тока.

Сопротивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому он практически работает в режиме короткого замыкания, при котором токи I_1 и I_2 во много раз больше тока I_0 , и с достаточной степенью точности можно считать, что

$$I_1 = I_2' = I_2 / K$$

в действительности из-за наличия тока холостого хода $I_0 \approx I_\mu$ в рассматриваемом трансформаторе $I_1 = I_2$ и между векторами этих токов имеется некоторый угол, отличный от 180° это создает относительную токовую погрешность

$$\gamma_i = [(I_2 K - I_1) / I_1] \cdot 100 \%$$

и угловую погрешность измеряемую углом δ_i между векторами I_1 и I_2' . Погрешность δ_i считается положительной, если вектор $-I_2'$ опережает вектор I_1 .

В зависимости от значения допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяют на пять классов точности: стационарные – 0,2; 0,5; 1; 3; 10; и лабораторные - 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. приведенные цифры соответствует допускаемой для данного класса токовой погрешности при номинальном значении тока. Угловая погрешность составляет 10...120 угл. мин.

Для уменьшения токовой и угловой погрешностей магнитопровод трансформатора тока изготавливают из высококачественной стали достаточно большого сечения, чтобы в рабочем режиме он был не насыщен ($B=0,06...0,1$ Тл). При этих условиях намагничивающий ток будет мал.

Следует отметить, что размыкание цепи вторичной обмотки трансформатора тока недопустимо. Трансформатор переходит в режим х. х. его результирующая МДС, в рабочем режиме равная $F_{рез} = F_1 - F_2$, становится $F_{рез} = F_1$ в результате резко в десятки и сотни раз возрастает магнитный поток в магнитопроводе, а индукция в нем достигает значения $B > 2Тл$ что приводит к сильному возрастанию магнитных потерь в стали; при этом трансформатор может сгореть. Ещё большую опасность представляет резкое повышение напряжения на зажимах вторичной обмотки до нескольких сотен и

даже тысяч вольт. Для предотвращения режима холостого хода при отключении приборов следует замыкать вторичную обмотку трансформатора тока накоротко.

IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

На электрических станциях и подстанциях применяемое оборудование (электрическое) можно разделить на 5 групп:

1. Коммутационная аппаратура: выключатели, разъединители, отделители, автоматы, рубильники и т.д.
2. Защитная аппаратура: разрядники, предохранители, реле.
3. Токоограничители: реакторы, резисторы, заземляющие реакторы.
4. Измерительные трансформаторы.
5. Вторичные цепи релейной защиты, автоматические телесигнализации.

Для измерения тока и напряжения, мощности и энергии в высоковольтных сетях применяются измерительные трансформаторы тока и напряжения. Эти аппараты позволяют измерять высоковольтный ток и напряжение до нескольких десятков кВ и кА обыкновенными стендовыми приборами, применяемыми в лабораторных условиях.

Трансформаторы являются также элементами устройств релейной защиты и автоматики. От первичной обмотки вторичная обмотка надёжно изолируется. Ток цепи нагрузка подключается к зажимам вторичных обмоток трансформаторов тока последовательно. Сопротивление вторичной нагрузки невелико, поэтому рабочий режим трансформатора тока близок к режиму к.д.г. Размыкание вторичной обмотки приводит к исчезновению размагничивающего действия вторичного тока и тогда весь первый ток становится током намагничивания.

Основной мерой безопасного производства работ во вторичных токовых цепях в случае повреждения изоляции и попадания на вторичную цепь высокого напряжения является заземление одного из концов каждой вторичной обмотки трансформатора тока.

Таблица данных трансформаторов напряжения

Таблица 3.2

Тип трансформатора	Коэффициент трансформации	$U_1 B$	$U_2 B$	Класс точности измерения (0,5)
НТМИ-10				
НТМИ-6				

Таблица данных трансформаторов тока.

Таблица 3.3

Тип трансформатора	U ном кВ	$I_1 A$	$I_2 A$	Коэффициент трансформации Кт	Класс точности измерения (0,5)
ТК-20					
УТТ-5					
ТПОЛ-1093					

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое трансформатор тока?
2. Что такое трансформатор напряжения?
3. Как определяют коэффициент ТТ и ТН?
4. Какие виды бывают ТТ и ТН?
5. Для чего используются ТТ и ТН?
6. Какие бывают погрешности ТТ и ТН?

7. Какие классы точности ТТ и ТН Вы знаете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИЗУЧЕНИЕ СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Ознакомиться с конструкцией, режимом работы, эксплуатационными характеристиками и энергетическими показателями сварочного трансформатора.

II. ПРИБОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.

1. Сварочный трансформатор ТС-220/12-1 шт.
2. Вольтметр Э365 $U_H=0-250$ В – 1 шт.
3. Вольтметр Э365 $U_H=0-50$ В – 1 шт.
4. Амперметр Э365 $I_H=0-50$ А – 1 шт.
5. Трансформатор тока УТТ5М-600/5-1 шт
6. Амперметр Э365 $I_H=5$ А – 1 шт.
7. Мегомметр М1000 $U_H=1000$ В – 1 шт.

III. ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ:

Сварочные трансформаторы широко используются в промышленных предприятиях для сварки металлов. Существуют разновидности сварочных трансформаторов. Этим сварочным аппаратом относятся: дуговые сварочные аппараты, сварочные выпрямители, сварочные аппараты для контактной сварки и др. Данной лабораторной работе рассмотрим дуговой сварочный трансформатор.

Электрическая дуговая сварка представляет собой процесс образования неразъемного соединения в результате местного нагрева до пластического или жидкого состояния металлических деталей протекающим по ним электрическим током, с последующим охлаждением зоны сварки за счет теплопроводности в тело свариваемых деталей.

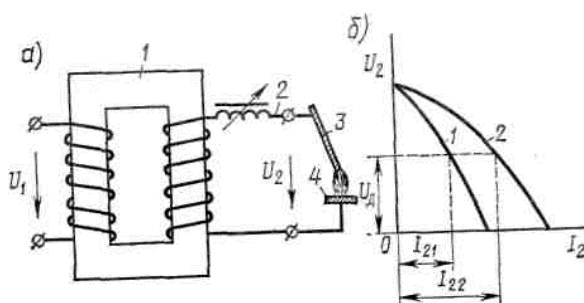


Рис 4.1. Электрическая схема (а) и внешние характеристики (б) сварочного трансформатора:

1 – трансформатор, 2 – дроссель с переменной индуктивностью, 3 – электрод, 4 – свариваемая деталь

Электросварка получила широкое распространение в производстве неразъемных соединений металлических деталей, высокую производительность, значительную экономию металла и рабочие силы.

Для электросварки используют как постоянный, так и переменный ток.

Источниками питания сварочной дуги переменного тока являются сварочные трансформаторы, которые подразделяют на одно и трёхфазные, а по количеству питаемых сварочных постов на одно и многопостовые. Источники питания постоянного тока подразделяются на две основные группы: сварочные преобразователи и сварочные выпрямители.

Широкое распространение в современной сварочной технике, из-за энергетических

и эксплуатационных преимуществ, получили источники переменного тока-сварочные трансформаторы.

Такие трансформаторы представляют собой понижающие однофазные сухие трансформаторы со вторичным напряжением при холостом ходе 60...75 В. Это напряжение необходимо для надежного зажигания электрической дуги. При номинальной нагрузке вторичное напряжение уменьшается до 30 В.

При работе сварочных трансформаторов короткое замыкание является нормальным эксплуатационным режимом. Поэтому для ограничения тока к. з. и устойчивого горения дуги такой трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику, а цепь сварочного тока должна обладать значительной индуктивностью. Для этого в сварочных трансформаторах первичную и вторичную обмотки размещают на различных стержнях магнитопровода, вследствие чего сопротивление короткого замыкания Z_k и напряжения U_k оказываются у них в несколько раз больше, чем у обычных силовых трансформаторов. Обычно в сварочных трансформаторах последовательно со вторичной обмоткой включают реактор L_c переменной индуктивностью. Регулируя индуктивность реактора изменяя воздушный зазор в его магнитопроводе изменяют форму внешней характеристики 1 или 2 трансформатора (рис 4.1) и ток дуги I_{21} или I_{22} соответствующий напряжению горения дуги U_d .

В некоторых конструкциях реактор непосредственно встраивают в сварочный трансформатор. Такой трансформатор имеет три обмотки: первичную 1 (рис 4.1), вторичную 3 и обмотку реактора 4, расположенные на общем для цепей трансформатора и реактора. Обмотки 3 и 4 включены таким образом, что магнитный поток, создаваемый обмоткой реактора 4 в ярме 2. направлен против основного потока, создаваемого первичной обмоткой 1. благодаря этому существенно возрастает магнитное рассеяние в трансформаторе при сравнительно небольшом поперечном сечении ярма 2. Из-за наличия в цепи нагрузки большой индуктивности сварочные трансформаторы работают с низким $\cos \varphi = 0.4 \dots 0.5$.

Таблица 4.1

Тип сварочного трансформатора.	Схема соединения	Изоляция	$U_1 B$	$U_2 B$	$I_d A$	$U_d B$

IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1.Собрать схему как показанную на рисунке.
2. Подать напряжения сварочному трансформатору.
3. Измерить напряжения и ток первичной и вторичной обмотки холостого хода.
4. Измерить напряжения и ток первичной и вторичной обмотки нормального режима.
5. Значение занести в таблицу 4.1.

V.КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

- 1.Что такое сварочный трансформатор?
2. Какие бывают сварочные аппараты?
3. По какому принципу работает сварочный трансформатор?
4. Расскажите принцип работы сварочного трансформатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

I.ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Изучить принцип работы защиты силового трансформатора.

II. ПРИБОРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

1. Силовой трансформатор $S_H=63$ ВА - 1 шт.
2. Магнитный пускатель ПМЕ – 111 – 2шт.
3. Рубильник Р=100 – 1 шт.
4. Трансформатор тока УТП 5 м – 1 шт.
5. Реле тока РТ 40/02 – 1 шт.
6. Реле промежуточный ПП-25 – 1 шт.

III. ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ:

В процессе эксплуатации силовых трансформаторов из-за старения изоляции обмоток, пробой изоляции, механические повреждения, природные происшествия происходит короткое замыкание в силовых трансформаторах чтобы защитить силовые трансформаторы от всех видов повреждений выполняют соответствующие защиты.

Силовые трансформаторы защищаются от следующих видов повреждений и нарушений нормального режима работы трансформатора:

- 1) Многофазных к.з. в обмотках и на выводах;
- 2) Витковых замыканий в обмотках;
- 3) Токов от внешних многофазных или однофазных к.з.;
- 4) Перегрузки;
- 5) Понижения уровня масла в трансформаторе;
- 6) Замыкания на землю в питаемой сети 6-10 кВ, когда отключение таких замыканий необходимо по условиям техники безопасности.

Для защиты от внутренних к.з. и витковых замыканий, а также от к.з. на выводах могут применяться:

1. Продольная дифференциальная защита или дифференциальная отсечка;
2. Токовая отсечка без выдержки времени;

Устанавливаемая со стороны питания, когда не применяется дифференциальная защита;

3. Быстродействующая защита максимального тока;
4. плавкие предохранители, когда со стороны питания не применяется выключатель и когда плавкие предохранители, могут быть выбраны с требуемыми номинальными данными и характеристиками.

Релейная защита при этом действует на отключение выключателей первичного и вторичного напряжений.

Если на ГПП выключатель со стороны ВН не предусматривается, то защита может действовать на выключение короткозамыкателя, а также на отключение выключателя в начале питающей линии с передачей команды на отключение средствами телеуправления.

Токовая отсечка или плавкие предохранители или удовлетворяющие требованиям чувствительности, могут быть установлены также в начале блока линии - трансформатор. Этот способ защиты широко применяется в распределительных сетях предприятий для защиты цеховых трансформаторов. Защита от токов внешних к.з. на понижающих трансформаторах может осуществляться с релейной защитой максимального тока с выдержкой времени, а также плавкими предохранителями, если они обеспечивают необходимые избирательность и чувствительность.

При многостороннем питании оказывается необходимым применение направленной защиты. Защита от перегрузок предусматривается в зависимости от вероятности, длительности и значения ожидаемых в эксплуатации реальных перегрузок. Существенные перегрузки могут возникать, например, при отключении одного из параллельно работающих трансформаторов, в случае роста систематических перегрузок во время максимума суточного графика нагрузки. Из-за большой постоянной времени нагрева трансформатора 0,5 ч и более. Защита от перегрузок обычно действует на предупреждающий сигнал; при отсутствии постоянного дежурного персонала защита может действовать также на отключение части нагрузок, на отключение трансформатора и на подключение резервных источников питания, параллельная работа которых с

защищаемым трансформатором допустима.

От понижения уровня масла в масляных трансформаторах большой мощности начиная с 6,3 МВ/А при отсутствии быстродействующей токовой защиты начиная с мощности 1 МВ/А или при внутрицеховой установке (начиная с мощности 630 кВ/А) применяется газовая защита. Основным органом защиты является газовое реле, устанавливаемое в трубопроводе между баком и расширителем трансформатора.

IV. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Собрать схему.
2. Подать напряжение к трансформатору.
3. На одной из фаз первичной обмоткой трансформатора через большое сопротивление, заземлить.
4. Наблюдать работу реле КАБ.
5. Писать отчёт по выполненной работе.

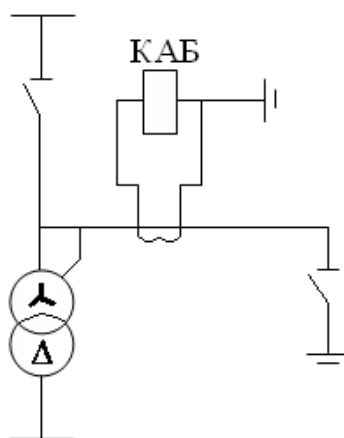


Рис 5.1 . Блокирующее реле отделителя БРО

V. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какие виды есть короткого замыкания?
2. Принцип работы реле тока?
3. Что собой представляет реле промежуточный?
4. Какие виды изоляции применяются в трансформаторе?

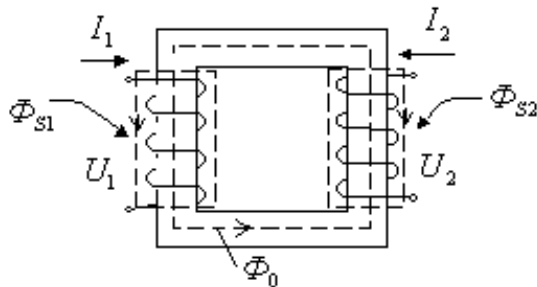
ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1.

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА РАБОТЫ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Целью настоящей работы является изучение конструкции, принципа действия и режимов работы однофазного трансформатора, а также опытное определение его основных характеристик.

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, преобразующий электрическую энергию напряжения переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию с другими параметрами (частота, напряжение, фазность, форма напряжения и т.д.). Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции. Рассмотрим работу трансформатора по логической цепочке на “холостом” ходу. На рисунке изображена конструкция однофазного трансформатора,



Здесь Φ_0 – основной магнитный поток (магнитопровод предназначен для направления и

концентрации основного магнитного потока);

Φ_{s1}, Φ_{s2} – потоки рассеяния основного магнитного потока в обмотках первичной и вторичной цепей. Они зависят от сцепления обмоток (удаленности друг от друга), от расположения их на стержнях, а также от контура прохождения основного потока. Представим принцип действия трансформатора в виде логической цепочки:

$$U_1 \xrightarrow{-1} I_1 \xrightarrow{-2} H \xrightarrow{-3} B_m, \Phi_0 \begin{matrix} \xrightarrow{-4} e_1 \\ \rightarrow e_2 \end{matrix}$$

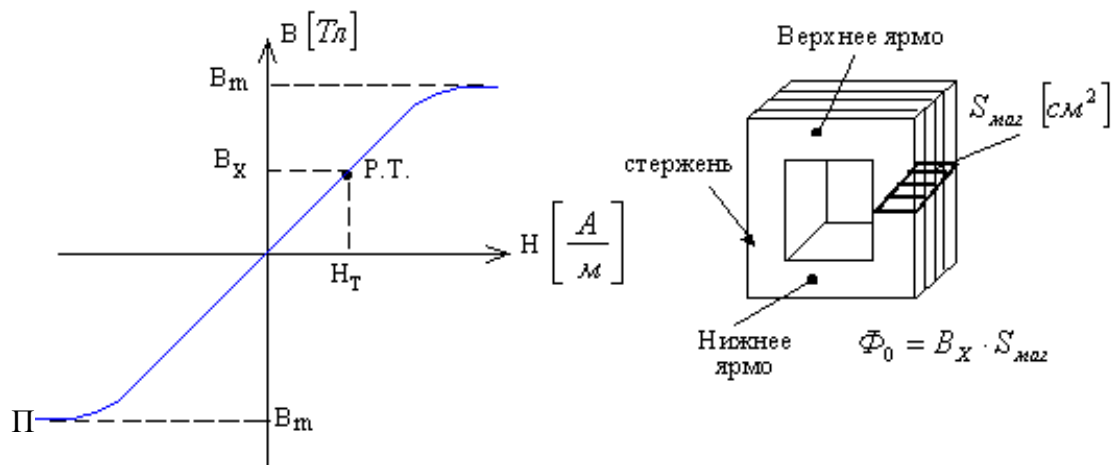
1 При подключении трансформатора к первичной цепи переменного тока возникает ток (по закону Ома), обратно пропорциональный входному сопротивлению трансформатора:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{ex}};$$

2 При протекании тока по обмотке трансформатора, намотанной на замкнутый магнитопровод, возникает напряженность магнитного поля (H):

$$H = \frac{I_1 \cdot W_1}{l_{cp}} = \frac{F}{l_{cp}} \left[\frac{Ae}{M} \right],$$

где F – магнитодвижущая сила, l_{cp} – средняя линия магнитопровода, W_1 – число витков в первичной цепи. Магнитопровод трансформатора необходимо выполнять из ферромагнитного материала.



од

действием напряженности магнитного поля H в магнитопроводе (сердечнике) трансформатора возникает основной магнитный поток Φ_0 , прямо пропорциональный сечению магнитопровода ($S_{\text{маг}}$). Магнитная индукция B_x является рабочей точкой на основной кривой намагничивания и выбирается на линейном участке, чтобы при намагничивании сердечника постоянным током магнитопровода не было захода ее в область насыщения.

4 При прохождении основного магнитного потока по сердечнику в первичной цепи возникает ЭДС самоиндукции, а во вторичной цепи ЭДС взаимной индукции, которые определяются по закону магнитодвижущих сил – закону Максвелла – Фарадея:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt},$$

где ЭДС – это изменение потока сцепления во времени.

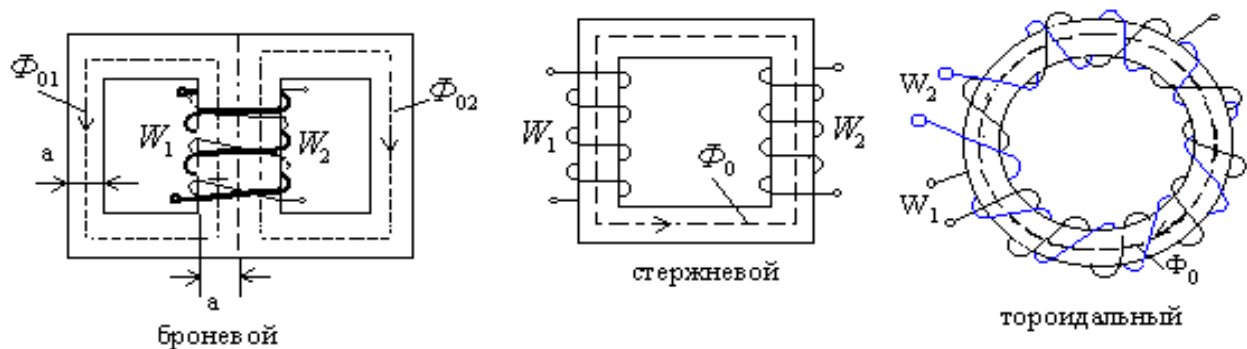
При работе трансформатора на высокой частоте прямоугольная форма напряжения объясняется использованием магнитомягких материалов, таких как феррит, альсифер, пермаллой, обладающие узкой прямоугольной петлей гистерезиса

А, частоте свыше 8 кГц·А] и частоте до 8 кГц, тороидальные – при мощности 250 [В·А и частота до 8 кГц, стержневые при мощности от 150 до 800 [В·Броневые сердечники используются при мощности менее 150В

В броневом сердечнике трансформатора основной магнитный поток раздваивается, что приводит к увеличению потока рассеяния. Расположение обмоток на одном (среднем) стержне трансформатора улучшает их сцепление и защищает обмотки от механических воздействий и электромагнитных помех. Такая конструкция обладает наибольшим рассеиванием основного потока (Φ_0), поэтому используется при малых мощностях.

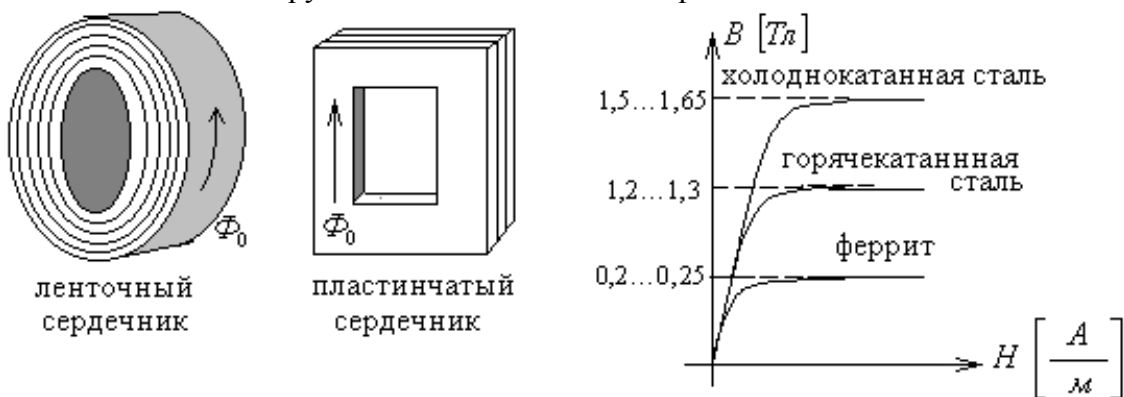
Тороидальная конструкция сердечника трансформатора обладает наименьшим потоком рассеяния, благодаря круговому движению силовой линии основного магнитного потока Φ_0 и хорошему сцеплению обмоток (из-за намотки по всему тороиду).

Конструктивные особенности трансформатора



Однофазные трансформаторы классифицируются по типу магнитопровода на броневые, стержневые и тороидальные

Ограничение по мощности связано с плохим охлаждением обмоток и технологическими трудностями изготовления тороида.



Тип изоляции зависит от рабочей температуры. Провода для обмоток имеют прямоугольное или круглое сечение, прямоугольные используются при повышенных токах нагрузки. При проектировании трансформаторов вводится понятие плотности тока.

$$j = \frac{I_i}{S_{np}}$$

$$j = [2...8] \text{ A/мм}^2$$

Выбор плотности тока зависят от расположения обмотки на магнитопроводе и типа магнитопровода.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Описание рабочих процессов относится как к однофазным, так и к трехфазным трансформаторам, в последнем случае—к одной фазе трансформатора, нагруженного симметрично. Трансформирование трехфазной системы токов может осуществляться трансформаторной группой — тремя однофазными трансформаторами, работающими как один агрегат. Но можно объединить три однофазных трансформатора в один трехфазный аппарат и при этом достигнуть экономии материалов. Это было сделано изобретателем трехфазного трансформатора М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. Покажем наглядно, как создается экономия материала при построении трехфазного трансформатора. Представим себе три однофазных трансформатора (рис. 4.6а). Составляя сердечник для трехфазного трансформатора, оставим без изменения те части сердечников однофазных

трансформаторов, на которых расположены обмотки, а свободные части этих трех сердечников соединим в один общий магнитопровод (рис. 4.6б). Такое построение магнитной системы можно сопоставить с соединением трех электрических цепей звездой. Но в трехфазной системе при равномерной на грузке нейтральный провод не нужен; отказываясь от него, получаем экономию меди.

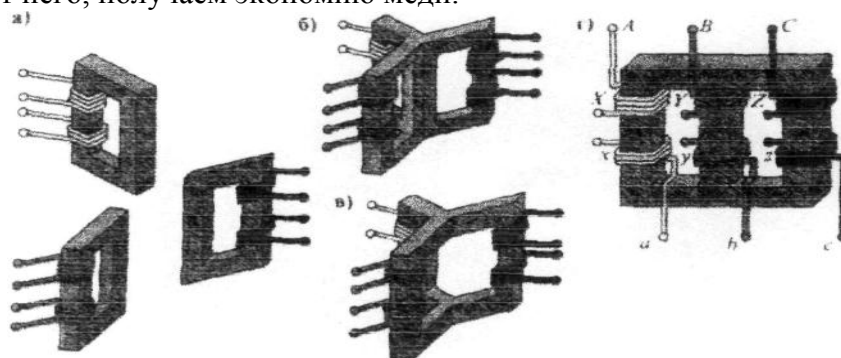


Рис. 4.6 Схема преобразования трех однофазных трансформаторов в один трехфазный

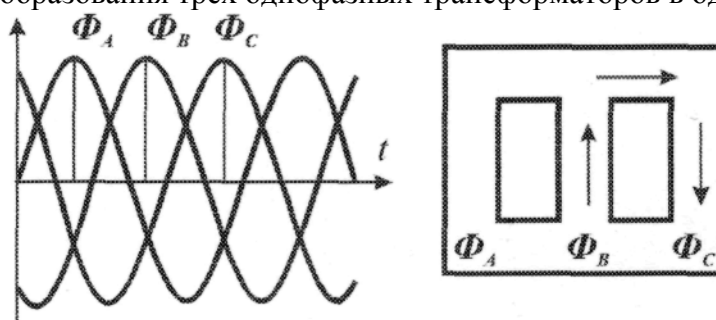


Рис. 4.7 Кривые мгновенных значений магнитных потоков трехфазного трансформатора и распределение потоков в сердечнике

Нейтральному проводу в магнитной системе трехфазного трансформатора соответствует средний общий стержень. При наличии симметричной трехфазной системы магнитных потоков этот стержень не нужен и может быть удален (рис. 4.6в), так как алгебраическая сумма этих магнитных потоков всегда равна нулю. Магнитный поток в стальном сердечнике трансформатора можно считать прямо пропорциональным напряжению и отстающим от него по фазе почти на 90° . Три первичных напряжения трехфазной системы, следовательно, должны обуславливать три потока одинаковой амплитуды, сдвинутых по фазе по отношению друг к другу на одну треть периода (120°).

Показанный на рис. 4.6в симметричный сердечник неудобен для изготовления и в настоящее время заменен несимметричным магнитопроводом (рис. 4.6г), который, можно мыслить как выпрямленный вариант магнитопровода (рис. 4.6в). Симметричная трехфазная система первичных напряжений трансформатора возбуждает и в таком несимметричном магнитопроводе симметричную систему магнитных потоков. Но из-за неравенства магнитных сопротивлений намагничивающие токи отдельных фаз между собой не равны. Однако эта несимметрия намагничивающих токов для основных соотношений существенного значения не имеет. Физически в каждый данный момент магнитный поток одного стержня замыкается через два других стержня магнитопровода (рис. 4.7).

Отметим, что для фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке справедливы те же отношения, что и для однофазного трансформатора. Эти условия нарушаются лишь в некоторых случаях при несимметричной нагрузке трехфазных трансформаторов.

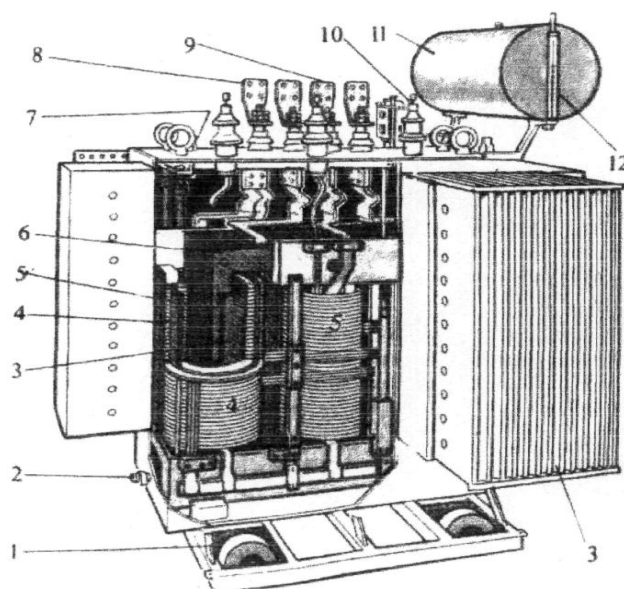


Рис. 4.8.Трехфазный масляный трансформатор с трубчатым баком в частичном разрезе: 1 — катки, 2 — спускной кран для масла, 3 - изолирующий цилиндр, 4 — обмотка высшего напряжения, 5 — обмотка низшего напряжения, 6 — сердечник, 7 — термометр, 8, 9 — выходы низшего напряжения, 10 — выходы обмотки высшего напряжения. 11 — расширитель для масла, 12 — указатель уровня масла, 13 — радиаторы

Практически большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняют трехфазными (рис. 4.8), а больших мощностей — с учетом конкретных условий установки. Трехфазные трансформаторы изготовляют мощностью до $60\,000\text{ кВ} \cdot \text{А}$, но уже начиная с мощности $3 \times 600 = 1800\text{ кВ} \cdot \text{А}$ допускается применять трехфазные группы трехфазных трансформаторов.

Зажимы трехфазного трансформатора размечаются в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения зажимы A, B, C — начала обмоток, X, Y, Z — их концы; на стороне низшего напряжения — соответственно a, b, c , и x, y, z .

Основными способами соединения обмоток трехфазного трансформатора являются соединения звездой и треугольником.

Самым простым и дешевым из них является соединение обеих обмоток трансформатора звездой, при котором каждая из обмоток и ее изоляция (при глухом заземлении нейтральной точки) должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток; так как число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то, следовательно, соединение обмоток звездой требует в каждой из обмоток меньшего количества витков, но большего сечения проводников с изоляцией, рассчитанной лишь на фазное напряжение. Соединение обеих обмоток звездой широко применяют для трансформаторов небольшой и средней мощности (примерно до $1800\text{ кВ} \cdot \text{А}$). Соединение звездой является наиболее желательным для высокого напряжения, так как при нем изоляция обмоток рассчитывается лишь на фазное напряжение. Чем выше напряжение и меньше ток, тем относительно дороже обходится соединение обмоток треугольником.

Соединение обмоток треугольником конструктивно удобнее при больших токах. По этой причине соединение Y/Δ широко применяется для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не требуется нейтрального провода.

При трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений $U_{1\phi}/U_{2\phi}$ всегда приближенно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток w_1/w_2 , что же касается линейных напряжений, то их отношение зависит от способа соединения обмоток трансформатора. При одинаковом способе соединения (Y/Y или Δ/Δ) отношение линейных напряжений также равно коэффициенту трансформации. Однако при различном

способе соединения (Y/Δ и ΔY) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в $\sqrt{3}$ раз. Это дает возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением способа соединения его обмоток.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

В этих трансформаторах помимо магнитной связи между обмотками имеется и электрическая связь.

Обмотка с числом витков w_{ax} одновременно является частью первичной обмотки и вторичной обмоткой. Для понижающего автотрансформатора (рис.1.29) уравнение токов имеет следующий вид:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_{12} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{12} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1.$$

По виткам w_{ax} протекает ток, равный разности тока нагрузки I_2 и первичного тока I_1 .

Если коэффициент трансформации автотрансформатора $k_{AT} = \frac{w_{AX}}{w_{ax}}$ меньше двух, то ток I_{12} будет меньше тока I_1 и витки w_{ax} можно выполнить проводом уменьшенного сечения. Уменьшается расход обмоточного провода, электротехнической стали из-за уменьшения пространства, необходимого для размещения обмотки.

Снижение массы активных материалов приводит к уменьшению электрических и магнитных потерь, поэтому при одинаковой номинальной мощности КПД автотрансформатора всегда выше, чем в трансформаторе.

Наряду с перечисленными преимуществами автотрансформаторы обладают и недостатками.

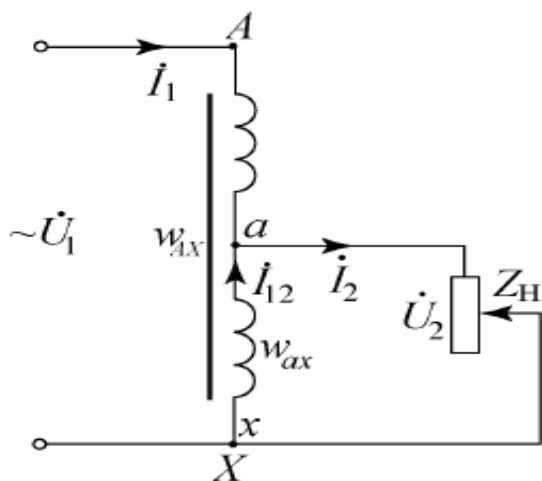


Рис. 1.29

Вследствие электрической связи вторичной и первичной обмоток их изоляция должна выбираться, исходя из высшего напряжения. Автотрансформаторы имеют больший ток короткого замыкания, т.к. он ограничивается сопротивлением части Aa обмотки. Кроме того, при коротком замыкании первичное напряжение будет приложено только к этой части обмотки, что вызовет резкое увеличение магнитного потока, насыщения магнитопровода, намагничивающего тока – приведет к еще большему увеличению тока короткого замыкания в автотрансформаторе. В целях обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала нельзя применять

автотрансформаторы для понижения напряжения сетей ВН до значений НН, подводимого непосредственно к потребителю.

Автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации

Этот автотрансформатор выполнен на тороидальном магнитопроводе, часть наружной поверхности витков обмотки оголена (без изоляции) и по оголенным проводникам перемещается угольная щетка (рис.1.30).

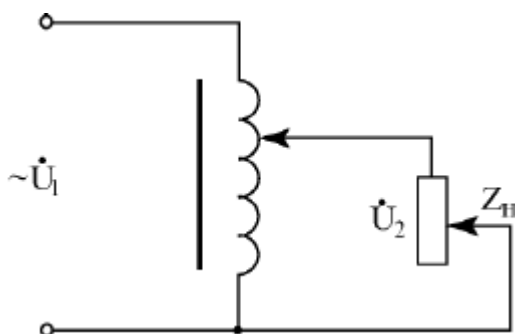


Рис.1.30

Щетка выполнена так, чтобы в процессе ее перемещения не более одного витка замыкалось накоротко. Большое переходное сопротивление между проводниками обмотки и щеткой ограничивает ток короткозамкнутого витка, а в более мощных автотрансформаторах применяются двойные комплекты щеток с дополнительным сопротивлением с целью ограничения тока короткозамкнутого витка.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении их обмоток как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные клеммы обмоток трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети (рис.1).

Параллельная работа трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности нужна по следующим соображениям:

1. Для обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта;
2. Обеспечение работы трансформаторов с высокими эксплуатационными показателями (КПД и $\cos \varphi_2$), варьируя количество работающих трансформаторов, чтобы каждый из них был нагружен оптимально.

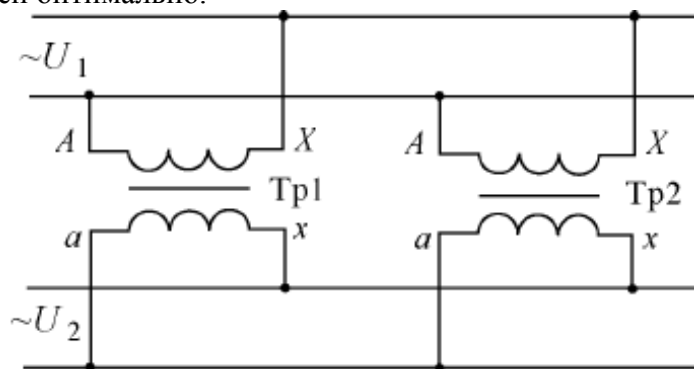


Рис. 1.

Для того, чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, нужно выполнить следующих три условия:

- Первичные и вторичные напряжения трансформаторов должны быть соответственно равны, т.е. трансформаторы должны иметь равные коэффициенты трансформации ($k_1 = k_2 = k_3 = \dots$).

Трансформаторы должны иметь одну и ту же группу соединения обмоток.

Номинальные напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть равными ($U_{K1} = U_{K2} = U_{K3} = \dots$).



Рис. 1.22

При несоблюдении первого условия, даже в режиме холостого хода, между параллельно включенными трансформаторами возникает уравнивающий ток I_{yp} , обусловленный разностью вторичных ЭДС трансформаторов ΔU (рис.1.22)

$$I_{yp} = \frac{\Delta U}{Z_{к1} + Z_{к2}}$$
, где $Z_{к1}$, $Z_{к2}$ - сопротивления короткого замыкания трансформаторов. При подключении нагрузки уравнивающий ток накладывается на нагрузочный. У трансформатора с более высокой вторичной ЭДС (у понижающих трансформаторов - трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации) уравнивающий ток суммируется с током нагрузки. Трансформатор равной мощности, но с большим коэффициентом трансформации, окажется недогруженным, так как уравнивающий ток направлен встречно нагрузочному.

Длительная перегрузка трансформаторов недопустима, поэтому приходится при не равных коэффициентах трансформации снижать общую нагрузку. При значительной разнице коэффициентов трансформации нормальная работа трансформаторов будет практически невозможной. Поэтому ГОСТ допускает включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если их разница не превышает $\pm 0,5\%$ среднего геометрического значения

$$\Delta k = \frac{k_1 - k_2}{\sqrt{k_1 \cdot k_2}} \cdot 100 \leq \pm 0,5\%$$

При несоблюдении второго условия вторичные линейные напряжения трансформаторов окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга.

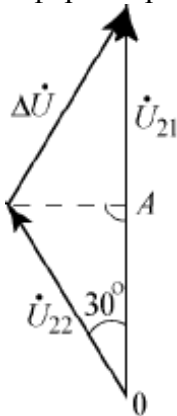


Рис. 2

В цепи трансформаторов появится разностное напряжение ΔU , под действием которого возникнет значительный уравнивающий ток.

Например, рассмотрим включение на параллельную работу двух трансформаторов с равными коэффициентами трансформации, один из которых имеет нулевую (Y/Y-0), а другой – одиннадцатую (Y/Δ-11) группы соединения обмоток. Во-первых, линейное напряжение ΔU_{21} первого трансформатора будет больше линейного напряжения ΔU_{22} второго трансформатора в $\sqrt{3}$ раз. Во-вторых, векторы этих напряжений окажутся сдвинутыми по фазе относительно друг друга на угол 30° (рис.2)

$$\overline{OA} = \sqrt{3} \cdot U_{22} / 2, \text{ так как } U_{22} = U_{21} / \sqrt{3}, \text{ то } \overline{OA} = U_{21} / 2 \text{ и}$$

$$\Delta U = U_{22}$$

Появление такого разностного напряжения ΔU приведет к возникновению во вторичной цепи трансформаторов уравнивающего тока, в 15-20 раз превышающего номинальный ток нагрузки, т.е. возникает аварийная ситуация. Наибольшее значение ΔU появится при включении на параллельную работу трансформаторов с нулевой и шестой группами соединения обмоток ($\Delta U = 2U_2$), т.к. в этом случае векторы линейных вторичных напряжений окажутся в противофазе. При несоблюдении третьего условия с некоторым приближением, пренебрегая токами холостого хода, можно параллельно включенные трансформаторы (рис.1.24,а) заменить их сопротивлениями короткого замыкания $Z_{к1}$ и $Z_{к2}$ (рис.1.24,б).

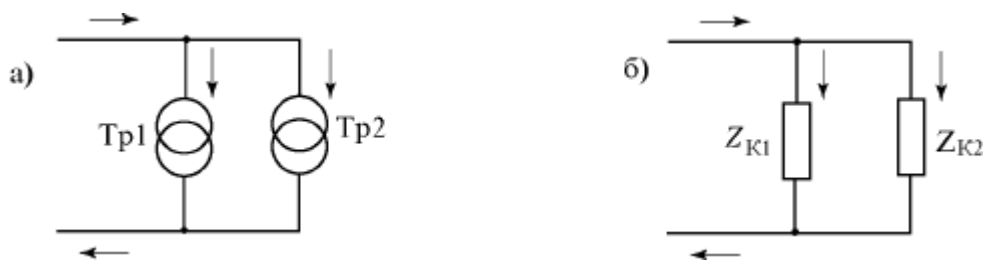


Рис. 1.24

Так как токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, то и относительные мощности (нагрузки) параллельно работающим трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания. В итоге это ведет к перегрузке трансформатора с меньшим U_{κ} и недогрузке трансформатора с большим U_{κ} .

Поэтому ГОСТ допускает включение трансформаторов на параллельную работу с различными напряжениями короткого замыкания, если их разница не превышает $\pm 10\%$ среднего арифметического значения

$$\Delta U_{\kappa} = \frac{U_{\kappa 1} - U_{\kappa 2}}{0,5 \cdot (U_{\kappa 1} + U_{\kappa 2})} \cdot 100 \leq \pm 10\%$$

Разница в напряжениях короткого замыкания тем больше, чем больше трансформаторы отличаются друг от друга по мощности, поэтому ГОСТ рекомендует, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включаемых параллельно, было не более 3:1.

Кроме соблюдения названных трех условий необходимо перед включением трехфазных трансформаторов на параллельную работу проверить порядок чередования фаз, который должен быть одинаковым у всех трансформаторов.

Соблюдение всех перечисленных условий проверяется фазировкой трансформаторов (рис.1.25). При этом любую пару, противоположно расположенных клемм рубильника, соединяют проводом (на рис. не изображен), а между оставшимися парами клемм измеряют напряжение

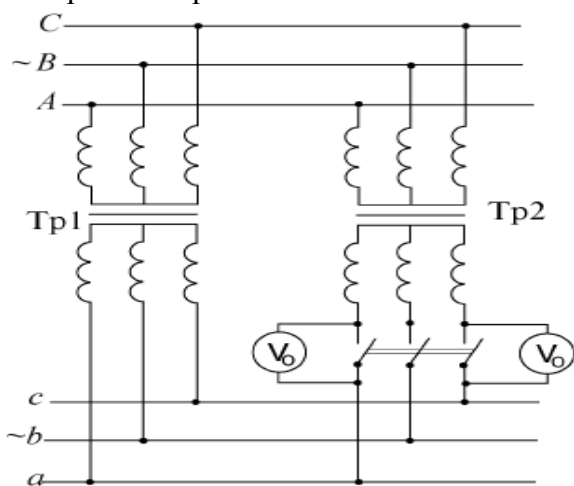


Рис. 1.25

нулевым вольтметром. Если вторичные напряжения трансформаторов равны и одинаковы их группы соединения обмоток, то при одинаковом порядке следования фаз показание нулевого вольтметра равно нулю. В этом случае трансформаторы можно подключать на параллельную работу. Если вольтметр покажет некоторое напряжение, то необходимо выяснить какое из условий параллельной работы нарушено и устранить это нарушение.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА.

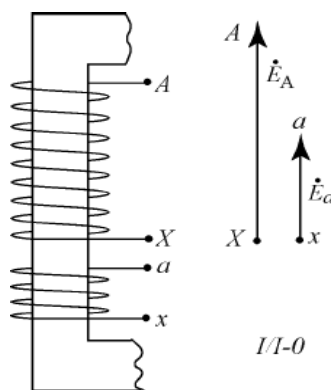
Маркировка начал и концов обмоток трансформаторов выполняется следующим образом. В однофазном трансформаторе обмотка ВН обозначается прописными латинскими буквами: A – начало, X – конец. Обмотка НН – строчными латинскими буквами: a – начало, x – конец. При наличии третьей обмотки с промежуточным (средним) напряжением начало и конец ее обозначают соответственно At и Xt .

В трехфазном трансформаторе обмотка ВН обозначается прописными латинскими буквами: A, B, C – начала, X, Y, Z – концы. Обмотка НН – строчными латинскими буквами: a, b, c – начала, x, y, z – концы. Чередование фаз A, B, C принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов обмотки ВН.

В большинстве случаев обмотки трехфазных трансформаторов соединяются либо в “звезду” (Y), либо в “треугольник” (Δ) и реже в “зигзаг” (Z). Первые две схемы соединения трехфазных обмоток обозначаются прописными русскими буквами: соответственно $У, Д$.

Клеммы нулевой точки при соединении трехфазной обмотки в “звезду” или “зигзаг” обозначаются в обмотке ВН прописной буквой O , а в обмотке НН строчной буквой o . При этом к буквенным обозначениям схем соединения обмоток добавляют индекс “н” (Y_n, Z_n).

Для включения трансформатора на параллельную работу с другими трансформаторами особое значение имеет сдвиг фаз между ЭДС первичной и вторичной обмоток. Для характеристики этого сдвига используется понятие о группе соединения обмоток.



Изобразим фрагмент стержневого магнитопровода однофазного двухобмоточного трансформатора (рис.1.16). Обе обмотки намотаны по левой винтовой линии, имеют одинаковое направление намотки. У обеих обмоток начала A и a находятся сверху, а концы X и x – снизу, т.е. одинаково промаркированы.

Будем считать ЭДС наводимую в обмотке, положительной, если она действует от конца обмотки к ее началу. В обеих обмотках ЭДС наводит один и тот же основной магнитный поток. А одинаковые направления намотки и одинаковая маркировка позволяют утверждать, что названные ЭДС этих обмоток в каждый момент времени действуют в одинаковом направлении, т.е. одновременно положительны или отрицательны.

ЭДС E_A и E_a совпадают по фазе. Угол между векторами ЭДС первичной и вторичной обмоток равен нулю. Условное обозначение $I/I-0$ (нулевая группа).

Если в одной из обмоток сменить маркировку на обратную (рис.1) или изменить направление намотки, то в каждый момент времени в обмотках будут действовать ЭДС противоположные по знаку.

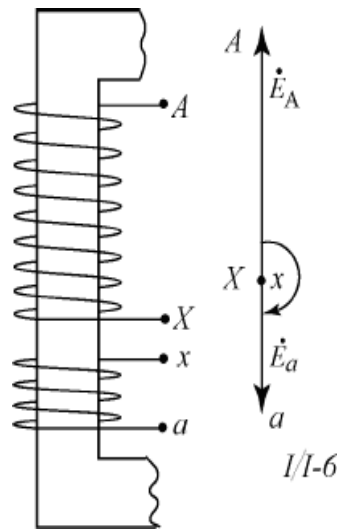


Рис. 2

Угол между векторами ЭДС первичной и вторичной обмоток равен 180° . Для определения группы соединения обмоток этот угол необходимо разделить на 30° . Условное обозначение $I/I-6$ (шестая группа).

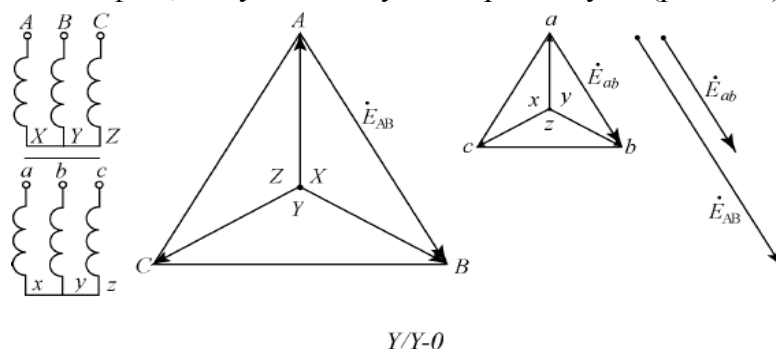
Таким образом, в однофазных трансформаторах возможно получить только две группы соединения обмоток: нулевую и шестую.

Рассмотрим теперь трехфазный двухобмоточный трансформатор с соединением обмоток ВН и НН в “звезду” при выполнении следующих условий:

1. Обмотки имеют одинаковое направление намотки;
2. Обмотки одинаково промаркированы;
3. Одноименные фазы обмоток находятся на общих стержнях.

Сначала строится векторная диаграмма для обмотки ВН, произвольно выбрав направление первой из фазных ЭДС, соблюдая для остальных фазных ЭДС чередование фаз. При построении векторной диаграммы для обмотки НН направление каждого из векторов зависит от векторной диаграммы обмотки ВН.

Тогда все вектора фазных ЭДС попарно E_A и E_a , E_B и E_b , E_C и E_c а также все вектора линейных ЭДС попарно E_{AB} и E_{ab} , E_{BC} и E_{bc} , E_{CA} и E_{ca} в каждый момент времени совпадают по фазе, т.е. угол между ними равен нулю (рис.1.18).



Y/Y-0

Рис.3

В трехфазных трансформаторах группа соединения обмоток определяется по углу между одноименными линейными ЭДС. В рассматриваемом случае условное обозначение $Y/Y-0$ (нулевая группа).

К каким изменениям приведет, например, смена маркировки обмотки НН в круговую на один шаг? Векторную диаграмму ЭДС для обмотки ВН оставляем изображенной без изменения. Векторная диаграмма ЭДС обмотки НН будет иной. Фаза a -х обмотки НН расположена теперь на общем стержне с фазой B -Y обмотки ВН и вследствие того, что фазы имеют одинаковое направление намотки и одинаково

промаркированы, магнитный поток стержня наводит в этих фазах одинаковые по направлению ЭДС. Вектор E_a обмотки НН необходимо изобразить совпадающим по фазе с вектором E_B обмотки ВН.

Подобными будут рассуждения при обосновании направлений векторов E_b и E_c . В итоге векторная диаграмма ЭДС обмотки НН повернулась по часовой стрелке на 120° по сравнению с предыдущей векторной диаграммой. Угол между одноименными линейными ЭДС определяется по часовой стрелке от вектора ЭДС обмотки ВН до вектора ЭДС обмотки НН. Угол равен 120° , группа четвертая. Условное обозначение $Y/Y-4$.

Изменение маркировки обмотки НН в круговую на один шаг изменит группу соединения обмоток на четыре, будет получена третья группа. Если вновь сменить маркировку обмотки НН в круговую на один шаг, то группа соединения обмоток вновь изменится на четыре, будет получена седьмая группа.

Не трудно предположить и подтвердить, что у трехфазного трансформатора при различных схемах соединения обмоток изменения маркировки одной из обмоток позволяет получить шесть нечетных групп: 11, 3, 7, 5, 9, 1.

ГОСТом предусматривается изготовление трансформаторов со следующими схемами и группами соединения обмоток: 1. Y/Y_n-0 ; 2. Δ/Y_n-11 ; 3. $Y/\Delta-11$; 4. $Y_n/\Delta-11$; 5. Y/Z_n-11 .

При схеме соединения “зигзаг” каждая фаза обмотки разделяется на две части, которые располагаются на разных стержнях (одна на основном, а вторая на стержне соседней, в порядке чередования, фазы). При этом вторая половина каждой фазы подключается по отношению к первой половине встречно. Это позволяет получить ЭДС фазы в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при согласном включении.

Однако при встречном включении половин фаз ЭДС каждой фазы будет все же меньше в 1,15 раза, чем при расположении половин фаз на одном стержне. Поэтому расход обмоточного провода при соединении по схеме “зигзаг” увеличивается на 15%. Это соединение используется только в случае, когда возможна несимметричная нагрузка фаз с наличием токов нулевой последовательности.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6

ОЗНОКОМЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: **Цель работы:** ознакомление характеристики машины постоянного тока с независимым возбуждением в различных режимах работы

Изучить принцип действия, конструкцию и свойства генераторов постоянного тока с параллельным и независимым возбуждением. Ознакомиться с методикой снятия основных характеристик генераторов: холостого хода, внешней, регулировочной. Выявить по снятым характеристикам рабочие свойства генераторов.

Используя рекомендованную литературу, ознакомьтесь с принципом действия, конструкцией и назначением основных частей генератора. Обратите внимание на конструкцию таких элементов, как якорь, коллектор, обмотка возбуждения. Четко уясните процессы, происходящие в генераторе и роль коллектора. Уясните процесс самовозбуждения. Выясните, какие характеристики определяют эксплуатационные

возможности генератора и почему они имеют такой вид.

Генератор постоянного тока (рис. 1) состоит из двух частей: неподвижной и вращающейся. Неподвижная часть (статор) является остовом машины и одновременно служит для создания магнитного потока. Во вращающейся части, называемой якорем (ротором), индуцируется электродвижущая сила - ЭДС.

Неподвижная часть состоит из станины (1), главных полюсов (2) с обмоткой возбуждения (3) и дополнительных полюсов (4), уменьшаемых искрение под щетками.

Якорь имеет сердечник (5), набираемый из тонких стальных листов, обмотку якоря (6), заложенную в пазы сердечника и коллектор (7). На поверхность коллектора наложены угольно-графитовые щетки (8), обеспечивающие скользящий контакт с обмоткой вращающегося якоря. Коллектор имеет форму цилиндра и выполняется из изолированных медных пластин - ламелей - к которым подсоединены секции якорной обмотки.

Вращаясь вместе с обмоткой, коллектор выполняет роль механического выпрямителя.

Обмотка возбуждения (3) создает главный магнитный поток Φ полюсов. В генераторах с независимым возбуждением она питается от постороннего источника постоянного тока (выпрямителя, аккумулятора и т.п.). С генератором с параллельным возбуждением обмотка главных полюсов подключена к главным щеткам, т.е. параллельно цепи якоря. В связи с этим для возникновения магнитного потока и ЭДС необходим хотя бы слабый остаточный магнитный поток. Благодаря наличию остаточного магнетизма возникает процесс самовозбуждения генератора.

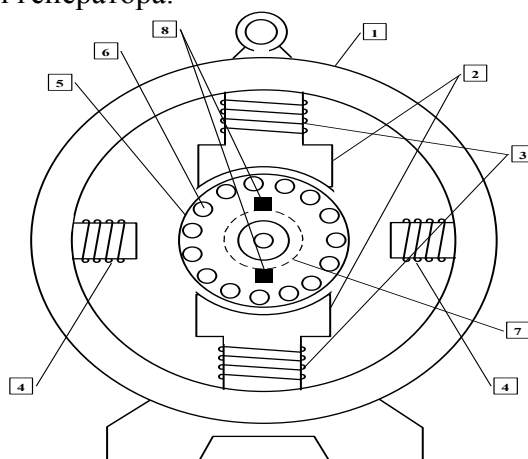


Рис. 1. Конструкция генератора постоянного тока

1. Станина.
2. Главные полюса.
3. Обмотка возбуждения.
4. Дополнительные полюса.
5. Сердечник.
6. Обмотка якоря.
7. Коллектор.
8. Угольно-графитовые щетки.

ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, определяется следующим выражением:

$$E = \frac{p N}{2 \pi a} \Phi \Omega , \quad (1)$$

где: p - число пар полюсов генератора;

N - число активных проводников обмотки якоря;

a - число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

Ω - угловая частота вращения в (рад/с)

Φ - магнитный поток полюса.

Обычно используется сокращенная запись выражения (1):

$$E = C_E \Phi \Omega , \quad (2)$$

где $C_E = \frac{p N}{2 \pi a}$ - конструктивная постоянная.

Поскольку в паспорте генератора приведена частота вращения n , выраженная в (об/мин), то на практике удобнее пользоваться следующей формулой для ЭДС:

Генератор с независимым возбуждением

Подготовьте установку для снятия характеристик генератора с независимым возбуждением. Схема установки приведена на рис. 6. Клеммы источника независимого возбуждения "0-250 В" расположены на панели питания в правой части стенда. Для регулирования тока возбуждения предусмотрен резистор R_p (можно использовать также рукоятку ЛАТР на панели блока питания).

Характеристика холостого хода ничем не отличается от ранее снятой, поэтому она не входит в программу испытаний.

Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $I_B = \text{const}$.

1. Пустите в ход приводной двигатель АД автоматом АП и кнопкой "Пуск".
2. Включите источник независимого возбуждения. Для этого нажмите левую кнопку "Пуск" на панели питания (загорится третья сигнальная лампа).
3. Резистором R_p или рукояткой регулятора установите такой ток возбуждения, при котором напряжение холостого хода генератора U_0 будет равно заданному в опыте 2.

Контрольные вопросы

В чем состоит назначение генератора постоянного тока и на чем основан принцип его работы?

Для каких целей предназначены обмотка возбуждения, якорь, коллектор, щетки?

В чем различие между генераторами с параллельным и независимым возбуждением?

Чем объясняется, что характеристика холостого хода имеет две ветви?

В чем состоит процесс самовозбуждения генератора?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №7

ОЗНОКОМЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы; Ознакомиться с конструкцией и принципом работы двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Ознакомиться со схемой включения двигателя параллельного возбуждения. Ознакомиться со способами регулирования частоты вращения двигателя.

Краткие теоретические сведения

В двигателе параллельного возбуждения обмотку возбуждения включают параллельно обмотке якоря (см. рис. 1). Величина тока в обмотке возбуждения I_B меньше тока якоря I_A и составляет 2 – 5% от I . Эксплуатационные свойства двигателей оцениваются рабочими, механическими и регулировочными характеристиками.

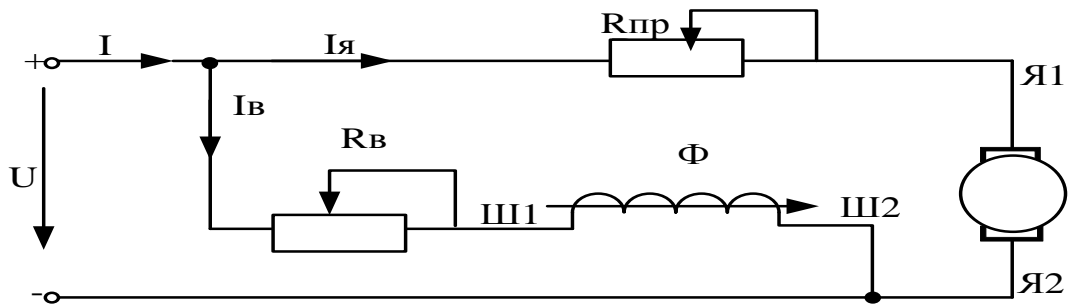


Рис. 1

На рис. 8 показаны *рабочие* характеристики двигателя параллельного возбуждения: зависимость частоты вращения n , величины тока якоря $I_{я}$, вращающего момента M , коэффициента полезного действия η и потребляемой из сети мощности P_1 от полезной мощности P_2 при неизменных напряжении U и токе возбуждения $I_{в}$.

Двигатель включается в сеть постоянного тока с напряжением $U = 110$ В. В цепь якоря Я1-Я2 двигателя включается трехступенчатый пуско-регулирующий реостат Кш>, величина сопротивления которого изменяется с помощью промежуточных реле 1К - 3К, вольтметр V на 150 В для измерения входного напряжения, амперметр А1 на 30 А для измерения тока якоря.

В цепь возбуждения двигателя включен реостат Кв для изменения тока возбуждения, а его величина измеряется амперметром А2 с номинальным током 2 А.

В качестве нагрузки для двигателя используется генератор постоянного тока независимого возбуждения (НГ). В цепь якоря нагрузочного генератора включен реостат Кн и амперметр М для определения момента нагрузки. При наличии дополнительных полюсов, компенсирующих реакцию якоря, и неизменном токе возбуждения генератора НГ его электромагнитный момент, являющийся тормозным, линейно зависит от тока якоря $M = C_m \Phi I_a$. Поэтому шкала амперметра М проградуирована в единицах момента.

Тахогенератор ТГ предназначен для измерения частоты вращения двигателя. Он представляет собой маломощный генератор постоянного тока независимого возбуждения, работающий в режиме холостого хода

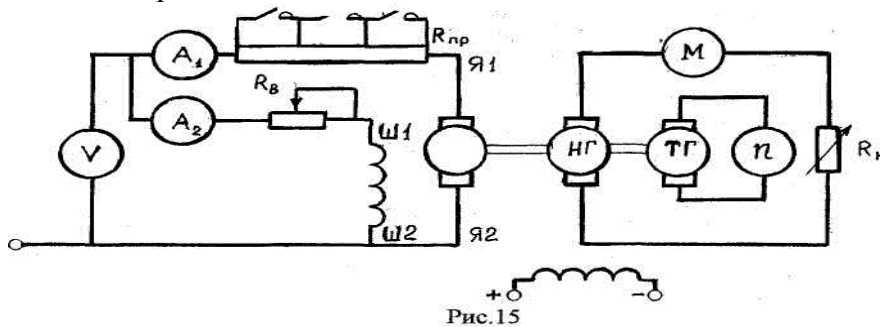


Рис. 15

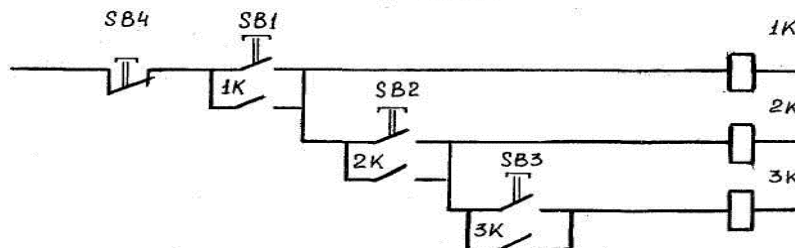


Рис. 2. Схема управления пусковым реостатом: 8В1 - 8В3 - кнопки для выведения ступеней пуско-регулирующего реостата Кш>; 5В4 - кнопка для введения Кш> в цепь якоря; 1К - 3К - катушки и контакты контакторов цепи управления

Порядок выполнения работы

1. Путем внешнего осмотра, по плакатам и рисункам ознакомиться с конструкцией

двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и записать его паспортные данные в табл.1.

Таблица1

Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/мин	R_{Σ} , Ом	η_n , %
П-32	1,5	110	8	145	0,7	

2. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2).

3. Ознакомиться со схемой управления (рис.2). Убедиться в правильном положении ручки реостата в цепи возбуждения, $K_v = 0$.

4. После проверки цепи преподавателем произвести пуск двигателя. Для этого включить напряжение, затем последовательным нажатием кнопок 8В1, 8В2, 8В3 вывести пусковой реостат $K_{пр}$.

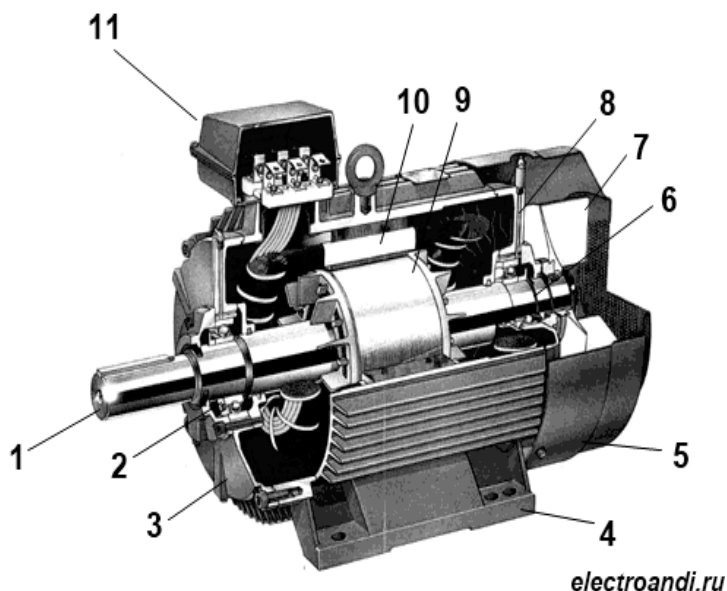
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №8

ОЗНОКОМЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы ознакомление с конструкцией асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель - это асинхронная машина, предназначенная для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. Само слово "асинхронный" означает не одновременный. При этом имеется в виду, что у асинхронных двигателей частота вращения магнитного поля статора всегда больше частоты вращения ротора. Работают асинхронные двигатели, как понятно из определения, от сети переменного тока.

Устройство

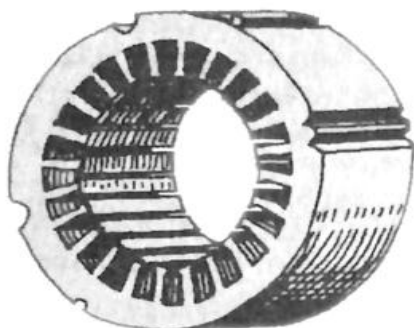


electroandi.ru

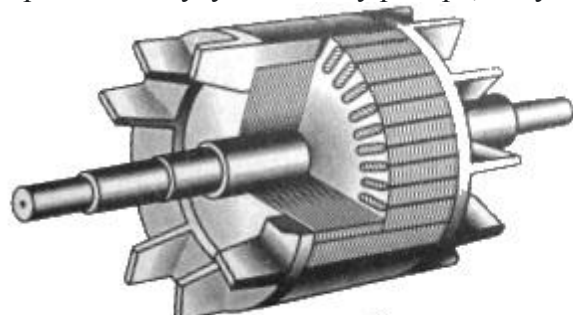
На рисунке: 1 - вал, 2,6 - подшипники, 3,8 - подшипниковые щиты, 4 - лапы, 5 - кожух вентилятора, 7 - крыльчатка вентилятора, 9 - короткозамкнутый ротор, 10 - статор, 11 - коробка выводов.

Основными частями асинхронного двигателя являются статор (10) и ротор (9).

Статор имеет цилиндрическую форму, и собирается из листов стали. В пазах сердечника а, которые выполнены из обмоточного провода. Оси относительно друг друга на угол 120° . В зависимости от \dot{m} моток соединяются треугольником или звездой.



Роторы асинхронного двигателя бывают двух видов: короткозамкнутый и фазный ротор. **Короткозамкнутый ротор** представляет собой сердечник, набранный из листов стали. В пазы этого сердечника заливается расплавленный алюминий, в результате чего образуются стержни, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется "беличьей клеткой". В двигателях большой мощности вместо алюминия может применяться медь. Беличья клетка представляет собой короткозамкнутую обмотку ротора, откуда собственно название.



короткозамкнутый ротор



беличья клетка

Фазный ротор имеет трёхфазную обмотку, которая практически не отличается от обмотки статора. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединяются в звезду, а свободные концы подводятся к контактным кольцам. С помощью щёток, которые подключены к кольцам, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор. Это нужно для того, чтобы можно было изменять активное сопротивление в цепи ротора, потому что это способствует уменьшению больших пусковых токов. Подробнее о фазном роторе можно прочитать в статье - [асинхронный двигатель с фазным ротором](#).



Принцип работы

При подаче к обмотке статора напряжения, в каждой фазе создаётся магнитный поток, который изменяется с частотой подаваемого напряжения. Эти магнитные потоки сдвинуты относительно друг друга на 120° , как во времени, так и в пространстве. Результирующий магнитный поток оказывается при этом вращающимся.

Результирующий магнитный поток статора вращается и тем самым создаёт в проводниках ротора ЭДС. Так как обмотка ротора, имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который в свою очередь взаимодействуя с магнитным потоком статора, создаёт пусковой момент двигателя, стремящийся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Когда он достигает значения, тормозного момента ротора, а затем превышает его, ротор начинает вращаться. При этом возникает так называемое скольжение.

Скольжение s - это величина, которая показывает, насколько синхронная частота n_1 магнитного поля статора больше, чем частота вращения ротора n_2 , в

$$s = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \cdot 100 \%$$

процентном соотношении.

Скольжение это крайне важная величина. В начальный момент времени она равна единице, но по мере возрастания частоты вращения n_2 ротора относительная разность частот $n_1 - n_2$ становится меньше, вследствие чего уменьшаются ЭДС и ток в проводниках ротора, что влечёт за собой уменьшение вращающего момента. В режиме холостого хода, когда двигатель работает без нагрузки на валу, скольжение минимально, но с увеличением

статического момента, оно возрастает до величины $s_{кр}$ -критического скольжения. Если двигатель превысит это значение, то может произойти так называемое опрокидывание двигателя, и привести в последствии к его нестабильной работе. Значения скольжения лежит в диапазоне от 0 до 1, для асинхронных двигателей общего назначения оно составляет в номинальном режиме - 1 - 8 %.

Как только наступит равновесие между электромагнитным моментом, вызывающим вращение ротора и тормозным моментом создаваемым нагрузкой на валу двигателя процессы изменения величин прекратятся.

Выходит, что принцип работы асинхронного двигателя заключается *во взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и токов, которые наводятся этим магнитным полем в роторе*. Причём вращающий момент может возникнуть только в том случае, если существует разность частот вращения магнитных полей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №9

ОЗНОКОМЛЕНИЕ ПРИНЦИПОМ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы ознакомление принципом работы асинхронных двигателей

Обмотка статора создает вращающийся магнитный поток Φ_1 , который при своем вращении пересекает проводники обмотки статора и ротора, индуцируя в них ЭДС e_1, e_2 . ЭДС обмотки статора e_1 , являясь ЭДС самоиндукции, действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает ее ток.

Если обмотку фазного ротора замкнуть, то в ней под действием ЭДС e_2 возникнет ток i_2 , частота которого при неподвижном роторе равна первичной частоте f_1 (частоте тока обмотки статора). При трехфазной обмотке ротора в ней индуцируется трехфазный ток, который создает вращающийся магнитный поток ротора Φ_2 .

При неподвижном роторе вращающийся магнитный поток ротора Φ_2 , вследствие равенства числа полюсов обмоток, имеет частоту и направление вращения такие же, как у магнитного потока статора

$$n_2 = f_2 / p = f_1 / p = n_1, \text{ об/с.}$$

Потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно и образуют результирующий вращающийся магнитный поток Φ .

При короткозамкнутом роторе, в отличие от фазного ротора, в стержнях его обмотки индуцируется многофазная система токов i_2 . Эти токи также создают вращающийся магнитный поток Φ_2 , у которого число полюсов, частота и направление вращения являются такими же, как у потока фазного ротора.

ЭДС, индуцируемые в обмотках статора и ротора вращающимся магнитным потоком, можно рассматривать как действие результирующего магнитного потока Φ .

В результате взаимодействия проводников с током, размещенных в пазах ротора, с результирующим магнитным потоком Φ возникают действующие на проводники ротора механические силы F и вращающий электромагнитный момент M .

Изобразим на рис.2.7 упрощенную развертку двухполюсной асинхронной машины. В верхней части рисунка представлена вращающаяся слева направо синусоидальная волна индукции B результирующего магнитного потока Φ , и направления ЭДС e_2 в проводниках обмотки неподвижного короткозамкнутого ротора, индуцируемых этим потоком. Ниже показаны направления токов проводников i_2 и действующих на них сил F , когда угол сдвига фаз ψ_2 между e_2 и i_2 равен нулю и 90 эл.град.

При $\psi_2 = 0$ все механические силы действуют в сторону вращения магнитного потока. Поэтому создается электромагнитный вращающий момент, действующий в сторону вращения магнитного потока.

При $\psi_2 = 90^\circ$ механические силы действуют на проводники обмотки ротора таким образом, что не создается результирующий электромагнитный вращающий момент. Это

позволяет сделать вывод, что вращающий момент создается только активной составляющей тока ротора

$$I_{2a} = I_2 \cdot \cos \Psi_2.$$

Так как обмотка ротора асинхронного двигателя обладает активным и индуктивным сопротивлениями, то в первый момент пуска (при неподвижном роторе) всегда $0 < \Psi_2 < 90^\circ$, в результате создается электромагнитный вращающий момент. Если он больше статического момента на валу, ротор придет во вращение в том же направлении, что и поток, но с несколько меньшей частотой вращения n . Причина этого заключается в том, что ротор является симметричным в электрическом и магнитном отношении. Поэтому не создается “реактивный” момент, как в синхронных машинах, и синхронизма вращения ротора и потока нет. Это и заставило назвать рассматриваемые электрические машины асинхронными.

Относительная разность частот вращения потока и ротора называется скольжением и может рассчитываться в относительных единицах или в процентах

$$S = (n_1 - n) / n_1, \text{ о.е.},$$

$$S = (n_1 - n) \cdot 100 / n_1, \%$$

Частота вращения ротора определяется через скольжение в о.е. следующим образом $n = (1 - S) \cdot n_1$, через скольжение в % $n = (100 - S) \cdot n_1 / 100$.

В первый момент пуска (при неподвижном роторе) скольжение равно единице. Если ротор вращать синхронно с потоком $n = n_1$, вращающееся магнитное поле относительно ротора неподвижно и скольжение равно нулю. ЭДС в обмотке ротора в этом случае не индуцируется, ток в обмотке ротора отсутствует, поэтому электромагнитный момент не создается.

Таким образом, асинхронная машина в режиме двигателя обладает частотой вращения ротора и скольжением в следующих диапазонах:

$$0 < n < n_1; 0 < S < 1.$$

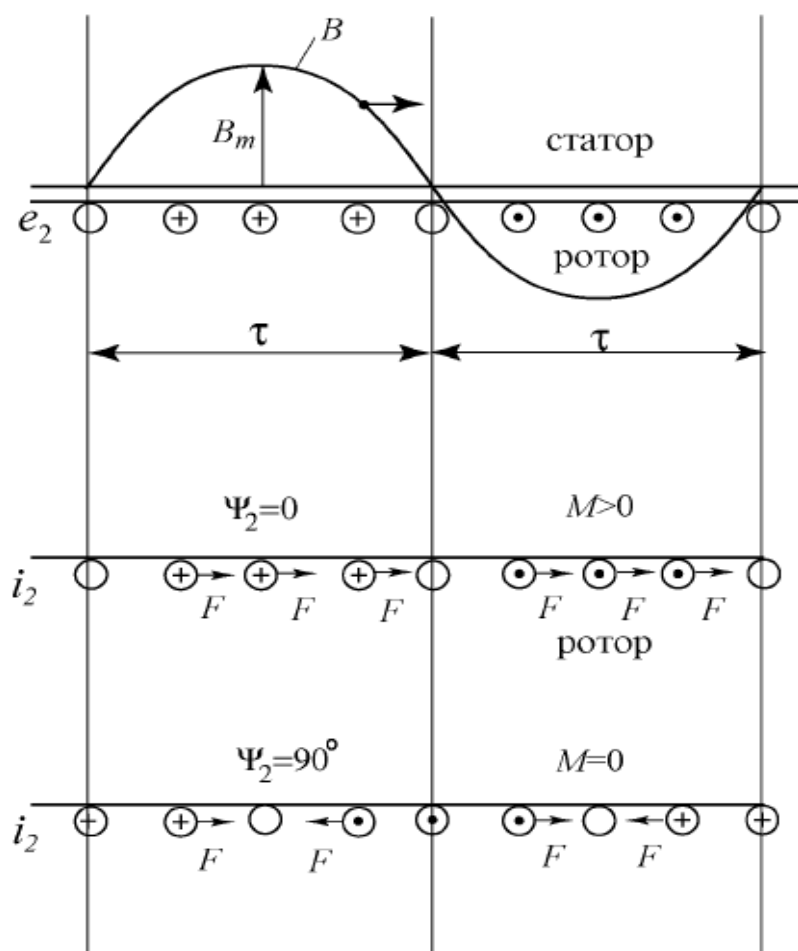


Рис. 2.7

Ранее было отмечено, что потоки обмоток статора и ротора в первый момент пуска (при неподвижном роторе) вращаются синхронно. Рассмотрим, изменится ли ситуация при вращающемся роторе.

При вращении ротора в сторону вращения потока частота пересечения потоком проводников обмотки ротора пропорциональна разности их частот вращения ($n_1 - n$), поэтому частота тока в обмотке ротора будет равна $f_2 = p \cdot (n_1 - n) = S \cdot p \cdot n_1 = S \cdot f_1$.

Т.е. частота тока в обмотке ротора пропорциональна скольжению.

При частоте тока в обмотке ротора $f_2 < f_1$ частота вращения поля ротора относительно самого ротора n_{2p} также меньше n_1

$$n_{2p} = f_2 / p = S \cdot n_1$$

Частота вращения потока обмотки ротора относительно статора

$$n_{2c} = n + n_{2p} = (1 - S) \cdot n_1 + S \cdot n_1 = n_1,$$

т.е. частота вращения потока обмотки ротора относительно статора при любой частоте вращения ротора n равна частоте вращения потока обмотки статора n_1 .

К выше сказанному остается добавить следующее. Если ротор асинхронной машины с помощью дополнительного устройства привести во вращение в направлении вращения потока с частотой выше синхронной ($n > n_1$), то ротор будет обгонять поток и направления индуцируемых в обмотке ротора ЭДС и токов изменятся на обратные. Также изменятся на обратные направления сил F и электромагнитного момент M .

Момент теперь будет тормозящим, а машина будет работать в режиме генератора и отдавать активную мощность в сеть. Скольжение для генераторного режима $S < 0$.

Если ротор вращать в направлении обратном направлению вращения потока, то

направления e_2 , i_2 , F сохраняются такими же, как в двигательном режиме. Электромагнитный момент M будет действовать в направлении вращения потока, но будет теперь тормозить вращение ротора. Этот режим асинхронной машины называется режимом противовключения или режимом электромагнитного тормоза. В этом режиме $S > 1$.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №10 ОЗНОКОМЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЕЙ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы ознакомление с конструкцией синхронных двигателей

Синхронной электрической машиной называется машина переменного тока, в которой частота вращения ротора n равна частоте вращения магнитного потока статора n_1 и, следовательно, определяется частотой тока сети f_1 , т.е. $n = 60 \cdot f_1 / p$, об/мин, где p - число пар полюсов обмотки статора.

Синхронный генератор является основным типом генератора переменного тока, применяемым в процессе производства электроэнергии (рис.3.1).

Синхронные двигатели в отличие от асинхронных двигателей имеют строго постоянную частоту вращения, не зависящую от нагрузки.

Преимуществом синхронных двигателей является возможность регулирования их коэффициента мощности и коэффициента мощности электрической системы.

Синхронные машины имеют еще одно весьма важное применение - в качестве синхронного компенсатора, дающего возможность улучшить коэффициент мощности электрической системы.

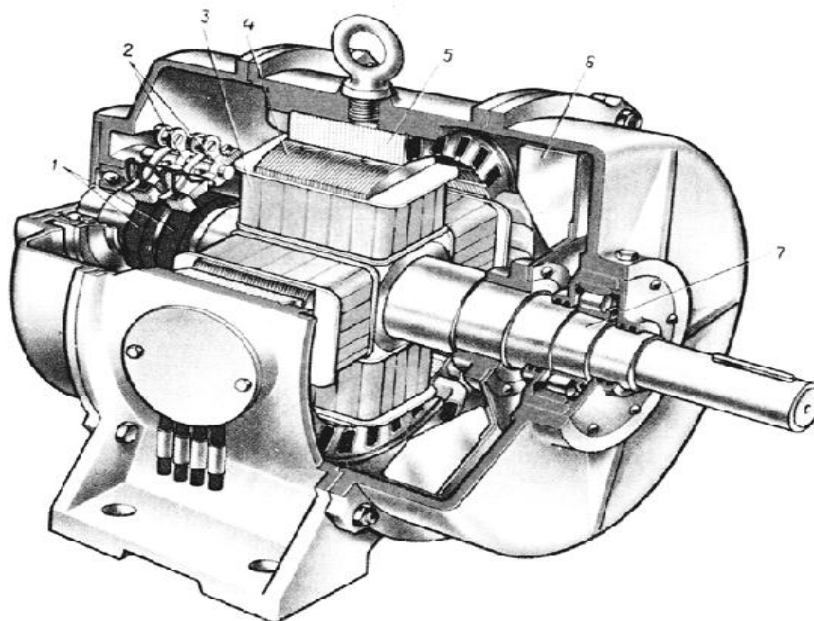


Рис..1

1 - контактные кольца; 2 - щеткодержатели; 3 - полюсная катушка ротора; 4 - полюсный наконечник; 5 - сердечник статора; 6 - вентилятор; 7 - вал

По своей конструкции синхронные машины подразделяются на явнополюсные и неявнополюсные (рис.2).

Статор синхронной машины имеет такое же устройство, как и статор асинхронной машины и называется якорем. Трехфазная обмотка якоря синхронной машины выполняется с таким же числом полюсов, как и ротор. На рис.2 условно показаны только клеммы начал фаз A , B , C обмотки якоря.

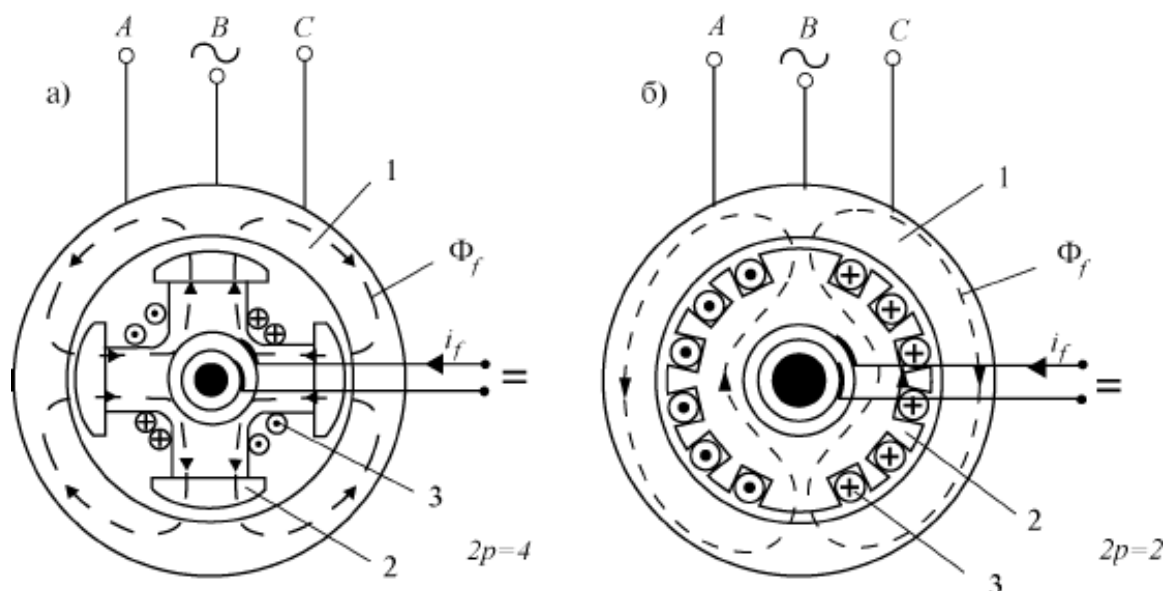


Рис.2 1 - статор (якорь); 2 - ротор (индуктор); 3 - обмотка возбуждения

Ротор синхронной машины имеет обмотку возбуждения, подключенную через два контактных кольца и щетки к источнику постоянного тока. Назначение обмотки возбуждения – создание в машине основного магнитного потока. Ротор вместе с обмоткой возбуждения называется индуктором.

Если ротор синхронной машины привести во вращение с частотой вращения n и возбудить его, то поток возбуждения Φ_f будет индуцировать в обмотке якоря ЭДС с частотой $f_1 = p \cdot n / 60$.

ЭДС обмотки якоря составляют симметричную трехфазную систему и при подключении к обмотке якоря генератора симметричной нагрузки, эта обмотка нагрузится симметричной системой токов. Машина при этом будет работать в режиме генератора.

При нагрузке обмотка якоря создает свое вращающееся магнитное поле, которое вращается в том же направлении, что и ротор с частотой $n_1 = 60 f_1 / p = n$, об/мин. Поля якоря и ротора вращаются с одинаковой частотой и неподвижны друг относительно друга.

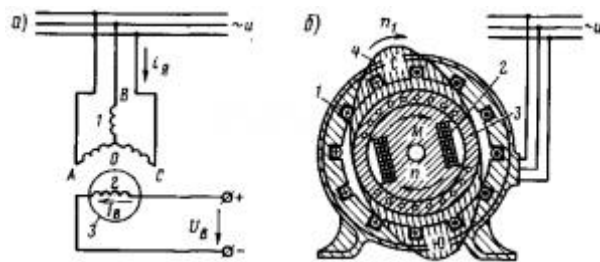
Синхронная машина может работать и в качестве двигателя, если подвести к обмотке якоря трехфазный ток из сети. В этом случае в результате взаимодействия магнитных полей якоря и ротора, поле якоря увлекает за собой ротор. При этом ротор вращается в том же направлении, что и поле якоря.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №11 ОЗНОКОМЛЕНИЕ ПРИНЦИПОМ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы ознакомление принципом работы синхронных двигателей Синхронный двигатель.

Принцип действия и устройство. Синхронный двигатель может работать в качестве генератора и двигателя. Синхронный двигатель выполнен так же, как и синхронный генератор. Его обмотка якоря I (рис. 291, а) подключена к источнику трехфазного переменного тока; в обмотку возбуждения 2 подается от постороннего источника постоянный ток. Благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля 4, созданного трехфазной обмоткой якоря, и поля, созданного обмоткой возбуждения, возникает электромагнитный момент М (рис. 1,б), приводящий ротор 3 во вращение. Однако в синхронном двигателе в отличие от асинхронного ротор будет разгоняться до частоты вращения $n = n_1$, с которой вращается магнитное поле

Рис. 1. Электрическая (а) и электромагнитная (б) схемы синхронного электродвигателя



Объясняется это тем, что ток в обмотку ротора подается от постороннего источника, а не индуцируется в нем магнитным полем статора и, следовательно, не зависит от частоты вращения вала двигателя. Характерной особенностью синхронного двигателя является постоянная частота вращения его ротора независимо от нагрузки.

Электромагнитный момент. Электромагнитный момент в синхронном двигателе возникает в результате взаимодействия магнитного потока ротора (потока возбуждения Φ_B) с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным током, протекающим по обмотке якоря (поток якоря Φ_A). При холостом ходе машины оси магнитных полей статора и ротора совпадают (рис. 1, а). Поэтому электромагнитные силы I , возникающие между «полюсами» статора и полюсами ротора, направлены радиально (рис. 1, б) и электромагнитный момент машины равен нулю. При работе машины в двигательном режиме (рис. 1, в и г) ее ротор под действием приложенного к валу внешнего нагрузочного момента $M_{вн}$ смещается на некоторый угол θ против направления вращения. В этом случае в результате электромагнитного взаимодействия между ротором и статором создаются электромагнитные силы I , направленные по направлению вращения, т. е. образуется вращающий электромагнитный момент M , который стремится преодолеть действие внешнего момента $M_{вн}$. Максимум момента M_{max} соответствует углу, когда оси полюсов ротора расположены между осями «полюсов» статора.

Если нагрузочный момент $M_{вн}$, приложенный к валу электродвигателя, станет больше M_{max} , то двигатель под действием внешнего момента $M_{вн}$ останавливается; при этом по обмотке якоря неподвижного двигателя будет протекать очень большой ток. Этот режим называется выпадением из синхронизма, он является аварийным и не должен допускаться.

При работе машины в генераторном режиме (рис. 1, д и е) ротор под действием приложенного к валу внешнего момента $M_{вн}$ смещается на угол φ по направлению вращения. При этом создаются электромагнитные силы, направленные против вращения, т. е. образуется тормозной электромагнитный момент M . Таким образом, при изменении значения и направления внешнего момента на валу ротора $M_{вн}$ изменяется лишь угол φ между осями полей статора и ротора, в то время как в асинхронной машине в этом случае изменяется частота вращения ротора.

Пуск в ход и регулирование частоты вращения. Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если подключить обмотку якоря к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока электромагнитный момент будет дважды менять свое направление, т. е. средний момент за период будет равен нулю. Следовательно, для пуска в ход синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной. Для этой цели применяют метод асинхронного пуска. Синхронный двигатель пускают в ход как асинхронный, для чего его снабжают специальной короткозамкнутой пусковой обмоткой 3 (рис. 3). В полюсные наконечники ротора 2 синхронного двигателя закладывают медные или латунные стержни, замкнутые накоротко двумя торцовыми кольцами. Пусковая обмотка выполнена подобно беличьей клетке асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора. В некоторых двигателях специальная короткозамкнутая обмотка

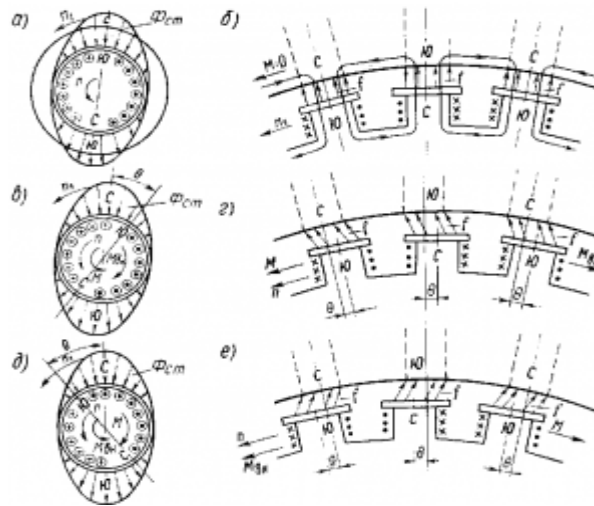


Рис. 3. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя;

Рис. 4. Электромагнитный момент в синхронной машине, образующийся в различных режимах

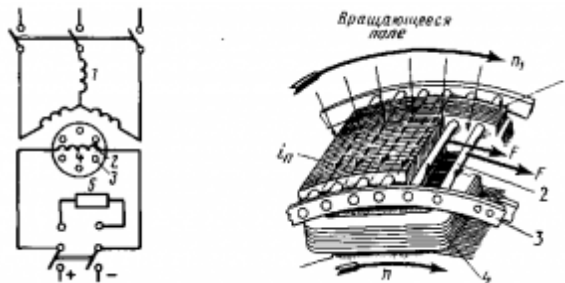


Рис. 4 Схема асинхронного пуска синхронного двигателя;

Рис. 4 Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя: 1 — ротор; 2 — стержни; 3 — кольцо; 4 — обмотка возбуждения

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №12

ПРИВЕДЕНИЕ СИЛ, МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ И МАССА К ВАЛУ ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы приведение сил, моментов инерции и масса к валу двигателя

Автоматизированным электроприводом называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и управления их технологическими процессами, состоящая из задающего, управляющего, силового преобразовательного, электродвигательного и механического передаточного устройств.

В тех случаях, когда нет жестких требований к качеству управления движением исполнительных органов рабочей машины, используются более простые привода, состоящие из силового выключателя и электродвигателя.

С точки зрения способов распределения механической энергии разнообразные ЭП можно разделить на 3 вида: групповой, индивидуальный, взаимосвязанный.

Групповой ЭП применялся на первых этапах развития техники привода и обеспечивал движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной и той же машины. Передача механической энергии и ее распределение в этом случае осуществлялось от одного двигателя с помощью трансмиссий. Очевидные недостатки такого привода – громоздкость механических связей, сложность управления движением каждого исполнительного органа. Вследствие этого групповой ЭП в настоящее время почти не применяется..

В *индивидуальном* ЭП управление движением каждого исполнительного органа обеспечивается отдельным двигателем, что упрощает механические передачи, облегчает управление движением, позволяет достичь более высоких энергетических показателей.

Взаимосвязанный ЭП имеет два или несколько электрически или механически связанных между собой двигателей. Примером взаимосвязанного ЭП может служить привод цепного конвейера большой протяженности. Исполнительным органом такого конвейера служит цепь, приводимая в движение несколькими двигателями, установленными по длине конвейера. Взаимосвязанный ЭП широко применяется в транспортных установках, бумагоделательных машинах, текстильных агрегатах, прокатных станах металлургического производства и т.д. Одной из разновидностей взаимосвязанного ЭП является многодвигательный привод – это электропривод, в котором несколько двигателей работают на общий вал. В большинстве случаев, как отмечалось выше, двигатель приводит в движение исполнительный орган механизма через механическое передаточное устройство, отдельные элементы которого движутся с различными скоростями.

При инженерных расчетах в большинстве практических случаев можно принять механические связи абсолютно жесткими (не учитывать упругость звеньев и наличие зазоров в передачах). Тогда движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов, и достаточно рассматривать один элемент. В качестве такого элемента обычно принимают вал двигателя. В результате расчетную схему механической части привода можно свести к одному обобщенному механическому звену. В качестве него обычно принимают вал двигателя.

Заключается в том, что эти массы и моменты инерции заменяются одним эквивалентным моментом инерции на валу двигателя. При этом необходимым условием приведения является равенство кинетической энергии, в определенном эквивалентном моменте энергии на валу двигателя, сумме кинетической энергии двигателя всех движущих масс в механической части привода т.е.

$$J \frac{w^2}{2} = J_{\partial в} \frac{w^2}{2} + \sum_{i=1}^n J_i \frac{w_i^2}{2} + \sum_{j=1}^q \frac{m_j V_j^2}{2}$$

w -скорость вращения вала двигателя

$$J = J_{\partial в} + \sum_{i=1}^n \frac{J_i}{i_i^2} + \sum_{j=1}^q m_j \rho_j^2$$

J – приведенный момент инерции к валу двигателя;

$J_{\partial в}$ м·– момент инерции ротора двигателя (кг²)

Если в каталоге указана величина махового момента, то в системе СИ момент инерции будет:

$$J_{\partial в} = \frac{GD^2}{4}$$

J_i – момент инерции i -ого вращающего механизма,

m_j – масса j -поступательно-движущегося элемента (кг),

$$i_{pi} = \frac{w}{w_i}$$

i_{pi} - передаточное отношение редукторов от вала двигателя до вращательного элемента,

$$\rho_j = \frac{V_j}{w}$$

ρ_j - радиус приведения поступательно-движущегося элемента.

Приведение статических нагрузок и инерционных масс к поступательному движению.

При приведении вращающего движения к поступательному, на рабочем органе величина приведенного усилия будет зависеть от направления передачи энергии.

1 случай: передача энергии от двигателя к поступательно движущимся элементам привода

$$M\omega = \frac{F_p V_{po}}{\eta}; F_p = M \frac{\omega}{V_{po}} \eta = M \frac{\eta}{\rho_{po}}$$

2 случай: направление передачи механической энергии от механизма к валу двигателя.

$$M\omega = F_p V_{po} \eta; F_p = \frac{M}{\rho_{po} \eta};$$

F_p – приведенное усилие,

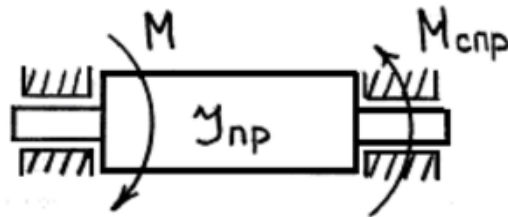
M – момент, создаваемый на валу двигателя,

ρ_{po} – радиус приведенного поступательно-движущегося элемента к валу.

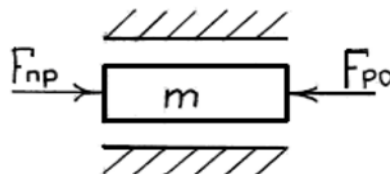
В случае приведения маховых масс к рабочему органу, максимальные массы заменяются одной результирующей массой на рабочем органе, которая определяется из условия сохранения полного запаса кинетической энергии.

Понятие о приведенном механическом звене и одномассовой системе электропривода.

Из приведенного выше соотношения следует, что при приведении инерционных масс и моментов сопротивления к вращающему движению, сложная в кинематическом отношении механическая часть электропривода, заменяется эквивалентным или приведенным механическим звеном. Это звено представляет собой твердое тело, вращающееся вокруг осевой линии со скоростью двигателя, которая обладает моментом инерции равной J_{np} и находится под воздействием момента двигателя и приведенного момента сопротивления.

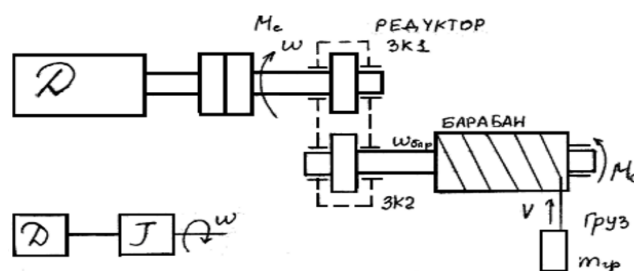


В случае приведения инерционных масс и момента сопротивления к поступательному движению приведенное механическое звено представляет собой поступательно-движущуюся массу, к которой приложены две силы – приведенная и сила рабочего органа.



Таким образом полученная простая модель механической части электропривода в виде одномассовой системы, справедлива для механических звеньев без упругости и зазоров. Такое представление о кинетической системе электропривода (в виде одномассовой системы) может быть сохранено в большинстве случаев для механических звеньев, обладающих небольшими зазорами и незначительной механической упругостью.

Пример: привести статический момент и момент инерции к валу кинематической схемы грузоподъемной лебедки.



$$G = m_{2p}g; M_{сбар} = m_{2p}gR_{бар}; i = \frac{\omega}{\omega_{бар}}$$

Активный статический момент на валу барабана создается силой тяжести груза на крюке лебедки.

Момент, прикладываемый к валу лебедки. Для случая подъема груза, приведенный статический момент на барабане к валу двигателя будет равен

$$M_c = \frac{M_{c,бар}}{i\eta_{ред}} = \frac{m_{зр}gR_{бар}}{i\eta_{ред}}$$

Приведенный момент инерции поступательного движения к вращающему движению барабана определяется:

$$\frac{m_{зр}V^2}{2} = \frac{J_{зр}\omega^2}{2}; J_{зр} = \frac{m_{зр}R_{б}^2}{i^2}; \text{ так как } V = \omega_{бар}R_{бар}.$$

Тогда суммарный приведенный момент энергии к валу двигателя равен:

$$J_{\Sigma} = J_{рот} + J_{зк1} + \frac{J_{зк1} + J_{бар} + m_{зр}R_{бар}^2}{i^2}$$

Движение электроприводов определяется действием 2-х моментов - момента развиваемого движением и момента сопротивления. Различают два типа момента сопротивления - реактивный и активный. Реактивный момент сопротивления появляется только вследствие движения привода. Это противоречит реакции механического звена на движение.

К реактивным моментам относят: момент трения, момент на рабочем органе, на металлорежущих станках, вентиляторах и т.д.

Реактивный момент сопротивления всегда направлен против движения, т.е. имеет противоположный знак направления скорости. При изменении направления вращения меняется и знак реактивного момента. Элемент, создающий реактивный момент всегда является потребителем энергии.



Активный момент сопротивления появляется независимо от движения электропривода и создается посторонним источником механической энергии.

Например: момент от веса падающего груза. Момент создается потоком воды и т.д.

Направление активного момента не зависит от направления движения привода, т.е. при изменении направления вращения привода знак активного момента привода не меняется. Элемент, создающий активный момент, может быть как источником, так и потребителем механической энергии.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 13 ЗАПУСК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ, ОСТАНОВКИ ВРЕМЕНИ И КОЛИЧЕСТВА ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы; изучение запуск электроприводов, остановки времени и количества оптимальной передачи

. Это наиболее простой способ пуска. Обмотка статора включается непосредственно в сеть на номинальное напряжение (рис. 1).

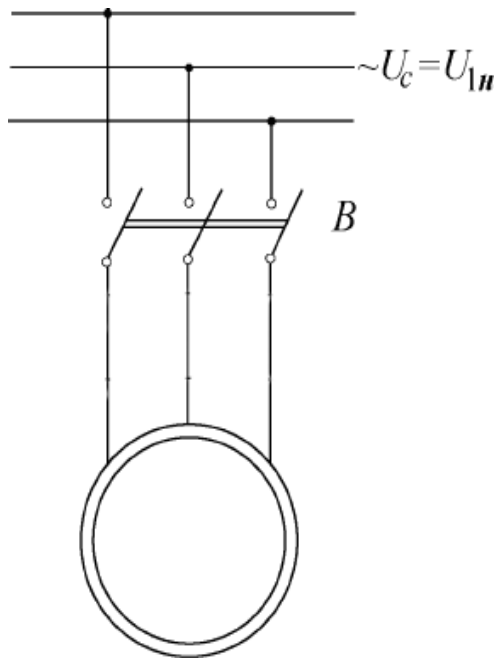


Рис. 1

Пусковой ток равен

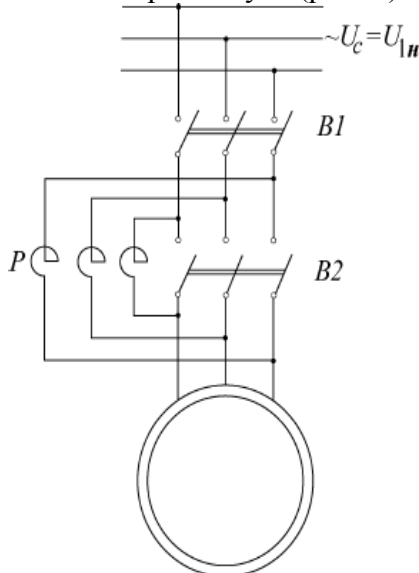
$$I_{1п} = U_{1н} / \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = (4 \div 7) I_{1н}$$

Прямой пуск возможен, когда сеть мощная и пусковой ток АД не вызывает недопустимо больших падений напряжения в сети (не более 10 ÷ 15 %).

Три способа пуска при пониженном напряжении. Они применяются, если по условию допустимого падения напряжения в сети прямой пуск невозможен, и обладают одинаковым недостатком – уменьшением пускового момента ($M_{п} \propto U_1^2$).

Поэтому эти способы реализуются, когда возможен пуск АД на холостом ходу или под неполной нагрузкой, что чаще встречается у мощных высоковольтных двигателей.

Реакторный пуск (рис.2.). Сначала включается B1. Напряжение



подается на обмотку статора через трехфазный реактор P, поэтому обмотка статора запитана пониженным напряжением.

Сопrotивление реактора x_p выбирается таким образом, чтобы напряжение на фазе обмотки статора было не менее 65% номинального.

После достижения АД установившейся частоты вращения включается выключатель B2, который шунтирует реактор P, в результате чего на клеммы обмотки статора подается полное напряжение сети, равное номинальному напряжению обмотки статора.

Пусковой ток при реакторном пуске равен

$$I_{1р} = U_{1н} / \sqrt{r_e^2 + (x_e + x_p)^2}$$

и уменьшился по сравнению с пусковым током при прямом пуске в

$$\frac{I_{1р}}{I_{1п}} = \sqrt{\frac{r_e^2 + (x_e + x_p)^2}{r_e^2 + x_e^2}} \text{ раз.}$$

Рис.2.

Во столько же раз уменьшается напряжение на клеммах обмотки статора в начальный момент пуска.

Начальный пусковой момент при реакторном пуске $M_{п}$ уменьшается по сравнению с

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{пр}}} = \frac{r_{\kappa}^2 + (x_{\kappa} + x_p)^2}{r_{\kappa}^2 + x_{\kappa}^2} \text{ раз.}$$

начальным пусковым моментом при прямом пуске $M_{\text{п}}$ в

В приведенных соотношениях не учитывается изменение величины x_e при пуске. При необходимости это нетрудно сделать.

Автотрансформаторный пуск (рис.3). Сначала включаются $B1$ и

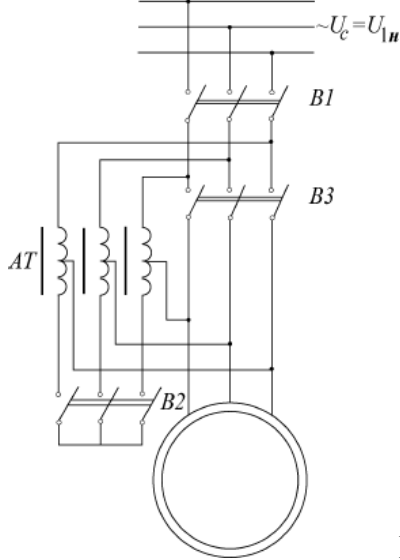


Рис.3

$B2$ и на обмотку статора АД через автотрансформатор АТ подается пониженное до $(0,55 \div 0,73)U_H$ напряжение. После достижения АД установившейся частоты вращения выключатель $B2$ отключается и на обмотку статора подается напряжение через часть обмотки АТ, который в этом случае работает как реактор. Затем включается $B3$, и на клеммы обмотки статора подается полное напряжение сети, равное номинальному напряжению обмотки статора. Если пусковой автотрансформатор понижает пусковое напряжение АД в k_{AT} раз (k_{AT} - коэффициент трансформации автотрансформатора), то пусковой ток АД и ток на низкой стороне автотрансформатора уменьшатся также в k_{AT} раз. Пусковой момент $M_{\text{п}}$,

пропорциональный квадрату напряжения на клеммах обмотки статора АД, уменьшится в k_{AT}^2 раз.

Пусковой ток на высокой стороне автотрансформатора и ток в сети уменьшатся также в k_{AT}^2 раз.

Таким образом, при автотрансформаторном пуске пусковой момент АД и пусковой ток в сети уменьшаются в одинаковое число раз. При реакторном пуске пусковой ток АД является также пусковым током в сети, а пусковой момент $M_{\text{п}}$ уменьшается быстрее пускового тока. Поэтому при одинаковых значениях пускового тока в сети при автотрансформаторном пуске пусковой момент будет больше.

Несмотря на это преимущество автотрансформаторного пуска перед реакторным, достигнутое ценой значительного усложнения и удорожания пусковой аппаратуры, этот пуск применяется реже реакторного в том случае, когда реакторный пуск не обеспечивает необходимого пускового момента.

Пуск переключением “звезда-треугольник” (рис.4).

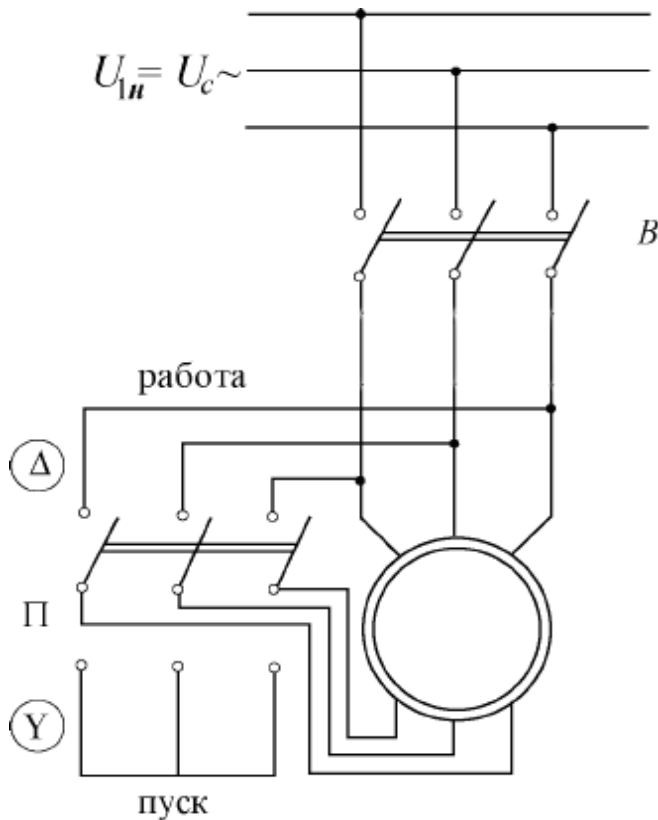


Рис.4

Этот способ пуска ранее широко применялся при пуске низковольтных АД, но в связи с увеличением мощности сетей потерял свое прежнее значение, используется сравнительно редко. Для его применения необходимо, чтобы были выведены все шесть клемм обмотки статора, линейное напряжение сети равно номинальному фазному напряжению обмотки статора. В первый момент пуска обмотка статора соединена в “звезду”, а при достижении устойчивой частоты вращения схема соединения обмотки изменяется переключателем П на “треугольник”. При таком способе пуска на фазы обмотки статора подается напряжение уменьшенное в раз по сравнению с номинальным, пусковой момент уменьшается в 3 раза, пусковой ток в фазах уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а пусковой ток в сети в 3 раза. Таким образом, рассматриваемый способ пуска равноценен автотрансформаторному

пуску при $k_{AT} = \sqrt{3}$, однако при пусковых переключениях возникают коммутационные перенапряжения в обмотке статора АД. В цепь обмотки ротора включается пусковой реостат, который имеет обычно несколько ступеней и рассчитывается на кратковременное протекание тока, рис.6. Начальный пусковой момент может быть увеличен до максимального момента двигателя $M_{II} = M_{max}$ при определенном сопротивлении пускового реостата $R_{II} = R_{II(m)}$, рис.7. Величину сопротивления пускового реостата $R_{II(m)}$ можно определить приравняв критическое скольжение единице, т.е.

$$s_{кр} = c_1 \cdot (r'_2 + R'_{II(m)}) / \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 \cdot x'_{\sigma 2})^2} = 1$$

Приведенное активное сопротивление фазы пускового реостата

$$R'_{II(m)} = \left(\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 \cdot x'_{\sigma 2})^2} - c_1 \cdot r'_2 \right) / c_1$$

$$\text{Действительное сопротивление пускового реостата } R_{II(m)} = R'_{II(m)} \cdot (w_2 \cdot k_{об2} / w_1 \cdot k_{об1})^2$$

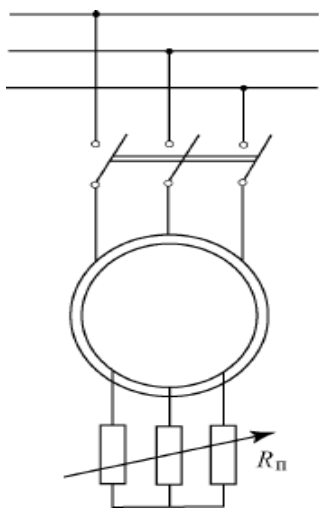


Рис 6

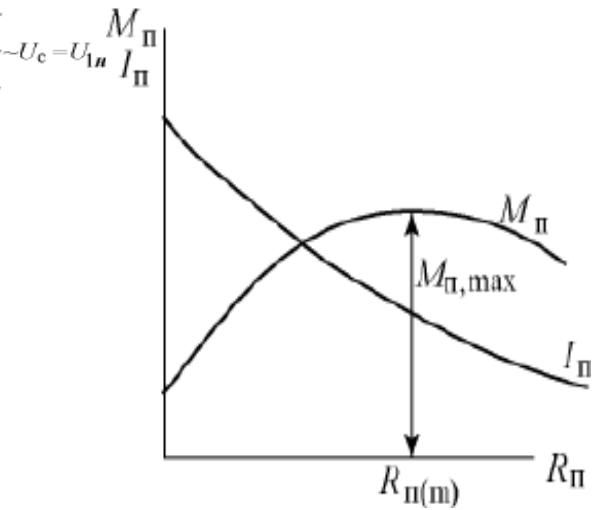


Рис. 7

Обычно выбирают $R_{п} \leq R_{п(m)}$. По мере увеличения частоты вращения ротора сопротивление пускового реостата уменьшают, переходя с одной его ступени на другую. Ступени пускового реостата

рассчитывают так, чтобы при переключениях вращающий момент превышал статический момент.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №14 ПОСТРОЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

Эксплуатационные свойства двигателей определяются его рабочими характеристиками, наибольший интерес из которых представляют зависимости частоты вращения n и вращающего момента M от полезной мощности на валу двигателя, т.е. $n, M = f(P_2)$.

Рассмотрим $n = f(P_2)$ для различных двигателей. Частота вращения якоря равна
$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{c_e \cdot \Phi_\delta}$$
 На рис.4.20,а представлена зависимость $n = f(P_2)$ для двигателя параллельного возбуждения (1). Падающий характер обусловлен преобладанием падения напряжения в цепи обмотки якоря над размагничивающим действием реакции якоря, иначе зависимость $n = f(P_2)$ будет иметь возрастающий характер (2), что недопустимо с точки зрения устойчивой работы двигателя. Поэтому для обеспечения падающего характера применяют легкую последовательную обмотку, называемую стабилизирующей. Эта обмотка включается таким образом, чтобы компенсировать размагничивающее действие реакции якоря.

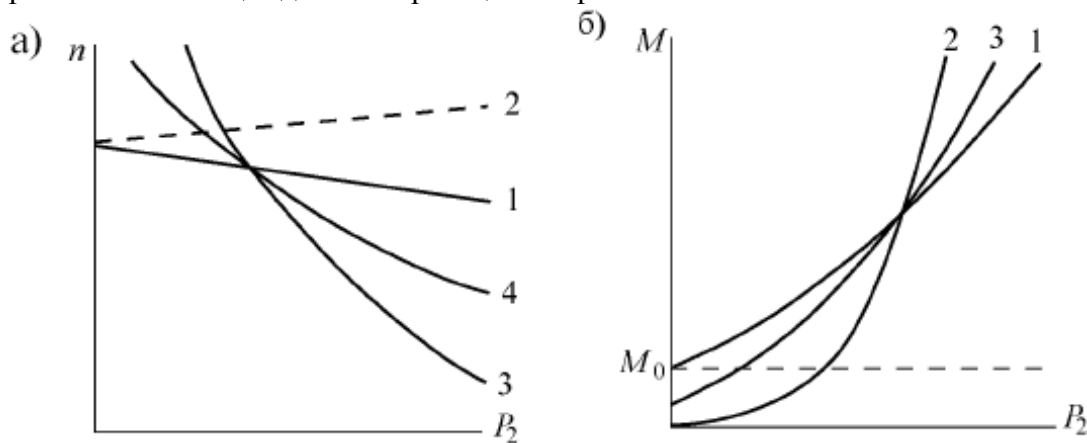


Рис.1

Для двигателя последовательного возбуждения магнитный поток зависит от тока нагрузки, так как $i_\delta = I_a$. С учетом этого частота вращения якоря будет равна

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{c'_e \cdot I_a}, \text{ где } c'_e = k \cdot c_e, \text{ } k - \text{ коэффициент пропорциональности. Анализ зависимости}$$

$n = f(P_2)$ для двигателя последовательного возбуждения (3) показывает, что при малых нагрузках (менее 20 % от номинальной) резко увеличивается частота вращения n и может достигнуть опасных значений. Поэтому работа двигателей в режиме холостого хода недопустима.

Для двигателя смешанного возбуждения зависимость $n = f(P_2)$ определяется соотношением МДС параллельной и последовательной обмоток. При сильной параллельной обмотке возбуждения зависимость (4) будет ближе к характеристике (1), при сильной последовательной обмотке возбуждения – ближе к характеристике (3). В общем случае зависимость (4) располагается между характеристиками (1) и (3).

Анализ зависимости $M = f(P_2)$ для различных двигателей. Для этого используем выражение для момента $M = c_m \cdot \Phi_\delta \cdot I_a$.

На рис.1,б представлена зависимость $M = f(P_2)$ для двигателя параллельного

возбуждения (1). При $n = const$ $M = f(P_2)$ была бы линейной. Однако с увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается, и поэтому зависимость $M = f(P_2)$ - нелинейная, где M_0 – момент холостого хода. Для двигателя последовательного возбуждения значение электромагнитного момента можно определить по формуле

$$M = c_m \cdot \Phi_\delta \cdot I_a = c'_m \cdot I_a^2,$$

где $\Phi_\delta = k \cdot I_a$, $c'_m = c_m \cdot k$.

На рис.1,б приведена зависимость $M = f(P_2)$ для двигателя последовательного возбуждения (2). При больших нагрузках двигателя наступает насыщение магнитной системы, магнитный поток практически не меняется и характеристика $M = f(P_2)$ становится линейной.

Для двигателя смешанного возбуждения (3) зависимость будет располагаться между (1) и (2).

Механические характеристики. Механические характеристики двигателей принято подразделять на естественные и искусственные. Естественная характеристика соответствует номинальному напряжению питания и отсутствию добавочных сопротивлений в цепях обмоток двигателя. Если хотя бы одно из перечисленных условий не выполняется, характеристика называется искусственной. Уравнения электромеханической $\omega=f(I_a)$ и механической $\omega=f(M_{эм.})$ характеристик могут быть найдены из уравнения равновесия ЭДС и напряжений для якорной цепи двигателя, записанного на основании второго закона Кирхгофа

$$U_a = E_a + I_a(R_a + R_d), \quad (1)$$

где R_a – активное сопротивление якоря

Преобразуя (1) с учетом (2), получим уравнение электромеханической характеристики

$$\omega = (U_a - I_a(R_a + R_d)) / k\Phi \quad (2)$$

В соответствии с (4) ток якоря $I_a = M_{эм.} / k\Phi$ и выражение (2) преобразуется в уравнение механической характеристики

$$\omega = U_a / k\Phi - (R_a + R_d) / (k\Phi)^2 M_{эм.} \quad (3)$$

Это уравнение можно представить в виде $\omega = \omega_{о.ид.} - \Delta \omega$ где

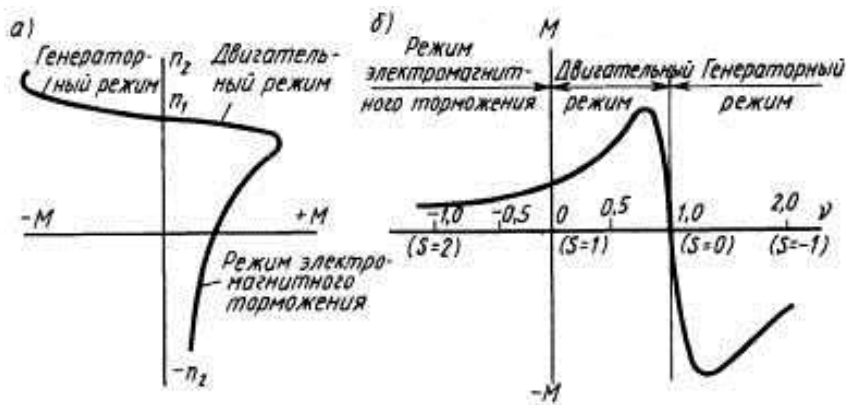
$$\omega_{о.ид.} = U_a / k\Phi \quad (4)$$

$\omega_{о.ид.}$ – угловая скорость идеального холостого хода (при $I_a = 0$ и, соответственно, $M_{эм.} = 0$); $\Delta \omega = M_{эм.} [(R_a + R_d) / (k\Phi)^2]$ – уменьшение угловой скорости, обусловленное нагрузкой на валу двигателя и пропорциональное сопротивлению якорной цепи.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №15 ПОСТРОЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Цель работы – изучение построения естественной механической характеристики асинхронного электроприводов

Наибольшее значение для оценки свойств асинхронного двигателя имеет *механическая характеристика*, представляющая собой графическую зависимость частоты вращения ротора n_2 от вращающего момента M , т.е. $n_2 = f(M)$



Иногда эта зависимость выражается в виде $M=f(s)$

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (1)$$

Использование понятий относительной частоты вращения и скольжения придает механической характеристике более общий характер.

Зависимость электромагнитного момента от скольжения.

Для построения механической характеристики можно воспользоваться формулой

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot r_2' / s}{\omega_0 ((r_1' + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2)} \quad (2)$$

Задавая значения s , при известных параметрах двигателя можно определить M и построить искомую механическую характеристику.

Механическая характеристика (рис. 1, а, б) имеет максимум момента при частоте вращения $n_2 \approx (0,8 \dots 0,9)n_1$; при частоте вращения $n_2 = n_1$ момент вращения $M=0$, а при $n_2 = 0$ пусковой момент составляет $M_{\text{п}} = (0,3 \dots 0,7)M_{\text{max}}$.

Скольжение, при котором момент имеет максимальное значение (критическое скольжение), можно определить из (2), взяв производную от момента по скольжению dM/ds и приравняв ее нулю.

Решая уравнение относительно s , получаем критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (3)$$

Значение максимального момента получим из (2), подставив значение s_k из (5.47):

$$M_{\text{max}} = \frac{\pm 3U_1^2}{2\omega_0 (\sqrt{r_1'^2 + (x_1 + x_2')^2} \pm r_1')} \quad (4)$$

Знак «+» относится к двигательному режиму, «-» — к генераторному.

Из уравнения (4) видно, что максимальный момент не зависит от активного сопротивления ротора. Это сопротивление определяет лишь скольжение при максимальном моменте.

Для перехода к характеристике $n_2=f(M)$ следует применить формулу

$$n_2 = \frac{60 f}{p} \cdot (1 - s) \quad (5)$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя имеет два участка — нерабочий (разгонный) АВ и рабочий ВСД (рис. 8.8).

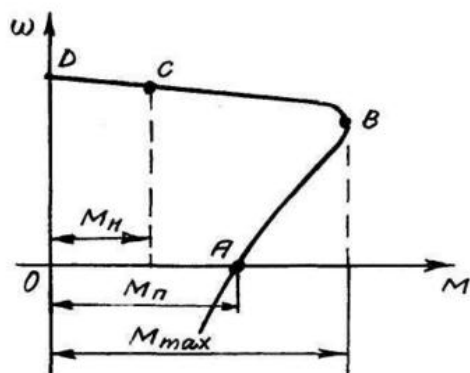


Рис. 10.5 Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

При пуске двигатель развивает пусковой момент M^n (отрезок OA), после чего разгоняется по траектории ABC до точки C. При этом на участке AB одновременно увеличиваются как скорость, так и момент, в точке B двигатель развивает максимальный момент M^{\max} . На участке BC скорость продолжает увеличиваться, а момент уменьшается, до номинального (точка C). На участке BC **двигатель перегружен**, т.к. в любой точке этого участка электромагнитный момент двигателя больше номинального ($M^{\max} \gg M^n$).

В нормальных условиях двигатель работает на участке CD, жесткость которого $\beta = \Delta M / \Delta \omega < 10\%$.

Это означает, что при изменении момента в широких пределах скорость двигателя изменяется незначительно.

Асинхронные двигатели нашли самое широкое применение на судах с электростанцией на переменном токе.

Промышленность выпускает специально для судов асинхронные двигатели разных серий, например, 4А...ОМ2 (четвертая серия асинхронных двигателей), МАП (морской асинхронный полусопереключаемый), МТФ (с фазным ротором) и др.

При этом двигатели серии 4А – односкоростные, серии МАП – двух- и трехскоростные, серии МТФ – число скоростей определяется схемой управления (до 5 скоростей).

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №16 РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы расчет сопротивления пуска электроприводов постоянного тока

Машиной постоянного тока называют электрическую машину с коммутатором-коллектором. Они находят широкое применение, как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов.

Двигатели постоянного тока обладают большой глубиной регулирования частоты вращения, сохраняют во всем диапазоне регулирования высокий к.п.д. и могут иметь механические характеристики, отвечающие специальным требованиям.

Для лучшего понимания ДПТ с различными системами самовозбуждения в части их применения целесообразно рассмотреть зависимости величины момента $M = M_p(I_A)$ и частоты вращения $n = n_p(I_A)$ от тока якоря I_A для параллельного возбуждения и аналогичных характеристик $M = f(I_A)$ и $n = f(I_A)$ для последовательно возбуждения.

В двигателях с параллельным возбуждением результирующий магнитный поток в пределах номинальной нагрузки остается постоянным, поэтому $M_p = k_p I_A$ и $n_p = n_0 - b I_A$, где k_p и b - константы. В двигателях же с последовательным возбуждением магнитный поток пропорционален току поэтому $M_s = k_s I_A^2$ и $n_s = a M^{0.5} + d$ (здесь в этих зависимостях k_s и d – то же константы).

Таким образом, двигатель с параллельным возбуждением обладает жесткой характеристикой $n = n_0 - qM$, а двигатель с последовательным возбуждением – мягкой.

Поэтому для механизмов, работающих с ударной нагрузкой (пресс, штамповочное устройство, стартер, электропоезд, и др.) пригоден двигатель с последовательным возбуждением и непригоден двигатель с параллельным возбуждением, так как в нем с увеличением нагрузки происходит пропорциональное увеличение тока. Для механизмов же, требующих жесткую механическую характеристику (металлорежущие станки и др.), пригоден двигатель с параллельным возбуждением.

На практике используют три способа пуска двигателей постоянного тока: прямой пуск, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети; реостатный, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока; путем плавного повышения питающего напряжения, подаваемого на обмотку якоря.

Двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование скорости вращения. Диапазон регулирования ограничен. Увеличение скорости вращения приводит к ухудшению условий коммутации, а уменьшение скорости вызывает увеличение двигателя. Обычно отношение максимальной скорости вращения к минимальной не превышает 3.

Регулирование частоты вращения осуществляют тремя способами: посредством добавочного реостата в цепи обмотки якоря; изменением магнитного потока; изменением питающего напряжения.

Пример решения задачи по теме

Двигатель параллельного возбуждения, присоединенный к сети с напряжением $U_n=220$ В, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_n=20,5$ А, а на холостом ходу - $I_0=2,35$ А. Сопротивление обмотки якоря $r_{я}=0,75$ Ом, а в цепи возбуждения $r_{в}=258$ Ом. Номинальная скорость вращения $n_n=1025$ об/мин.

Определить номинальную мощность двигателя (на валу), номинальный к.п.д., номинальный вращающий момент, пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление пускового реостата для условия $I_n=2,5I$ и пусковой момент при пуске двигателя с реостатом. При решении принять, что магнитные и механические потери не зависят от нагрузки.

Решение.

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_n = P_{1n} - \square ДР,$$

Где $\square ДР$, – потери в двигателе; P_{1n} – потребляемая мощность:

$$P_{1n} = U_n \cdot I_n = 220 \cdot 20,5 = 4510 \text{ Вт} = 4,51 \text{ кВт}.$$

Для определения потерь в цепи якоря и цепи возбуждения надо знать ток в цепи якоря $I_{я.н}$ и ток возбуждения $I_{в}$:

$$I_{в} = U_n / r_{в} = 220 / 258 = 0,85 \text{ А}.$$

$$I_{я.н} = I_n - I_{в} = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ А}.$$

Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения:

$$ДР_{я.н} = r_{я} \cdot I_{я.н}^2 = 0,75 \cdot 19,65^2 = 290 \text{ Вт};$$

$$ДР_{в} = r_{в} \cdot I_{в}^2 = 258 \cdot 0,85^2 = 186 \text{ Вт}.$$

Магнитные и механические потери:

$$P_m = P_0 - P_{я.0} - P_{в},$$

где $P_0 = U_n \cdot I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517$ Вт; $ДР_{я.0}$ – потребляемая мощность при холостом ходе двигателя:

$$ДР_{я.0} = r_{я} \cdot (I_0 - I_{в})^2 = 0,75 \cdot (2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ Вт};$$

$$DP_M = 517 - 1,7 - 186 = 329,3 \text{ Вт};$$

$$\Sigma DP_H = 290 + 186 + 329,3 = 805,3 \text{ Вт};$$

$$P_H = 4510 - 805,3 = 3704,7 \text{ Вт} = 3,71 \text{ кВт}.$$

Номинальный к.п.д.

$$\eta_H = P_H / P_{1H} \cdot 100 = 3,71 / 4,51 = 82,2\%,$$

Номинальный вращающий момент

$$M_H = 9550 \cdot (P_H / \eta_H) = 9550 \cdot (3,71 / 1025) = 34,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Пусковой ток двигателя при пуске без реостата

$$I_{\Pi} = U_H / r_{я} = 220 / 0,75 = 293 \text{ А}.$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_{\Pi} = 2,5 \cdot I_{я.н} = U_H / (r_{я} + r_p),$$

Откуда

$$r_p = (U_H / I_{\Pi}) - r_{я} = (220 / 2,5 \cdot 19,65) - 0,75 = 3,73 \text{ Ом}.$$

Определяем пусковой момент двигателя при пуске с реостатом. Известно, что вращающий момент двигателя определяется уравнением

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я}$$

Для режима номинальной нагрузки это выражение принимает вид

$$M_H = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я.н},$$

а для пускового режима

$$M_{\Pi} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\Pi}.$$

Полагая магнитный поток в двигателе постоянным, возьмем отношение моментов

$$M_H / M_{\Pi} = I_{я.н} / I_{\Pi}.$$

Откуда

$$M_{\Pi} = M_H \cdot (I_{\Pi} / I_{я.н}) = 34,6 \cdot (2,5 \cdot 19,65) / 19,65 = 86,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №17

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы расчет сопротивления пуска электроприводов переменного тока

Асинхронной называется электрическая машина, у которой одна совокупность обмоток получает питание от электрической сети переменного тока с постоянной частотой ω_1 , а другая совокупность обмоток замыкается накоротко или на электрические сопротивления. Токи во вторичных обмотках асинхронной машины появляются в результате электромагнитной индукции. Их частота является функцией вращающего момента, приложенного к валу.

Скорость вращения ротора ω_2 отличается от частоты сети. Величина $s = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1$ называется скольжением. Теоретически она может принимать любое значение. При этом изменяется режим работы асинхронной машины: генератор ($s < 0$), двигатель ($0 < s < 1$), тормоз ($s > 1$).

Пуск асинхронного двигателя осуществляют подключением его статорных обмоток непосредственно к сетевому напряжению (прямой пуск), либо к напряжению, пониженному на время пуска одним из известных способов (переключением с “треугольника” на “звезду”, включением в цепь статора добавочных резисторов или реакторов, с помощью понижающего автотрансформатора).

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя осуществляют следующими способами: изменением частоты сети; изменением числа полюсов и изменением скольжения. Последний способ обычно реализуют за счет изменения потерь в цепи ротора с помощью реостата либо за счет изменения питающего напряжения.

В процессе эксплуатации асинхронные двигатели могут работать в диапазоне нагрузок (механических мощностей) от холостого хода до номинальной. При этом изменяются его технические показатели (КПД η , коэффициент мощности $\cos \varphi$, потребляемая мощность P_1 , момент M , скольжение s , частота вращения n).

Зависимости параметров от нагрузки называются рабочими характеристиками. Типичные рабочие характеристики асинхронных двигателей приведены на рис.7. При этом индексом “н” обозначены параметры, соответствующие номинальному режиму работы.

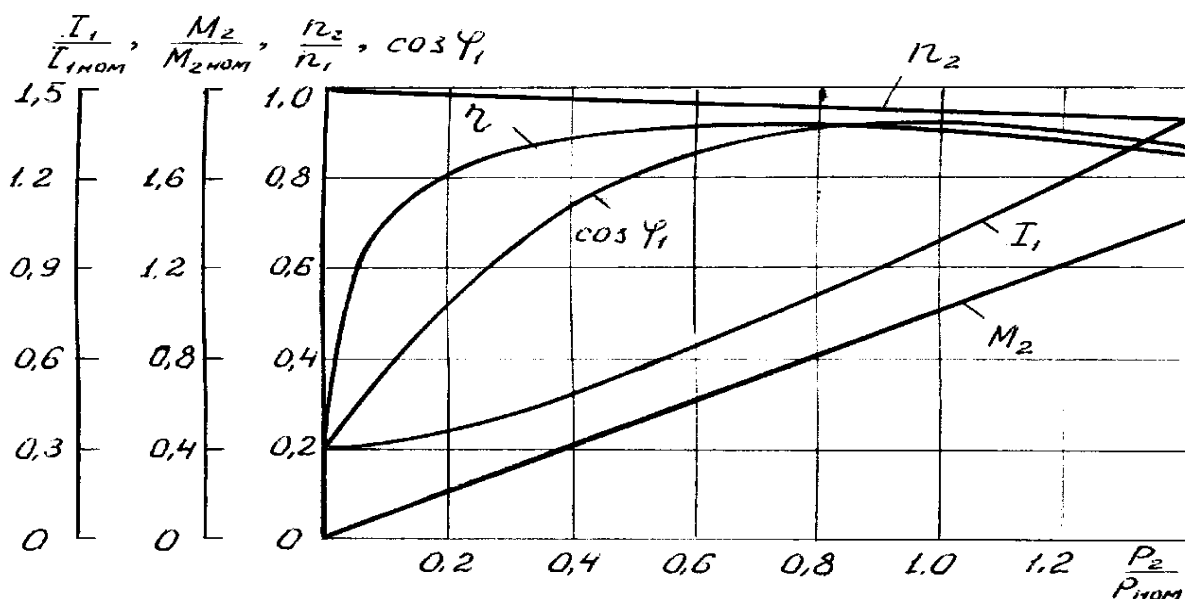


Рис. 1. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Пример решения задачи по теме 3.

Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_n=10$ кВт, номинальное напряжение $U_n=380$ В, номинальное число оборотов ротора $n_n=1420$ об/мин, номинальный к.п.д. $\eta_n=0.84$ и номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_n=0.85$. Кратность пускового тока $I_n/I_n=6.5$, а перегрузочная способность двигателя $\lambda=1.8$. Определить: потребляемую мощность; номинальный и максимальный (критический) вращающие моменты; пусковой ток; номинальное и критическое скольжения. Построить механические характеристики $M=f(s)$ и $n=f(M)$.

Решение.

Потребляемая мощность

$$P_{1n} = P_n / \eta_n = 10 / 0,84 = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_n = 9550 \cdot P_n / n_n = 9550 \cdot 10 / 1420 = 67,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_M = \lambda M_n = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_n = P_{1n} / (\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n) = 11,9 \cdot 1000 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,84) = 21,2 \text{ А;}$$

$$I_p = 6,5 \cdot I_n = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ А.}$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$s_n = (n_0 - n_n) / n_0 = (1500 - 1420) / 1500 = 0,053;$$

$$s_k = s_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,053 \cdot (1,8 + (1,8^2 - 1)) = 0,175$$

Механические характеристики $M=f(s)$ строятся по уравнению

$$M = \frac{2 M_M}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad (\text{ф-ла Клосса})$$

Задаваясь скольжением s от 0 до 1, подсчитываем вращающий момент. Скорость вращения ротора определяем из уравнения $n = n_0(1-s)$, где n_0 об/мин-скорость вращения магнитного поля.

Расчетные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные данные для асинхронного двигателя

N	s	n, об/мин	M, Н*м
1	0,053	1420	67,3
2	0,04	1350	104,3
3	0,175	1238	121,0
4	0,2	1200	120,5
5	0,3	1050	105,3
6	0,4	900	88,8
7	0,5	750	75,5
8	0,6	600	65,2
9	0,7	450	57,0
10	0,8	300	50,5
11	0,9	150	45,5
12	1,0	0	41,2

Характеристики, построенные по данным таблицы 2, изображены на рис.8 и 9.

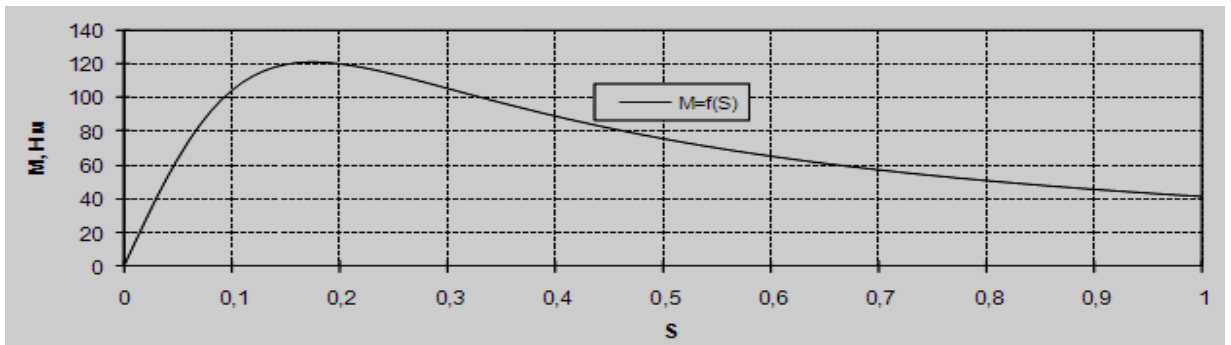


Рис. 2 Зависимость момента от скольжения

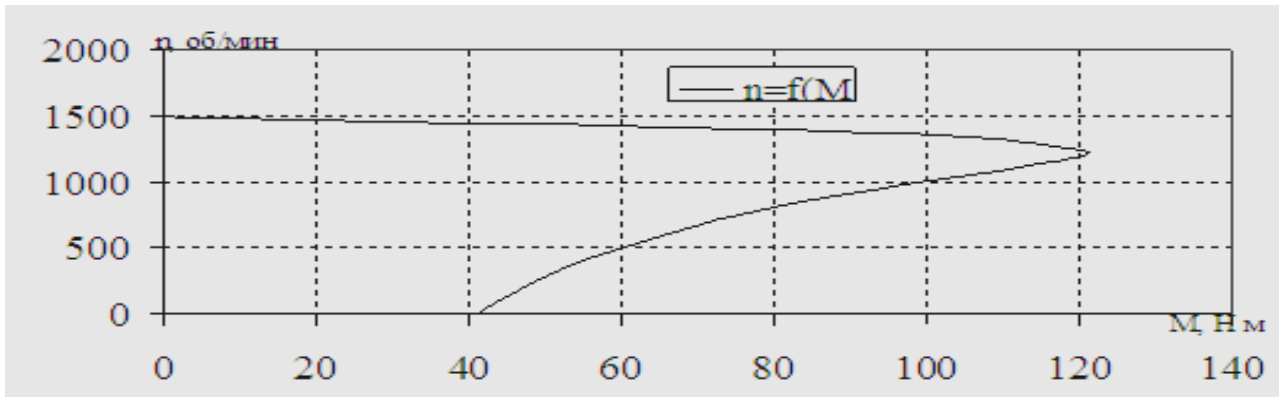


Рис. 31. Зависимость числа оборотов от момента

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №18 РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Цель работы расчет переходных процессов электроприводов

При пуске и останове электродвигателя, при его реверсе, изменении задания на скорость или при других управляющих воздействиях в регулируемом электроприводе, при приложении (или снятии) к валу двигателя механической нагрузки изменяются параметры электропривода: ток, момент, скорость двигателя и другие. При этом привод переходит из одного установившегося режима работы с одними параметрами движения в другой с другими параметрами. Однако этот переход не может быть мгновенным, т.к. ток в двигателе из-за электромагнитной инерционности его цепей не может изменяться мгновенно и скорость двигателя из-за механической инерционности движущихся масс электропривода также не может изменяться мгновенно.

Переходным процессом (переходным режимом) электропривода называется процесс, протекающий во времени, перехода от одного установившегося режима работы (или отключенного состояния) к другому установившемуся состоянию.

Причиной возникновения переходных процессов могут быть:

- управляющие воздействия (включение – отключение электропривода, изменение задания на скорость привода и др.);
- возмущающие воздействия, главным из которых является изменение нагрузки на валу двигателя (изменение M_c).

Для расчета и анализа переходных процессов необходимо найти переходную функцию, т.е. зависимость параметров электропривода (скорости, тока, момента и др.) от времени.

Переходные функции описываются дифференциальными уравнениями. Порядок дифференциального уравнения будет равен числу инерционностей, которые учитываются при рассмотрении данного переходного процесса. Такими инерционностями являются:

- механическая инерционность, связанная с накоплением или отдачей кинетической энергии; ее влияние на переходные процессы оценивается электромеханической постоянной времени T_M ;

- электромагнитная инерционность, связанная с накоплением (или отдачей) энергии в электромагнитном поле; электромагнитная инерционность с точки зрения ее влияния на переходный процесс оценивается электромагнитной постоянной времени

$$T_{\text{э}} = \frac{L}{R}, \quad (1)$$

где: L – индуктивность электромагнитного устройства (например, обмотки двигателя); R – активное сопротивление обмотки;

- электростатическая инерционность, связанная с накоплением (отдачей) энергии в электростатическом поле (конденсаторе); эта инерционность оценивается постоянной времени

$$T_c = CR, \quad (2)$$

где: C – емкость конденсатора, R – сопротивление цепи заряда-разряда конденсатора;

- инерционность, связанной с накоплением потенциальной энергии (например, в упругом элементе механической системы); эта инерционность для учета при анализе переходных процессов отражается величиной, обратной жесткости элемента или другим физическим параметром.

Если предположить, что инерционности отсутствуют или они пренебрежимо малы, то переходные процессы будут протекать мгновенно. Наличие в реальных системах инерционностей различной физической природы обуславливает затягивание переходных процессов, связанное с тем, что в процессе перехода системы из одного состояния в другое происходит накопление (запасание) или отдача энергии, которые не могут происходить мгновенно.

Если потоки энергии однонаправлены, то переходный процесс при приложении постоянного по величине воздействия носит монотонный характер. Таков, например, процесс нарастания тока в обмотке возбуждения двигателя постоянного тока при подаче напряжения на эту обмотку (1а).

Процесс изменения тока во времени описывается дифференциальным уравнением

$$U = iR + L \frac{di}{dt}, \text{ приводя который к нормализованному виду с учетом (1), получим:}$$

$$T_{\text{э}} \frac{di}{dt} + i = \frac{U}{R} = I_{\text{уст}}. \quad (3)$$

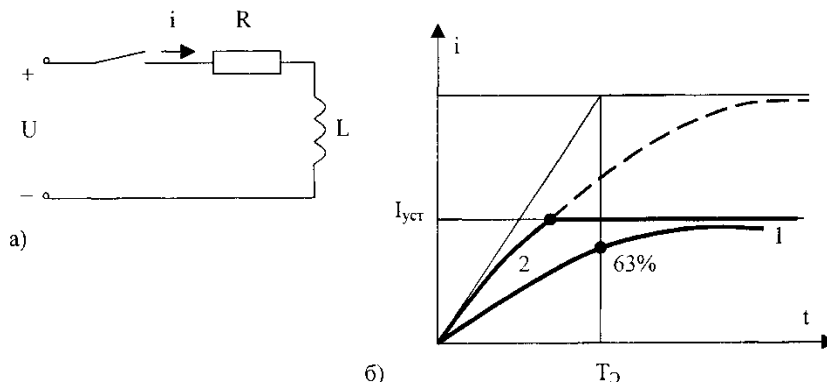


Рис.3.8. Переходные характеристики при включении обмотки возбуждения

или в операторной форме:

$$i(T_{\text{э}} p + 1) = I_{\text{уст}}. \quad (4)$$

Решение этого уравнения будет

$$i = I_{\text{уст}} - (I_{\text{уст}} - I_{\text{нач}}) e^{-t/T_{\text{э}}} \quad (5)$$

при $I_{нач} = 0$

$$i = I_{уст} (1 - e^{-t/T_{\Delta}}) \quad (6)$$

Переходная характеристика $i = f(t)$ представляет собой экспоненту (рис.1б). За время, равное T_{Δ} , ток в обмотке возбуждения возрастает до значения $0,63I_{уст}$; за время $3T_{\Delta}$ - до значения $0,95I_{уст}$; за время $5T_{\Delta}$ - до значения $0,98I_{уст}$. Практически можно считать, что время переходного процесса при экспоненциальном характере переходного процесса составляет 3-5 постоянных времени. Если возникает задача ускорить нарастание тока в обмотке возбуждения, то это можно сделать единственным способом – увеличить напряжение, подводимое к индуктивности (обмотке возбуждения) на время протекания переходного процесса. Если, например, мы увеличим напряжение в a раз $U_{\phi} = aI_{уст} \cdot R$, то ток в обмотке возбуждения будет нарастать быстрее, как это следует из характеристики 2 на рис.1б. По достижении током значения $I_{уст}$ напряжение на обмотке возбуждения следует уменьшить до значения $U = I_{уст} \cdot R$.

Таким образом, для уменьшения времени переходного процесса нужно применить форсировку напряжения, которая затем снимается. Отношение $a = \frac{U}{U_{\phi}}$ называется коэффициентом форсировки.

Переходные процессы в электроприводе, когда изменяются ток, момент и скорость двигателя, представляют собой сложное явление – одновременное протекание электромагнитных и механических переходных процессов. Характер переходного процесса зависит от числа инерционностей, участвующих в данном процессе, и соотношения между характеризующими их постоянными времени.

Если постоянные времени по величине отличаются на два и более порядка, то можно малыми постоянными времени пренебрегать. Это упрощает анализ переходных процессов.

Переходные процессы в зависимости от характера объекта могут описываться линейными или нелинейными дифференциальными уравнениями. Если нелинейности несущественны, можно прибегнуть к линеаризации уравнений.

В случае линейных систем анализ переходных процессов (расчет переходных характеристик) может производиться аналитическими методами. В случае нелинейных систем целесообразно пользоваться численными методами решения уравнений на ЭВМ или методами компьютерного моделирования.

Проведем анализ переходных процессов, характеризующихся двумя инерционностями: механической и электромагнитной. Рассмотрим изменение скорости двигателя, имеющего линейную механическую характеристику, при приложении управляющего и возмущающего воздействий.

Момент двигателя при линейной механической характеристике равен

$$M = \beta (\omega_0 - \omega). \quad (7)$$

Момент в общем случае пропорционален току в обмотках двигателя $M = c_M \cdot I$. При приложении (изменении) управляющего воздействия: напряжения (для двигателя постоянного тока), напряжения и частоты (для асинхронного двигателя), - будет изменяться ток в обмотках двигателя. Однако, поскольку обмотки обладают индуктивностью, ток a , следовательно и момент, будут изменяться не мгновенно, а в функции времени. Электромагнитная часть двигателя описывается апериодическим (инерционным) звеном с постоянной времени T_{Δ} . По аналогии с (4), умножая ток I на c_M , получим $M(T_{\Delta} p + 1) = M_{уст}$. С учетом (7) процесс изменения момента в этом случае описывается дифференциальным уравнением

$$M + T_{\Sigma} \frac{dM}{dt} = \beta(\omega_0 - \omega) \quad (8)$$

Решая это уравнение совместно с уравнением движения (2.8) и учитывая, что $\frac{dM}{dt} = J \frac{d^2\omega}{dt^2}$ и $T_M = \frac{J}{\beta}$, после преобразований получим

$$T_M T_{\Sigma} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст} \quad (9)$$

Здесь $\omega_{уст} = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta}$ - установившееся значение скорости, с которой будет работать двигатель по окончании переходного процесса; если $M_c=0$, то $\omega_{уст} = \omega_0$.

Характеристическое уравнение для (9) будет:

$$T_M \cdot T_{\Sigma} p^2 + T_M p + 1 = 0. \quad (10)$$

$$\text{Корни этого уравнения } p_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{T_M^2 - 4T_M T_{\Sigma}}}{2T_M T_{\Sigma}}.$$

Если $T_M \geq 4T_{\Sigma}$, то корни будут вещественными и отрицательными. В этом случае решение уравнения (9) имеет вид:

$$\omega = \omega_{уст} + C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}. \quad (11)$$

Переходный процесс в этом случае будет носить монотонный характер с изменением

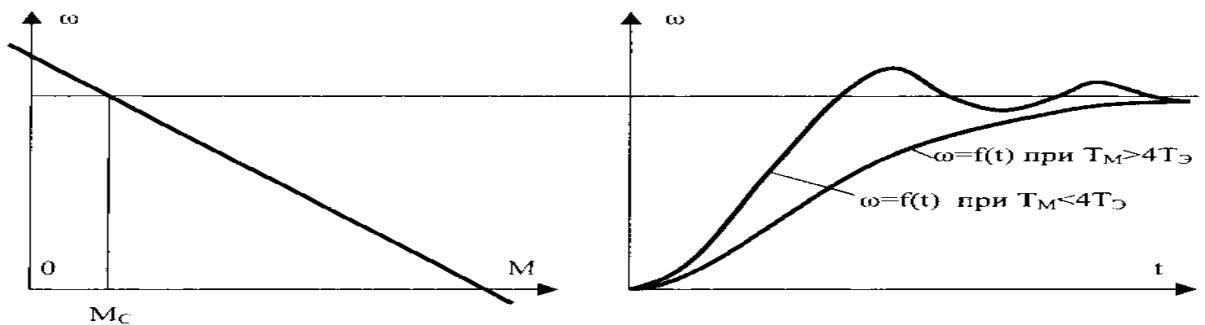


Рис.3.9. Переходные характеристики электропривода с линейной механической характеристикой

скорости по закону, соответствующему инерционному звену второго порядка (см.рис.2).

Если $T_M < 4T_{\Sigma}$, то корни будут комплексными сопряженными с отрицательной вещественной частью $p_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega$, где

$$\alpha = \frac{1}{2T_{\Sigma}}; \quad \Omega = \frac{\sqrt{4\frac{T_{\Sigma}}{T_M} - 1}}{2T_{\Sigma}} \quad (12)$$

Решение дифференциального уравнения (9) при этом будет:

$$\omega = \omega_{уст} + (C_1 \cos \Omega t + C_2 \sin \Omega t) e^{-\alpha t}. \quad (13)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных или конечных условий переходного процесса, например при $t=0$ $\omega(0) = \omega_{нач}$; $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{t=0} = \frac{M_{нач} - M_c}{J_{\Sigma}}$.

Переходный процесс в этом случае характеризуется периодическими колебаниями с частотой Ω и затухающей амплитудой. Время переходного процесса ориентировочно может быть оценено, как $t_{инт} = (6 - 10) T_{\Sigma}$. Колебательность процесса связана с тем, что происходит периодическое преобразование кинетической энергии в электромагнитную и обратно.

Представив уравнения (7) и (6) в операторной форме

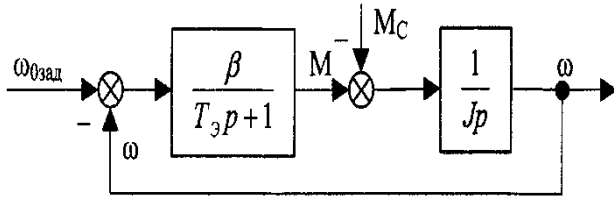


Рис.3.10. Структурная схема электромеханической системы с линейной механической характеристикой

$$(T_{\text{э}} p + 1)M = \beta(\omega_0 - \omega)$$

$$M - M_c = Jp \omega,$$

составим структурную схему (рис.3.), отражающую динамические свойства электропривода с линейной механической характеристикой.

Скорость холостого хода ω_0 пропорциональна сигналу задания

$$X_{\text{зад}} = c \omega_{0\text{зад}}.$$

В соответствии со структурной схемой найдем передаточную функцию электропривода (по управляющему воздействию $\omega_{0\text{зад}} = X_{\text{зад}}/c$)

$$W(p) = \frac{1}{T_M T_{\text{э}} p^2 + T_M p + 1}. \quad (14)$$

Знаменатель этой передаточной функции идентичен левой части характеристического уравнения (10), что говорит о том, что переходная функция $\omega = f(t)$ при единичном управляющем воздействии будет описываться уравнением (11) при $T_M > 4T_{\text{э}}$ и уравнением (13) при $T_M < 4T_{\text{э}}$.

Найдем передаточную функцию электропривода при возмущающем воздействии ΔM_c .

$$W(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta M_c(p)} = - \frac{1/Jp}{\frac{\beta}{Jp(T_{\text{э}}p + 1)} + 1} = - \frac{1}{\beta} \cdot \frac{T_{\text{э}}p + 1}{T_M T_{\text{э}} p^2 + T_M p + 1}; \quad (15)$$

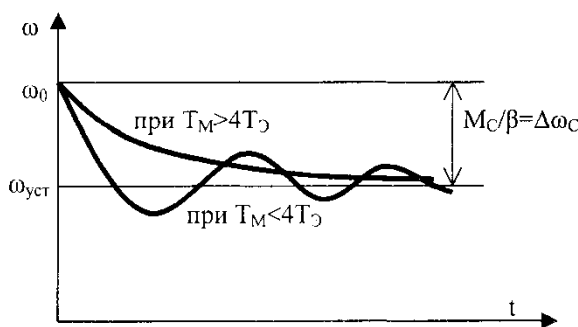


Рис.3.11. Кривые переходных процессов при скачкообразном приложении нагрузки

$$\text{отсюда } \Delta \omega(p) = - \frac{1}{\beta} \cdot \frac{T_{\text{э}} p + 1}{T_M T_{\text{э}} p^2 + T_M p + 1} \cdot \Delta M_c(p). \quad (16)$$

Это выражение показывает, что при приложении к двигателю нагрузки – статического момента ΔM_c , скорость двигателя уменьшится на величину $\Delta \omega$.

Процесс перехода от начальной скорости ω_0 при $M_c=0$ к новому установившемуся значению $\omega_{уст}$ при $M_c = \Delta M_c$ может носить монотонный характер, если $T_M > 4T_{\text{э}}$, или

затухающий колебательный характер, если $T_m < 4T_{я}$. Характеристики переходного процесса показаны на рис.4.

В общем случае можно предложить следующий порядок анализа переходных процессов в системах электропривода, если эти процессы описываются линейными (или линеаризованными) дифференциальными уравнениями.

1. Определяется, какие инерционности следует учитывать при анализе данного переходного процесса.

2. Находят постоянные времени, характеризующие каждую инерционность. Если постоянные времени отличаются на 2 и более порядка, то меньшими в инженерных расчетах, как правило, можно пренебречь.

3. Число инерционностей определяет порядок дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс.

4. Находят характеристическое уравнение, соответствующее левой части однородного линейного дифференциального уравнения, описывающего исследуемый переходный процесс. Характеристическое уравнение будет иметь вид (например, для дифференциального уравнения 3-го порядка) $T_1 T_2 T_3 p^3 + T_1 T_2 p^2 + T_1 p + 1 = 0$. Здесь T_1, T_2, T_3 – постоянные времени.

5. Переходный процесс в случае линейных зависимостей переменных и скачкообразного (единичного) характера управляющего или возмущающего воздействий будет описываться уравнением $X = f(t)$, (где X – исследуемый параметр электропривода – ток, момент, скорость) вида (например, для уравнения 3-го порядка) если все корни характеристического уравнения действительные $X(t) = X_{уст} + C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + C_3 e^{p_3 t}$ и, если один корень характеристического уравнения действительный, а остальные два – комплексно сопряженные

$$X(t) = X_{уст} + C_1 e^{p_1 t} + (C_2 \cos \Omega t + C_3 \sin \omega t) e^{-\alpha t}.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №19

ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Выбор двигателя – один из ответственных этапов проектирования электропривода, так как именно двигатель в значительной степени определяет технические и экономические качества привода в целом. Из многочисленных типов двигателя переменного и постоянного токов для привода той или иной производственной машины должен быть выбран такой, который наиболее полно удовлетворял бы технико-экономическим требованиям. Это значит, что двигатель должен быть наиболее простым по управлению, надежным в эксплуатации и иметь наименьшую стоимость, массу и габариты, а также высокие энергетические показатели. В сравнении со всеми существующими типами двигателей этим требованиям в наибольшей мере отвечают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. При выборе двигателя такого типа необходимо выяснить, удовлетворяются ли технические требования: допустимое уменьшение скорости при увеличении нагрузки, допустимая величина повторных включений, возможность быстрого и надежного пуска.

В напряженном режиме работы привода, с большой частотой включений, где требуется повышенный или ограниченный пусковой момент, а также регулирование частоты вращения в узких пределах, применяют асинхронные двигатели с контактными кольцами. Для нерегулируемых приводов средней и большой мощности, работающих в продолжительном режиме с редкими пусками, рекомендуется применять синхронные двигатели. Они отличаются более высоким к.п.д. и допускают регулирование коэффициента мощности за счет компенсации реактивной мощности. При необходимости плавного и глубокого регулирования скорости, а также при большой частоте включений применяются двигатели постоянного тока. При выборе мощности двигателя основными исходными данными являются требуемые моменты, которые должны быть приложены к валу механизма, т.е. необходимо иметь нагрузочные диаграммы электропривода $P=f(t)$ или $M=f(t)$, которые могут быть заданы как в виде графика, так и в виде таблицы.

Пример решения задачи

Определить необходимую мощность двигателя для привода механизма, режим работы которого задан нагрузочной диаграммой на рис.9. По технологическим условиям следует использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Двигатель должен развивать частоту вращения $n=980$ об/мин. Помещение, где будет установлен двигатель, - сухое, без пыли и грязи.

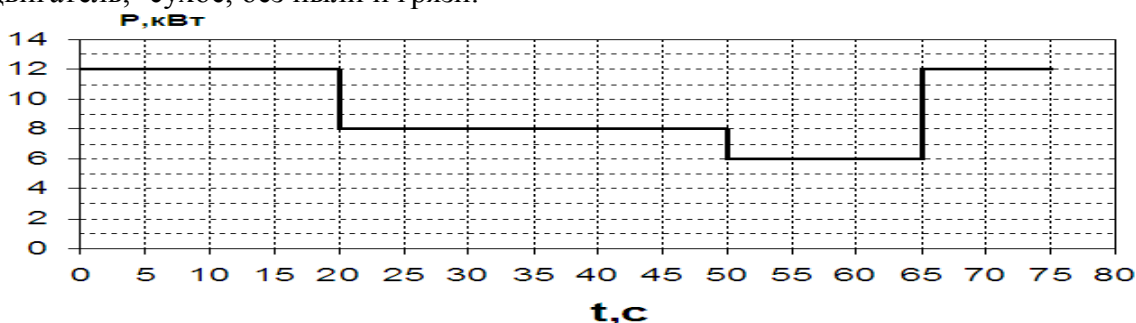


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма

Решение.

В нашем случае режим работы представляет собой длительную переменную нагрузку. Мощность двигателя подбирается при подобных режимах работы по эквивалентной мощности, которая равна

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (P_k^2 t_k)}{t_{\text{ц}}}}$$

где $t_{\text{ц}}$ - время цикла работы:

$$t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 = 20 + 30 + 15 = 65 \text{ с};$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{12^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 30 + 6^2 \cdot 15}{65}} = 9,05 \text{ кВт}$$

По данным каталога в качестве приводного двигателя может быть использован асинхронный короткозамкнутый двигатель в защищенном исполнении типа А2-61-6; 380/220 В; $P_{\text{н}}=10$ кВт, $n_{\text{н}}=965$ об/мин, $\eta_{\text{н}}=0,870$, $M_{\text{п}}/M_{\text{н}}=1,2$, $M_{\text{м}}/M_{\text{н}}=1,8$.

В ряде случаев момент нагрузки на отдельных участках может оказаться больше максимально допустимого момента двигателя, и асинхронный двигатель может остановиться. Поэтому после выбора двигателя его необходимо проверить по перегрузочной способности исходя из условия $M_{\text{макс}} < M_{\text{макс.д}}$, где $M_{\text{макс}}$ - максимальный момент на валу двигателя; $M_{\text{макс.д}}$ - максимально допустимый момент двигателя. Для асинхронного двигателя $M_{\text{макс.д}}=0,9 \cdot M_{\text{к}}$. Здесь $M_{\text{к}}$ - критический (максимальный) момент двигателя.

В нашем примере: номинальный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = 9550 P_{\text{н}} / n_{\text{н}} = 9550 \cdot 10 / 965 = 99 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Максимальный (критический) момент

$$M_{\text{к}} = \eta M_{\text{н}} = 1,8 \cdot 99 = 178 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Максимальный статический момент

$$M_{\text{с}} = 9550 \cdot P_1 / n = 9550 \cdot 12 / 980 = 117 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По перегрузочной способности двигатель проходит, так как выполняется условие $0,9 \cdot M_{\text{к}} = 0,9 \cdot 178 = 160 > M_{\text{с}} = 117$.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №20 СОЗДАНИЕ СХЕМ СБОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Цель работы

В электрических схемах и ГОСТе используются следующие термины и понятия.

Элемент схемы - составная часть схемы, которая имеет самостоятельное графическое обозначение, выполняет определенную функцию в изделии и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное функциональное назначение.

Устройство - совокупность элементов, представляющая собой единую конструкцию. Устройство может не иметь в схеме строго определенного функционального назначения.

Функциональная группа - совокупность элементов, выполняющих в изделии определенную функцию и не представляющих собой единой конструкции.

Функциональная часть - элемент, оборудование, функциональная группа или устройство, имеющее в изделии строго определенное функциональное назначение.

Изделие - совокупность устройств, представляющая собой отдельную законченную конструкцию, имеющую свою схему соединений (панель управления, пульт и т.п.).

Объект - условное наименование изделия, устройства, установки, сооружения, применяемое в качестве общего понятия.

Линия связи - линия, являющаяся графическим символом связи между элементами.

Функциональная цепь - линии, канал, тракт определенного назначения.

Электрическая схема - графический конструкторский документ, на котором при помощи графических обозначений изображены составные части объекта и связи между ними. На некоторых типах схем связи могут быть и не изображены.

В зависимости от основного назначения схемы подразделяются на следующие типы, обозначаемые арабскими цифрами: структурная - 1, функциональная - 2, принципиальная - 3, эквивалентная - б/н, соединений - 4, подключений - 5, общая - 6, расположения - 7, прочие - 8, объединенная - 0. Структурная схема определяет основные функциональные части электропривода (элементы, устройства и функциональные группы), в которые объединяются отдельные электротехнические устройства, их назначение и взаимосвязи. Она разрабатывается на стадии проектирования и используется для общего ознакомления с электроприводом.

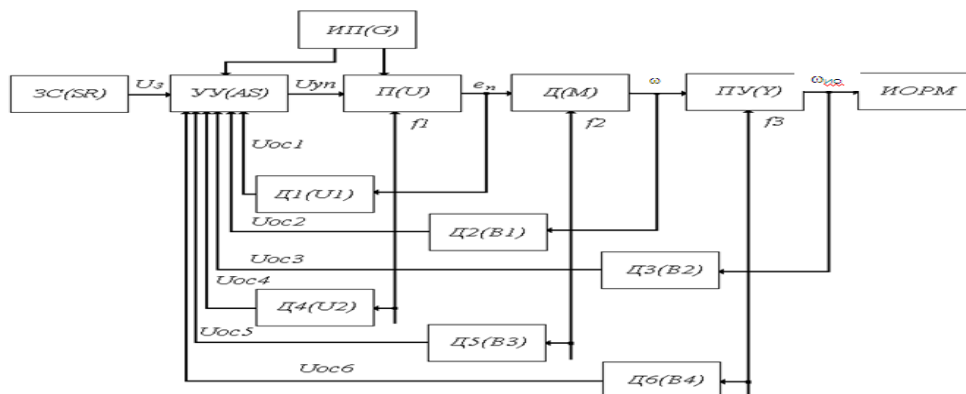


Рис. 1.1. Структурная схема электропривода

При большом количестве функциональных частей взамен наименований допускается проставлять порядковые номера, как правило, слева направо и сверху вниз, а наименования элементов, соответствующие номеру, указывать в таблице, помещаемой на поле схемы.

Функциональная схема

Функциональная схема электропривода разъясняет процессы, протекающие в отдельных функциональных частях или в электроприводе в целом. Эти схемы используются для изучения принципов работы электропривода и его составных частей, а также при их наладке, регулировке, контроле и ремонте.

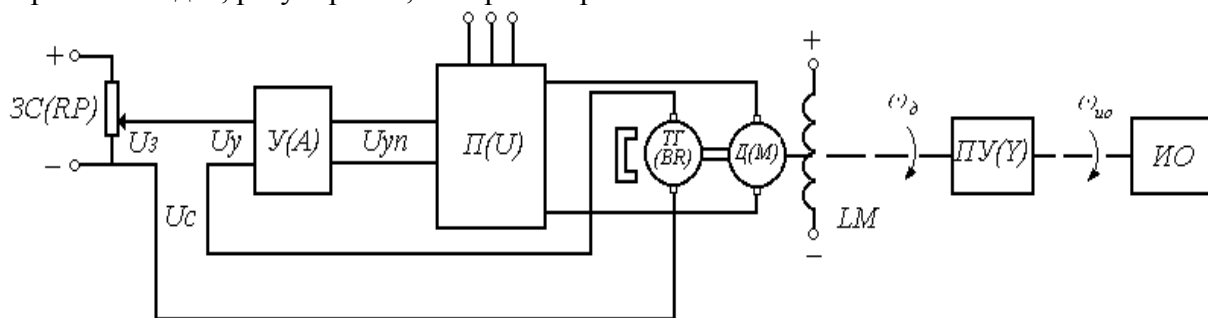


Рис. 1.2. Функциональная схема электропривода

Она включает в себя те же устройства, что и структурная схема на рис. 1.1. Задающее напряжение U_3 обеспечивается задатчиком ЗС (RP). Обратная связь по скорости двигателя осуществляется тахогенератором ТГ (BR), обеспечивающим напряжение обратной связи u_c , пропорциональное скорости двигателя. Принципиальная схема определяет полный состав элементов электротехнических устройств электропривода и связи между ними. Она используется для изучения принципов работы электроприводов, их наладки, регулировки, контроля, ремонта и является основанием для разработки схем соединений и подключений.

Силовые цепи постоянного тока маркируют соответственно: участки цепей положительной полярности - нечетными числами, а отрицательной полярности - четными. Допускается нумеровать цепи постоянного тока последовательными числами.

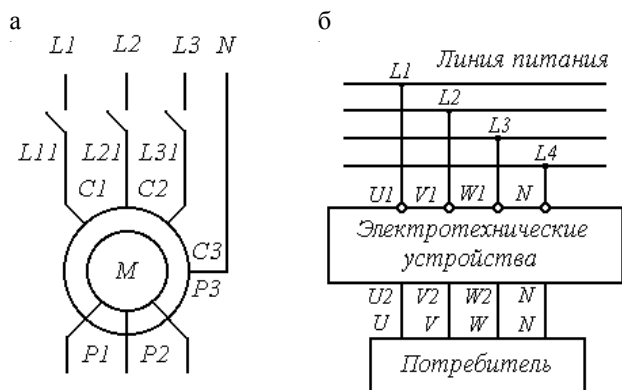


Рис. 1.4. Принципиальная схема силовой части

Цепи управления, защиты и сигнализации маркируют слева направо и сверху вниз последовательными числами. Допускается цепи управления постоянного и однофазного переменного тока маркировать четными и нечетными числами. Обычно в сложных больших схемах, все цепи постоянного тока маркируются четными и нечетными числами, начиная с 1, 100, 200, 300 и т.д., отделяя функциональные назначения цепей схемы, например, силовые цепи управления, защиты и сигнализации

Читаются принципиальные схемы в следующем порядке: исходное положение схемы, ее работа, электрические защиты, блокировки и сигнализация.

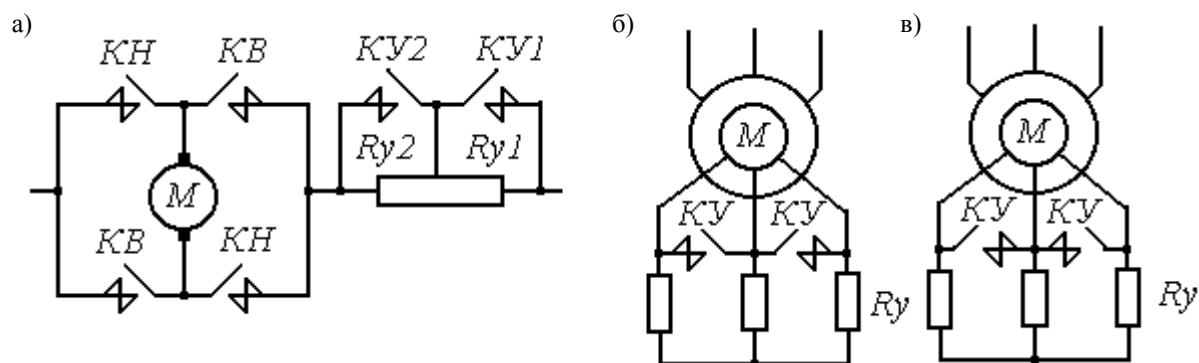
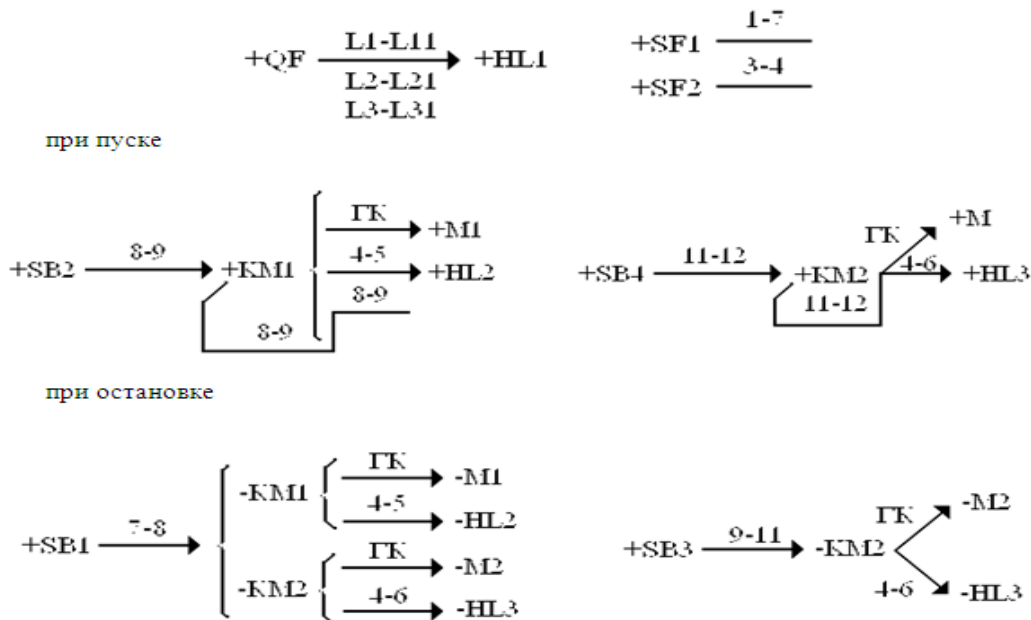


Рис. 1.5. Узлы принципиальной схемы силовой части электропривода

Исходным является положение элементов после подачи на схему напряжения питания. Например, в схеме (на рис. 1.3) после включения автоматических выключателей QF и SF в исходном положении никакие аппараты не срабатывают, а только загорается сигнальная лампа $HL1$, сигнализирующая о подаче напряжения. При анализе работы схемы рассматриваются состояния элементов, обеспечивающих переходные и установившиеся режимы работы электропривода. Например, схема на рис. 1.3 осуществляет пуск и остановку двигателей $M1$ и $M2$. Команды на пуск двигателей подаются кнопками $SB2$ и $SB4$. При нажатии на кнопку $SB2$ ее замыкающий контакт с маркировкой 8 - 9 подает напряжение на катушку линейного контактора $KM1$, ток в которой протекает по цепи 7 - 8 - 9 - 10 - $KM1$ - 2. Контактор $KM1$ включается и своими главными замыкающими контактами с маркировкой $L11 - L12$, $L21 - L22$ и $L31 - L32$ подключает обмотку статора двигателя $M1$ к питающей сети. Происходит его пуск. Контактор $KM1$ замыкающим вспомогательным контактом 8 - 9 шунтирует замыкающий контакт кнопки $SB2$ и обеспечивает память команды «Пуск», а контактом 4 - 5 включает лампу $HL2$. Описать работу схемы можно проще. Например, для осуществления пуска двигателя $M2$ нажимается кнопка $SB4$, которая контактом 11 - 12 включает контактор $KM2$. Этот контактор главными контактами подключает обмотку статора двигателя $M2$ к питающей сети, а вспомогательным контактом 11 - 12 обеспечивает память команды на пуск и контактом 4 - 6 включает лампу $HL3$.

Для облегчения записи работы схемы можно использовать схематическую запись с помощью символов, где знак «+» (плюс) означает включение аппарата или двигателя, знак «-» (минус) - отключение, стрелка «→» направление воздействия одного аппарата на другой, Δt - задержка воздействия по времени. Цифры около стрелки указывают номер контакта аппарата, которым производится воздействие. Черта без стрелки «-» с номером контактов показывает, что аппарат замкнул или разомкнул свой контакт, но прямого воздействия на включение или отключение другого аппарата не произвел, а только подготовил цепь. Буквы ГК означают: «Главные контакты». Номера на стрелке соответствуют номерам контактов аппаратов на принципиальной схеме.



Эквивалентная схема

Эквивалентная схема - это схема, предназначенная для анализа и расчета параметров (характеристик) отдельных функциональных частей или объекта в целом. К эквивалентным схемам относятся все расчетные схемы, например, схемы замещения электротехнических устройств, векторные диаграммы. Сюда относится и неправильно названная в теории автоматического регулирования структурная схема, приведенная на рис.1.6. Это эквивалентная расчетная схема динамических режимов электропривода.

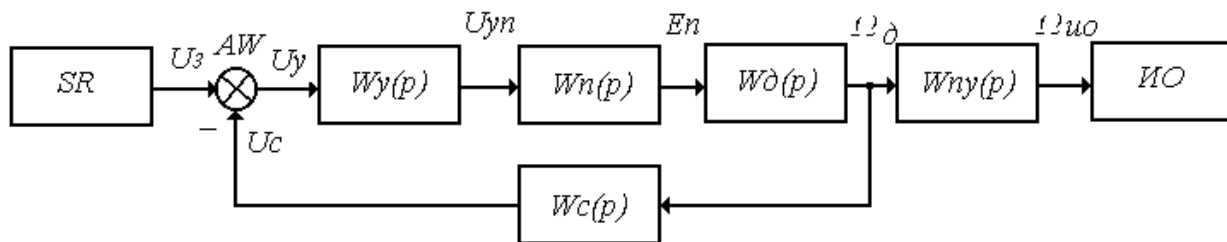
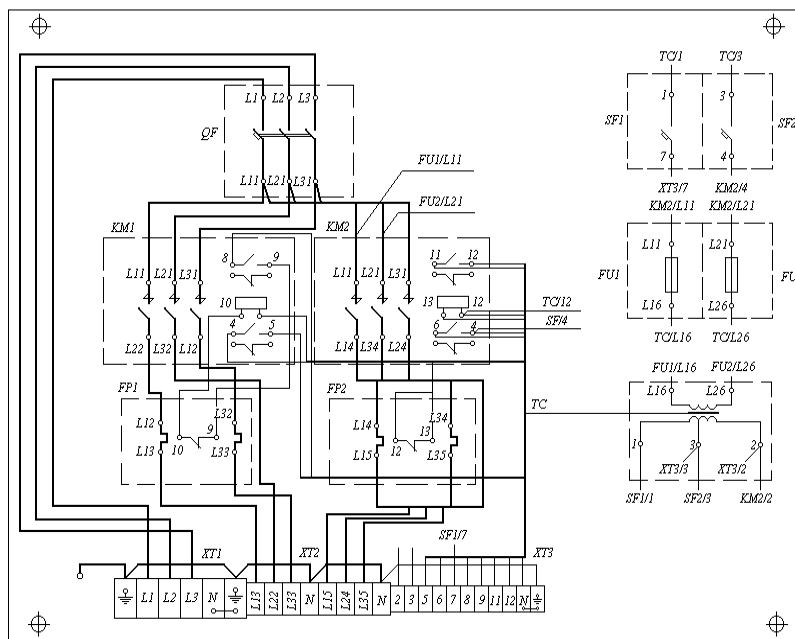


Рис. 1.6. Структурная схема электропривода.



Зажимы располагают внизу панели или сбоку так, чтобы обеспечить удобство обслуживания и иметь минимальный расход проводов. К каждому зажиму с каждой стороны можно присоединить не более двух проводов, а при большем количестве проводов предусматривают несколько зажимов с одинаковой маркировкой, соединенных между собой перемычками.

Рис. 1.7. Схема соединений системы электропривода

На рис. 1.7 приведен пример схемы (внутренних) соединений устройства в виде панели управления электропривода, принципиальная схема которого показана на рис. 1.3. На панели расположены автоматические выключатели QF и $SF1$, $SF2$, контакторы $KM1$, $KM2$, тепловые реле $FP1$, $FP2$, предохранители $FU1$, $FU2$, трансформатор TC и наборы зажимов (клеммники) $XT1$ – $XT3$.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №21 ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы изучение схем автоматического управления электропривод постоянного тока

Рассмотрим ряд типовых узлов схем управления электроприводами, реализующими вышеописанные принципы управления. На рис. 2.2, а приведен узел электрической схемы, обеспечивающий автоматический пуск в функции времени двигателя M с двумя ступенями добавочного пускового сопротивления (вид возбуждения двигателя может быть любым, на рисунке показано независимое возбуждение). Алгоритм работы приведенного узла схемы следующий. Сразу же после подачи напряжения на главные цепи и цепи управления включается реле времени первой ступени $PY1$ и открывает свой размыкающий контакт, не давая возможности преждевременно включиться контакторам ускорения $KV1$ и $KV2$.

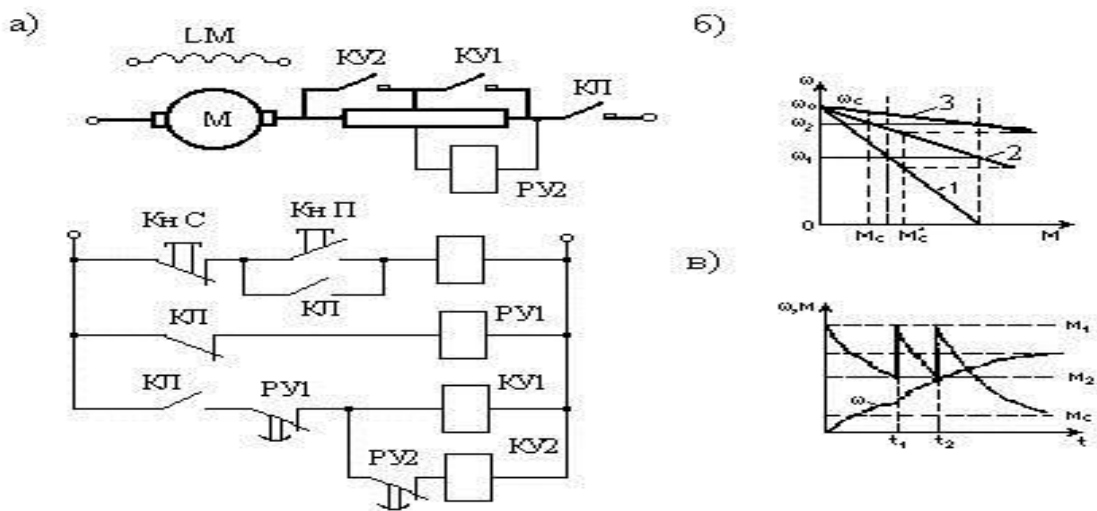


Рис. 1. Схема реостатного пуска двигателя постоянного тока в функции времени

Нажатие на кнопку $KnП$ («Пуск») приводит к включению линейного контактора $КЛ$, который замыкает свой главный контакт в цепи якоря двигателя, замыкающим блок-контактом шунтирует кнопку $KnП$ (тем самым контактор $КЛ$ становится на самопитание), а размыкающим блок-контактом разрывает цепь катушки реле $PУ1$. Двигатель начинает разгоняться по реостатной механической характеристике первой ступени пуска (рис. 1, б). При протекании по добавочному сопротивлению пускового тока мгновенно срабатывает реле времени второй ступени $PУ2$, так как к его катушке прикладывается достаточное по величине напряжение, равное падению напряжения на сопротивлении $R_{доб.п.1}$. Размыкающий контакт реле $PУ2$ открывается в цепи катушки контактора $КУ2$.

Реле $PУ1$, начавшее отсчет выдержки времени, соответствующей времени t_1 разгона двигателя на первой ступени пуска, по истечении ее замыкает свой контакт. Включается контактор $КУ1$, который своим силовым контактом закорачивает сопротивление $R_{доб.п.1}$ и вместе с ним катушку реле $PУ2$. Начинается разгон двигателя согласно реостатной характеристике 2 второй ступени пуска. Реле $PУ2$ отсчитывает выдержку времени, соответствующую времени $(t_2 - t_1)$ двигателя на второй ступени, и затем замыкает свой контакт. Включается контактор $КУ2$ и закорачивает сопротивление $R_{доб.п.2}$. Двигатель выходит на естественную характеристику 3 и разгоняется до установившейся скорости ω_c , соответствующей моменту M_c . На этом пуск заканчивается.

На рис.1, в показаны зависимости момента и скорости двигателя от времени, которые дополнительно иллюстрируют работу описанного узла схемы управления. Уставка реле времени $PУ1$ определится как разность между временем t_1 и собственным временем включения контактора $КУ1$: $t_{PУ1} = t_1 - t_{склКУ1}$. Аналогично определится и уставка реле времени $PУ2$: $t_{PУ2} = t_2 - t_1 - t_{склКУ2}$. При этом $t_1 = \Delta t_1$ и $t_2 - t_1 = \Delta t_2$ - расчетные значения времени разгона двигателя на первой и второй ступенях

Достоинством принципа управления в функции времени – это простота и надежность реле времени, удобство регулировки их уставок, возможность применения однотипных реле для двигателей различной мощности. Кроме того, при изменениях статического момента, момента инерции привода, напряжения сети и т.д. время пуска практически не изменяется. Например, при увеличении M_c до значения M'_c (рис. 1, б) при сохранении той же выдержки времени реле $PУ1$ двигатель на первой ступени разгонится до меньшей скорости, но бросок момента при переключении будет большим. В результате процесс разгона пойдет в соответствии с графиком, показанным на рис. 1, б штрихпунктирными линиями, таким образом, что средний динамический момент при пуске останется приблизительно тем же. Поэтому почти не изменится и общее время пуска. Если же бросок момента (тока якоря) превысит допустимое значение, то двигатель

отключится максимально-токовой защитой. При управлении в функции времени (в отличие от управления в функции скорости или тока) полностью устраняется опасность «застревания» двигателя на первой ступени пуска при $M'_c > M_2$. Все это и обусловило шир

Такая схема СЭПТ получила название схемы с местным реверсированием (рис. 3). В отличие от нее в схеме СЭПТ с центральным реверсированием (рис. 4) реверсирующее реле не устанавливается, при этом число линейных проводов в схеме возрастает до пяти.

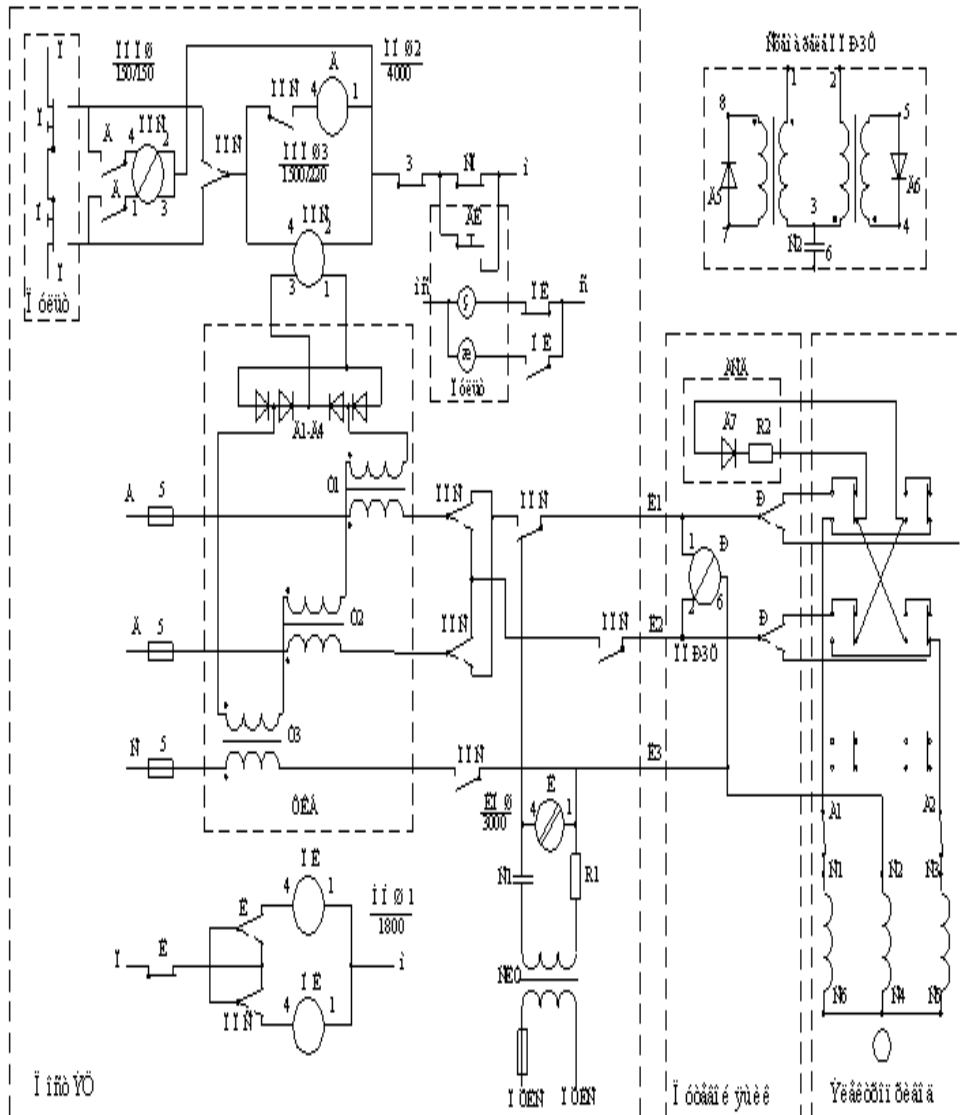


Рис. 3. Схема управления электроприводом с местным реверсированием

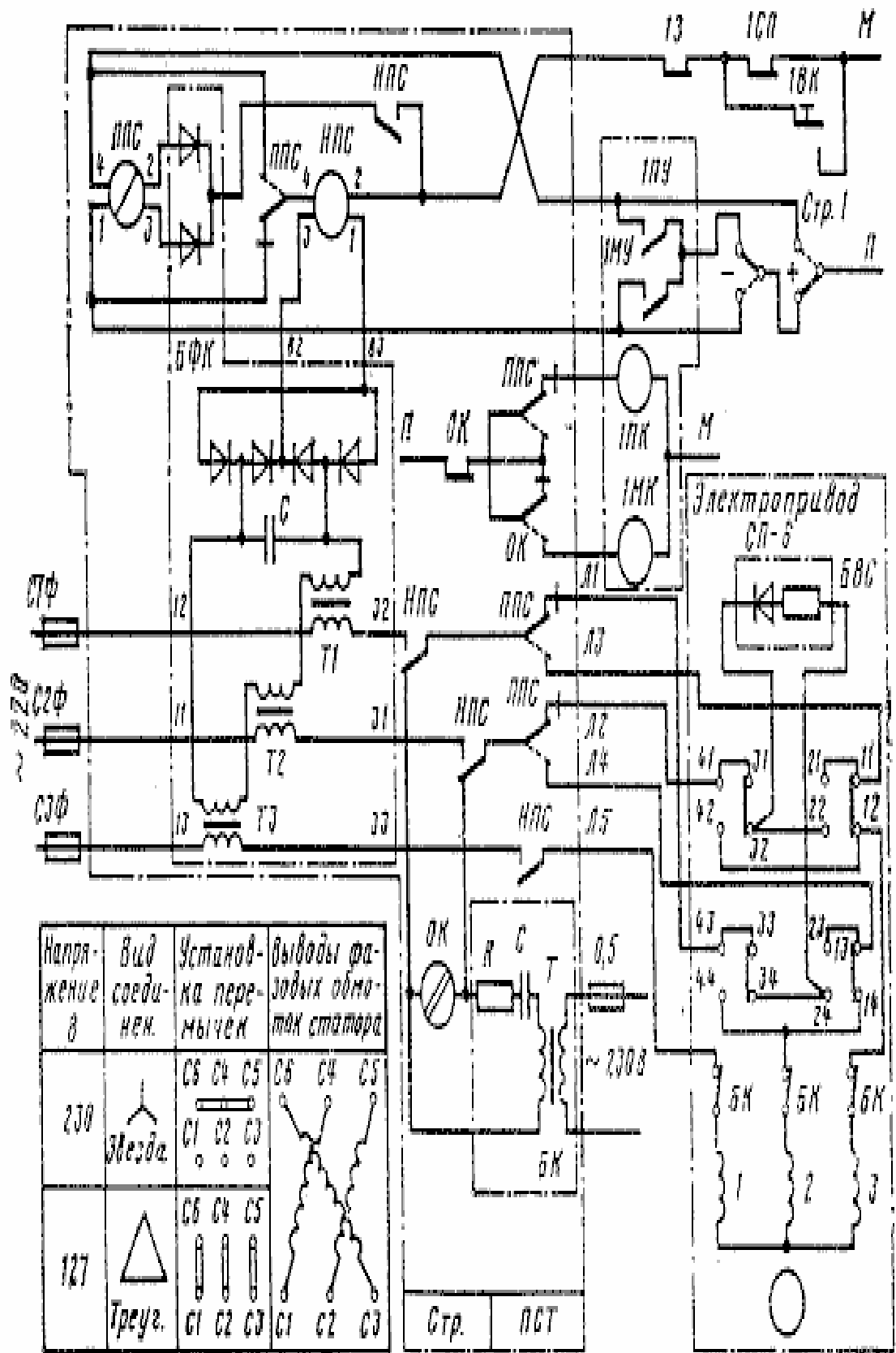


Рис. 4. Схема управления электроприводом с центральным реверсированием

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №22

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель: Изучить электрических параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$$P_n = 10 \text{ кВт} ,$$

Номинальное напряжение

$$U_n = 380 \text{ В} ,$$

Номинальное число оборотов ротора

$$n_n = 1420 \text{ об/мин} ,$$

Номинальный к.п.д.

$$\eta_n = 0,84$$

и номинальный коэффициент мощности

$$\cos \varphi_n = 0,85 .$$

Кратность пускового тока

$$I_n / I_n = 6,5 ,$$

а перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = 1,8 .$$

Определить:

- 1) Потребляемую мощность;
- 2) Номинальный и максимальный (критический) вращающие моменты;
- 3) Пусковой ток;
- 4) Номинальное и критическое скольжения. Построить механические характеристики

$$M = f(s) \text{ и } n = f(M) .$$

РЕШЕНИЕ:

Потребляемая мощность

$$P_{1n} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт} .$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} = 9550 \frac{10}{1420} = 67,3 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

$$M_m = \lambda M_n = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_n = \frac{P_{1n}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n} = \frac{11,9 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,2 \text{ А} ;$$

$$I_n = 6,5 I_n = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ А} .$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053 ;$$

$$s_n = s_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,053 (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,175 .$$

Механические характеристики

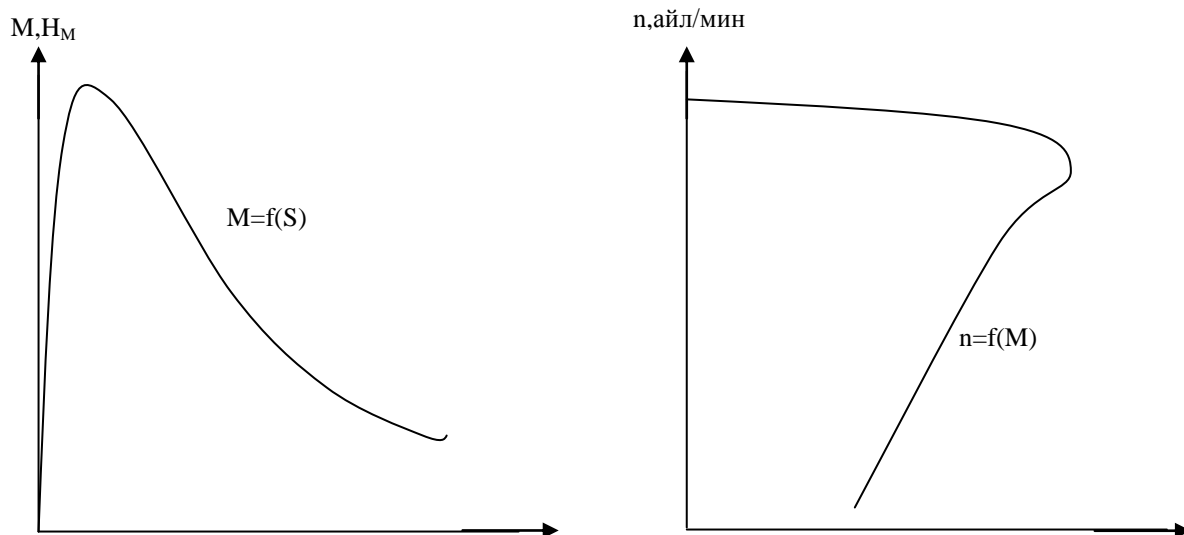
$$M = f(s)$$

строятся по уравнению.

$$M = \frac{242}{\frac{0,175}{s} + \frac{s}{0,175}} .$$

<i>№ п/п</i>	<i>S</i>	<i>n об/мин</i>	<i>MН · м</i>
<i>1</i>	<i>0,053</i>	<i>1420</i>	<i>67,3</i>
<i>2</i>	<i>0,4</i>	<i>1350</i>	<i>104,3</i>
<i>3</i>	<i>0,175</i>	<i>1238</i>	<i>121,0</i>
<i>4</i>	<i>0,2</i>	<i>1200</i>	<i>120,5</i>
<i>5</i>	<i>0,3</i>	<i>1050</i>	<i>105,3</i>
<i>6</i>	<i>0,4</i>	<i>900</i>	<i>88,8</i>
<i>7</i>	<i>0,5</i>	<i>750</i>	<i>75,5</i>
<i>8</i>	<i>0,6</i>	<i>600</i>	<i>65,2</i>
<i>9</i>	<i>0,7</i>	<i>450</i>	<i>57,0</i>
<i>10</i>	<i>0,8</i>	<i>300</i>	<i>50,5</i>
<i>11</i>	<i>0,9</i>	<i>150</i>	<i>45,5</i>
<i>12</i>	<i>1,0</i>	<i>0</i>	<i>41,2</i>

Задаваясь скольжением s от 0 до 1, подсчитываем вращающий момент. Скорость вращения ротора определяем из уравнения. Расчетные данные приведены в таблице. Характеристики, построенные по данным таблице, изображены на рис.



Контрольные вопросы.

1. Какой двигатель называется асинхронным?
2. Каковы основные части асинхронного двигателя?
3. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
4. От чего зависит величина момента асинхронного двигателя?
5. Какими способами можно уменьшить величину пускового тока?
6. Что при этом будет с моментом двигателя?
7. Почему короткозамкнутый двигатель называют нерегулируемым?
8. Какие имеются возможности регулировки скорости вращения асинхронного двигателя?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №23 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель: Изучить электрических параметров асинхронного двигателя с фазным ротором

Из каталога на асинхронные двигатели с фазным ротором известны: номинальная мощность двигателя

$$P_n = 11 \text{ кВт} ,$$

номинальное напряжение

$$U_n = 220 \text{ В} ,$$

номинальное число оборотов ротора

$$n = 920 \text{ об / мин} ,$$

номинальный к.п.д.

$$\eta_n = 81 \% ,$$

номинальный коэффициент мощности

$$\cos \varphi_n = 0,78 ,$$

перегрузочная способность двигателя

$$M_m / M_n = 3,4 ,$$

активное сопротивление фазы статора

$$r_1 = 0,422 \text{ Ом} .$$

Определить:

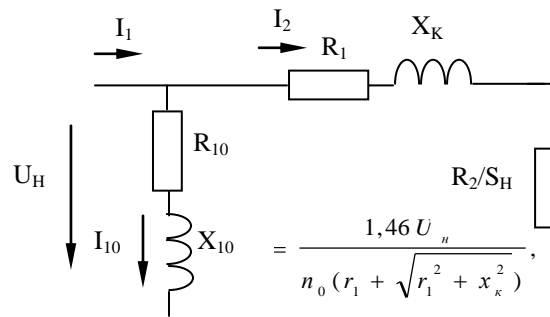
- 1) Номинальный ток статора;
- 2) Номинальный и максимальный моменты;
- 3) Сопротивления r_2' и x_k ветви приведенного тока I_2' в Γ -образной схеме замещения;
- 4) Приведенный ток ротора I_2' ;
- 5) Ток в статоре в режиме холостого хода I_{10} и коэффициент мощности $\cos \varphi_{10}$;
- 6) Сопротивления r_{10} и x_{10} в Γ -образной схеме замещения.

РЕШЕНИЕ:

По каталогу находим номинальный ток статора:

$$I_{1n} = \frac{P_n}{3U_n \eta_n \cos \varphi_n} = \frac{11 \cdot 1000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,78} = 26,4 \text{ А} .$$

Для определения реактивного сопротивления воспользуемся формулой максимального электромагнитного момента:



из которой следует, что

$$x_k = \sqrt{r_m^2 - r_1^2} ,$$

где, r_m - расчетное сопротивление:

$$R_m = \frac{1,46 U_n^2}{M_m n_0} - R_1 .$$

Приведенное активное сопротивление ротора r_2' найдем из формулы, выражающей зависимость номинального электромагнитного момента M_n от номинального скольжения s_n ;

$$M_n = \frac{2,92 U_n^2 R_2}{n_0 s_n \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s_n} \right)^2 + X_k^2 \right]} ,$$

из которой следует что

$$R_2 = s_n \left(R_n + \sqrt{R_n^2 - R_m^2} \right) ,$$

где R_n - расчетные сопротивления :

$$R_n = \frac{1,46 U_n^2}{M_n n_0} - R_1 .$$

По каталогу номинальный момент

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} = 9550 \frac{11}{920} = 114 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент

$$M_m = 3,4 M_n = 3,4 \cdot 114 = 389 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчетные сопротивления:

$$R_m = \frac{1,46 U_n^2}{M_n n_0} - R_1 = \frac{1,46 \cdot 220^2}{39,6 \cdot 1000} - 0,422 = 1,36 \text{ Ом};$$

$$R_n = \frac{1,46 U_n^2}{M_n n_0} - R_1 = \frac{1,46 \cdot 220^2}{11,65 \cdot 1000} - 0,422 = 5,64 \text{ Ом};$$

где

$$M_m = 39,6 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_n = 11,65 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Реактивное сопротивление

$$X_k = \sqrt{R_m^2 - R_1^2} = \sqrt{1,36^2 - 0,422^2} = 1,29 \text{ Ом}.$$

Приведенное реактивное сопротивление ротора

$$R_2 = s_n \left(R_n + \sqrt{R_n^2 - R_m^2} \right) = 0,08 \left(5,64 + \sqrt{5,64^2 - 1,36^2} \right) = 0,888 \text{ Ом}.$$

Определяем приведенный ток I_2' при номинальном режиме работы двигателя:

$$I_2 = \frac{U_n}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_k^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,422 + \frac{0,888}{0,08} \right)^2 + 1,29^2}} = 19 \text{ А}.$$

Для Г – образной схемы замещения составим два уравнения баланса активных мощностей при номинальном режиме работы двигателя:

$$U_n I_1 \cos \varphi_n = \left(R_1 + \frac{R_2}{s_n} \right) (I_2)^2 + R_{10} I_{10}^2;$$

$$U_n I_1 \sin \varphi_n = X_n (I_2)^2 + X_{10} I_{10}^2.$$

Активная мощность двигателя в режиме холостого хода, отнесенная к одной фазе обмотке статора

$$P_{10} = R_{10} I_{10}^2 = U_n I_n \cos \varphi_n - \left(R_1 + \frac{R_2}{s_n} \right) \cdot (I_2)^2 = 220 \cdot 26,4 \cdot 0,78 - \left(0,422 + \frac{0,888}{0,08} \right) \cdot 19^2 = 330 \text{ Вт}.$$

Рактивная мощность двигателя в режиме холостого хода, отнесенная к одной фазе обмотке статора

$$Q_{10} = X_{10} I_{10}^2 = U_n I_n \sin \varphi_n - X_n (I_2)^2.$$

Величине $\cos \varphi_n = 0,78$ соответствует $\sin \varphi_n = 0,625$, по этому

$$Q_{10} = 220 \cdot 26,4 \cdot 0,625 - 1,29 \cdot 19^2 = 3165 \text{ вар}.$$

Полная мощность двигателя в режиме холостого хода, отнесенная к одной фазе обмотке статора

$$s_{10} = \sqrt{P_{10}^2 + Q_{10}^2} = \sqrt{330^2 + 3165^2} = 3170 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Ток холостого хода

$$I_{10} = \frac{s_{10}}{U_n} = \frac{3170}{220} = 14,4 \text{ А}.$$

коэффициент мощности при холостом ходе двигателя

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{s_{10}} = \frac{330}{3170} = 0,1.$$

Сопротивления при холостом ходе

$$R_{10} = \frac{U_n}{I_{10}} \cos \varphi_{10} = \frac{220}{14,4} \cdot 0,1 = 1,52 \text{ Ом}.$$

$$X_{10} = \frac{U_n}{I_{10}} \sin \varphi_{10} = \frac{220}{14,4} \cdot 0,995 = 15,2 \text{ Ом}.$$

Контрольные вопросы:

1. Как устроен фазный ротор асинхронного двигателя?
2. Для чего применяется пусковой реостат?
3. Как изменить направление вращения асинхронного двигателя?
4. Что такое рабочие характеристики асинхронного двигателя и как они снимаются?
5. Как определить мощность на валу, коэффициент мощности, к.п.д. и скольжение асинхронного двигателя?
6. Как влияет сопротивление цепи ротора на величину скольжения?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №24

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель: Изучить электрических параметров двигателя постоянного тока

Двигатель последовательного возбуждения работает от сети напряжением 220В. Номинальный вращающий момент двигателя и номинальная скорость вращения соответственно равны

$M_n = 75 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $n_n = 1020 \text{ об/мин}$, сопротивления обмоток якоря и возбуждения

$r_{\text{я}} = 0,4 \text{ Ом}$, $r_{\text{в}} = 0,3 \text{ Ом}$. Номинальный к.п.д. $\eta_n = 81,5\%$.

Определить:

- 1) Мощность на валу двигателя и мощность, потребляемую из сети при номинальной нагрузке;
- 2) Ток двигателя;
- 3) Противо э.д.с. и электромагнитную мощность (мощность, передаваемую на якорь);
- 4) Потери в двигателе при номинальной нагрузке и сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток превышает номинальный в 2 раза.

РЕШЕНИЕ:

Номинальная мощность двигателя

$$P_n = \frac{M_n \eta_n}{9550} = \frac{75 \cdot 1020}{9550} = 8 \text{ кВт}$$

Потребляемая мощность

$$P_{1n} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{8}{0,815} = 9,8 \text{ кВт}$$

Номинальный ток двигателя $I_n = \frac{P_{1n}}{U_n} = \frac{9,8 \cdot 100}{220} = 44,5 \text{ А}.$

Полученный ток является током обмотки якоря в обмотки возбуждения:

$$I_{\text{я.н}} = I_{\text{в}} = 44,5 \text{ А}.$$

Э.д.с., наводимая в обмотки якоря,

$$E = U_n - (r_y + r_g) I_n = 220 - (0,4 + 0,3) \cdot 44,5 = 188,8 \text{ В}.$$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = EI_{я.н} = 188,8 \cdot 44,5 = 8400 \text{ Вт} = 8,4 \text{ кВт}.$$

Магнитные и механические потери

$$\Delta P_m = P_{эм} - P_n = 8,4 - 8 = 0,4 \text{ кВт}.$$

Потери в обмотке якоря и в обмотке возбуждения:

$$\Delta P_{я.н} = r_y I_{я.н}^2 = 0,4 \cdot 44,5^2 = 792 \text{ Вт}.$$

$$\Delta P_g = r_g I_g^2 = 0,3 \cdot 44,5^2 = 595 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери в двигателе

$$\Sigma \Delta P_n = 400 + 792 + 595 = 1787 \text{ Вт} = 1,787 \text{ кВт}.$$

Проверим полученный результат:

$$\Sigma \Delta P_n = P_{1н} - P_n = 9,8 - 8 = 1,8 \text{ кВт}.$$

Сопротивление пускового реостата

$$r_p = \frac{U_n}{2 I_{я.н}} - (r_y + r_g) = \frac{220}{2 \cdot 44,5} - 0,7 = 1,77 \text{ Ом}.$$

Контрольные вопросы:

- 1 Расскажите об устройстве простейших машин?
- 2 Принцип работы генератора?
- 3 Принцип режима двигателя?

№	Данные для расчета .					
	U _н , В	I _н , А	I _о , А	r _я , Ом	r _н , Ом	n _н об/мин
0	220	10	1,5	0,11	180	1025
1	220	12	1,8	0,25	120	1225
2	115	15	5,2	0,65	220	1000
3	110	20	4,8	0,4	140	1100
4	220	30	3,5	0,9	210	1025
5	110	40	10,2	0,45	155	1240
6	220	15	9,7	0,33	132	960
7	110	25	7,8	0,7	110	1400
8	220	40	6,4	0,2	195	1500
9	220	35	8,2	0,34	240	1100
10	110	23	3,6	0,78	80	1800
11	115	27	5,8	0,6	130	1350
12	220	44	1,6	0,2	150	1400
13	220	50	4,2	0,26	70	850
14	110	52	9,6	0,18	160	1700
15	220	47	7,2	0,5	145	1750
16	110	18	6,8	0,4	90	1350
17	220	26	3,4	0,75	125	1200
18	220	34	4,5	0,82	60	1110
19	220	60	1,7	0,34	170	1100
20	110	48	8,8	1,2	190	1000
21	110	54	10,5	0,55	130	1550
22	220	28	5,7	0,74	135	1600
23	110	32	4,3	0,92	185	1750
24	110	55	7,6	0,84	195	1350
25	220	62	6,4	0,48	120	1600

(для задач №22)

	Данные для расчета												
	U _н , В	P _н , кВт	η _н , Ом	r ₁ , Ом	η _н	n _н об/мин	cosφ _н	m ₁ =m ₂	P	S _н %	M _п /M _н λ	M _п /M _н	I _п /I _н
1	220	40	90	0,072	0,78	1440	0,84	0,072	2	3	2,2	2	7
2	220	55	90,5	0,039	0,795	1440	0,84	0,039	2	3	2,2	2	7
3	220	75	90,5	0,021	0,805	1450	0,85	0,032	2	4	2,2	2	7
4	220	100	90,5	0,092	0,805	960	0,85	0,021	2	4,5	2,2	2	7
5	220	30	89	0,06	0,845	960	0,84	0,092	2	3,5	2,2	2	7
6	220	40	89	0,069	0,855	960	0,85	0,06	2	2	2,2	1,9	7
7	220	55	89	0,035	0,86	960	0,86	0,059	2	3	2,2	1,9	7
8	220	75	90,5	0,157	0,86	960	0,86	0,035	2	3,5	2,2	1,8	7
9	220	22	87,5	0,093	0,88	720	0,79	0,157	2	4	2,2	1,7	7
10	220	30	87,5	0,086	0,88	720	0,79	0,093	2	3,5	2,2	1,7	7
11	220	40	87,5	0,051	0,88	720	0,81	0,086	2	3,5	2,2	1,7	7
12	220	55	90	0,27	0,88	720	0,81	0,051	2	3,5	2,2	1,7	7
13	220	10	85	0,495	0,89	1420	0,82	0,27	2	3	2,2	2	7
14	220	75	84	0,34	0,89	960	0,82	0,495	2	3	2,2	1,8	7
15	220	10	85	0,645	0,9	960	0,83	0,34	2	3	2,2	1,7	7
16	220	55	82	0,75	0,9	710	0,72	0,645	2	3	2,2	2,3	7

17	220	22	64	0,74	0,915	875	0,72	0,75	2	2,5	2,2	2,5	7
18	220	35	70,5	0,685	0,885	910	0,73	0,74	2	3	2	2,9	7
19	220	50	74,5	0,49	0,885	940	0,68	0,685	2	3	2	2,8	7
20	220	75	78,5	0,325	0,89	945	0,69	0,49	2	3	2	3,1	7
21	220	11	82,5	0,45	0,9	953	0,71	0,325	2	3	2	2,6	7
22	220	75	77,5	0,475	0,91	720	0,69	0,045	2	3	2	2,9	7
23	220	11	81	0,355	0,925	720	0,7	0,475	2	3	2	3	7
24	220	16	82,5	0,180	0,925	710	0,74	0,355	2	3	2	3	7
25	220	22	84,5	0,095	0,925	710	0,67	0,18	2	3	2	3	7

(для задач №23 и №24)

КУРСОВАЯ РАБОТА

Для выполнения курсового проекта приведен один пример, который дается в следующей последовательности.

Исходные данные трёхфазного двухобмоточного масляного трансформатора.

Номинальная мощность	$S_n=1000$ кВА
Число фаз	$m = 3$
Частота	$F = 50$ ГЦ
Номинальные напряжения: Обмотки ВН Обмотки НН	$U_{н2}= 35000$ В $U_{н1}= 400$ В
Схема и группа соединений	Звезда/треугольник–
Напряжение короткого замыкания	$U_k= 6.5\%$
Потери короткого замыкания	$P_k= 12200$ Вт
Потери холостого хода	$P_x= 2350$ Вт
Ток холостого хода	$I_0=1.5\%$
Материал обмоток	Медь

Порядок расчёта.

1. Расчёт основных электрических величин и изоляционных материалов.
2. Расчёт обмоток.
3. Расчёт параметров короткого замыкания.
4. Расчёт магнитной системы трансформатора и параметров холостого хода.
5. Тепловой расчёт трансформатора, расчёт системы охлаждения.

1. РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАССТОЯНИЙ.

1.1 Определение основных электрических величин

Расчёт проводим для трёхфазного трансформатора стержневого типа с концентрическими обмотками.

$$S_{\phi} = S' = S_n/3 = 1000/3 = 333.3 \text{ кВА}$$

Номинальные (линейные) токи на сторонах:

$$\text{ВН: } I_2 = \frac{S_n}{U_{н2} \times \sqrt{3}} = \frac{1000 \times 10^3}{35000 \times \sqrt{3}} = 16.5 \text{ А}$$

$$\text{НН: } I_1 = \frac{S_n}{U_{н1} \times \sqrt{3}} = \frac{1000 \times 10^3}{400 \times \sqrt{3}} = 1443.38 \text{ А}$$

Фазные токи соединения звезда равны линейным.

Фазные напряжения обмоток:

$$\text{ВН: } U_{\phi 2} = U_{н2}/\sqrt{3} = 35000/\sqrt{3} = 20207 \text{ В}$$

$$\text{НН: } U_{\phi 1} = U_{н1} / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 231 \text{ В}$$

Испытательное напряжение обмоток смотрим по таблице 4.1 (Л-1):

ВН: $U_{\text{исп.2}} = 85 \text{ кВ}$

НН: $U_{\text{исп.1}} = 5 \text{ кВ}$

По таблице 5.8 (Л-1) выбираем тип обмоток:

Обмотка ВН при напряжении 35 кВ и токе 16.5 А – непрерывная катушечная из прямоугольного провода.

Обмотка НН при напряжении 400 кВ и токе 1443.38А – винтовая двухходовая из прямоугольного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН, $U_{\text{исп.2}} = 85 \text{ кВ}$ по таблице 4.5 (Л-1) находим изоляционные расстояния:

$$a_{12} = 27 \text{ мм}; \quad l_{02} = 75 \text{ мм}; \quad a_{22} = 30 \text{ мм}$$

Для обмотки НН, $U_{\text{исп.1}} = 5 \text{ кВ}$

$$a_{01} = 15 \text{ мм}$$

1.2. Определение исходных данных расчёта.

Мощность обмоток одного стержня:

$$S = 333.3 \text{ кВА}$$

Ширина приведённого канала рассеивания:

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3$$

$$(a_1 + a_2) / 3 = K \sqrt[4]{S} \times 10^{-2}, \text{ где } K=0.52 \text{ (из табл. 3.3), (Л-1)}$$

$$(a_1 + a_2) / 3 = 0.52 \sqrt[4]{333.3} \times 10^{-2} = 0.0222 \text{ м}$$

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3 = 27 \times 10^{-3} + 0.0222 = 0.0492 \text{ м}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_a = P_k / 10 S_n = 12200 / 10 \times 1000 = 1.22 \%$$

$$\text{Реактивная составляющая: } U_p = \sqrt{U_k^2 - U_a^2} = \sqrt{6.5^2 - 1.22^2} = 6.38 \%$$

Выбираем трёхфазную стержневую шихтованную магнитную систему с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне по рис.1.

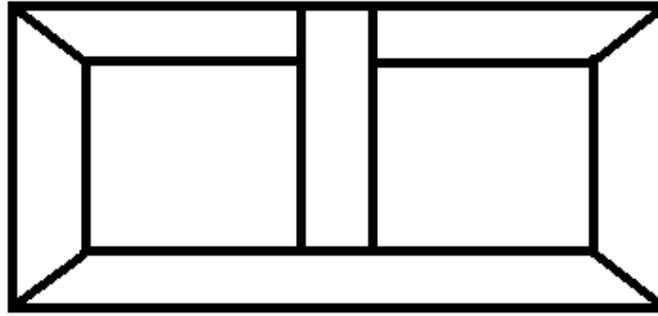


Рис. 1 Схема плоской магнитной системы трансформатора.

Прессовка стержней бандажами из стеклоленты и ярм стальными балками. Материал магнитной системы – холоднокатаная сталь марки 3404 толщиной 0.35 мм.

Индукция в стержне $B_c = 1.62$ Тл (по таблице 2.4). В сечении стержня 9 ступеней, коэффициент заполнения круга $K_{кр} = 0.925$ (по таблице 2.5), изоляция пластин – нагревостойкое изоляционное покрытие плюс однократная лакировка, $K_3 = 0.97$ (по таблице 2.2), коэффициент заполнения сталью $k_c = K_{кр} \times K_3 = 0.925 \times 0.97 = 0.897$. Ярмо многоступенчатое, число ступеней 6, коэффициент усиления ярма (по таблице 8.7) :

$$k_{я} = 1.1$$

индукция в зазоре:

$$B_{я} = B_c / k_{я} = 1.62 / 1.1 = 1.473 \text{ Тл}$$

Число зазоров магнитной системы на косом стыке = 4, на прямом = 3. Индукция в зазоре на прямом стыке:

$$B_3'' = B_c = 1.62 \text{ Тл}$$

На косом стыке:

$$B_3' = B_c / \sqrt{2} = 1.62 / \sqrt{2} = 1.146 \text{ Тл}$$

Удельные потери в стали $p_c = 1.353$ Вт/кг; $p_{я} = 1,242$ Вт/кг.

Удельная намагничивающая мощность $q_c = 1.958$ ВА/кг, $q_{я} = 1,66$ ВА/кг,

Для зазоров на прямых стыках $q_3'' = 25100$ ВА/кг,

для зазора на косых стыках $q_3' = 3200$ ВА/м².

По таблице 3.6 (Л-1) находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания, $k_d = 0.91$ и по таблице 3.4 и 3.5 (Л-1) находим постоянные коэффициенты для медных обмоток $a = 1.4$ и $b = 0.3$.

Принимаем $k_p \leq 0.95$.

Диапазон изменения β от 1.5 до 3.6

1.3. Расчет основных коэффициентов.

Расчет коэффициентов проводится по следующим формулам (3.30), (3.36), (3.43), (3.44), (3.52), (3.65) :

$$A = 0.507 \times \sqrt[4]{\frac{S \times a_p \times k_p}{f \times u_p \times B_c^2 \times k_c^2}} ;$$

$$A = 0.507 \times \sqrt[4]{\frac{333 \cdot 3 \times 0.0492 \times 0.95}{50 \times 6.38 \times 1.62^2 \times 0.897^2}} = 0.198 ;$$

$$A_1 = 5.633 \times 10^4 \times k_c \times A^3 \times a;$$

$$A_1 = 5.633 \times 10^4 \times 0.897 \times 0.198 \times 1.4 = 549.1 \text{ кг};$$

$$A_2 = 3.605 \times 10^4 \times k_c \times A^2 \times l_0;$$

$$A_2 = 3.605 \times 10^4 \times 0.897 \times 0.198^2 \times 0.075 = 95.1 \text{ кг};$$

$$B_1 = 2.4 \times 10^4 \times k_c \times k_{\text{я}} \times A^3 \times (a + b + e);$$

$$B_1 = 2.4 \times 10^4 \times 0.897 \times 1.1 \times 0.198^3 \times (1.4 + 0.3 + 0.41) = 387.9 \text{ кг};$$

$$B_2 = 2.4 \times 10^4 \times k_c \times k_{\text{я}} \times A^2 \times (a_{12} + a_{22});$$

$$B_2 = 2.4 \cdot 10^4 \times 0.897 \times 1.1 \times 0.198^2 \times (0.027 + 0.03) = 52.9 \text{ кг};$$

$$C_1 = K_0 \times \frac{S \times a^2}{k_{\text{я}} \times k_c^2 \times B_c^2 \times u_a \times A^2};$$

$$C_1 = 2.46 \times 10^{-2} \times \frac{1000 \times 1.4^2}{0.91 \times 0.897^2 \times 1.62^2 \times 1.22 \times 0.198^2} = 524.6 \text{ кг};$$

$$M = 0.244 \times 10^{-6} \times k_{\text{к,3}}^2 \times k_{\text{д}} \times k_{\text{п}} \times (P_{\text{к}} / (a \times A));$$

$$M = 0.244 \times 10^{-6} \times 33.6^2 \times 0.91 \times 0.95 \times (12200 / (1.4 \times 0.198)) = 10.5 \text{ МПа}$$

$$k_{\text{к,3}} = 1.41 \times \frac{100}{u_k} \times (1 + e^{-\pi \times u_a / u_p});$$

$$k_{\text{к,3}} = 1.41 \times \frac{100}{6.5} \times (1 + e^{-\pi \times 1.22 / 6.38}) = 33.6 ;$$

Минимальная стоимость активной части трансформатора имеет место при условиях, определяемых (3.55) Для рассчитываемого трансформатора

$$B = 2 \times (B_2 + A_2) / (3 \times B_1);$$

$$B = 2 \times (95.1 + 52.9) / (3 \times 387.9) = 0.254;$$

$$C = A_1 / (3 \times B_1);$$

$$C = 549.1 / (3 \times 387.9) = 0.472;$$

$$k_{\text{и,п}} = 1.06; k_{\text{о,с}} = 2.36 \text{ по таблице 3.7}$$

$$D = k_{\text{о,с}} \times k_{\text{и,п}} \times (2 \times C_1 / 3 \times B_1);$$

$$D = 2.36 \times 1.06 \times (2 \times 524.6) / (3 \times 387.9) = 2.26$$

$$x^5 + B \times x^4 - C \times x - D = 0$$

$$x^5 + 0.254 \times x^4 - 0.472 \times x - 2.26 = 0$$

по выражениям 3.61 и 3.66 находим предельные значения β по допустимым значениям плотности тока и растягивающим механическим напряжениям.

$$x_J \leq 4.5 \cdot 10^6 \sqrt{2.4 \times 10^{-12} \times C_1 / (k_A D_e)} \quad \beta_J = x_J^4;$$

$$x_J = \leq 4.5 \sqrt{2.4 \times 524.6 / (0.91 \times 12200)} = 1.5 ; \quad \beta_J = 1.5^4;$$

$$\beta_J = 5.06;$$

$$x_\sigma \leq \sqrt[3]{\sigma_p / M} ;$$

где σ_p – обычно для медного провода допускают значение не более 60 МПа

$$x_\sigma \leq \sqrt[3]{60 / 10.5} = 1.79 ; \quad \beta_\sigma = 1.79^4 = 10.3;$$

$$\beta_\sigma = x_\sigma^4;$$

Оба этих значений β лежат за пределами обычно принимаемых. Масса одного угла магнитной системы по (3.45 а)

$$G_y = 0.492 \times 10^4 \times k_c \times k_y \times A^3 \times x^3 ;$$

$$G_y = 0.492 \times 10^4 \times 0.897 \times 1.1 \times 0.198^3 \times x^3 = 37.68 \cdot x^3$$

Активное сечение стержня по (3.59)

$$\Pi_c = 0.785 \times k_c \times A^2 \times x^2;$$

$$\Pi_c = 0.785 \times 0.897 \times 0.198^2 \times x^2 = 0.0276 \cdot x^2;$$

Площадь зазора на прямом стыке

$$\Pi_3'' = \Pi_c = 0.0276 \times x^2 ;$$

На косом стыке

$$\Pi_3' = \Pi_c \times \sqrt{2} ;$$

$$\Pi_3' = 0.0276 \times x^2 \times \sqrt{2} = 0.0390 \times x^2;$$

Для магнитной системы рис 217,б по (8.33) потери холостого хода с учетом таблиц 8.10 , 8.13 и 8.14.

$$P_x = k_{п,д} \times p_c (G_c + 0.5 \times k_{п,у} \times G_y) + k_{п,д} \times p_y (G_y - 6 \times G_y + 0.5 k_{п,у} \times G_y);$$

где : $k_{п,д} = 1.15$ по таблице 8.14;

$k_{п,у} = 10,18$ по таблице 8.13;

$p_{\text{я}}$ и $p_{\text{с}}$ – определены в пункте 1.2;

$$P_x = 1.15 \times 1.353 \times (G_c + 0.5 \times 10.18 \times G_y) + 1.15 \times 1.242 \times (G_{\text{я}} - 6 \times G_y + 0.5 \times 10.18 \times G_y) = 1.556 \times G_c + 1.428 \times G_{\text{я}} + 6.62 \times G_y;$$

Намагничивающая мощность по (8.44) с учетом таблицы 8.17 и 8.20

$$Q_x = k'_{\text{т,д}} \times k''_{\text{т,д}} \times q_{\text{с}} \times (G_c + 0.5 \times k_{\text{т,у}} \times k_{\text{т,пл}} \times G_y) + k'_{\text{т,д}} \times k''_{\text{т,д}} \times q_{\text{я}} (G_{\text{я}} - 6 \times G_y + 0.5 \times k_{\text{т,у}} \times k_{\text{т,пл}} \times G_y) + k''_{\text{т,д}} \times \sum q_{\text{с}} \times n_{\text{с}} \times \dot{I}_{\text{с}} ;$$

где : $k_{\text{т,у}} = 42,45$ по таблице 8.20;

$k_{\text{т,пл}} = 1,25$ по таблице 8.21;

$k'_{\text{т,д}} = 1,20$, $k''_{\text{т,д}} = 1,07$ (из пояснений к формуле 8.44);

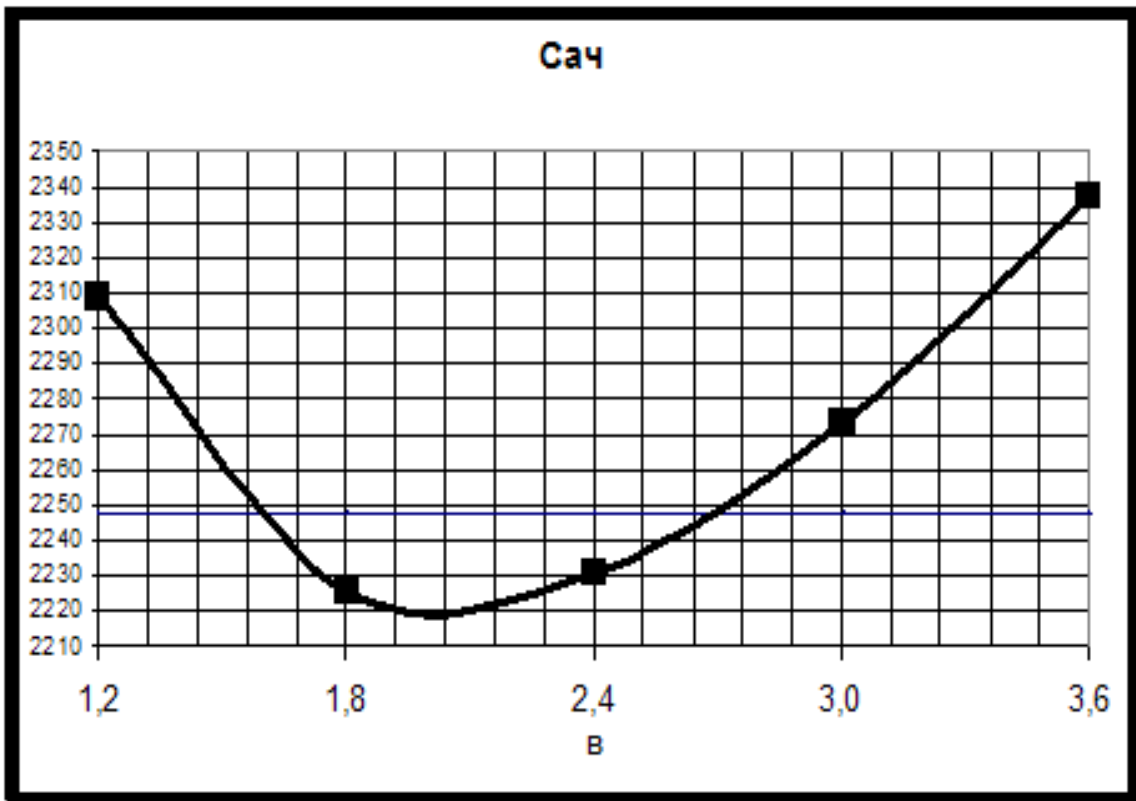
$q_{\text{с}}$ и $q_{\text{я}}$ – определены в пункте 1.2;

$$Q_x = 1.20 \times 1.07 \times 1.958 \times (G_c + 0.5 \times 42.45 \times 1.25 \times G_y) + 1.20 \times 1.07 \times 1.66 \times (G_{\text{я}} - 6 \times G_y + 0.5 \times 42.45 \times 1.25 \times G_y) + 1.07 \times 3200 \times 4 \times 0.0390 \times x^2 + 1.07 \times 25100 \times 3 \times 0.0276 \times x^2 = 2.514 \times G_c + 2.131 \times G_{\text{я}} + 110.46 \times G_y + 2758 \times x^2;$$

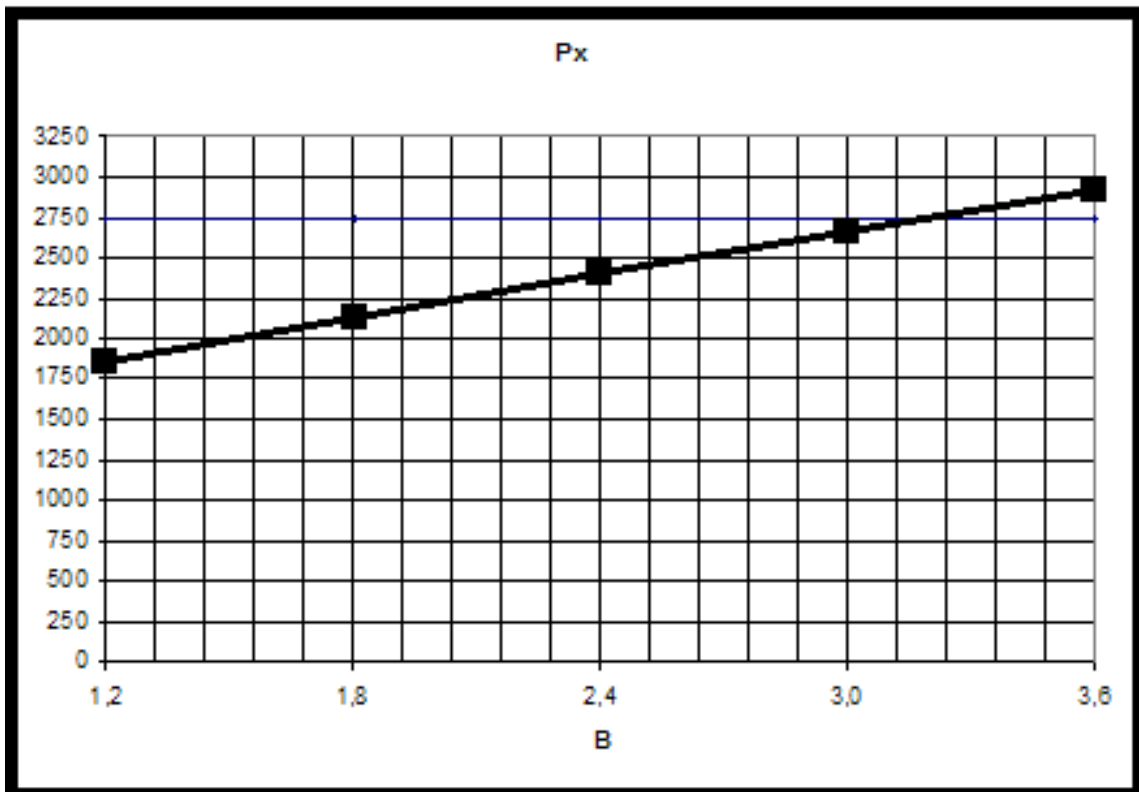
Весь дальнейший расчет, начиная с определения массы стали магнитной системы, для пяти различных значений β (от 1.2 до 3.6) приводится по форме табл. 3.8.

Изменение относительной стоимости активной части с изменением β для трансформатора типа ТМ – 1000/35 с медными обмотками

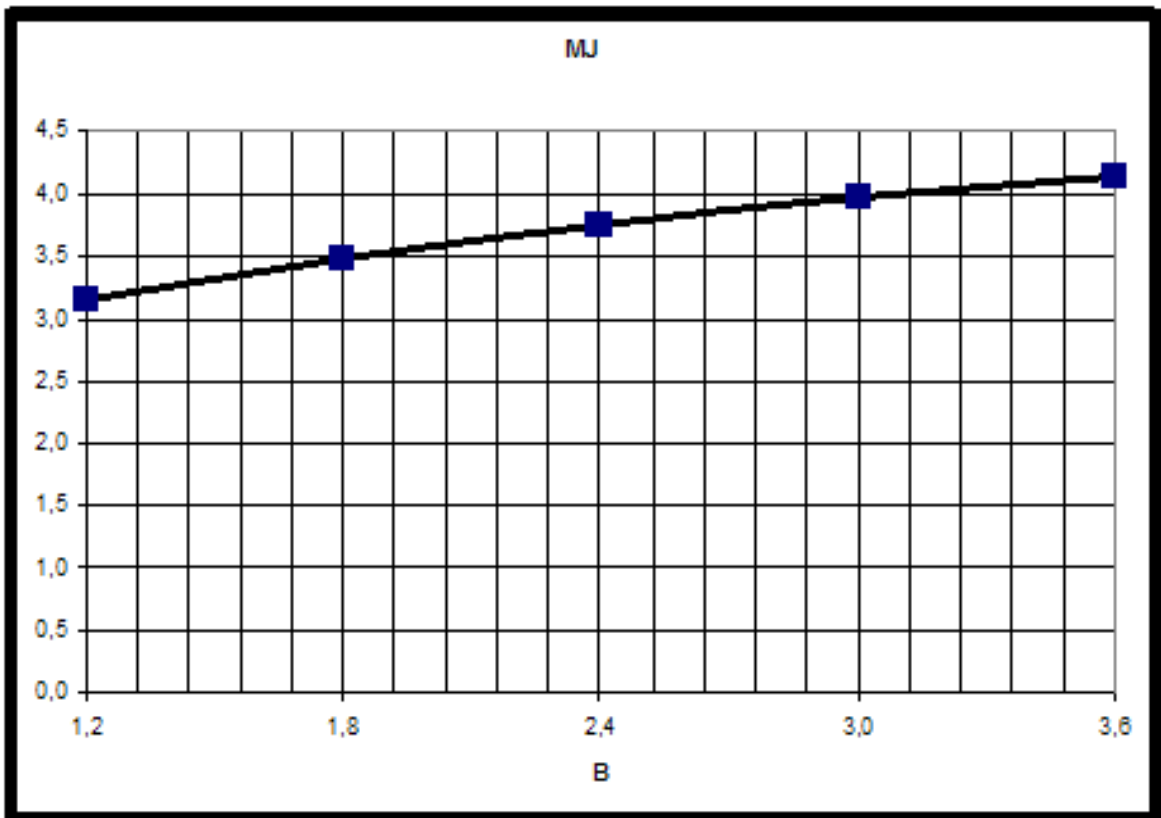
β	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60	1.83
$x = \sqrt[4]{\beta}$	1,047	1.16	1,24	1,32	1,38	1.18
$x^2 = \sqrt{\beta^2}$	1,095	1,34	1,55	1,73	1,9	1.4
$x^3 = \sqrt[4]{\beta^3}$	1,15	1,55	1,93	2,28	2,61	1.66
$A_1/x = 549.1/x$	524.5	473.4	441	416	397.9	465.3
$A_2 \cdot x^2 = 95.1 \cdot x^2$	104.1	127.4	147.4	164.5	180.7	133.1
$G_c = A_1/x + A_2 \cdot x^2$	628.6	600.8	588.4	580.5	578.6	598.4
$B_1 \cdot x^3 = 387.9 \cdot x^3$	446.1	601.2	748.6	884.4	1012.4	643.9
$B_2 \cdot x^2 = 52.9 \cdot x^2$	57.9	70.9	82	91.5	100.5	74.1
$G_{я} = B_1 \cdot x^3 + B_2 \cdot x^2$	504	672.1	830.6	975.9	1112.9	718
$G_{сг} = G_c + G_{я}$	1132.6	1272.9	1419	1556.4	1691.5	1316.4
$G_y = 37.68 \cdot x^3$	43.3	58.4	72.7	85.9	98.3	62.5
$1.556G_c$	978.1	934.8	915.6	903.3	900.3	931.1
$1.428G_{я}$	719.7	959.6	1186.1	1393.6	1589.2	1025.3
$6.62G_y$	286.6	386.6	481.3	568.7	650.7	413.8
$P_x = 1.556 G_c + 1.428G_{я} + 6.62G_y$	1984.4	2281	2583	2865.6	3140.2	2370.2
$\Pi_c = 0.0456 \cdot x^2$	0.0302	0.037	0.0428	0.0477	0.0524	0.0386
$2.514 \cdot G_c$	1580.3	1510.4	1479.2	1459.4	1454.6	1504.4
$2.131 \cdot G_{я}$	1074	1432.3	1770	2079.6	2371.6	1530.1
$110.46G_y$	4782.9	6450.7	8030.4	9488.5	10858.2	6903.8
$2758 x^2$	3020	3695.7	4274.9	4771.3	5240.2	3861.2
$Q_x = 2.514 \cdot G_c + 2.131 \cdot G_{я} + 110.46G_y + 2758 x^2$	10457.2	13179.1	15554.5	17798.8	19924.6	13799.5
$i_0 = Q_x/10S, \%$	1.046	1.318	1.555	1.78	1.992	1.38
$G_0 = C_1/x^2 = 524.6/x^2$	479.1	391.2	338.5	303.2	276.1	374.7
$G_{np} = 103 \cdot 1.03 \cdot G_0$	507.8	414.7	358.8	321.4	292.7	397.2
$k_{o,c} \cdot G_{np} = 2.36 \cdot G_{np}$	1198.4	978.7	846.8	7788.5	690.8	937.4
$C_{a,ч} = G_{сг} + k_{o,c} \cdot G_{np}$	2331	2251.6	2265.8	2314.9	2382.3	2253.8
$J = \sqrt{k_{д} \cdot P_{к} / (K \cdot G_0)} \cdot 10^6 =$	$3.107 \cdot 10^6$	$3.439 \cdot 10^6$	$3.697 \cdot 10^6$	$3.906 \cdot 10^6$	$4.093 \cdot 10^6$	$3.513 \cdot 10^6$
$\sigma_p = M \cdot x^3 = 10.5 \cdot x^3$	12.08	16.28	20.27	23.94	27.41	17.43
$d = A \cdot x = 0.198x$	0.207	0.23	0.247	0.261	0.273	0.234
$d_{12} = a \cdot d = 1.4 \cdot d$	0.29	0.322	0.346	0.365	0.382	0.328
$l = \pi \cdot d_{12} / \beta$	0.062	0.069	0.074	0.078	0.082	0.07
$2a_2 = bd = 0.3d$	0.759	0.562	0.453	0.382	0.33	0.525
$C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}$	0.409	0.448	0.477	0.5	0.521	0.455



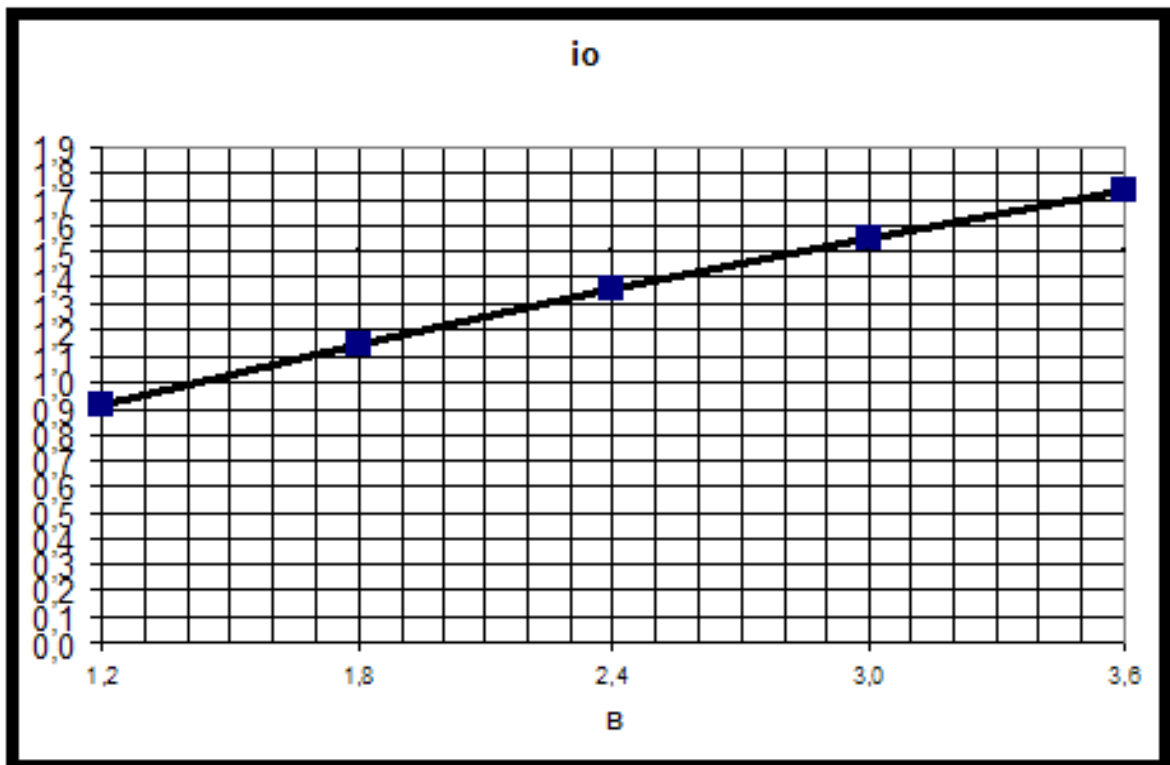
Изменение потерь с изменением β для трансформатора типа ТМ 1000/35 с медными обмотками.



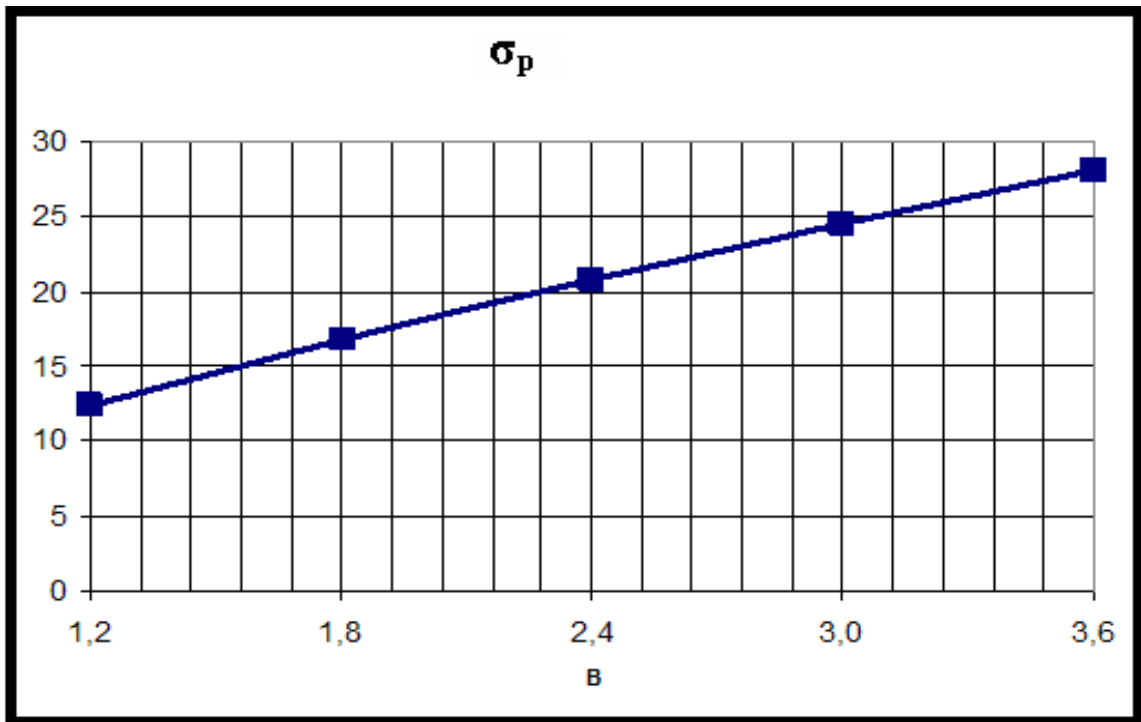
Изменение плотности тока с изменением β для трансформатора типа ТМ - 1000/35 с медными обмотками.



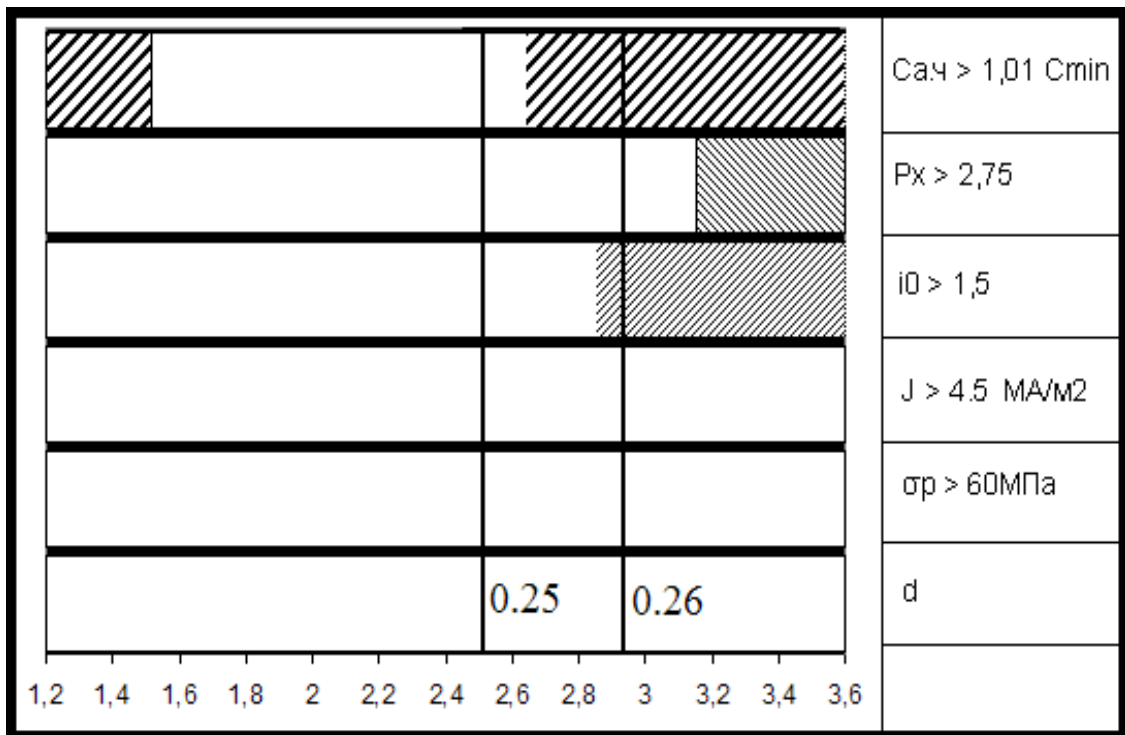
Изменение тока холостого хода с изменением β для трансформатора типа ТМ - 1000/35 с медными обмотками.



Изменение механических натяжений для трансформатора типа ТМ -1000/35 с медными обмотками.



Определение оптимального значения β и диаметра стержня d для трансформатора типа ТМ -1000/35 с медными обмотками.



Используя, рисунок для определения оптимального значения β определяем, что самое оптимальное $\beta=1.83$ при $d = 0.23\text{м}$.
 Для выданных значений β и d рассчитываем и находим по графикам приведенные ниже данные трансформатора.

1.5 Определение основных размеров.

$$\beta = 1.96; x = 1.18; x^2 = 1,4; x^3 = 1,66;$$

Диаметр стержня: $d = Ax = 0,23$ м;

Активное сечение стержня:

$$P_c = 0.0276x^2 = 0.0386\text{м}^2.;$$

Средний диаметр обмоток:

$$d_{12} = ad = 0.3271 \text{ м.};$$

Высота обмоток:

$$l = \pi d_{12} / \beta = 0.524 \text{ м};$$

Высота стержня:

$$l_c = l + 2l_0 = 0.524 + 2 \times 0.075 = 0.674 \text{ м};$$

Расстояние между осями стержней:

$$C = d_{12} + a_{12} + bd + a_{22} = 0.3271 + 0.027 + 0.3 \times 0.23 + 0.03 = 0.4048 \text{ м};$$

ЭДС одного витка:

$$u_b = 4.44fP_cB_C = 4.44 \times 50 \times 0.0386 \times 1.62 = 13.88 \text{ В};$$

Масса стали:

$$G_{ст} = 1316 \text{ кг};$$

Масса металла обмоток:

$$G_0 = 375 \text{ кг};$$

Масса провода:

$$G_{пр} = 1.03 \times G_0 = 1.03 \times 375 = 386.3 \text{ кг};$$

Плотность тока:

$$J = 3.51 \times 10^6 \text{ А/м}^2.;$$

Механическое напряжение в обмотках:

$$\sigma_p = M \cdot x^3 = 10.5 \times 1.66 = 17.4 \text{ МПа}$$

Стоимость активной части в условных единицах

$$C_{a,ч} = 2254$$

Потери и ток холостого хода.

$$P_x = 2370 \text{ Вт};$$

Ток холостого хода

$$i_0 = 1.38\%$$

$$\begin{aligned} x^5 + 0.254x^4 - 0.472x - 2.26 &= 0 \\ x^2 \times (x^3 + 0.254x^2) - 0.472x - 2.26 &= 0 \\ 1.4 \times (1.66 + 0.254 \times 1.4) - 0.472 \times 1.18 - 2.26 &= 0.005 \end{aligned}$$

2. РАСЧЕТ ОБМОТОК.

2.1. Расчёт обмоток НН.

Число витков обмоток НН:

$$\omega_1 = U_{\phi 1} / U_b = 231 / 13.88 = 16.64.$$

Принимаем $\omega_1 = 17$

Напряжение одного витка $U_B = U_{\phi 1} / \omega_1 = 231 / 17 = 13.59 \text{ В}$

Средняя плотность тока в обмотках :

$$J_{cp} = 10^4 \times 0.746 k_g P_k U_B / S d_{12} = 10^4 \times 0.746 \times 0.91 \times 12200 \times 13.59 / 1000 \times 0.3271 = 3.44 \times 10^6 \text{ А/м}^2 = 3.44 \text{ МА/м}^2$$

Сечение витка ориентировочно:

$$П_1 = П_B = I_{\phi 1} / J_{cp} = 1443 / 3.44 \times 10^6 = 419.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2 = 419.5 \text{ мм}^2$$

По таблице 5.8 по мощности 1000 кВА, току на один стержень 1443 А, номинальному напряжению одной обмотки 400 В и сечению витка 419.5 мм^2 – выбираем конструкцию винтовой обмотки.

Размер радиального канала предварительно: $h_k = 5 \text{ мм}$.

Число реек по окружности обмотки – 12.

Ширина между витковых прокладок: $b_{пр.} = 40 \text{ мм}$

Ориентировочный осевой размер витка:

$$h_{в1} = \frac{l}{w_1 + 4} - h_k = \frac{0.524}{17 + 4} - 0.005 = 0.020 \text{ м} = 20 \text{ мм}$$

Ввиду того, что $h_{в1}$ больше предельно допустимого $h_{в1} \geq 6,5 \text{ мм}$, выбираем двухходовую винтовую обмотку с радиальными каналами между витками с равномерно распределённой транспозицией по рисунку 6.5 г.

По полученным ориентировочным значениям $П_1$ и $h_{в1}$ в таблице 5.2 подбираем значение сечения витка из 12-ти параллельных проводов:

$$ПБ12 \times \frac{3.55 \times 10^{-6}}{4.15 \times 10^{-6}}$$

Разделённых на две группы по шесть проводов с каналами по 4 мм между витками (рис.2).

Для частичной компенсации разрыва в обмотке ВН при регулировании напряжения размещаем в середине высоты обмотки НН шесть радиальных каналов по 10 мм.

Полное сечение витка:

$$П_1 = 12 \times 35 = 420 \text{ мм}^2 = 420 \times 10^{-6} \text{ м}^2$$

Плотность тока:

$$J_1 = 1443 \times 10^6 / 420 = 3.44 \text{ МА/м}^2$$

По графику рис.5.34(а) ($J-I$), находим, что для $J=3.44 \text{ МА/м}^2$ и $b=10 \text{ мм}$,
 $q=1200 \text{ Вт/м}^2$

Высота обмотки:

$$I_1 = 2 \times b \times 10^{-3} \times (\omega_1 + 1) + k \times h_k \times (2\omega_1 + 1) \times 10^{-3};$$

$$I_1 = (17+1) \times 2 \times 10.5 \times 10^{-3} + 0.95 \times 5 \times (34+1) = 540 \approx 0.54 \text{ м}$$

Радиальный размер обмотки: $a_1 = 6 \times 4.05 \times 10^{-3} = 0.024 \text{ м}$.

По таблице 4.4 ($J-I$) для $U_{исп.1}=5 \text{ кВ}$, $S=1000 \text{ кВА}$ и винтовой обмотки находим $a_{01}=15 \text{ мм}$, обмотка наматывается на 12 рейках на бумажно-бакелитовом цилиндре размером

$$\frac{0.240}{0.248} \times 0.65 \text{ м}$$

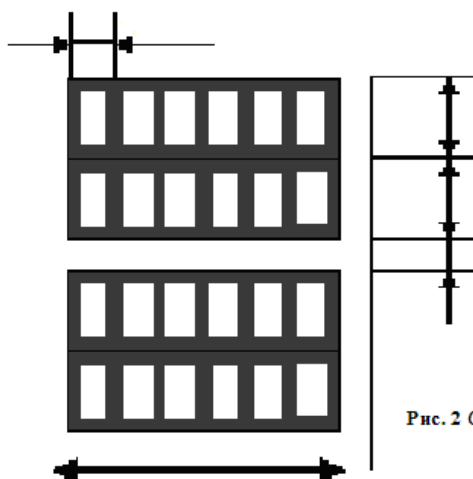


Рис. 2 Сечение витка обмотки НН.

Внутренний диаметр обмотки:

$$D_1 = d + 2a_{01} = 0.23 + 2 \times 0.015 = 0.26 \text{ м}$$

Внешний диаметр обмотки по (7.19):

$$D_1 = D_1 + 2a_1 = 0.26 + 2 \times 0.024 = 0.31 \text{ м}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7.19)

$$q = \frac{107 \text{ Вт/м}^2 \cdot k_g}{k_3 (b + a)} \times 10^{-10} = \frac{107 \times 3.44 \times 10^6 \times 1443 \times 0.5 \times 1.05}{0.75 \times (0.011 + 0.024)} \times 10^{-10} \approx 1062 \text{ Вт/м}^2$$

В обмотке предусматривается равномерно распределённая транспозиция параллельных проводов-12 транспозиций по принципиальной схеме рис. 5.29 (Л-1). Первая транспозиция после первого витка, 11 последующих с шагом в два витка, т.е. после третьего витка, пятого витка и т.д. .

Масса металла обмотки по (7.6) (Л-1):

$$G_{01} = 28 \times 10^3 \text{ сД}_{\text{ср}} \omega_1 \Pi_1 = 28 \times 10^3 \times 3 \times 0.28 \times 17 \times 420 \times 10^{-6} = 167.9 \text{ кг}$$

Масса провода по таблице 5.5 (Л-1)

$$G_{\text{пр1}} = 167.9 \times 1.02 = 171.3 \text{ кг}$$

Расчёт обмотки ВН.

Выбираем схему регулирования по рис. 3 (6.14) (Л-1) с выводом концов всех трёх фаз обмотки к одному трёх фазному переключателю. Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток 16.5 А. Наибольшее напряжение между контактами переключателя в одной фазе:

$$\text{рабочее: } \frac{10}{\sqrt{3}} \% U_2, \text{ т.е. } 2020 \text{ В}$$

$$\text{испытательное: } 2 \times \frac{10}{\sqrt{3}} \% U_2, \text{ т.е. } 4040 \text{ В.}$$

для получения на стороне В различных напряжений необходимо соединять

Напряжение, В	Ответвления обмотки
36 750	A ₂ A ₃ B ₂ B ₃ C ₂ C ₃

35 875	A ₃ A ₄ B ₃ B ₄ C ₃ C ₄
35 000	A ₄ A ₅ B ₄ B ₅ C ₄ C ₅
34 125	A ₅ A ₆ B ₅ B ₆ C ₅ C ₆
33 250	A ₆ A ₇ B ₆ B ₇ C ₆ C ₇

Число витков в обмотке ВН при номинальном напряжении:

$$\omega_{н2} = U_{ф2}/U_B = \frac{20207}{13.59} = 1487 \text{ витка}$$

Число витков на одной ступени регулирования:

$$\omega_p = \frac{\Delta U}{U_B \sqrt{3}} = \frac{875}{13.59 \cdot \sqrt{3}} = 37 \text{ витка}$$

Для пяти ступеней

Напряжение, В	Число витков на ответвлениях
36 750	1487+2×37=1561
35 875	1487+37=1524
35 000	1487
34 125	1487-37=1450
33 250	1487-2×37=1413

Ориентировочная плотность тока

$$J_2 \approx 2 \times J_{ср.} - J_1 = 2 \times 3.44 \times 10^6 - 3.44 \times 10^6 = 3.44 \text{ МА/м}^2$$

Ориентировочное сечение витка

$$П_2 \approx \frac{I_2}{J_2} = \frac{16.5}{3.44 \cdot 10^6} = 4.8 \times 10^{-6} \text{ м}^2 = 4.8 \text{ мм}^2$$

По таблице 5,8 (Л-1) выбираем непрерывную катушечную обмотку из медного прямоугольного провода (S=1000 кВА; I₂=16.5А; U₂= 35000 В; П₂ = 5.04мм²). По сортаменту медного обмоточного провода (табл. 5,2) выбираем провод марки ПБ.

$$\text{ПБ-1} \times \frac{1.40 \times 3.75}{1.90 \times 4.25} \text{ сечением } П_2 = 5.04 \times 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$\text{Плотность тока в обмотке: } J_2 = \frac{I_2}{П_2} = \frac{16.5}{5.04 \cdot 10^{-6}} = 3.27 \text{ МА/м}^2.$$

При J₂ = 3.27 МА/м² и b=3.75 мм по графикам рис. 5,34 (а) находим q = 600 Вт/м²

Принимаем конструкцию обмотки с радиальными каналами по 4 мм между всеми катушками. Две крайние катушки вверху и внизу катушки отделены каналами по 7,5 мм (см. табл. 4,10) (Л-1).

Схема регулирования напряжения (по рис. 6,14) (Л-1), канал в месте разрыва обмотки h_{кр} = 12 мм (см. табл.4,9) (Л-1).

Осевой размер катушки 4.25 мм.

Число катушек на стержне ориентировочно:

$$N_{кат.2} \approx \frac{l_2 \cdot 10^3}{b + h_k} = \frac{0.52 \times 10^3}{4.25 + 4} = 63.03$$

В целях соблюдения условий по высоте катушек берем 63

Число витков в катушке ориентировочно:

$$\omega_{кат} \approx \frac{1561}{63} = 24.7 \approx 25$$

Радиальный размер: a₂ = 1.90 × 25 = 47.5 ≈ 48мм

Общее распределение витков по катушкам:

44 основные катушки В по 26 витков.....	1144 витков
7 основных катушек Г по 25 витков.....	175 витков
8 регулировочных катушек Д по 18.5 витков.....	148 витков
4 катушки с усиленной изоляцией Е по 23.5 витка	94 витков
Всего: 63 катушек.....	1561 витков

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты по рис. 3 (а).

Осевой размер обмотки:

$$l = 0.54 \text{ м}$$

По испытательному напряжению $U_{исп.} = 85 \text{ кВ}$ и мощности трансформатора $S = 1000$,

канал между обмотками ВН и НН $a'_{12} = 27 \text{ мм}$

Толщина цилиндра $\delta'_{12} = 5 \text{ мм}$

Выступ цилиндра за высоту обмотки $\Gamma_{11} = 55 \text{ мм}$

Расстояние между обмотками ВН двух соседних стержней $a'_{22} = 30 \text{ мм}$

Толщина междуфазной перегородки $\delta'_{22} = 3 \text{ мм}$

Расстояние от обмотки ВН до ярма $\Gamma_0 = 75 \text{ мм}$

Согласно параграфу 4,3 (Л-1) принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра, на котором на 12 рейках наматывается обмотка диаметром:

$$\frac{345}{355} \times 0.650$$

основные размеры обмоток трансформатора показаны на рис. 3 (б).

Плотность теплового потока на поверхности обмотки для катушки Г по (7,19) (Л-1):

$$q_2 = \frac{107 \cdot J_2 \cdot 10^6 \cdot I \cdot \omega_k \cdot k_d}{k_3 (b' + a_2)} \times 10^{-10}$$

$$q_2 = \frac{107 \times 3,27 \times 10^6 \times 16,5 \times 25 \times 1,05}{0,8 \times (0,00425 + 0,0475)} \times 10^{-10} = 210 \text{ Вт/м}^2$$

Данные катушек обмотки ВН трансформатора ТМ-1000/35 с медными обмотками.

Данные	Условные обозначения катушки				Всего
	В	Г	Д	Е	
Назначение катушек	основная	основная	регулирующая	С усиленной изоляцией	-
Катушек на стержень	44	7	8	4	63
Число витков в катушке	26	25	18.5	23.5	-
Всего	1144	175	148	94	1561
Размеры провода: Без изоляции, мм	1.40×3.75			1.40×3.75	-
С изоляцией, мм	1.90×4.25			2.90×5.25	-
Сечение витка, мм ²	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04
Плотность тока, МА/ мм ²	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27
Размер, мм:			(35)*		

Радиальный	49	47.5	45	68	52
Осевой	4.25	4.25	4.25	5.25	540
Масса провода, кг:					
Без изоляции	200	30.5	25.6	17.2	274.9
С изоляцией	207	31.6	26.5	19	284.5
$K_{из}$ по табл. 5.5	1,035	1,035	1,035	1,105	-
Диаметры, м :					
Внутренний	0.364	0.364	0.364	0.364	0.364
Внешний	0.462	0.459	0.454	0,5	0.468

примечание :

* в катушки и Д вмотать полоску картона до радиального размера 45 мм

- 1- $k_{из}$ - учитывает увеличение массы провода за счет массы изоляции.
- 2- Внутренний диаметр обмотки ВН: $D'_2 = D''_1 + 2a_{12}$;
- 3- Внешний диаметр обмотки ВН: $D''_2 = D'_2 + 2a_2$;
- 4- Средний диаметр ВН: $D_{cp} = (D'_2 + D''_2) / 2$;
- 5- Масса металла обмотки ВН $G_{02} = 28 \times 10^3 \times c \times D_{cp} \times w_2 \times \Pi_2$
- 6- Масса провода в обмотке ВН с изоляцией: $G_{пр2} = K_{из} \times G_{02}$

Масса металла обмотки ВН по таблице 4:

$$G_{02} = 274.9 \text{ кг}$$

Масса провода в обмотке ВН с изоляцией по таблице 4:

$$G_{пр2} = 284.5 \text{ кг}$$

Масса металла (меди) обмоток НН и ВН:

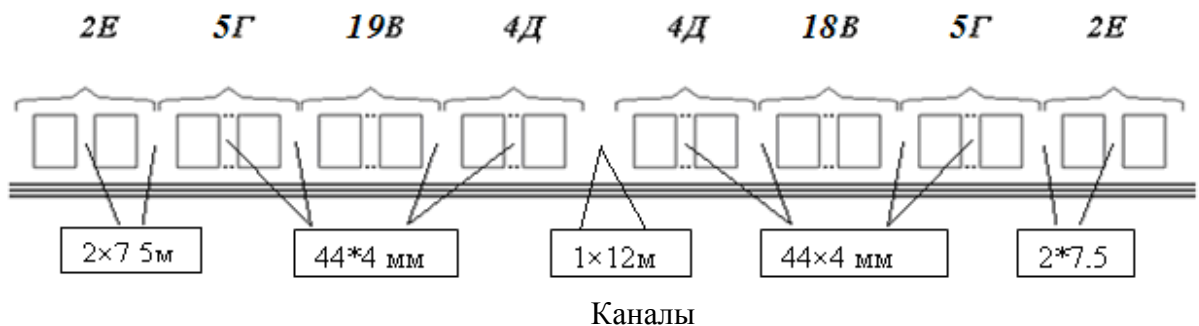
$$G_0 = G_{01} + G_{02} = 167.9 + 274.9 = 442.8 \text{ кг}$$

Масса провода двух обмоток:

$$G_{пр} = G_{пр1} + G_{пр2} = 171.3 + 284.5 = 455.8 \text{ кг}$$

Рис. 3 Обмотка трансформатора.

Катушки



3. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Потери короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называются потери, возникающие в трансформаторе при номинальной частоте и установленной в одной из обмоток тока, соответствующего его номинальной мощности при замкнутой накоротко второй обмотки.

Потери короткого замыкания согласно параграфу 7.1 (Л-1):

Основные потери в обмотках по параграфу 7.3, при $t = 75^\circ \text{ C}$.

Обмотка НН:

$$P_{\text{осн.1}} = 2,4 \times 10^{-12} \times J_1^2 \times G_{\text{об.1}} = 2,4 \times 10^{-12} \times (3.44 \times 10^6)^2 \times 167.9 = 4768.5 \text{ Вт};$$

Обмотка ВН:

$$P_{\text{осн.2}} = 2,4 \times 10^{-12} \times J_2^2 \times G_{\text{об.2}} = 2,4 \times 10^{-12} \times (3.27 \times 10^6)^2 \times 274.9 = 7054.7 \text{ Вт};$$

Принимаем $k_p = 0,95$

Добавочные потери в обмотке НН:

$$k_{\text{Д1}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times \beta^2 \times a^4 \times n^2;$$

$$\beta_1^2 = (b \times m \times k_p / l)^2;$$

$$\beta_1^2 = (10 \times 10^{-3} \times 34 \times 0,95 / 0,54)^2 = 0,358;$$

$$k_{\text{Д1}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times 0,358 \times 3,55^4 \times 10^{-12} \times 6^2 = 1 + 0,019 = 1,019$$

Добавочные потери в обмотке ВН:

$$k_{\text{Д2}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times \beta^2 \times a^4 \times n^2;$$

$$\beta_2^2 = (b \times m \times k_p / l)^2;$$

$$\beta_2^2 = (3,75 \times 10^{-3} \times 63 \times 0,95 / 0,54)^2 = 0,173;$$

$$k_{\text{Д2}} = 1 + 0,095 \times 10^8 \times 0,173 \times 1,4^4 \times 10^{-12} \times 26^2 = 1 + 0,004 = 1,004$$

Основные потери в отводах рассчитываются следующим образом:

Длина отводов определяется приближённо по (7,21) (Л-1):

$$l_{\text{отв}} = 7,5 \times l = 7,5 \times 0,54 = 4,05 \text{ м}$$

Масса отводов НН: (при плотности меди отводов $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$)

$$G_{\text{отв.1}} = l_{\text{отв.1}} \times \Pi_{\text{отв.1}} \times \gamma = 4,05 \times 420 \times 10^{-6} \times 8900 = 15,14 \text{ Вт}$$

Потери в отводах НН: (при $k = 2,4 \times 10^{-12}$)

$$P_{\text{отв.1}} = k \times J_1^2 \times G_{\text{отв.1}} = 2,4 \times 10^{-12} \times 3,44^2 \times 10^{12} \times 15,14 = 430 \text{ Вт}$$

Масса отводов ВН: (при плотности меди отводов $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$)

$$G_{\text{отв.2}} = l_{\text{отв.2}} \times \Pi_{\text{отв.2}} \times \gamma = 4,05 \times 5,04 \times 10^{-6} \times 8900 = 0,182 \text{ Вт}$$

Потери в отводах ВН: (при $k = 2,4 \times 10^{-12}$)

$$P_{\text{отв.2}} = k \times J_2^2 \times G_{\text{отв.2}} = 2,4 \times 10^{-12} \times 3,27^2 \times 10^{12} \times 0,182 = 5 \text{ Вт}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака определяем приближённо, по (7,25) и табл. 7,1 (Л-1):

$$P_{\text{б}} = 10kS = 10 \times 0,025 \times 1000 = 250 \text{ Вт}$$

Полные потери короткого замыкания:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{осн.1}} \times k_{\text{Д1}} + P_{\text{осн.2}} \times k_{\text{Д2}} + P_{\text{отв.1}} + P_{\text{отв.2}} + P_{\text{б}}$$

$$P_{\text{к}} = 4768,5 \times 1,019 + 7054,7 \times 1,004 + 430 + 5 + 250 = 12627 \text{ Вт}$$

Для номинального напряжения обмотки ВН:

$$P_{\text{к}} = 12627 - 0,05 \times 7082,9 = 12273 \text{ Вт}$$

$$\text{или } \frac{12273 \times 100}{12200} = 100,6 \%$$

Напряжение короткого замыкания рассчитывается согласно параграфу 7,2 (Л-1):

Активная составляющая:

$$u_{\text{а}} = \frac{P_{\text{к}}}{10 S} = \frac{12273}{10 \cdot 1000} = 1,277\%$$

Реактивная составляющая:

$$u_{\text{р}} = \frac{7,9 \times f \times S \times \beta \times a_{\text{р}} \times k_{\text{р}} \times k_{\text{q}}}{u_{\text{б}}^2} \times 10^{-1}$$

где: $f = 50 \text{ Гц}$

$S = 333,3 \text{ кВА}$

$\beta = \pi \times d_{12} / l = 3,14 \times 0,3271 / 0,54 = 1,902$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 0,027 + \frac{0,024 + 0,0475}{3} = 0,051 \text{ м}$$

$$k_p = 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,0581(1 - e^{-1/0,0581}) = 0,94$$

$$\sigma = \frac{a_{12} + \dot{a}_1 + \dot{a}_2}{\pi \times l} = \frac{0,027 + 0,024 + 0,0475}{\pi \times 0,54} = 0,0581$$

$$k_q = 1 + \frac{l \times x^2}{m \times a_p \times k_p} = 1 + \frac{0,54 \times 0,102^2}{3 \times 0,051 \times 0,94} = 1,039$$

$$u_p = \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 433 \cdot 3 \cdot 1,902 \cdot 0,051 \cdot 0,94 \cdot 1,039}{13,59^2} \times 10^{-1} = 6,753 \%$$

Напряжение короткого замыкания:

$$u_k = \sqrt{u_p^2 + u_a^2} = \sqrt{6,753^2 + 1,227^2} = 6,86 \%$$

или $6,86 \times 100 / 6,5 = 105,5 \%$ заданного значения.

Установившийся ток короткого замыкания на обмотке ВН по (7,38) и табл. 7,2 (Л-1):

$$I_{к.у.} = \frac{100 \cdot I_n}{u_k \times (1 + \frac{100 \cdot S_n}{u_k \cdot S_k})} = \frac{100 \cdot 16,5}{6,86 \cdot (1 + \frac{100 \cdot 1000}{6,86 \cdot 1000 \cdot 10^3})} = 239,1 \text{ А}$$

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания:

$$i_{к.маx} = 1,41 k_{маx} \times I_{к.у.} = 529,3 \text{ А}$$

Радиальная сила по (7,43) (Л-1):

$$F_p = 0,628 \times (i_{к.маx} \times w)^2 \times \beta \times k_p \times 10^{-6} = 0,628 \times (529,3 \times 1487)^2 \times 1,902 \times 0,94 \times 10^{-6} = 695543 \text{ Н}$$

Среднее сжимающее напряжение в проводе обмотки НН по (7,48) и (7,49):

$$\sigma_{сж,р} = \frac{F_p}{2 \times \pi \times \omega_1 \times \dot{I}_1} = \frac{695543}{2 \times \pi \times 17 \times 420} = 15,51 \text{ МПа};$$

Средние растягивающие напряжение в проводе обмотки ВН по (7,48) и (7,49):

$$\sigma_{сж,р} = \frac{F_p}{2 \times \pi \times \omega_2 \times \dot{I}_2} = \frac{695543}{2 \times \pi \times 1487 \times 5,04 \times 10^{-6}} \times 10^{-6} = 14,78 \text{ МПа};$$

т.е. 25% допустимого значения 60 МПа. Осевые силы по рис. 7.11, в.

$$F_{oc}^{\wedge} = F_p \times \frac{a_p}{2l} = 695543 \times 0,051 / (2 \times 0,54) = 32845 \text{ Н};$$

$$F_{oc}^{\wedge\wedge} = F_p \times \frac{l_x}{l'' \times k_p \times m} = 695543 \times \frac{0,099}{0,250 \times 0,94 \times 4} = 73254 \text{ Н}$$

где $l_x = 0,099$ мм по рисунку 7.15 а, расположение обмоток по рис 7.11 в $m = 4$; после установления размеров бака $l'' = 0,25$ м распределение осевых сил по рис 7.15 б.

$$F_{сж1} = F_{oc}^{\wedge} + F_{oc}^{\wedge\wedge} = 32845 + 73254 = 112099 \text{ Н};$$

$$F_{сж2} = F_{oc}^{\wedge\wedge} - F_{oc}^{\wedge} = 73254 - 32845 = 34409 \text{ Н};$$

Наибольшая сжимающая сила наблюдается в середине высоты обмотки НН, где

$F_{сж1}=112099$ Н. Напряжение сжатия на межвитковых прокладках

$\sigma_{сж} = F_{сж} \times 10^{-6} / (n \times a \times b) = 112099 \times 10^{-6} / (12 \times 0.03 \times 0.04) = 7.78$ МПа

Что ниже допустимого значения 18-20 Н.

Температура обмотки через $t_{\kappa} = 5$ сек. после возникновения короткого замыкания по (7,54)

(Л-1):

$$\Theta = \frac{670 \cdot t_{\kappa}}{12,5 \times \left(\frac{u_{\kappa}}{J_2 \cdot 10^{-6}} \right)^2 - t_{\kappa}} + \Theta_{\text{н}} = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \times \left(\frac{6.86}{3.27} \right)^2 - 5} + 90 = 157 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4. РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА И ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА.

4.1 Расчёт магнитной системы трансформатора.

Определение размеров магнитной системы и массы стали по параграфу 8.1. Принята конструкция трёхфазной плоской шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки 3404,0,35 мм по рис 4. Стержни магнитной системы скрепляются бандажами из стеклоленты, ярма прессуются ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по табл. 8.4 (Л-1), для стержня диаметром 0.23м без прессующих пластин. Число ступеней в сечении стержня 8, в сечении ярма 6.

Размеры пакетов в сечении стержня и ярма по табл. 8.4

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо (в половине поперечного сечени), мм
1	220×34	220×34
2	205×19	205×19
3	185×16	185×16
4	165×12	165×12
5	145×9	145×9
6	130×5	130×16
7	115×5	—
8	920×6	—

Общая толщина пакетов стержня (ширина ярма): 0.212 м.

По табл. 8.7 (Л-1)

Площадь ступенчатой фигуры сечения стержня: $P_{\text{ф.с}} = 387.7 \text{ см}^2 = 0.03877 \text{ м}^2$;

Площадь ступенчатой фигуры сечения ярма: $P_{\text{ф.я}} = 394.0 \text{ см}^2 = 0,0394 \text{ м}^2$;

Объём угла магнитной системы: $V_y = 7482 \text{ см}^3 = 0,007482 \text{ м}^3$

Активное сечение стержня:

$$P_c = k_3 \times P_{\text{ф.с}} = 0,97 \times 0.03877 = 0.03761 \text{ м}^2$$

Активное сечение ярма:

$$P_y = k_3 \times P_{\text{ф.я}} = 0,97 \times 0.0394 = 0.03822 \text{ м}^2$$

Объём стали угла магнитной системы:

$$V_{\text{у.ст}} = k_3 \times V_y = 0,97 \times 0.007482 = 0.007258 \text{ м}^3$$

Длина стержня:

$$l_c = 0.054 + 2 \times 0,075 = 0.69 \text{ м}$$

Расстояние между осями стержней:

$$C = D_2 + a_{22} \times 10^{-3} = 0.462 + 0.03 = 0.492 \text{ м}$$

Массы стали в стержнях и ярмах магнитной системы рассчитываем по (8,6), (8,8)–(8,13) (Л-1):

Масса стали угла магнитной системы:

$$G_y = V_{y.ст.} \times \gamma_{ст.}; \text{ где } \gamma_{ст.} = 7650 \text{ кг/м}^3$$

$$G_y = 0.007258 \times 7650 = 55.5 \text{ кг}$$

Масса стали ярм:

$$G_{я} = G_{я}^{\prime} + G_{я}^{\prime\prime} = 2\Pi_{я} \times 2C\gamma_{ст.} + 2G_y = 2 \times 0.03822 \times 2 \times 0.492 \times 7650 + 2 \times 55.5 = 575.4 + 111 = 686.4 \text{ кг}$$

Масса стали стержней:

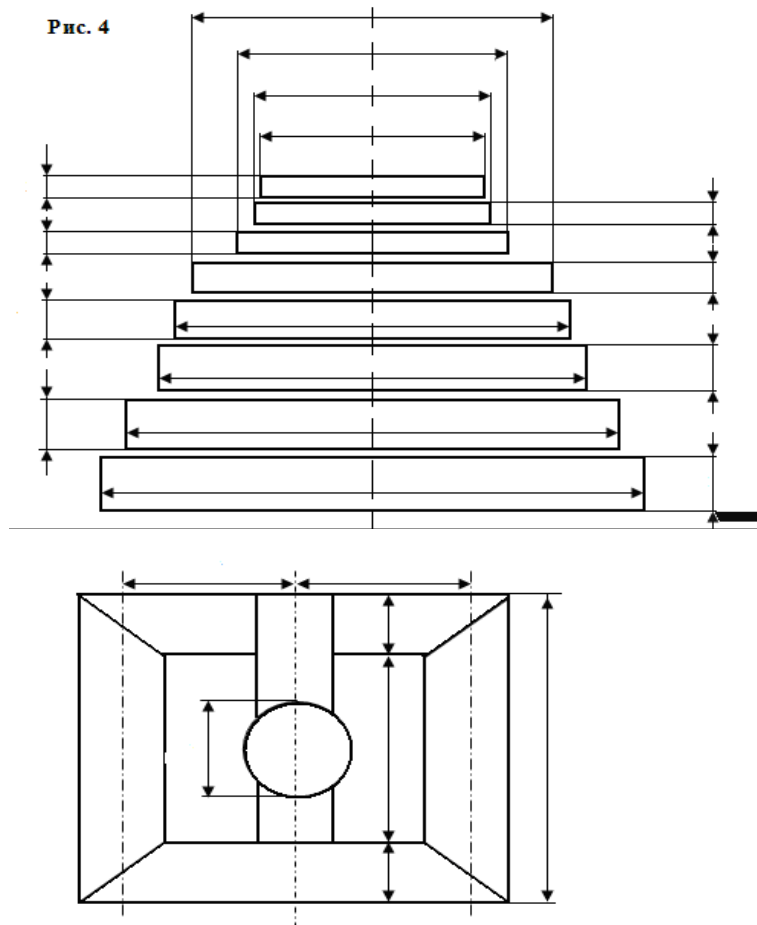
$$G_c = G_c^{\prime} + G_c^{\prime\prime} = 595.6 + 23.4 = 619 \text{ кг}$$

где $G_c^{\prime} = 3 \times l_c \times \Pi_c \times \gamma_{ст.} = 3 \times 0.03761 \times 0.69 \times 7650 = 595.6 \text{ кг}$

$$G_c^{\prime\prime} = 3 \times (\Pi_c \times a_{1я} \times \gamma_{ст.} - G_y) = 3 (0.03761 \times 0.220 \times 7650 - 55.5) = 23.4 \text{ кг}$$

Общая масса стали:

$$G_{ст.} = G_{я} + G_c = 619 + 686.4 = 1305.4 \text{ кг}$$



4.2. Расчёт потерь холостого хода.

Расчёт потерь холостого хода производим по параграфу 8.2

Индукция в стержне:

$$B_c = \frac{u_e}{4,44 f \Pi_c} = \frac{13,59}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,03761} = 1,628 \text{ Тл}$$

Индукция в ярме:

$$B_{\text{я}} = \frac{u_{\text{с}}}{4,44 f \Pi_{\text{с}}} = \frac{13,59}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,03822} = 1,602 \text{ Тл}$$

Индукция на косом стыке

$$B_{\text{кос.}} = \frac{B_{\text{с}}}{\sqrt{2}} = \frac{1,628}{1,41} = 1,151 \text{ Тл}$$

Площади сечения немагнитных зазоров на прямом стыке среднего стержня равны соответственно активным сечениям стержня и ярма.

Площадь сечения стержня на косом стыке:

$$\Pi_{\text{кос.}} = \sqrt{2} \Pi_{\text{с}} = 1,41 \times 0,03761 = 0,0532 \text{ м}^2$$

Удельные потери для стали стержней, ярм и стыков по табл. 8.10 (Л-1) для стали марки 3404 толщиной 0,35 мм при шихтовке в две пластины:

$$\text{При } B_{\text{с}} = 1,628 \text{ Тл, } p_{\text{с}} = 1,376 \text{ Вт/кг; } p_{\text{з}} = 1028 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{При } B_{\text{я}} = 1,602 \text{ Тл, } p_{\text{я}} = 1,301 \text{ Вт/кг; } p_{\text{з}} = 993 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{При } B_{\text{кос.}} = 1,151 \text{ Тл, } p_{\text{кос.}} = 473 \text{ Вт/м}^2$$

Для плоской магнитной системы с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми стыками на среднем стержне, с многоступенчатым ярмом, без отверстий для шпилек, с отжигом пластин после резки стали и удаления заусенцев для определения потерь применим выражение (8,32) (Л-1).

На основании параграфа 8,2 и табл. 8,12 принимаем:

$$k_{\text{п.р.}} = 1,05; k_{\text{п.з.}} = 1; k_{\text{п.я.}} = 1; k_{\text{п.п.}} = 1,03; k_{\text{п.ш.}} = 1,04.$$

По таблице 8,13 (Л-1) находим коэффициент $k_{\text{п.у.}} = 10,18$.

Тогда потери холостого хода:

$$P_{\text{х}} = [k_{\text{п.р.}} \times k_{\text{п.з.}} \times (p_{\text{с}} G_{\text{с}} + p_{\text{я}} G_{\text{я}} - 4 p_{\text{я}} G_{\text{у}} + \frac{p_{\text{с}} + p_{\text{я}}}{2} \times k_{\text{п.у.}} \times G_{\text{у}}) + 4 \times \Pi_{\text{кос.}} \times p_{\text{кос.}} + 1 \times \Pi_{\text{с}} \times p_{\text{з}} + 2 \times \Pi_{\text{я}} \times p_{\text{з}}] \times k_{\text{п.я.}} \times k_{\text{п.п.}} \times k_{\text{п.ш.}}$$

$$P_{\text{х}} = [1,05 \times 1 \times (1,376 \times 619 + 1,301 \times 575,4 - 4 \times 1,301 \times 55,5 + \frac{1,376 + 1,301}{2} \times 10,18 \times 55,5) + 4 \times 0,0532 \times 473 + 1 \times 0,0376 \times 1028 + 2 \times 0,0382 \times 993] \times 1 \times 1,03 \times 1,04 = 2556 \text{ Вт}$$

$$\text{Или } \frac{2556}{2350} \times 100 = 108,8 \% \text{ от заданного значения}$$

4.3. Расчёт тока холостого хода.

Расчёт тока холостого хода производим по параграфу 8.3.

По таблице 8,17 (Л-1) находим удельные намагничивающие мощности:

$$\text{При } B_{\text{с}} = 1,628 \text{ Тл, } q_{\text{с}} = 2,027 \text{ ВА/кг; } q_{\text{с.з}} = 25740 \text{ ВА/м}^2$$

$$\text{При } B_{\text{я}} = 1,602 \text{ Тл, } q_{\text{я}} = 1,793 \text{ ВА/кг; } q_{\text{я.з}} = 23660 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{При } B_{\text{кос.}} = 1,151 \text{ Тл, } q_{\text{кос.}} = 3265 \text{ ВА/м}^2$$

Для принятой конструкции магнитной системы и технологии её изготовления используем (8,43), в котором по параграфу 8.3 и таблице 8.12 и 8.21 принимаем коэффициенты:

$$k_{\text{т.р.}} = 1,18; k_{\text{т.з.}} = 1,0; k_{\text{т.п.л.}} = 1,34; k_{\text{т.я.}} = 1,0; k_{\text{т.п.}} = 1,05;$$

$$k_{\text{т.ш.}} = 1,04; k_{\text{т.у.}} = 42,45.$$

По таблице 8,20 (Л-1) находим коэффициент $k_{\text{т.у.}} = 42,45$.

$$Q_x = [k_{т.р} \times k_{т.з.} \times (q_c G_c + q_y G_y - 4q_y G_y + \frac{q_c + q_y}{2} \times k_{т.у.} \times k_{т.пл.} \times G_y) + 4 \times q_{кос} \times \Pi_{з.кос} + 1 \times \Pi_c \times q_{с.з} + 2 \times \Pi_y \times q_{я.з.}] \times k_{т.я} \times k_{т.п.} \times k_{т.ш.}$$

$$Q_x = [1,18 \times 1 \times (2,027 \times 619 + 1,793 \times 575,4 - 4 \times 1,793 \times 55,5 + \frac{2,027 + 1,793}{2} \times 42,45 \times 1,34 \times 55,5) + 4 \times 3265 \times 0,0532 + 1 \times 25740 \times 0,03761 + 2 \times 23660 \times 0,03822] \times 1 \times 1,05 \times 1,04 = 13994 \text{ ВА}$$

Ток холостого хода

$$i_0 = Q_x / 10S = 13994 / 10 \times 1000 = 1,399 \%$$

или $\frac{1,399 \times 100}{1,1} = 93,3 \%$ заданного значения.

Активная составляющая тока холостого хода:

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \times S} = \frac{2556}{10 \times 100} = 0,256 \%$$

Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$i_{0p} = \sqrt{i_0^2 - i_{0a}^2} = \sqrt{1,399^2 - 0,256^2} = 1,375 \%$$

5. ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРА, РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ.

5.1. Тепловой расчёт обмоток.

Тепловой расчёт обмоток производится согласно параграфу 9.5 (Л-1).

Внутренний перепад температуры

Обмотка НН по (9.9) и по рис. 9.9 (Л-1).

$$\Theta_{01} = \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda_{из}} = \frac{1062 \times 0,25 \times 10^{-3}}{0,17} = 1,56^\circ \text{ C}$$

где δ – толщина изоляции провода на одну сторону, $\delta = 0,25 \times 10^{-3}$ м;

q – плотность теплового потока на поверхности обмотки;

$\lambda_{из}$ – теплопроводность бумажной, пропитанной маслом изоляции провода по табл. 9.1 (Л-1), $\lambda_{из} = 0,17$ Вт/(м \times °C);

Обмотка ВН по (9.9) и рис 9.9 (Л-1);

$$\Theta_{02} = \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda_{из}} = \frac{210 \times 0,25 \times 10^{-3}}{0,17} = 0,31^\circ \text{ C}$$

Перепад температуры на поверхности обмоток:

Обмотка НН:

$$\Theta_{0,м1} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times 0,35 \times q^{0,6} = 1 \times 1,1 \times 0,8 \times 0,35 \times 1062^{0,6} = 20,15^\circ \text{ C}$$

где $k_1 = 1$ – для естественного масляного охлаждения;

$k_2 = 1,1$ – для внутренней обмотки НН;

$k_3 = 0,8$ – по таблице 9.3 (Л-1) для $h_k/a = 5/24 = 0,21$

Обмотка ВН:

$$\Theta_{0,м2} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times 0,35 \times q^{0,6} = 1 \times 1,1 \times 1,05 \times 0,35 \times 210^{0,6} = 9,09^\circ \text{ C}$$

где $k_1 = 1$ – для естественного масляного охлаждения;
 $k_2 = 1,1$ – для внешней обмотки ВН;
 $k_3 = 1.05$ – по таблице 9.3 (*Л-1*) для $h_k/a = 4.5/48 = 0.094$.

Полный средний перепад температуры от обмотки к маслу:

Обмотка НН:

$$\Theta_{o, м. ср.} = \Theta_{o1} + \Theta_{o, м1} = 1.56 + 20.15 = 21.71^\circ \text{C}$$

Обмотка ВН:

$$\Theta_{o, м. ср.} = \Theta_{o2} + \Theta_{o, м2} = 0.31 + 9.09 = 9.4^\circ \text{C}$$

5.2. Тепловой расчёт бака.

Тепловой расчёт бака проводится согласно параграфу 9.6.

По таблице 9.4 (*Л-1*), в соответствии с мощностью трансформатора выбираем конструкцию $S=1000$ кВА, выбираем конструкцию гладкого бака с навесными радиаторами и прямыми трубами по рис. 9.16 (*Л-1*). Минимальные внутренние размеры бака – по рис. 9.18, (а) и (б), (*Л-1*).

Изоляционные расстояния отводов определяем до прессующей балки верхнего ярма и стенки бака. До окончательной разработки конструкции внешние габариты прессующих балок принимаем равными внешнему габариту обмотки ВН.

$$\begin{aligned} S_1 &= 40 \text{ мм} & S_3 &= 25 \text{ мм} \\ S_2 &= 42 \text{ мм} & S_4 &= 90 \text{ мм} \\ d_2 &= 10 \text{ мм} & d_1 &= 20 \text{ мм} \end{aligned}$$

Минимальная ширина бака по рис. 9.18, (а) и (б), (*Л-1*).

$$B = D_2 + (S_1 + S_2 + d_2 + S_3 + S_4 + d_1) \times 10^{-3} = 0.46 + (40 + 42 + 20 + 25 + 90 + 10) \times 10^{-3} = 0.687 \text{ м}$$

Принимаем $B = 0.7$, при центральном положении активной части трансформатора в баке.
 Длина бака:

$$A = 2C + B = 2 \times 0.49 + 0.7 = 1.7 \text{ м.}$$

Высота активной части по (9.24) (*Л-1*):

$$H_{a.ч.} = l_c + 2h_{я} + n = 0.69 + 2 \times 0.22 + 0.05 = 1.18 \text{ м.}$$

где $n = 0,05$ м – толщина бруска между дном бака и нижним ярмом

Принимаем расстояние от верхнего ярма до крышки бака при горизонтальном расположении над ярмом переключателя ответвлений обмотки ВН по табл. 9.5 (*Л-1*).

$$H_{я.к.} = 400 \text{ мм} = 0,4 \text{ м.}$$

Глубина бака:

$$H_б = H_{a.ч.} + H_{я.к.} = 1.18 + 0,4 = 1.58 \text{ м.}$$

Для развития должной поверхности охлаждения целесообразно использовать радиаторы с прямыми трубами по рис. 9.16 (*Л-1*).

Расстояние между осями фланцев по табл. 9.9 (*Л-1*):

$$A_p = 1400 \text{ мм}$$

Поверхность конвекции труб:

$$P_{к.тр.} = 4.333 \text{ м}^2$$

Поверхность конвекции двух коллекторов при двух рядах:

$$P_{к.к.} = 0,34 \text{ м}^2$$

Минимальные расстояния осей фланцев радиатора:

$$\text{От нижнего среза стенки бака } c_1 = 0,085 \text{ м}$$

$$\text{От верхнего среза стенки бака } c_2 = 0,1 \text{ м}$$

Для установки этих радиаторов глубина бака должна быть принята:

$$H_б = A_p + c_1 + c_2 = 1.4 + 0,085 + 0,1 = 1.585 \text{ м}$$

Допустимое превышение средней температуры масла над температурой окружающего

воздуха для наиболее нагретой обмотки НН по (9.32) (Л-1):

$$\Theta_{\text{м.в}} = 65 - \Theta_{\text{о.м.ср.}} = 65 - 21.71 \approx 43^\circ$$

найденное среднее превышение может быть допущено, так как превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = \delta \times \Theta_{\text{м.в}} = 1,2 \times 43 = 52^\circ \text{ C} < 60^\circ \text{ C}$$

Принимая предварительно перепад температуры на внутренней поверхности стенки бака $\Theta_{\text{м.б.}} = 5^\circ \text{ C}$ и запас 2° C , находим среднее превышение температуры наружной стенки бака над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{б.в.}} = \Theta_{\text{м.в}} + \Theta_{\text{м.б.}} = 43 - 5 - 2 = 36^\circ \text{ C}$$

Для выбранного размера бака рассчитываем поверхность конвекции гладкой стенки бака:

$$\Pi_{\text{к.гл.}} = H_{\text{б}} [2(A-B) + \pi B] = 1.585 \times [2 \times (1.7 - 0.7) + 3,14 \times 0.7] = 6.656 \text{ м}^2$$

Ориентировочная поверхность излучения бака с радиаторами по (9.35) (Л-1):

$$\Pi_{\text{и}} = k \times \Pi_{\text{к.гл.}} = 1,5 \times 6.656 = 9.98 \text{ м}^2$$

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции для заданного значения $\Theta_{\text{б.в.}} = 33^\circ \text{ C}$ по (9.30) (Л-1):

$$\Pi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}} + P_{\text{x}}}{2,5 \cdot \Theta_{\text{б.в.}}^{1,25}} - 1,12 \times \Pi_{\text{и}} = \frac{1,05 \cdot (12273 + 2556)}{2,5 \cdot 36^{1,25}} - 1,12 \times 9,98 = 59,45 \text{ м}^2$$

Поверхность конвекции составляется из:

Поверхности гладкого бака: $\Pi_{\text{к.гл.}} = 6.656 \text{ м}^2$

Поверхности крышки бака:

$$\Pi_{\text{к.кр.}} = 0,5 [(A-B) \times (B+0,16) + \pi \cdot \frac{(B+0,16)^2}{4}] = 0,5 \times [(1,7-0,7) \times (0,7+0,16) + 3,14 \times \frac{(0,7+0,16)^2}{4}] = 0,72 \text{ м}^2$$

где 0.16 – удвоенная ширина верхней рамы бака; коэффициент 0.5 учитывает закрытие поверхности крышки вводами и арматурой.

Поверхность конвекции радиаторов:

$$\Sigma \Pi_{\text{к.р.}} = \Pi_{\text{к}} - \Pi_{\text{к.гл.}} - \Pi_{\text{к.кр.}} = 59,45 - 6,656 - 0,72 = 52,074 \text{ м}^2$$

поверхность конвекции радиаторов, приведённая к поверхности гладкой стенки (табл.9.6) (Л-1):

$$\Pi_{\text{к.р.}} = \Pi_{\text{тр.}} \times k_{\text{ф}} + \Pi_{\text{к.к}} = 4,333 \times 1,26 + 0,34 = 5,8 \text{ м}^2$$

Необходимое число радиаторов:

$$n_{\text{р}} = \frac{\Sigma \Pi_{\text{к.р.}}}{\Pi_{\text{к.р.}}} = 52,074 / 5,8 \approx 8,98$$

Принимаем 8 радиаторов с расположением по рис. 5.

Поверхность конвекции бака:

$$\Pi_{\text{к}} = \Sigma \Pi_{\text{к.р.}} + \Pi_{\text{к.гл.}} + \Pi_{\text{к.кр.}} = 8 \times 5,8 + 6,66 + 0,72 = 53,78 \text{ м}^2$$

Поверхность излучения: $\Pi_{\text{и}} = 10 \text{ м}^2$

Определение превышения температуры масла и обмоток над температурой охлаждающего воздуха по параграфу 9.7.

Среднее превышение температуры наружной поверхности трубы над температурой воздуха по (9.49) (Л-1):

$$\Theta_{\text{б.в.}} = \left[\frac{1,05 \cdot (P_{\text{к}} + P_{\text{x}})}{2,8 \Pi_{\text{и}} + 2,5 \Pi_{\text{к}}} \right]^{0,8} = \left[\frac{1,05 \cdot (12273 + 2556)}{2,8 \cdot 10 + 2,5 \cdot 53,78} \right]^{0,8} = 38,48^\circ \text{ C}$$

среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой внутренней поверхности стенки трубы по (9.50) (Л-1):

$$\Theta_{\text{м.б}} = 0.165 \times \left[\frac{1.05 \cdot (P_{\text{к}} + P_{\text{х}})}{\sum \Pi_{\text{р}} + \Pi_{\text{к.эл}} + \Pi_{\text{кр}}} \right]^{0.6} = 0.165 \times \left[\frac{1.05 \cdot (12273 + 2556)}{8 \cdot 4.333 + 6.66 + 0.72} \right]^{0.6} = 5.74^{\circ} \text{C}$$

Превышение средней температуры масла над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{м.в.}} = \Theta_{\text{м.б}} + \Theta_{\text{б.в}} = 5.74 + 38.48 = 44.22^{\circ} \text{C}$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой воздуха:

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = k \times \Theta_{\text{м.в}} = 1.2 \times 44.22 = 53.06^{\circ} \text{C} < 60^{\circ} \text{C}$$

Превышение средней температуры обмоток над температурой воздуха:

Обмотки НН;

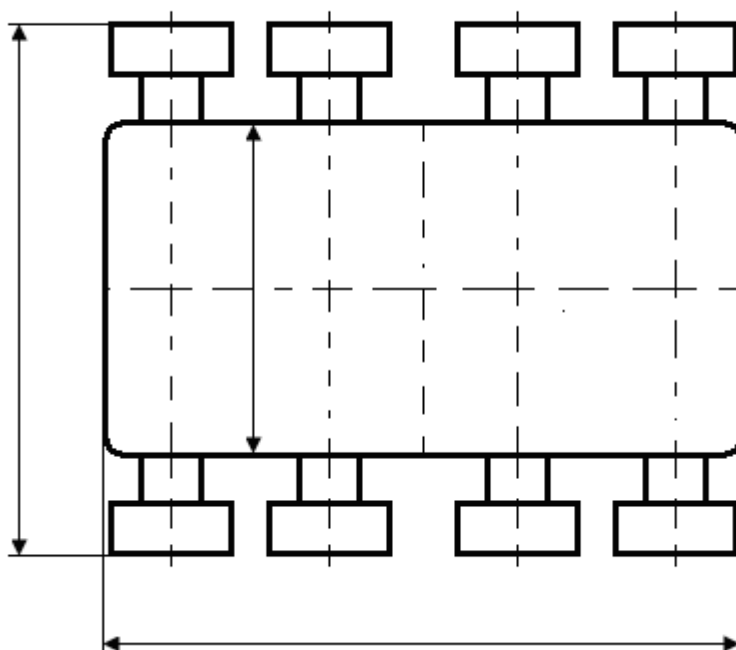
$$\Theta_{\text{о.в1}} = \Theta_{\text{о1}} + \Theta_{\text{о.м1}} + \Theta_{\text{м.в}} = 1.56 + 20.15 + 44.22 = 65.93^{\circ} \text{C} < 65^{\circ} \text{C}$$

Обмотки ВН;

$$\Theta_{\text{о.в2}} = \Theta_{\text{о2}} + \Theta_{\text{о.м2}} + \Theta_{\text{м.в}} = 0.31 + 9.09 + 44.22 = 53.62^{\circ} \text{C} < 65^{\circ} \text{C}$$

Превышения температуры масла в верхних слоях $\Theta_{\text{м.в.в}} < 60^{\circ} \text{C}$ и обмоток $\Theta_{\text{о.в}} < 65^{\circ} \text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677-85.

Рис. 5. Расположение радиаторов на стенке бака.



**Исходные данные для выполнения курсового проектирования
(трехфазного двухобмоточного трансформатора)**

№	S кВА	m	f Гц	Номинальное напряжение U		P _{х.х} кВт	P _{к.з} кВт	U _к %	i ₀ %
				ВН кВ	НН кВ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1600	3	50	10	0.4	0.365	18	6.5	1.1
2	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6
3	160	3	50	6.3	0.69	0.5	2.65	4.5	2.4
4	160	3	50	6.3	0.69	0.5	2.55	4.5	2.4
5	250	3	50	10	0.4	0.74	3.7	4.5	2.3
6	2500	3	50	110	2	6.5	6.5	10.5	1.5
7	630	3	50	10	0.4	2.7	7.6	4.5	1
8	1600	3	50	10	0.4	3.65	18	6.5	1.1

9	250	3	50	10	0.4	0.74	3.7	4.5	2.3
10	63	3	50	10	0.4	0.22	1.28	4.5	2.8
11	250	3	50	35	0.69	3.1	18	6.5	1.3
12	250	3	50	35	0.65	1.3	4.2	6.8	2.3
13	250	3	50	10	0.4	0.7	3.7	4.5	1
14	160	3	50	6.3	0.69	0.5	2.65	4.5	2.4
15	400	3	50	10.5	0.69	1.8	3.9	6.5	2.3
16	2500	3	50	35	0.69	4.3	25	6.5	1.1
17	1600	3	50	10	0.4	3.65	18	6.5	1.1
18	160	3	50	6.3	0.69	0.5	2.65	4.5	2.4
19	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6
20	2500	3	50	110	2	6.5	6.5	10.5	1.5
21	250	3	50	6.1	0.23	0.78	3.7	4.5	2.3
22	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6
23	300	3	50	10	0.5	1.9	6.2	5.5	7
24	160	3	50	10	0.69	2.27	4.65	6.8	2.8
25	250	3	50	11	0.69	0.82	4.2	4.7	2.3
26	250	3	50	10	0.4	0.7	3.7	4.5	1
27	630	3	50	6.3	0.4	2.7	7.6	4.5	1
28	2500	3	50	110	2	6.5	6.5	10.5	1.5
29	400	3	50	10.5	0.69	1.8	18	6.5	2.3
30	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6
31	250	3	50	10	0.69	1.6	4.5	4.5	0.7
32	630	3	50	10	0.4	1.42	7.6	6.5	2
33	2500	3	50	110	2	6.5	6.5	10.5	1.5
34	160	3	50	525	10	0.46	2.7	3.8	2.6
35	160	3	50	525	10	0.46	2.7	3.8	2.6
№	S кВА	m	f Гц	Номинальное напряжение U		P _{х.х}	P _{к.з}	U _к	i ₀
				ВН кВ	НН кВ	кВт	кВт	%	%
36	630	3	50	10	0.4	1.42	7.6	6.5	2
37	160	3	50	6.3	0.69	0.5	2.65	4.5	2.4
38	400	3	50	10.5	0.69	1.8	3.9	6.5	2.3
39	160	3	50	10	0.525	0.46	2.7	3.8	2.6
40	250	3	50	10	0.5	0.36	3.1	6.5	2.7
41	2500	3	50	110	2	6.5	6.5	10.5	1.5
42	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6
43	400	3	50	10.5	0.69	1.8	5.9	6.5	2.3
44	400	3	50	10.5	0.69	1.8	3.9	6.5	2.3
45	2500	3	50	110	2	6.5	6.5	10.5	1.5
46	160	3	50	10	0.4	0.42	1.97	6.5	2.6
47	400	3	50	10.5	0.69	1.8	5.8	6.5	2.3
48	400	3	50	10	0.69	1.8	5.8	6.4	2.3
49	400	3	50	10.5	0.69	1.8	3.5	6.5	2.3
50	250	3	50	10	0.69	1.6	4.5	4.5	0.7
51	400	3	50	10.5	0.23	1.8	1.8	6.5	2.3
52	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6

53	160	3	50	6.3	0.63	0.46	2.7	4.5	1.4
54	300	3	50	10	0.525	1.9	6.2	5.5	7
55	250	3	50	10	0.4	0.74	3.7	4.5	2.3
56	250	3	50	10	0.69	1.6	4.5	4.5	0.7
57	250	3	50	35	0.69	1.3	4.2	6.8	2.3
58	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.3	2.6
59	400	3	50	10	0.4	0.9	5.5	4.5	2.3
60	400	3	50	10	0.4	0.92	5.5	6.3	2.8
61	630	3	50	35	0.69	1.9	8.5	6.5	2
62	100	3	50	10	0.4	0.33	1.97	4.5	2.6
63	160	3	50	10	0.4	0.42	1.97	6.5	2.6
64	100	3	50	10	0.4	1.3	3.3	4.5	1.8
65	100	3	50	35	0.4	0.69	2.27	4.7	2.6
66	100	3	50	10	0.69	2.7	19.7	6.5	3.6
67	100	3	50	10	0.4	2.7	19.7	4.5	2.6
68	160	3	50	10	0.69	0.4	2.2	6.8	2.6
69	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.5	2.6
70	160	3	50	10	0.525	2.7	3.8	2.6	2.6

№	S кВА	m	f Гц	Номинальное напряжение U		P _{х.х} кВт	P _{к.з} кВт	U _к %	i ₀ %
				ВН кВ	НН кВ				
71	160	3	50	6.3	0.69	0.5	2.6	4.5	2.4
72	250	3	50	10	0.4	0.74	3.7	4.5	2.3
73	250	3	50	10	0.4	1.65	8.7	6.5	2.8
74	400	3	50	10.5	0.69	1.8	5.9	6.5	2.3
75	400	3	50	10	0.4	1.8	5.9	4.5	3
76	630	3	50	35	0.4	2.7	7.6	6.5	1.97
77	630	3	50	35	0.69	2.7	12.2	6.5	2.7
78	1000	3	50	35	0.69	2.6	12.2	6.5	1.3
79	1000	3	50	35	0.69	8.75	12.2	6.5	4.5
80	1000	3	50	35	0.69	2.75	12.2	6.5	1.5
81	1600	3	50	10	0.4	0.33	1.8	4.6	2.8
82	160	3	50	10	0.4	0.44	1.97	6.8	2.6
83	250	3	50	35	0.69	1.3	4.2	6.8	2.3
84	2500	3	50	35	0.69	2.8	4.85	6.5	1.1
85	2500	3	50	35	0.69	2.5	4.3	6.5	1.1
86	100	3	50	10	0.4	0.69	2.27	4.7	2.6
87	160	3	50	10	0.69	0.84	2.27	4.7	2.8
88	160	3	50	10	0.69	0.465	2.27	6.8	2.6
89	250	3	50	10	0.69	1.6	4.2	4.5	0.7
90	250	3	50	10	0.4	0.82	4.2	4.5	2.3

Примечание:

Если

U_{ВН} < 35 кВ, то группа соединений будет «звезда в звезду»;

U_{ВН} > 35 кВ, то группа соединений будет «треугольник в звезду»;

$U_{\text{HH}} < 1000$ кВ, то группа соединений будет «звезда в звезду»;
 $U_{\text{HH}} > 1000$ кВ, то группа соединений будет «треугольник в звезду».

ЛИТЕРАТУРА.

(Л-1) – Тихомиров П.М. "Расчёт трансформаторов".- М.: Энергоатомиздат, 1986.

Все ссылки (формулы и таблицы), используемые в составлении данной курсовой работы даны на учебнике Тихомирова П.М. "Расчёт трансформаторов". – М.: Энергоатомиздат, 1986.

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТУДЕНТАМ:

В период изучения дисциплины студент должен знать и уметь:

- Цель и задачи дисциплины «Электромеханика»;
- Место электромеханики в повседневной жизни и в общепроизводственной системе;
- Силовые трансформаторы и их элементы;
- Элемент трансформаторов напряжения и тока;
- Конструкции и виды электродвигателей;
- Принцип работы и схемы соединения АД с КЗ ротором;
- Принцип работы и схемы соединения АД с фазным ротором;
- Конструкция и принцип работы генераторов;
- Конструкция и принцип работы двигателей постоянного тока;

№	НАИМЕНОВАНИЕ ТЕМ
1	Асинхронные машины специального назначения
2	Конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором.
3	Конструкция и принцип работы синхронного двигателя.
4	Параллельное возбуждения двигателя постоянного тока.
5	Виды синхронных машин и их применение
6	Виды асинхронного двигателя и их применение
7	Принцип работы асинхронного двигателя.
8	Конструкция и принцип работы асинхронного двигателя.
9	Виды и конструкция генератора постоянного тока.
10	Механические характеристики синхронного двигателя.
11	Виды и конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором.
12	Асинхронный двигатель с фазным ротором.
13	Конструкция двигателя постоянного тока.
14	Конструкция и принцип работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором
15	Принцип работы и применение асинхронного двигателя.
16	Общие сведения об электрических машинах
17	Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока
18	Нагревание электрических машин и трансформаторов
19	Магнитная цепь асинхронной машины
20	Рабочий процесс трехфазного асинхронного двигателя
21	Пуск асинхронного двигателя.
22	Конструкция и принцип работы синхронного двигателя.
23	Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели
24	Параллельная работа синхронных генераторов
25	Синхронный двигатель и синхронный генератор

ГЛОССАРИЙ

Активной частью трансформатора называют остов трансформатора, обмотки, части регулирующего устройства, собранные на магнитной системе отводы и соединяющие детали.

Коэффициент трансформации. Согласно ГОСТ коэффициент трансформации $k \geq 1$ определяется как отношение ЭДС обмотки высшего напряжения E_{BH} к ЭДС обмотки

низшего напряжения E_{HH} (или отношение их чисел витков): $k = \frac{E_{BH}}{E_{HH}} = \frac{w_{BH}}{w_{HH}}$

Магнитный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ создает лишь потери энергии в трансформаторе.

МДС – это интегральная характеристика магнитного поля, служащая мерой энергии, затраченной на установления этого поля (т.е. причиной образования этого поля). МДС так же называют магнитным напряжением или потенциалом магнитного поля.

Намагничивающим током трансформатора называют реактивную составляющую тока холостого хода I_{0p} , потребляемую из сети для создания магнитного поля.

Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой высшего напряжения (ВН), обмотку низкого напряжения - обмоткой низшего напряжения (НН)

Основное поле (поле взаимодукации) - поток Φ которого на холостом ходу полностью замыкается по магнитопроводу. Основной магнитный поток Φ сцеплен почти со всеми витками первичной и вторичной обмоток трансформатора

Основной магнитный поток (поток взаимодукации) Φ участвует в преобразовании энергии в трансформаторе

Поле рассеяния - поток $\Phi_{\sigma 1}$ которого замыкается частично по магнитопроводу, а частично вне магнитопровода по маслу и конструктивным частям. Поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ сцеплен только с витками первичной обмотки

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство с двумя или большим числом индукционно связанных обмоток, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока

Параметрами схемы замещения трансформатора называют сопротивления намагничивающего контура и главной ветви.

Под напряжением короткого замыкания понимают такое напряжение, которое необходимо подать на одну из обмоток трансформатора при замкнутой другой, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи.

Изменением напряжения трансформатора называют арифметическую разность между вторичным напряжением при холостом ходе и вторичным напряжением при нагрузке, когда первичное напряжение и частота постоянны и равны номинальным значениям

$$U_1 = U_{1H} = const, f_1 = f_{1H} = const : \Delta U = U_{20} - U_2 = U'_{20} - U'_2$$

Внешняя характеристика трансформатора, под которой понимают зависимость напряжения вторичной обмотки от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ или от коэффициента загрузки $U_2 = f(k_k)$ при постоянном номинальном первичном напряжении ($U_1 = U_{1н}$), номинальной частоте питающей сети ($f_1 = f_{1н}$) и неизменном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = const$).

Электрическая машина это электромагнитный механизм предназначенный для преобразования энергии: механической в электрическую, электрической в механическую, а также электрической энергии в электрическую с другими параметрами или свойствами.

Электрические генераторы – это электрические машины предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую.

Электрические двигатели выполняют обратное преобразование электрической энергии в механическую.

Вращающиеся преобразователи преобразуют электрическую энергию в электрическую, отличающуюся родом тока, частотой тока, числом фаз.

Статором называют неподвижную часть электрической машины. Ротор и статор разделены зазором.

Ротором называют подвижную часть вращающихся электрических машин.

Асинхронной машиной (АМ) называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная) получает питание от электрической сети с постоянной частотой ω_1 , а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на электрические сопротивления. Ток во вторичной обмотке появляется в результате электромагнитной индукции. Их частота ω_2 является функцией угловой скорости ротора, которая, в свою очередь, зависит от вращающего момента, приложенного к валу.

Полюсным делением машины называется часть окружности статора, приходящаяся на один полюс.

Обмотку называют **сосредоточенной**, если обмотка фазы или катушечные группы фазы состоят из одной катушки.

Обычно обмотка фазы состоит из $2p$ групп катушек (катушечных групп), соединенных тем или иным способом. **Катушечную группу** образуют катушки, сходные активные стороны которых расположены в соседних пазах сердечника. Такие обмотки называют **распределенными**.

Рабочими характеристиками называют графические зависимости частоты вращения n (или скольжения s), момента на валу M_2 , потребляемой активной мощности P_1 , тока статора I_1 , коэффициента полезного действия η и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от полезной мощности P_2 при $U_1 = const$ и $f_1 = const$. Их определяют

экспериментально или расчетным путем, чаще всего по схемам замещения. Рабочие характеристики строят только для зоны практически устойчивой работы двигателя, т. е. в диапазоне изменения скольжения от 0 до $s = (1,1-1,2)s_H$.

Статор (неподвижная часть) синхронной машины состоит из корпуса, магнитопровода (сердечника) с обмоткой, торцевых щитов и других конструктивных элементов.

Генераторы, приводимые во вращение паровыми или газовыми турбинами, называют **турбогенераторами** и устанавливают на тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электрических станциях.

Генераторы, приводимые во вращение гидравлическими турбинами, называют **гидрогенераторами** и устанавливают на гидравлических электрических станциях (ГЭС)

Зависимость напряжения холостого хода U или ЭДС E_f от тока возбуждения I_f называют **характеристикой холостого хода (х.х.х.)**.

Действие МДС якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря.

Коэффициент пропорциональности x_σ между током якоря I и ЭДС рассеяния E_σ якоря называют **индуктивным сопротивлением рассеяния фазы обмотки якоря**

Появление напряжения на выводах включенной на емкость обмотки якоря невозбужденной машины называют явлением самовозбуждения.

Совокупность операций, требуемых для безаварийного включения генератора в сеть, называют **синхронизацией**. Различают два вида включения: способом **точной синхронизации** и **самосинхронизации (грубой синхронизации)**.

Под статической устойчивостью понимают способность синхронного генератора вернуться к исходному установившемуся режиму работы после окончания действия небольших или медленных изменений (возмущений режима работы) Δf_C , ΔU_C , ΔI_f , ΔP_1 .

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ

Руйхатга олинди:

№ БД 5310200-3.07

2016 йил "8" 08



ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРИ

ФАН ДАСТУРИ

Билим соҳаси:	300000	–	Мухандислик ишлов бериш ва қурилиш тармоқлари,
Таълим соҳаси:	310000	–	Мухандислик иши,
Таълим йўналиши:	310700	–	Электр техникаси, электр механикаси ва электр технологиялари (тармоқлар бўйича).

Тошкент – 2016

Фан дастури Олий ва ўрта махсус, касб-хунар таълими йўналишлари бўйича Ўқув-услубий бирлашмалар фаолиятини Мувофиқлаштирувчи Кенгашининг 2016 йил “8” 08 даги 3 - сонли баённомаси билан маъқулланган ҳамда вазирликнинг 2016 йил “25” 08 даги “333”-сонли буйруғининг 2 -илоvasи билан фан дастури рўйхати тасдиқланган.

Фан дастури Тошкент давлат техника университетида ишлаб чиқилди.

Тузувчилар:

- Мустафакулова Г.Н. – ТошДТУ «Электр машиналари ва кабель техникаси» кафедраси доценти т.ф.н.;
- Тошев Ш.Э. – ТошДТУ «Электр машиналари ва кабель техникаси» катта ўқитувчиси

Такризчилар:

- Амиров С.Ф. – Тошкент темир йўл муҳандислари институти «Темир йўл электр таъминоти» кафедраси мудири, т.ф.д., проф;
- Умаров Ш.Б.– Тошкент давлат техника университети Энергетика факультети «Электр техникаси, электр механикаси ва электр технологиялари» кафедраси доценти, т.ф.н.

Фан дастури Тошкент давлат техника университети Кенгашида кўриб чиқилган ва тавсия қилинган (2016 йил “6” 07 даги 12 - сонли баённома).

Кириш

Ушбу дастур электр машиналари ривожининг тарихи ва истиқболи, электр машиналарининг тузилиши, уларнинг конструкциялари; вазифаси ва ишлаш шароити ҳосбга олинган ҳолда уларга куйиладиган талаблар; уларнинг энергетик электр машиналарини созлаш тажрибасига эга булиши, электр машиналарининг турлари ва классификацияси; электр машиналарининг ишлаш принципларини, ишлатиладиган материалларини ва созланиши, электр машиналарининг курсаткичларини яхшилаш усулларини ва улардан фойдалана билиши, электр машиналарига техникавий хизмат курсатиш ва иктисодий курсаткичларини яхшилаш масалаларини уз ичига камраб олган.

Фанининг мақсади ва вазифалари

Фанини ўқитишдан мақсад - умумсаноат хўжалигида қўлланиладиган паст кучланишли электр машиналарини танлаш, ишлаш принциплари ва созланишини ҳамда уларнинг кўрсаткичларини яхшилаш буйича йуналиш профилига мос билимлар даражасини таъминлашдир.

Фаннинг вазифалари -электр машиналарни тузилиши, ишлаш принциплари, классификацияси, созланиши буйича билимларга эга бўлиши ва электр машиналарига техникавий хизмат кўрсатиш буйича талабаларга амалий кўникмалар ҳосил килишдир

Фан буйича талабаларнинг билимига, малака ва куникмасига куйиладиган талаблар

Ушбу вазифалардан келиб чиқиб ўқув фанини ўзлаштириш жараёнида амалга ошириладиган масалалар доирасида бакалавр:

- электр машиналари ва трансформаторларининг электр машинасозлиги соҳасида тутган ўрни;
- электр машиналари ривожланиш тенденцияси;
- электр машиналарида энергияни электр механик ўзгартириш масалалари;
- *электр машиналарининг тавсифлари тасаввурга эга бўлиши керак;*
- электр машиналар турларини;
- трансформатор, асинхрон, синхрон ва ўзгармас ток машиналарнинг ишлаш принципини;
- трансформатор, асинхрон, синхрон ва ўзгармас ток машиналарнинг уткинчи жараёнларини;
- трансформатор, асинхрон, синхрон ва ўзгармас ток машиналарнинг ресурс ва энергия тежаш режимларини билиши ва кўллаш олиши керак;
- электр машиналарни ишлатишни;
- электр машиналари ва трансформаторларнинг иш режимларини тахлил килиш ҳамда уларни ишлатиш кўникмаларига эга бўлиши керак.

кўйилган вазифалар ўқиш жараёнида талабаларнинг маъруза, амалий, лаборатория машғулотлар, ва курс лойиҳасида фаол иштирок этиши, ижодий ёндошиши, замонавий электрон ўқитиш ва коммуникация воситаларидан фойдалана билиши, адабиётлар билан мустақил ишлаши билан амалга оширилади.

Фаннинг ўқув режадаги бошқа фанлар билан ўзаро боғликлиги ва услубий жиҳатдан узвийлиги

«Электр машиналари» умумкасбий фани ҳисобланиб, фани уқув режасида режалаштирилган умумкасбий фанларни билишга асосланади, 3-4 семестрда ўқитилади, умумкасбий ва ихтисослик фанларини ўзлаштиришда ҳамда битирув малакавий ишни бажаришда базавий билим вазифасини ўтайди.

Фаннинг ишлаб чиқаришдаги ўрни

Хзирги кунда электр машиналари асосан заводларда, электр подстанцияларида ва электр станцияларида фойдаланилмоқда.

Ўзбекистонда ҳозирги кунда турли хил қорхоналарда трансформаторлар ишлаб чиқарилмоқда ва хорижга экспорт қилинмоқда. Шунинг учун ушбу фан ихтисосликни узлаштиришда ишлаб чиқариш технологик тизимининг ажралмас бўғини ҳисобланади.

Фанни ўқитишда замонавий ахборот ва педагогик технологиялар

Йўналишнинг ўзига хос хусусиятлари дастурни интерактив усулларда узлаштиришни тақозо қилади. Бунда асосий эътибор аудитория машғулотларида ва мустақил ишда узлаштириладиган чуқурлаштириладиган назарий билимларга, ҳамда объектив жараёнлар ва ходисаларга нисбатан дунёқарашни шакллантиришга қаратилади; дунёқарашни шакллантиришда маъруза машғулотларига катта урин ажратилади.

Дастурий материалларни узлаштириш турт хил:

- муаммоли таснифдаги мавзулар буйича;
- мустақил узлаштирилиши мураккаб булган булимлар буйича;
- таълим олувчиларда алоҳида кизикиш уйғотувчи булимлар буйича;
- олдинга силжиган (продвинутые) маърузаларни интерфаол усулда ўқиш йули билан;

- мустақил таълим олиш ва ишлаш, коллоквиумлар ва мунозаралар жараёнида узлаштириладиган билимлар буйича машғулотлар утказиш йули билан амалга оширишни назарда тутди.

Мустақил иш жараёнида талаба таълим технологияларига оид адабиётлар, интернет материаллари билан ишлашни уйддалашини намоён қилиши, аудитория машғулотлари пайтида қабул қилган ахборотни тугри мушоҳада қилиш қобилиятини курсатиши зарур. Дастур талабалар билимининг рейтинг-назоратидан фойдаланадиган уқув жараёнининг ташкил қилишнинг янги принциплари асосида амалга ошади.

АСОСИЙ ҚИСМ

Фаннинг назарий машғулоти мазмуни

Билим олишдаги узлуксизлик ва узвийликни таъминлаш буйича Ўзбекистон таълим тизими. Электр энергияси, унинг хусусиятлари ва кулланилиши. Ўзбекистонда электр энергетикани ривожланиш тарихи ва келажаги. Фаннинг ривожланиш тарихи ва истикболи. Электр машиналарининг таснифи ва уларга нисбатан куйиладиган асосий техник талаблар, яъни стандартлаш масалалари. Электр машиналарини ишлаб чиқаришда ишлатиладиган зарурий конструктив, актив (магнит утказувчи; электр ўтказувчи) ва электр изоляция материаллари. Электр машиналарининг номинал иш режимлари.

Трансформаторлар

Трансформаторларга оид умумий маълумотлар ва асосий қисмларининг тузилиши. Трансформаторларнинг вазифаси, кулланиш соҳалари ва таснифи. Трансформаторнинг асосий қисмлари ва уларнинг тузилиши. Бир ва уч фазали трансформаторларнинг магнит системалари; фаза чулғамлари учларининг белгиланиши ва уланиш усуллари.

Трансформаторларнинг салт ишлаш режимидаги электромагнит жараёнлар ва чулғамларининг уланиш гуруҳларини аниқлаш. Уч фазали трансформаторнинг салт ишлаш режимида буладиган электромагнит жараёнлар: уч фазали трансформатор чулғамларида ҳосил буладиган электр юритувчи кучлар ва трансформациялаш коэффициентлари; Уч фазали икки чулғали трансформатор чулғамларининг уланиш гуруҳларини аниқлаш. Салт ишлаш тажрибаси, характеристикалари ва бу режимга оид булган муҳим параметрлар. Салт ишлаш режими учун алмаштириш (эквивалент) схемаси ва вектор диаграммаси.

Келтирилган трансформатор ва унинг алмаштириш схемаси. Трансформаторларнинг симметрик қисқатуташув режимидаги электромагнит жараёнлар. Келтирилган трансформатор ва унинг алмаштириш схемаси. Уч фазали икки чулғамли трансформаторда симметрик қисқатуташув тажрибаси, характеристикалари ва бу режимга оид булган муҳим параметрлар; қисқатуташув режими учун вектор диаграмма.

Трансформаторнинг симметрик юклама билан ишлашидаги электромагнит жараёнлар. Симметрик юклама уланган уч фазали икки чулғамли трансформаторда буладиган электромагнит жараён. Актив-индуктив характерли юклама уланган ҳол учун вектор диаграммани қуриш. Трансформаторнинг ташқи характеристикаси ва кучланиш узгариши AU га таъсир қиладиган омиллар. Трансформатор кучланишини ростлаш усуллари. Трансформаторда қувват исрофлари ва фойдали иш коэффициенти (ФИК).

Трансформаторларнинг параллел ишлаши. Уч фазали икки чулғамли трансформаторларнинг параллел ишлаши: параллел улаш шартлари ва бу шартлардан биронтаси тула бажарилмаган ҳолларда параллел уланган трансформаторларнинг чулғамларида тоқларнинг тақсимланиши.

Трансформаторларнинг кизиши ва уларни совитиш усуллари. Трансформаторларнинг махсус турлари. Трансформатор қисмларининг кизиши, иссиқлик узатиши ва йул қуйилган температураларнинг меъёрлари. Трансформаторларнинг совитиш системалари. Мойли трансформаторлар совитиш системаларининг ёрдамчи жихозлари. Трансформаторларнинг махсус турлари: электр улчаш схемаларида ишлатиладиган (кучланиш ва ток трансформаторлари), пайвандлаш трансформаторлари, фазалар сонини узгартирадиган ҳамда амалиётда кенг қулланиладиган бошқа махсус трансформаторларга оид умумий маълумотлар.

Ўзгарувчан ток машиналари

Ўзгарувчан ток машиналари ва уларга оид умумий маълумотлар. Ўзгарувчан ток машиналарининг асосий турлари. Асинхрон машиналарнинг тузилиши ва уларнинг ҳар хил шаклдаги хужаликларда тутган урни. Синхрон машиналарининг тузилиши ва электр энергияни ишлаб чиқаришда уларнинг тутган урни. Асинхрон ва синхрон машиналарнинг узаро фарқ қиладиган ва ухшашлик жihatлари.

Ўзгарувчан ток машинаси статор чулгамининг таркибий қисмлари ва уларда ҳосил буладиган электр юритувчи кучлар.

Ўзгарувчан ток машинаси якорь (статор) чулгамининг турлари ва таркибий қисмлари. Уч фазали чулгамни ҳосил қилиш принципи.

Ўзгарувчан ток чулгамларининг таркибий қисмларида ва хусусан, уч фазали статор чулгамида ҳосил буладиган ЭЮК. Чулгам коэффициентини. ЭЮК нинг вақт бўйича ўзгариш шаклини синусоидага яқинлаштириш усуллари ва бу тадбирнинг машина қувват исрофларини камайтиришдаги аҳамияти. Уч фазали икки катламли чулгамлар ва уларнинг схемалари.

Ўзгарувчан ток машиналари чулгамларининг магнит юритувчи кучлари ва магнит майдонлари. Ўзгарувчан ток машинаси фаза чулгамларидан ток ўтганда вужудга келадиган магнит юритувчи куч (МЮК) ва унинг машинада тақсимланишини йиғилган, тарқалган ҳамда қадами қисқартирилган ҳоллари учун таққослаш. Ўзгарувчан ток машинасининг бир, икки ва уч фазали чулгамларида МЮКлар ҳосил қиладиган пульсланувчи магнит майдон, эллипс ва доира шаклларидаги айланма магнит майдонлар

Синхрон генераторлар

Синхрон генераторларнинг иш жараёнини характерловчи асосий тенгламалар ва вектор диаграммалар. Синхрон машина генератор режимда ишлаши. Унинг салт ишлашидаги ва симметрик юклама билан ишлашидаги магнит майдонлари. Якорь реакцияси ва унинг турлари. Якорь реакциясининг статор чулгами ЭЮКига таъсири ва индуктив қаршилиқлар. Асосий тенгламалари ва вектор диаграммалари. Электр тармоғига уланмаган синхрон генераторнинг асосий характеристикалари.

Синхрон генератор электр юритувчи кучларининг амалий (Потье) диаграммаси. Синхрон машинада қувват исрофлари ва ФИК. Электр юритувчи кучларнинг амалий (Потье) диаграммасини қуриш ва унинг

ахамияти. Синхрон машинада кувват исрофлари ва унинг фойдали иш коэффициенти.

Синхрон машиналарнинг параллел ишлаши. Синхрон генераторнинг электр тармоги билан параллел ишлашдаги тургун иш режимлари. Уч фазали синхрон генераторни электр тармоги билан параллел улаш усуллари ва шартлари. Электр лампали синхроскоп ёрдамида синхронлаш. Синхрон генераторнинг актив, реактив ва синхронловчи кувватлари. Синхрон машинанинг бурчак ва U-симон характеристикалари. Синхрон мотордаги физик жараёнлар ва унинг характеристикалари. Синхрон моторнинг ишлаш принципи. Синхрон моторни асинхрон усулда ишга тушириш. Синхрон моторнинг U-симон, бурчак ва иш характеристикалари.

Асинхрон машиналари

Асинхрон машинада буладиган электромагнит жараёнлар. Иш режимлари. Асинхрон машинанинг ишлаш принципи. Уч фазали асинхрон машинанинг иш режимлари. Ротори кузгалмас ($n=0$) булган, яъни тормозланган асинхрон машинанинг статор чулгами уч фазали тармоққа уланганда содир буладиган физик жараён ва ротор чулгами параметрларини статор чулгами урамлари сонига келтириш. Статор чулгами электр тармоғига уланган уч фазали асинхрон машинанинг ротори айланаётганда содир буладиган электромагнит жараёнлар. Асинхрон машинанинг алмаштириш схемалари. Асинхрон моторнинг қисқатуташув ва салт ишлаш характеристикалари.

Асинхрон машинанинг электромагнит моменти ва механик характеристикалари. Уч фазали асинхрон моторнинг энергетик диаграммаси ва электромагнит (айлантирувчи) моменти. Асинхрон машинанинг механик характеристикалари. Асинхрон моторнинг статор чулгамига берилган кучланишнинг ва ток частотасининг номиналдан фаркли булган ҳамда ротор чулгамига уланадиган қушимча актив қаршилик қийматларининг механик характеристикаларига таъсири.

Асинхрон моторнинг иш характеристикалари, ишга тушириш ва айланиш частотасини ростлаш. Асинхрон моторнинг иш характеристикалари. Асинхрон мотор тоқларининг доиравий диаграммасини унинг салт ишлаш ва қисқатуташув тажрибаларидан олинган маълумотлар асосида параметрлари ўзгармас булган хол учун қуриш ва мазкур диаграмма ёрдамида фаза роторли асинхрон мотор иш характеристикаларини таҳлил қилиш. Уч фазали асинхрон моторларни ишга тушириш усуллари. Ишга тушириш хоссалари яхшиланган уч фазали қисқатуташган роторли асинхрон моторларга оид умумий маълумот. Уч фазали қисқатуташган ва фаза роторли асинхрон моторларнинг айланиш частотасини узгартириш (ростлаш) усуллари.

Ўзгармас ток машиналар

Ўзгармас ток машиналарига оид умумий маълумотлар.

Ўзгармас ток машинасининг тузилиши ва унинг генератор режимда

ишлаш принципи Коллекторнинг ахамияти. Магнит занжири ва уни ҳисоблашга оид умумий маълумот.

Ўзгармас ток машинаси якорь чулгамининг таркибий қисмлари. Якорь чулгамини ҳисоблаш ва унинг электр юритувчи кучи. Электромагнит момент. Ўзгармас ток машинаси якорь чулгамининг турлари ва таркибий қисмлари. Якорь чулгамини ҳисоблаш; Якорь чулгамининг ЭЮК. Ўзгармас ток машинасида вужудга келадиган электромагнит момент.

Ўзгармас ток машинасида якорь реакцияси. Ўзгармас ток генераторлари ва уларнинг характеристикалари. Якорь реакцияси. Ўзгармас ток генераторларининг таснифи. Мустақил, параллел ва аралаш кузгатишли Ўзгармас ток генераторларининг характеристикалари. Параллел кузгатишли генераторда уз-узини кузгатиш жараёни.

Ўзгармас ток моторларида буладиган физик жараёнлар.

Ўзгармас ток моторини ишга тушириш. Ўзгармас ток моторининг ишлаш принципи. Ўзгармас ток моторларининг таснифи. Ўзгармас ток моторида кучланиш ва ЭЮК ларнинг мувозанат тенгламаси. Ўзгармас ток моторининг айлантирувчи (электромагнит) моменти ва моментларнинг мувозанат тенгламаси. Ўзгармас ток моторини ишга тушириш.

Ўзгармас ток моторларининг нормал иш жараёнидаги характеристикалари. Параллел ва аралаш кузгатишли Ўзгармас ток моторларининг нормал иш жараёнидаги (иш, механик, ростлаш) характеристикалари ва уларнинг тахлили. Кетма-кет кузгатишли Ўзгармас ток моторининг узига хос хусусиятлари Ўзгармас ток моторларини бошқаришнинг замонавий усуллари.

Амалий машғулотларни мазмунли ташкил этиш буйича курсатма ва тавсиялар

Амалий машғулотларда талабалар бир фазали статор чулгамини ҳисоблаш, параллел ишлаётган иккита трансформаторда юкламанинг тақсимланиши, асинхрон моторнинг айланиш частотасини ростлаш усулларига оид масалалар ечиш буйича амалий куникмаларни ҳосил қиладилар.

Амалий машғулотларнинг тавсия этиладиган мавзулари:

1. Бир фазали трансформаторни тузилиши ва ишлаш принтсипини ўрганиш;
2. Уч фазали трансформаторларни тузилиши ва ишлаш принципини ўрганиш;
3. Уч фазали автотрансформаторларни тузилиши ва ишлаш принципини ўрганиш;
4. Уч фазали трансформаторлар параллел ишлаш шартларини ўрганиш;
5. Трансформатор чулғамлари уланиш гуруҳларини аниқлаш;
6. Мустақил ва параллел кузгатишли узгармас ток машиналарининг тузилиши билан танишиш;

7. Кетма-кет қузғатишли ўзгармас ток машиналарининг тузилиши ва ишлаш принтсипини ўрганиш;
 8. Асинхрон машиналарнинг тузилиши билан танишиш;
 9. Асинхрон машиналарнинг ишлаш принтсипи билан танишиш;
 10. Синхрон машиналарнинг тузилиши билан танишиш;
 11. Синхрон машиналарнинг ишлаш принтсипи билан танишиш;
 12. Кучларни, моментларни, массаларни, инертсия моментларини бир айланиш ўқиға келтириш;
 13. Электр юритмани ишға тушириш, тўхтатиш вақтини ва оптимал узатиш сонини аниқлаш;
 14. Ўзгармас ток электр юритмаларнинг табиий механик тавсифини куриш;
 15. Асинхрон электр юритмаларнинг табиий механик тавсифини куриш.
 16. Ўзгармас ток электр юритмаларни ишға тушириш қаршиликларини ҳисоблаш;
 17. Ўзгарувчан ток электр юритмаларни ишға тушириш қаршиликларини ҳисоблаш;
 18. Электр юритмаларни ўтиш жараёнини ҳисоблаш;
 19. Электр юритмаларнинг қувватини танлаш;
 20. Электр юритмаларни йиғиш схемаларини тузиш;
 21. Ўзгармас ток электр юритмаларни автомат равишда бошқариш схемаларини ўрганиш;
 22. Киска туташтирилган роторли уч фазали асинхрон двигателларнинг электр параметрларини ҳисоблаш;
 23. Фаза роторли асинхрон двигателларнинг электр параметрларини ҳисоблаш;
 24. Ўзгармас ток двигателининг электр параметрларини ҳисоблаш;
- Амалий машгулотларини ташкил этиш буйича кафедра профессор-укутувчилари томонидан курсатма ва тавсиялар ишлаб чиқилган. Унда талабалар асосий маъруза мавзулари буйича олган билим ва куникмаларини амалий масалалар, кейслар орқали янада бойитадилар. Шунингдек, дарслик ва укув кулланмалар асосида талабалар билимларини мустахкамлашға эришиш, таркатма материаллардан фойдаланиш, илмий маколалар ва тезисларни чоп этиш орқали талабалар билимини ошириш, масалалар ечиш, мавзулар буйича такдимотлар ва кургазмали куруллар тайёрлаш, конун ва меъёрий хужжатлардан фойдалана билиш ва бошқалар тавсия этилади.

Лаборатория ишлари мазмуни, ташкил этиш буйича курсатмалар

Лаборатория ишларида талабалар электр машиналари ва трансформаторларға хизмат курсатиш усуллари билан танишиш ҳамда тажрибалардан олинган маълумотларни тахлил килиш буйича тажриба хосил киладилар.

Лаборатория ишларининг тавсия этиладиган мавзулари:

1. Бир фазали трансформаторни текшириш;
2. Уч фазали трансформатор иш режимини текшириш;
3. Уч фазали трансформатор юклама режимини текшириш;
4. Улчов трансформаторлари;
5. Пайвандлаш трансформаторлари;
6. Трансформаторларни химоялаш усуллари;

Курс лойиҳасини ташкил этиш буйича курсатмалар

Курс лойиҳаси ижодий мустакил ишлаш кўникмаларини ривожлантиради, талабаларда трансформаторларни ва асинхрон моторларни электромагнит ва иссиқлик ҳисобини бажариш кўникмаларини ҳосил қилади. ҳар бир талабага шахсий топширик берилади.

Курс лойиҳасининг (асинхрон моторлар) тахминий мавзулари:

а) (...) айл/мин, куввати (...) кВт, (...) В, булган уч фазалиқисқатуташтирилган роторли асинхрон моторини электромагнит ва иссиқлик ҳисобини бажариш;

б) (...) айл/мин, куввати (...) кВт, (...) В, булган уч фазалиқисқатуташтирилган роторли асинхрон моторини электромагнит ва иссиқлик ҳисобини бажариш;

Курс лойиҳасининг (трансформаторлар) тахминий мавзулари:

а) тула куввати (...) кВА, юкори ва паст кучланиш кийматлари (...) В, уланиш схемаси ва гуруҳи (...) булган уч фазали икки чулғамли трансформаторнинг электромагнит ва иссиқлик ҳисобини бажариш;

б) тула куввати (...) кВА, юкори ва паст кучланиш кийматлари (...) В, уланиш схемаси ва гуруҳи (...) булган уч фазали икки чулғамли трансформаторнинг электромагнит ва иссиқлик ҳисобини бажариш;

Курс лойиҳаси мавзулари мунтазам равишда қайта куриб турилади ва тасдиқланади.

Мустакил таълимни ташкил этишнинг шакли ва мазмуни

Ушбу ўқув фани буйича талабанинг мустакил иши маърузалар матни ва тавсия этилган адабиётлар билан ишлашни, амалий машгулотлар ва лаборатория ишларини утишга тайёргарлик кўришни, синов натижаларига ишлов беришни ҳамда муайян мавзулар буйича рефератлар ёзишни уз ичига олади.

Мустакил ишлар учун мулжалланган мавзулар:

-*Трансформаторлар буйича:* Чулғамлари бўлинган трансформаторлар, ўлчаш трансформаторлари, пайвандлаш трансформаторлари, автотрансформаторлар, фазалар сонини ўзгартирувчи трансформаторлар, бир фазали уч чулғамли трансформаторлар;

-*Ўзгарувчан ток машиналарининг умумий масалалари:* Уч фазали статор чулғамини ҳисоблаш ва таҳлил қилиш;

-*Синхрон машиналар буйича:* Аён ва ноён кутбли синхрон машиналар

ЭЮКларининг амалий, яъни Потъе диаграммаси-ни куриш. Аён кутбли синхрон генераторнинг актив сигим юкдаги ва аёнмас кутбли синхрон генераторнинг актив индуктив юкдаги вектор диаграммаси. Синхрон генераторнинг бурчак тавсифларини куриш. Синхрон компенсатор реактив синхрон мотор;

- *Асинхрон машиналар*: Фаза роторли асинхрон моторнинг ротор чулғамига уланган қўшимча актив қаршилиқнинг хар хил қийматлари учун ва статор чулғамларига бериладиган кучланишнинг номиналга якин қийматлари учун механик тавсифларини ҳисоблаш ва графигини чизиш. Бир фазали асинхрон моторни тузилиши, ишлаш принципи. Уч фазали асинхрон моторни бир фазали манбадан ишлатиш. Конденсаторли асинхрон моторлар. Асинхрон генераторларни ишлаши ва физик жараёнлари;

- *Ўзгармас ток машиналар*: Якорь чулғамини ҳисоблаш ва таҳлил қилиш. Параллел ва аралаш кузгатишли генераторни ташки тавсифлари. Коммутация ва унинг турлари. Коммутацияни тажрибада текшириш ва созлаш. Ўзгармас ток тахогенератори.

Дастурнинг инфор­ма­цион-услубий таъминоти.

Ўқув телевиденияси, компьютер проектори, компьютер техникаси, ўқув кино ва видеофильмлар, слайдлар.

Фойдаланиладиган асосий адабиётлар руйхати.

Асосий адабиётлар:

1. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика. Учебник для вузов. -М.: изд-во «Academia», 2007. -512 с.

2. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Учебник для вузов. - М.: Изд-во МЭИ, 2004. Том. 1 - 652 с, Том 2 - 532 с.

3. Кацман М.М. Сборник задач по электрическим машинам. Учеб. пособие для вузов. -Москва.- Издательский центр «Академия». стр 154.

4. Копылова И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. Москва.: Юрайт, 2012. - 675 с.

5. Набиев Ф.М. Электрические машины. -М.: Изд-во РадиоСофт, 2008. - 292 с.

6. Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н., Махмадиев Е.М. «Электр машиналари» курсидан «Трансформаторларни лойихалаш». Уқув кулланма. - Т.: ТошДТУ, 2013. -95 б.

7. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. Darslik.-Т.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011. - 408 б.

8. Салимов Ж.С., Пирматов Н.Б. «Трансформаторлар ва автотрансформаторлар». Уқув кулланма. -Т.: Вектор-Пресс. 2010.

Қўшимча адабиётлар:

1. Бозоров Н.Х, Пирматов Н.Б. Синхрон машиналар. ўқув кулланма. - Т.: ТДТУ, 1995.

2. Иброхимов У. Электр машиналари. Ўқув қўлланма. Т.: Укитувчи, 2001
3. Мажидов С. Электр машиналари ва электр юритма. Ўқув қўлланма. - Т.: Укитувчи, “Зиё-Ношир” КШК, 2002. - 408 б.
4. Nagrath I.J., Kothari D.P. Electric Machines. Twelfth Reprint. Tata McGraw - Hill, New - Delhi, 1995. - 684 p.
5. Пирматов Н.Б., Салимов Д.С. Экспериментальные способы определения параметров синхронных машин. -Т.: «КУРОПРИНТ», -85 с.
6. Pirmatov N.B., Yarmuxamedova Z.A., Mustafakulova G.N. Elektr mashinalari fanining transformatorlar qismi bo'yicha kurs loyihasini bajarishga oid o'quv-metodik qo'llanma. -Т.: ToshDTU, 2012. -120 b.
7. Rentzsch H. Elektromotoren. Electric Motors. -ASEA BROWN BOVERI, 1992. 861 p.
8. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. O'quv qo'llanma. -Т.: “O'qituvchi” NMIU, 2005. -240 b
9. Салимов Ж.С., Ахматов М.Г., Пирматов Н.Б. Ўзгармас ток машиналарининг тавсифлари. Тафсилий тахлил. - Т.: ТошДТУ, I қисм. Ўзгармас ток генераторлари, 1995. - 73 б. II қисм. Ўзгармас ток моторлари. Уқув қўлланма. 1994 - 86 б.
10. Епифанов А.Г. Электромеханические преобразователи энергии. Учебник для вузов. -СПб.: Изд-во “Лань”, 2004. -208 с.

Электрон ресурслар

1. www.Ziyo.net
2. <http://dhes.ime.mrsu.ru/studies/tot/tot lit.htm>;
3. <http://rbip.bookchamber.ru/description.aspx?product no=854>;
4. <http://energy-mgn.nm.ru/progr36.htm>;
5. <http://booket.ru./book-57542.html> “Электромеханические преобразователи энергии”). Епифанов А.Г. Изд-во “Лань”. 2004г.);
6. <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html> (Электронная книга по электромеханике. Леонтьев А.Г.);
7. www.utait.ru Копылова И.П. Электрические машины
8. Ахборот технологиялари: <http://booket.ru./book-57542.html>, <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html>.

**Министерство высшего среднего специального образования
Республики Узбекистан
Навоийский горно-металлургический комбинат
Навоийский государственный горный институт**

Регистрирован
№ _____

« _____ » _____ 2018 г.

“УТВЕРЖДАЮ”
Проректор по учебной работе
_____ Н.Абдуазизов

« _____ » _____ 2018 г.

**РАБОЧАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА
По курсу: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

Для бакалавров

Область знаний	300 000	– Производственно-техническая сфера
Область образования	310 000	– Инженерное дело
Направление образования	310700	– Электротехника, электромеханика и электротехнологии (по отраслям)

Семестр	5	6	Итого
Общее количество часов	246	154	400
Из них:			
Лекция	72	54	126
Практические занятия	54	36	90
Лабораторные занятия	18	-	18
Самостоятельная работа	102	64	166

НАВОИЙ-2018

Составители:

Каршибаев А.И. – доц. кафедры «Электроэнергетика»,

Рабочая учебная программа обсуждена и одобрена на заседании кафедры «Электроэнергетика» от «____» _____ 2018 года. (Протокол №____)

Заведующий кафедрой

Товбаев А.Н.

Рабочая учебная программа обсуждена и одобрена на Совете энергомеханического факультета “____” _____ 2018 года (Протокол №____).

Декан факультета

Базарова С.Ж.

Начальник учебно-методического отдела

Каримов И.А.

ВВЕДЕНИЕ

Эта программа охватывает изучение типов электрических машин и трансформаторов, принципов их работы и изучение электромеханических задач, электромеханических характеристик а также вопросов управления электротехническим процессом.

Цели и задачи предмета

Цель курса - предоставить студентам теоретические и практические знания о структуре, свойствах, расчете мощности и управлении электрическими машинами и электродвигателями.

Задачей предмета является подготовка студентов в процессе электрификации, структура электромеханических свойств, выбор типов машин и механизмов для горнодобывающих предприятий, выбор методов и инструментов контроля и схем

Требования к знаниям, умениям и навыкам учащихся.

В рамках предмета дисциплины «Электрические машины» бакалавр:

- роль электрических машин и трансформаторов в области электротехнического машиностроения;
- тенденция развития электрических машин;
- проблемы электромеханической трансформации мощности в электрических машинах;
- электрические машины;
- общие вопросы механики, электроэнергии, законы физики, которые составляют основу их работы;
- трансформаторы;
- оборудование, принцип работы, параметры, описание и порядок обработки;
- задачи и структура электротехники;
- роль горнодобывающей промышленности;
- электроприводы в качестве электромеханических систем;
- **понимание** структуры электроустановки;
- асинхронные машины;
- принцип, описание, режим работы устройств и навигации;
- запускать асинхронные двигатели, регулировать частоту вращения двигателя;
- синхронные машины: структура и принцип навигации, описание, режим работы;
- параллельная работа синхронного генератора;
- нестационарные текущие машины: принцип структуры и трафика;
- характеристики и типы генератора переменного тока;
- характеристики и типы асинхронных двигателей;
- специальные типы двигателей с фиксированной пилой;
- основные характеристики электродвигателей и преобразователей, их склонность к развитию;
- вопросы, подлежащие рассмотрению законом электротехники;
- электромеханические характеристики электрооборудования, важнейшие механические и механические свойства;
- **знание и использование** процесса переключения, регулировки скорости и торможения электроники;

- использование электрических машин;
- анализ режимов работы электрических машин и трансформаторов;
- запуск синхронных двигателей, определение их рабочих характеристик, использование специальных синхронных двигателей;
- выбор выходной мощности;
- электрическое управление;
- использование электрических схем управления;
- **иметь возможность** проектировать электрические проводники;

Задачи должны выполняться бакалавром в процессе чтения, в экспериментальных и практических занятиях, независимой работе с литературой и независимым обучением учителя, а также навыками.

Трансформаторы (72 часа)

Общие понятия об электрических машинах. Типы электропривода. Управление электроэнергией.	2 часа
Роль и классификация электрических машин. Общие понятия об трансформаторах. Номинальные мощности трансформатора	2 часа
Назначение и область применения трансформаторов. Использование трансформаторов. Структура однофазных и трехфазных трансформаторов. Вспомогательные элементы трансформаторов.	8 часов
Устройства и принцип действия трансформатора. Принцип работы силового трансформатора. Классификация и свойства трансформаторов. Устройства трансформаторов.	6 часов
Уровнение напряжения трансформатора. Дифференциальный вид трансформатора напряжения. Комплексный вид уравнения напряжения трансформатора. Приведение обмотки трансформатора.	4 часа
Уравнение магнитодвижущих сил трансформатора. Магнитные процессы трансформаторов. Процесс намагничивания подключенных трансформаторов Y/Δ. Процесс намагничивания подключенных трансформаторов. Y/Y Расчет магнитной цепи трансформаторов.	4 часа
Режимы работы трансформатора. Режим холостого хода работы однофазного трансформатора. Режим холостого хода работы идеального трансформатора. Режим холостого хода работы истенного трансформатора.	4 часа
Внешняя характеристика трансформатора. Основные понятия об трансформаторах. Структура трансформатора. Магнитный сердечник трансформатора. Обмотки трансформатора. Вспомогательные элекменты трансформатора.	4 часа
Потери и КПД трансформатора. Потери мощности при холостом ходе трансформатора. Основные потери в стали. Дополнительные потери при работе трансформатора в режиме холостого хода. Коэффициент полезного действия трансформатора.	2 часа

Группы соединений обмоток трансформатора. Общие понятия. Определение группы соединений обмоток трансформаторов.	4 часа
Параллельная работа трансформаторов. Подключение трансформаторов к параллельной работе. Условие одинаковых групп соединений трансформаторов. Условие коэффициентов трансформации трансформатора. Условие напряжения короткого замыкания.	4 часа
Трехобмоточные трансформаторы. Трехфазные трансформаторы. Методы соединения обмоток. Трехобмоточные трансформаторы большого тока.	4 часа
Автотрансформаторы. Общие понятия об автотрансформаторах. Схема однофазного автотрансформатора. Роль автотрансформаторов в народном хозяйстве.	2 часа
Специальные трансформаторы. Трансформаторы для выпрямительных устройств. Сварочные трансформаторы. Трансформаторы тока и напряжения. Основными требованиями к трансформаторам и подключение их к источнику.	4 часа
Измерительные трансформаторы. Трансформаторы напряжения. Трансформаторы тока.	4 часа
Сварочные трансформаторы. Общая информация о сварочном трансформаторе. Структура и использование сварочного трансформатора. Схемы подключения сварочных трансформаторов.	2 часа
Способ охлаждения трансформатора. Система охлаждения трансформаторов. Охлаждение маслом и естественная циркуляция.	4 часа
Защита трансформаторов. Общие сведения о релейной защите. Повреждения и ненормальные режимы работы трансформаторов. Виды и назначение автоматических устройств трансформатора. Токовые защиты трансформаторов. Газовая защита трансформатора. Продольная дифференциальная токовая защита трансформатора.	8 часов
Асинхронные машины (24 часа)	
Принцип работы асинхронных машин. Общие понятия об асинхронных машинах. Понятие роторов асинхронных двигателей. Принцип работы асинхронного двигателя.	4 часа
Потери и КПД асинхронного двигателя. Потери мощности в асинхронном двигателе. Электромагнитный момент в двигателе. Энергетическая диаграмма и скольжения.	4 часа
Механические характеристики асинхронных двигателей. Механические характеристики асинхронных двигателей. Рабочее состояние двигателя. Влияние напряжения сети на механические характеристики.	4 часа
Режимы работы асинхронного двигателя. Режим двигателя асинхронной машины. Режим генератора асинхронной машины. Электромагнитный тормозной режим асинхронной машины.	2 часа

Пуск двигателя с фазовым и короткозамкнутым ротором. Прямое подключение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Асинхронный двигатель с фазным ротором. **6 часов**

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Методы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя. Метод изменения числа пар полюсов. Изменение скорости со скольжением. **4 часа**

Синхронные машины (14 часов)

Типы синхронного генератора, принципы работы, реакция якоря, основные уравнения и векторные диаграммы. Типы синхронных генераторов. Принцип работы. Реакция якоря. Основные уравнения и векторные диаграммы. **4 часа**

Основные характеристики автономного синхронного генератора. диаграммы электродвижущих сил. Основные характеристики автономного синхронного генератора. **2 часа**

Параллельное подключение синхронной машины. Методы синхронизации. **2 часа**

Характеристики синхронного генератора. **2 часа**

Физико-химические процессы в синхронных двигателях и их характеристики. Синхронный компенсатор. **4 часа**

Машины постоянного тока (14 часов)

Конструкция машин постоянного тока. Расчет магнитной цепи. **4 часа**

Принцип работы машин постоянного тока в режиме генератора Обмотки якоря постоянного тока. **4 часа**

ЭДС обмоток. Электромагнитный момент. **2 часа**

Реакция якоря в машинах постоянного тока. Магнитная поля в режиме без нагрузок. Магнитная поля в режиме с нагрузкой. **2 часа**

Характеристики машин постоянного тока. Характеристики генератора постоянного тока с независимым колебанием. Характеристики нагрузок. Характеристики короткого замыкания. **2 часа**

Машины переменного тока (2 часа)

Общая понятия об машинах переменного тока. Основные типы. Активные части. **2 часа**

Практические работы (90 часов)

5 Семестр		
1	Изучение конструкции и принципа работы однофазных трансформаторов	2 часа
2	Изучение конструкции и принципа работы трехфазных трансформаторов	2 часа
3	Изучение конструкции и принципа работы трехфазных автотрансформаторов	4 часа
4	Изучение условий параллельной работы трансформаторов	4 часа
5	Определение групп соединений обмоток трансформатора.	4 часа
6	Ознокомление конструкцией двигателей постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением	4 часа
7	Ознокомление конструкцией двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением	4 часа
8	Ознокомление конструкцией асинхронных двигателей	4 часа
9	Ознокомление принципом работы асинхронных двигателей	4 часа
10	Ознокомление конструкцией синхронных двигателей	4 часа
11	Ознокомление принципом работы синхронных двигателей	4 часа
12	Приведение сил, моментов инерции и мас к валу двигателя	4 часа
13	Запуск электроприводов, остановки времени и количества оптимальной передачи	4 часа
14	Построение естественной механической характеристики электроприводов постоянного тока	4 часа
15	Построение естественной механической характеристики асинхронного электроприводов	4 часа
6 Semestr		
1	Расчет сопротивление пуска электроприводов постоянного тока	4 часа
2	Расчет сопротивление пуска электроприводов переменного тока	4 часа
3	Расчет переходны процессов электропривода	4 часа
4	Выбор мощности электроприводов	4 часа
5	Создание схем сбора электроприводов	4 часа
6	Изучение схем автоматического управления электропривод постоянного тока	4 часа
7	Расчет электрических параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	4 часа
8	Расчет электрических параметров асинхронного двигателя с фазным ротором	4 часа
9	Расчет электрических параметров двигателя постоянного тока	4 часа

Рекомендации по практическому обучению

В практических упражнениях студенты получают практические навыки в расчете принципа работы электроники, выбора и параметров их режима работы.

Руководство и рекомендация по практическому обучению разрабатываются преподавателями кафедры. Соответственно, студенты смогут получить знания и

навыки, полученные по ключевым темам, путем решения практических задач. Он также поощряет учащихся к получению знаний на основе учебников, использованию материалов распространения, увеличению знаний учащихся путем публикации научных статей и тезисов, решения вопросов, подготовки демонстрационных материалов по темам и других.

Лабораторные работы (18 часов)

5 Семестр		
1.	Исследование однофазного трансформатора..	4 часа
2.	Исследование трехфазного трансформатора..	2 часа
3.	Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора при нагрузке	4 часа
4.	Изучение измерительного трансформатора.	2 часа
5.	Изучение сварочного трансформатора.	2 часа
6.	Способы защиты трансформатора	4 часа

Рекомендации по лабораторному обучению

Во время лабораторных работ студенты приобретают навыки и умения для анализа электромеханических характеристик электроприводов в режимах двигателя и генератора а также методов управления.

Форма и содержание самостоятельного обучения

Самостоятельная работа студента по этой теме - работать с текстом лекции и рекомендуемой литературой, готовиться к практической и лабораторной работе, писать результаты теста и писать резюме по конкретным предметам.

Темы рекомендуемых самостоятельных работ

1. История развития электродвигателей.
2. Конструкции электродвигателей и трансмиссий.
3. Электромеханические характеристики смешанных двигателей со сменными двигателями.
4. Способ включения двигателей с переменным током.
5. Расчет и выбор сопротивления асинхронных двигателей с фазовым ротором.
6. Торможение асинхронных двигателей по сети.
7. Методы одновременного использования электродвигателей с тормозом.
8. Электромеханические и теплообменные процессы в электроприводах.
9. Короткие и повторяемые - расчет мощности электродвигателей, работающих в краткосрочном режиме.
10. Требования к электромонтажу в горнодобывающих предприятиях.

11. Роль электроприводов в горнодобывающих предприятиях.
12. Тенденция развития электродвигателей, используемых в горнодобывающих предприятиях.

Программа информационно-методического обеспечения

Образовательное телевидение, компьютерный проектор, компьютерная техника, образовательные фильмы и видео, слайды.

КРИТЕРИИ ОЦЕНОК

знаний студентов на основе рейтинговой системы
по дисциплине «**Электрические машины**»

Критерии оценок разработаны в соответствии с приказом Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 13 декабря 2013 года № 470 и Министерства Юстиции от 13 декабря 2013 года № 1981-2 “ Об Уставе контроля и оценки рейтинговой системы знаний студентов в высших учебных заведениях.

Введение

Национальная программа по подготовке кадров Республики Узбекистан определяет потребность всех сфер народного хозяйства в высококвалифицированных специалистах, владеющих передовыми достижениями науки и производства, навыками профессионального общения в условиях новых экономических отношений. Вхождение республики в мировой рынок, расширение международных связей обуславливают необходимость формирования языковой культуры студентов на иностранных языках, особенно мировых, в число которых входит русский язык.

Критерии оценок разработаны в соответствии с приказом Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 13 декабря 2013 года № 470 и Министерства Юстиции от 13 декабря 2013 года № 1981-2 “ Об Уставе контроля и оценки рейтинговой системы знаний студентов в высших учебных заведениях.

Проведения рейтинга по предмету «Электрические машины»

Этапы и формы

Оценка усвоения бакалаврами данного предмета в течение всего семестра проводится на основе следующих показателей:

- Текущая оценка – (ТК);
- Промежуточный контроль-(ПК)
- Итоговый контроль – (ИК);

Текущая оценка (ТК) – предусматривает оценку знаний бакалавров, полученных за усвоение каждой проведенной темы по данному предмету. Обычно **ТК** оценивается на практических занятиях. В первую очередь, **ТК** включает в себе уровень усвоения бакалавром знаний в аудитории, т.е. активность на занятиях, которая включает в себе следующее:

- Качественное конспектирование темы, активное участие в дискуссиях;
- Правильное выполнение заданий, упражнений по пройденной теме;

- Высокая подготовка к практическим занятиям, активное участие в решении проблемных задач, ситуаций, тестов и др.

Показатели усвоения по дисциплине «Электрические машины» оцениваются по 100 бальной системе. Из них для **ТК** предусмотрено всего 35%, т.е. 35 баллов. В **ТК** также включаются выполнение самостоятельной работы, подготовленный реферат, домашнее задание, пересказ содержания пройденных текстов; Выполнение заданий и упражнений по тексту специальности.

Итоговый контроль (ИК) обычно проводится в конце учебного семестра с целью оценки полученных бакалавром знаний и практических навыков. Он проводится только в письменной и устной форме. *Для ИК отведено 30% или 30 баллов.*

Результаты показателей усвоения бакалавром **ТК, ИК** по дисциплине должны вноситься в специальные ведомости, предоставленные деканатом и обсуждены на заседании кафедры.

Рейтинговая таблица по предмету

П/п	Курс	Семестр	Количество недель	Отведённые общие часы	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа	Аудиторные баллы АБ Самостоятельная работа СР	Виды контроля										Курсовой проект		
										Всего в процентах	ТК	ТК - 1	ТК - 2	ПК	ПК - 1	ПК - 2	ТКН+ПК	Проходной балл	ИК		Форма проведения ИК	Показатель успеваемости
1	3	5/ 6	1 8	400	1 2 6	1 8	9 0	1 6 6	Аб	70	3	1	1	3	1	1	7	3	3	уо з ма	100	НГИ
									Сб	30	5	7	8	5	7	7	0	9	0			

5-Семестр

П/п	Виды контроля	Количество	Балл и кол.	Итого баллов
1. ТК - 35 балл				
1.1.	Выполнение лабораторных занятий	6	2x6	12
1.2.	Выполнение практических работ	15	1x15	15
1.3.	Выполнение самостоятельных работ	2	4x2	8
2. ПК-35 балл				
2.1.	ПК-1, письменная, (2 вопроса)	1	5x2	10
2.2.	ПК-2, письменная, (2 вопроса)	1	5x2	10
2.3.	Выполнение самостоятельных работ	2	7,5x2	15
∑ТК+ПК				70
3. ИК-30 балл				
3.1.	Итоговая контрольная работа (3 задания)	1	10x3=30	30
Итого:				100

6- Семестр

П/п	Виды контроля	Количество	Балл и кол.	Итого баллов
1. ТК - 35 балл				
1.1.	Выполнение лабораторных работ	-	-	-

1.2.	Выполнение практических занятий	9	3x9	27
1.3.	Выполнение самостоятельных работ	2	4x2	8
2. ПК-35 балл				
2.1.	ПК-1, письменная, (2 вопроса)	1	5x2	10
2.2.	ПК-2, письменная, (2 вопроса)	1	5x2	10
2.3.	Выполнение самостоятельных работ	2	7,5x2	15
ΣТК+ПК				70
3. ИК-30 балл				
3.1.	Итоговая контрольная работа (3 задания)	1	10x3=30	30
Итого:				100

Критерии оценок за единицу самостоятельного работа и практического занятия определяются по нижеследующим показателям:

Лабораторная работа. От 1,8 до 2 баллов за студента, который полностью выполняет и может практически применять. От 1,6 до 1,8 балла на одного учащегося в зависимости от объема и качества выполняемой работы полностью и независимо. студенту 1,4 - 1,6 баллов за студента, который не смог выполнят зависимости от объема и качества выполненной работы.

Практическая работа. От 0,85 до 1 баллов за студента, который полностью выполняет и может практически применять. От 0,7 до 0,85 балла на одного учащегося в зависимости от объема и качества выполняемой работы полностью и независимо. студенту 0,55 – 0,7 баллов за студента, который не смог выполнят зависимости от объема и качества выполненной работы.

Промежуточная (1, 2 - промежуточная) оценка проводится в письменной форме и будет отвечать на 3 вопроса. Для каждого вопроса до 4 баллов.

Если суть вопросов полностью открыта, ответы являются полными и ясными и творческими идеями - 3,6 - 4 балла. Ответить на общие вопросы, но некоторые факты дали полный охват - 3,2 - 3,6 баллов. Если есть путаница на вопросах - до 2,8 - 3,2 балла. Нет ответа на вопросы вообще, или если есть путаница на вопросах - от 0 до 2,8 балла.

В итоговой оценке студент должен ответить на 3 вопроса в письменной форме. 10 баллов за каждый письменный вопрос. Если суть вопросов полностью раскрывается, если факты правильно разъяснены - 26 - 30 балла. На вопросы ответили правильно, но если есть некоторые недостатки - от 21 до 26 балла. Ответы, заданные в вопросах, являются общими, а недостатки превышают 16-21 балла. Неточные ответы на вопросы, недостатки и неточности - 0 – 16 балла.

Итоговый контроль

Итоговый контроль (ИК) проводится в конце учебного семестра с целью оценки полученных бакалавром знаний и практических навыков. Он проводится только в письменной и устной форме. Для ИК отведено 30% или 30 баллов. Студент, набравший выше **55% - 396** от отведённого общего балла текущего контроля имеет право участвовать в итоговом контроле. Варианты итогового контроля не повторяются, каждый вариант состоит из 3-х заданий.

Итоговый контроль (ИК) по дисциплине «Основы электробезопасности»

проводится в письменной и устной форме, каждому заданию отведено 10 баллов. Письменная и устная форма проведения **ИК** дает возможность бакалавру наиболее полно излагать свое мнение.

Студент:

- а) должен полностью выполнить 3 задания, чтобы набрать 30 баллов;
- б) должен полностью выполнить 2 задания и частично 1 задание, чтобы набрать от 21 до 25 баллов;
- в) должен полностью выполнить 2 задания, чтобы набрать от 17 до 20 баллов;
- г) должен полностью выполнить 1 задание и частично 1 задание, чтобы набрать от 1- 16 баллов.

Общий набранный балл студента по каждому виду контроля считается по следующей формуле:

$$ОБ=ТК+ПК+ИК$$

Здесь: ТК-текущий контроль; ПК- Промежуточный контроль; ИК-итоговый контроль. Преподаватель оценивает письменную и устную работу в течение двух дней, затем должен объявить баллы и зафиксировать в соответствующих документах. Рейтинг студента по предмету определяется в нижеследующем виде:

$$P=(ОЧ*УУ)/100$$

Здесь: ОЧ – отведённые общие часы по предмету за семестр (в часах); УУ –уровень успеваемости по предмету (в баллах).

Порядок регистрации рейтинговых результатов

Набранные баллы по видам контроля по предмету регистрируются в конце каждого семестра преподавателем в рейтинговой ведомости и книжке.

Основная литература

- 1.Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика. Учебник для вузов. -М.: изд-во «Academia», 2007. -512 с.
- 2.Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Учебник для вузов.- М.: Изд-во МЭИ, 2004. Том. 1 - 652 с, Том 2 - 532 с.
- 3.Кацман М.М. Сборник задач по электрическим машинам. Учеб. пособие для вузов. -Москва.- Издательский центр «Академия». стр 154.
- 4.Копылова И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. Москва.. Юрайт, 2012. - 675 с.
- 5.Набиев Ф.М. Электрические машины. -М.: Изд-во РадиоСофт, 2008. -292 с.
- 6.Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н., Махмадиев Е.М. «Электр машиналари» курсидан «Трансформаторларни лойихалаш». Укув кулланма. -Т.: ТошДТУ, 2013. - 95 б.
- 7.Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. Darslik.-Т.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011. - 408 b.
- 8.Салимов Ж.С, Пирматов Н.Б. «Трансформаторлар ва автотрансформаторлар». Укув кулланма. -Т.: Вектор-Пресс. 2010.

Дополнительная литература

- 1.Бозоров Н.Х, Пирматов Н.Б. Синхрон машиналар. ўкув кулланма. - Т.: ТДТУ, 1995.

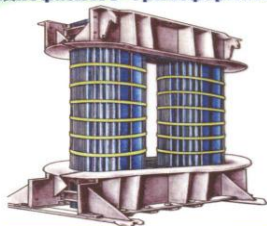
2. Иброхимов У. Электр машиналари. Ўқув қўлланма. Т.: Укитувчи, 2001
3. Мажидов С. Электр машиналари ва электр юритма. Ўқув қўлланма. -Т.: Укитувчи, “Зиё-Ношир” КШК, 2002. - 408 б.
4. Nagrath I.J., Kothari D.P. Electric Machines. Twelfth Reprint. Tata McGraw - Hill, New - Delhi, 1995. - 684 p.
5. Пирматов Н.Б., Салимов Д.С. Экспериментальные способы определения параметров синхронных машин. -Т.: «KUROPRINT», -85 с.
6. Pirmatov N.B., Yarmuxamedova Z.A., Mustafakulova G.N. Elektr mashinalari fanining transformatorlar qismi bo'yicha kurs loyahasini bajarishga oid o'quv-metodik qo'llanma. -Т.: ToshDTU, 2012. -120 b.
7. Rentsch H. Elektromotoren. Electric Motors. -ASEA BROWN BOVERI, 1992. 861 p.
8. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. O'quv qo'llanma. -Т.: “O'qituvchi” NMIU, 2005. -240 b
9. Салимов Ж.С., Ахматов М.Г., Пирматов Н.Б. Ўзгармас ток машиналарининг тавсифлари. Тафсилий тахлил. - Т.: ТошДТУ, I қисм. Ўзгармас ток генераторлари, 1995. - 73 б. II қисм. Ўзгармас ток моторлари. Уқув қўлланма. 1994 - 86 б.
10. Епифанов А.Г. Электромеханические преобразователи энергии. Учебник для вузов. -СПб.: Изд-во “Лань”, 2004. -208 с.

Электронные ресурсы

9. www.Ziyo.net
10. http://dhes.ime.mrsu.ru/studies/tot/tot_lit.htm;
11. http://rbip.bookchamber.ru/description.aspx?product_no=854;
12. <http://energy-mgn.nm.ru/progr36.htm>;
13. <http://booket.ru/book-57542.html> “Электромеханические преобразователи энергии”). Епифанов А.Г. Изд-во “Лань”. 2004г.);
14. <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html> (Электронная книга по электромеханике. Леонтьев А.Г.);
15. www.utait.ru Копылова И.П. Электрические машины
16. Ахборот технологиялари: <http://booket.ru/book-57542.html>, <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html>.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

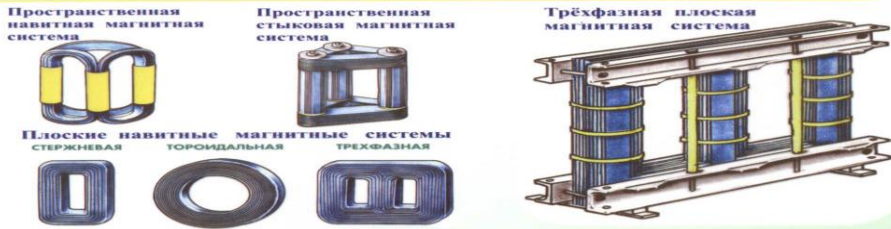
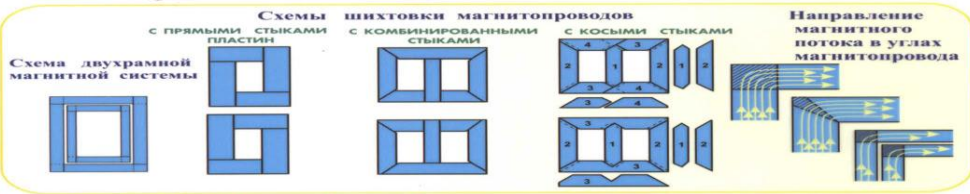
Шихтованный двухрамный магнитопровод однофазного трансформатора



ТИПЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ



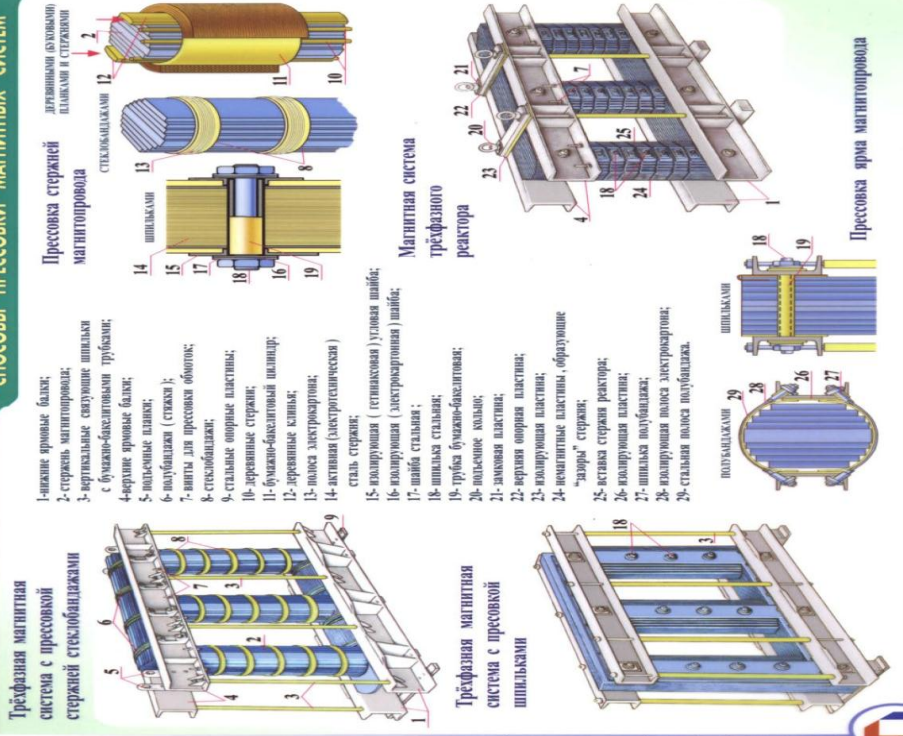
Новосийский Государственный Горный Институт



Электрические машины 1 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ

СПОСОБЫ ПРЕССОВКИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

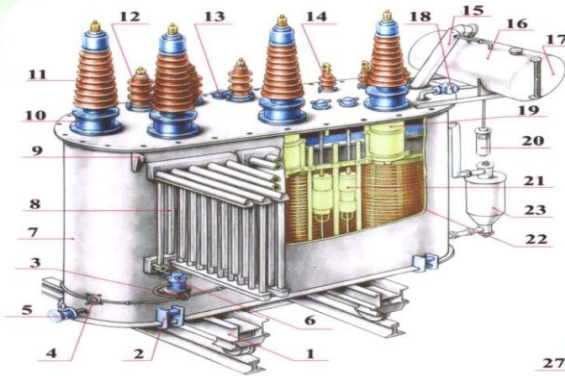


Новосийский Государственный Горный Институт

ТРАНСФОРМАТОРЫ

СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР. РЕАКТОР

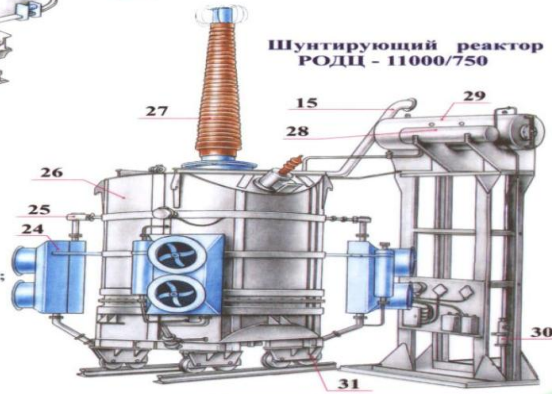
Трехфазный трехобмоточный трансформатор ТДТГ - 16000/110



- 1- каретка однокатовая;
- 2- площадка для установки домкрата;
- 3- распределительная коробка;
- 4- кран для слива масла;
- 6- электроиндикатор;
- 7- бак трансформатора;
- 8- радиатор охлаждения;
- 9- крюк для подъема полностью собранного трансформатора;
- 10- переходный фланец (адаптер) с трансформаторами тока;
- 11- ввод ВН (110 кВ);
- 12- ввод СН (35 кВ);
- 13- привод переключающего устройства;
- 14- ввод СН (10 кВ);
- 15- предохранительная труба.

- 16- расширитель;
- 17- маслоуказатель;
- 18- газовое реле;
- 19- бумажно-бакелитовый цилиндр ввода 110 кВ;
- 20- воздухоосушитель;
- 21- переключающее устройство ПБВ;
- 22- обмотка ВН;
- 23- термосифонный фильтр;
- 24- маслоохладитель типа ДЦ;
- 25- центробежный электронасос ЭЦТ;
- 26- бак реактора;
- 27- герметичный ввод 750 кВ;
- 28- расширитель ввода 750 кВ (бачок давления);
- 29- расширитель реактора;
- 30- воздухоосушитель;
- 31- каретка двухкатная.

Шунтирующий реактор РОДЦ - 11000/750



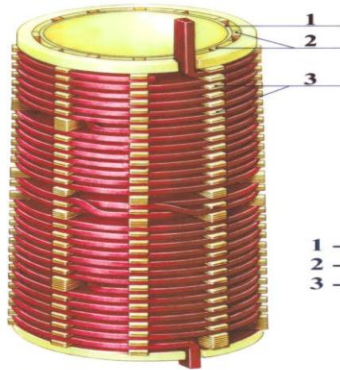
Навигийский Государственный Горный институт



ТРАНСФОРМАТОРЫ

ВИНТОВЫЕ ОБМОТКИ

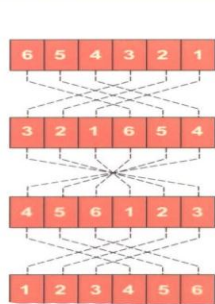
Одноходовая обмотка



- 1 - цилиндр;
- 2 - рейки;
- 3 - прокладки.



Двухходовая



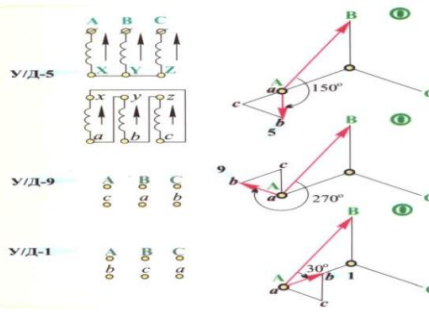
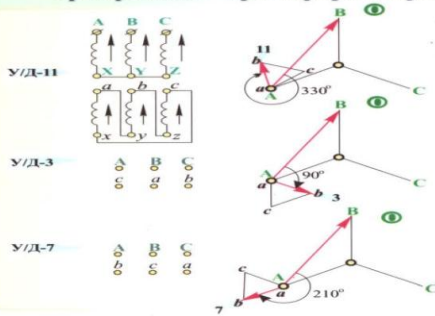
Навигийский Государственный Горный институт



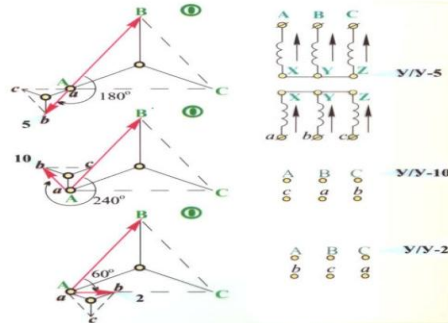
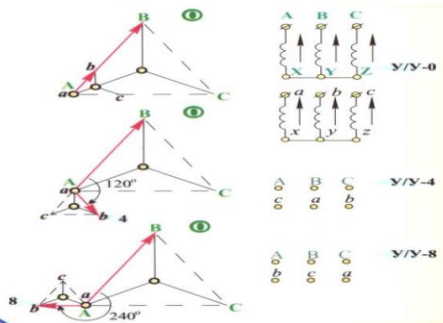
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нечётные группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов



Чётные группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов



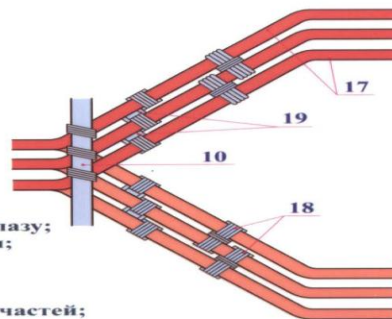
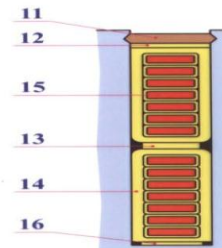
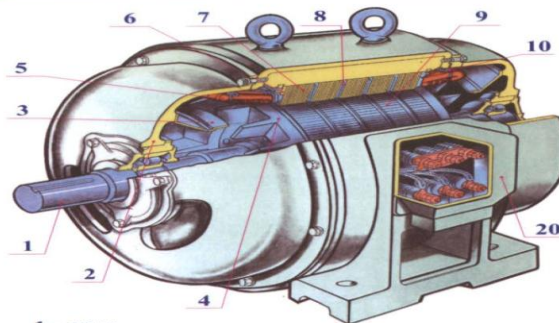
Навоиский Государственный Горный Институт



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

(НА НАПРЯЖЕНИЕ 6 кВ)

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



- 1 - вал;
- 2 - подшипниковый щит;
- 3 - воздухонаправляющий щиток;
- 4 - обмотка ротора;
- 5 - обмотка статора;
- 6 - нажимная шайба;
- 7 - сердечник статора;
- 8 - дистанционная распорка;
- 9 - сердечник ротора;
- 10 - бандажные кольца;
- 11 - пазовый клин;
- 12 - прокладка под клин;
- 13 - прокладка между слоями в пазу;
- 14 - корпусная изоляция катушки;
- 15 - проводники катушки;
- 16 - прокладка на дно паза;
- 17 - катушка обмотки;
- 18 - бандаж крепления лобовых частей;
- 19 - дистанционная распорка;
- 20 - коробка выводов.

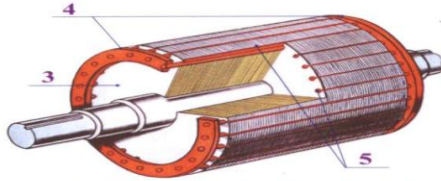
Навоиский Государственный Горный Институт



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

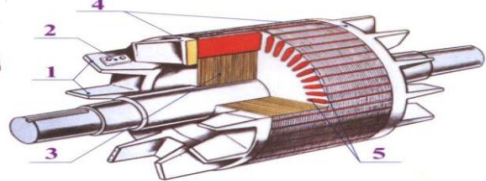
КОРТОКОЗАМКНУТЫЕ РОТОРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ротор со сварной беличьей клеткой



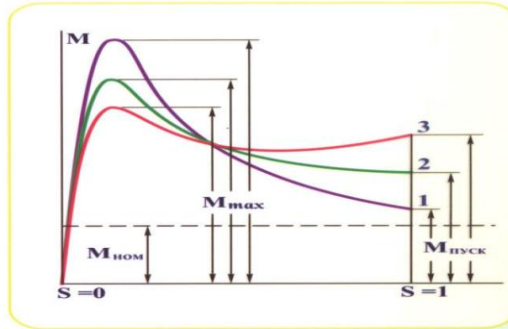
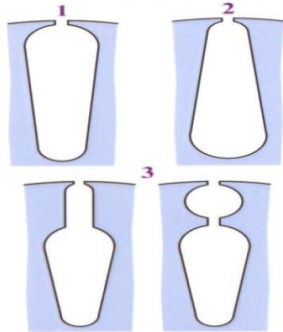
- 1 - вентиляционные лопатки;
- 2 - балансировочный груз;
- 3 - магнитопровод ротора;

Ротор с литой беличьей клеткой



- 4 - короткозамыкающие кольца;
- 5 - стержни в пазах.

Пусковые характеристики двигателей с различными пазами ротора

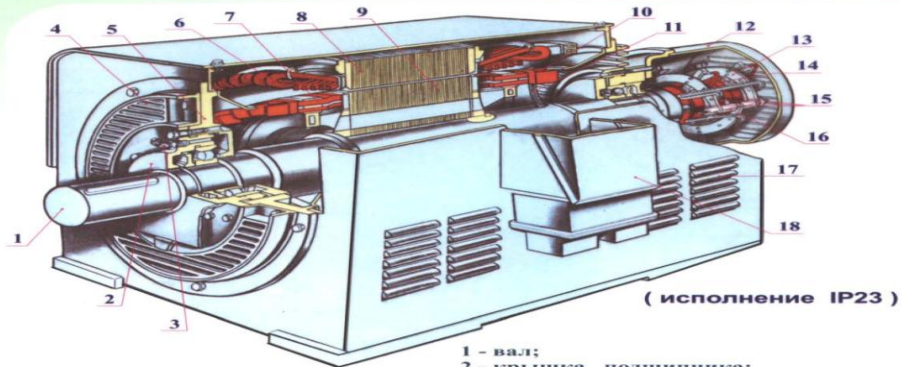


Навоийский Государственный Горный Институт

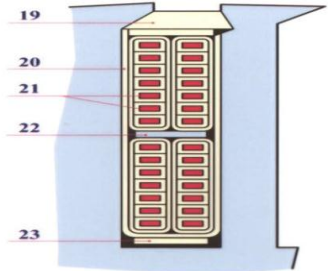


МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ



(исполнение IP23)



- 1 - вал;
- 2 - крышка подшипника;
- 3 - масленка для пополнения смазки;
- 4 - жалюзи для входа воздуха;
- 5 - подшипниковый щит;
- 6 - обмотка статора;
- 7 - обмотка ротора;
- 8 - магнитопровод статора;
- 9 - магнитопровод ротора;
- 10 - обмоткодержатель;
- 11 - токопровод к обмотке ротора;
- 12 - кожух контактных колец;
- 13 - траверса;
- 14 - щетка;
- 15 - контактные кольца;
- 16 - болт крепления щеткодержателя;
- 17 - жалюзи для выхода воздуха;
- 18 - крышка коробки выводов;
- 19 - клин;
- 20 - корпусная изоляция паза;
- 21 - проводники обмотки;
- 22 - прокладка между обмотками;
- 23 - прокладка на дно паза.

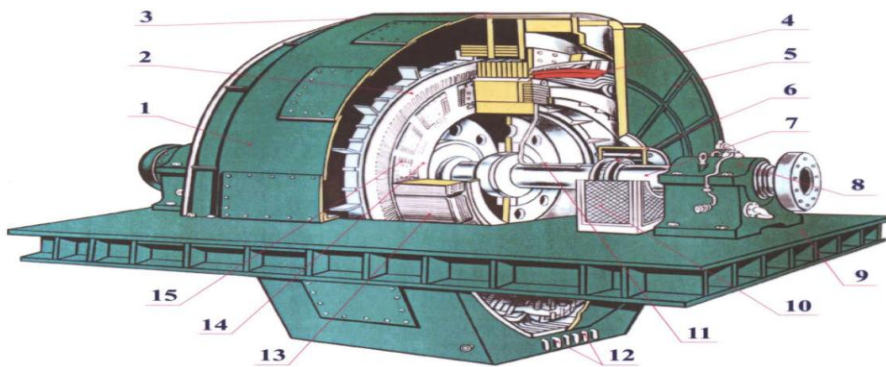
Навоийский Государственный Горный Институт





СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

СИНХРОННЫЙ ЯВНОПОЛЮСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ



- 1 - корпус;
- 2 - сердечник статора;
- 3 - сердечник полюса;
- 4 - лобовые части обмотки статора;
- 5 - подшипниковый щит;
- 6 - контактные кольца;
- 7 - вал;
- 8 - подшипник;
- 9 - фундаментная плита;
- 10 - кожух контактных колец;
- 11 - токоподвод к обмотке;
- 12 - выводы обмотки статора;
- 13 - стержни пусковой обмотки;
- 14 - сердечник ротора;
- 15 - обмотка полюса.

Электрические машины

2
11

Электрические машины

2
7

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ФАЗНЫЙ РОТОР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1-вентиляционная лопатка;
2-хомутки для соединения стержней;
3,4-верхние и нижние стержни;
5-пазовая изоляция;
6-магнитопровод ротора;
7-шпонка;
8-нажимная шайба с обмоточер-
-железом;
9-болты;
10-изоляция между стержнями;
11-изоляция на обмотоколлекторе;
12-балансировочный груз;
13-выводной конец обмотки;
14-отверстие в валу;
15-вал;
16-винт;
17-студия контактных колец;
18-шпилька для крепления
контактных колец;
19-изоляционная втулка;
20-контактное кольцо;
21-соединение вывода
с контактными кольцами;
22-стержни;
23-хомутки;
24-пружина;
25-щетки;
26-щеткодержатели;
27-болт крепления щеткодержатели
28-токоведущий троечник;
29-выводы для присоединения
обмотки;
30-болт крепления изоляционной
шайбы;
31-изоляция между контактными
кольцами;
32-изоляция втулки;
33-втулка.

Схема пуска

Контактные кольца с втулкой

Соединение стержней хомутком

Щеткодержатели с щетками

Пусковые характеристики

М_{Глоб} Г_{лоб}; Г_{лоб}; Г_{лоб}=0
M_{ст}

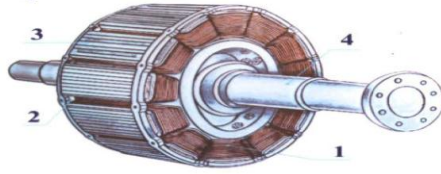
→ V ← S₀ ← S₁ ← S₂ ← S₃ ← S₄ ← S₅ ← S₆ ← S₇ ← S₈ ← S₉ ← S₁₀ ← S₁₁ ← S₁₂ ← S₁₃ ← S₁₄ ← S₁₅ ← S₁₆ ← S₁₇ ← S₁₈ ← S₁₉ ← S₂₀ ← S₂₁ ← S₂₂ ← S₂₃ ← S₂₄ ← S₂₅ ← S₂₆ ← S₂₇ ← S₂₈ ← S₂₉ ← S₃₀ ← S₃₁ ← S₃₂ ← S₃₃ ← S₃₄ ← S₃₅ ← S₃₆ ← S₃₇ ← S₃₈ ← S₃₉ ← S₄₀ ← S₄₁ ← S₄₂ ← S₄₃ ← S₄₄ ← S₄₅ ← S₄₆ ← S₄₇ ← S₄₈ ← S₄₉ ← S₅₀ ← S₅₁ ← S₅₂ ← S₅₃ ← S₅₄ ← S₅₅ ← S₅₆ ← S₅₇ ← S₅₈ ← S₅₉ ← S₆₀ ← S₆₁ ← S₆₂ ← S₆₃ ← S₆₄ ← S₆₅ ← S₆₆ ← S₆₇ ← S₆₈ ← S₆₉ ← S₇₀ ← S₇₁ ← S₇₂ ← S₇₃ ← S₇₄ ← S₇₅ ← S₇₆ ← S₇₇ ← S₇₈ ← S₇₉ ← S₈₀ ← S₈₁ ← S₈₂ ← S₈₃ ← S₈₄ ← S₈₅ ← S₈₆ ← S₈₇ ← S₈₈ ← S₈₉ ← S₉₀ ← S₉₁ ← S₉₂ ← S₉₃ ← S₉₄ ← S₉₅ ← S₉₆ ← S₉₇ ← S₉₈ ← S₉₉ ← S₁₀₀ ← S₁₀₁ ← S₁₀₂ ← S₁₀₃ ← S₁₀₄ ← S₁₀₅ ← S₁₀₆ ← S₁₀₇ ← S₁₀₈ ← S₁₀₉ ← S₁₁₀ ← S₁₁₁ ← S₁₁₂ ← S₁₁₃ ← S₁₁₄ ← S₁₁₅ ← S₁₁₆ ← S₁₁₇ ← S₁₁₈ ← S₁₁₉ ← S₁₂₀ ← S₁₂₁ ← S₁₂₂ ← S₁₂₃ ← S₁₂₄ ← S₁₂₅ ← S₁₂₆ ← S₁₂₇ ← S₁₂₈ ← S₁₂₉ ← S₁₃₀ ← S₁₃₁ ← S₁₃₂ ← S₁₃₃ ← S₁₃₄ ← S₁₃₅ ← S₁₃₆ ← S₁₃₇ ← S₁₃₈ ← S₁₃₉ ← S₁₄₀ ← S₁₄₁ ← S₁₄₂ ← S₁₄₃ ← S₁₄₄ ← S₁₄₅ ← S₁₄₆ ← S₁₄₇ ← S₁₄₈ ← S₁₄₉ ← S₁₅₀ ← S₁₅₁ ← S₁₅₂ ← S₁₅₃ ← S₁₅₄ ← S₁₅₅ ← S₁₅₆ ← S₁₅₇ ← S₁₅₈ ← S₁₅₉ ← S₁₆₀ ← S₁₆₁ ← S₁₆₂ ← S₁₆₃ ← S₁₆₄ ← S₁₆₅ ← S₁₆₆ ← S₁₆₇ ← S₁₆₈ ← S₁₆₉ ← S₁₇₀ ← S₁₇₁ ← S₁₇₂ ← S₁₇₃ ← S₁₇₄ ← S₁₇₅ ← S₁₇₆ ← S₁₇₇ ← S₁₇₈ ← S₁₇₉ ← S₁₈₀ ← S₁₈₁ ← S₁₈₂ ← S₁₈₃ ← S₁₈₄ ← S₁₈₅ ← S₁₈₆ ← S₁₈₇ ← S₁₈₈ ← S₁₈₉ ← S₁₉₀ ← S₁₉₁ ← S₁₉₂ ← S₁₉₃ ← S₁₉₄ ← S₁₉₅ ← S₁₉₆ ← S₁₉₇ ← S₁₉₈ ← S₁₉₉ ← S₂₀₀ ← S₂₀₁ ← S₂₀₂ ← S₂₀₃ ← S₂₀₄ ← S₂₀₅ ← S₂₀₆ ← S₂₀₇ ← S₂₀₈ ← S₂₀₉ ← S₂₁₀ ← S₂₁₁ ← S₂₁₂ ← S₂₁₃ ← S₂₁₄ ← S₂₁₅ ← S₂₁₆ ← S₂₁₇ ← S₂₁₈ ← S₂₁₉ ← S₂₂₀ ← S₂₂₁ ← S₂₂₂ ← S₂₂₃ ← S₂₂₄ ← S₂₂₅ ← S₂₂₆ ← S₂₂₇ ← S₂₂₈ ← S₂₂₉ ← S₂₃₀ ← S₂₃₁ ← S₂₃₂ ← S₂₃₃ ← S₂₃₄ ← S₂₃₅ ← S₂₃₆ ← S₂₃₇ ← S₂₃₈ ← S₂₃₉ ← S₂₄₀ ← S₂₄₁ ← S₂₄₂ ← S₂₄₃ ← S₂₄₄ ← S₂₄₅ ← S₂₄₆ ← S₂₄₇ ← S₂₄₈ ← S₂₄₉ ← S₂₅₀ ← S₂₅₁ ← S₂₅₂ ← S₂₅₃ ← S₂₅₄ ← S₂₅₅ ← S₂₅₆ ← S₂₅₇ ← S₂₅₈ ← S₂₅₉ ← S₂₆₀ ← S₂₆₁ ← S₂₆₂ ← S₂₆₃ ← S₂₆₄ ← S₂₆₅ ← S₂₆₆ ← S₂₆₇ ← S₂₆₈ ← S₂₆₉ ← S₂₇₀ ← S₂₇₁ ← S₂₇₂ ← S₂₇₃ ← S₂₇₄ ← S₂₇₅ ← S₂₇₆ ← S₂₇₇ ← S₂₇₈ ← S₂₇₉ ← S₂₈₀ ← S₂₈₁ ← S₂₈₂ ← S₂₈₃ ← S₂₈₄ ← S₂₈₅ ← S₂₈₆ ← S₂₈₇ ← S₂₈₈ ← S₂₈₉ ← S₂₉₀ ← S₂₉₁ ← S₂₉₂ ← S₂₉₃ ← S₂₉₄ ← S₂₉₅ ← S₂₉₆ ← S₂₉₇ ← S₂₉₈ ← S₂₉₉ ← S₃₀₀ ← S₃₀₁ ← S₃₀₂ ← S₃₀₃ ← S₃₀₄ ← S₃₀₅ ← S₃₀₆ ← S₃₀₇ ← S₃₀₈ ← S₃₀₉ ← S₃₁₀ ← S₃₁₁ ← S₃₁₂ ← S₃₁₃ ← S₃₁₄ ← S₃₁₅ ← S₃₁₆ ← S₃₁₇ ← S₃₁₈ ← S₃₁₉ ← S₃₂₀ ← S₃₂₁ ← S₃₂₂ ← S₃₂₃ ← S₃₂₄ ← S₃₂₅ ← S₃₂₆ ← S₃₂₇ ← S₃₂₈ ← S₃₂₉ ← S₃₃₀ ← S₃₃₁ ← S₃₃₂ ← S₃₃₃ ← S₃₃₄ ← S₃₃₅ ← S₃₃₆ ← S₃₃₇ ← S₃₃₈ ← S₃₃₉ ← S₃₄₀ ← S₃₄₁ ← S₃₄₂ ← S₃₄₃ ← S₃₄₄ ← S₃₄₅ ← S₃₄₆ ← S₃₄₇ ← S₃₄₈ ← S₃₄₉ ← S₃₅₀ ← S₃₅₁ ← S₃₅₂ ← S₃₅₃ ← S₃₅₄ ← S₃₅₅ ← S₃₅₆ ← S₃₅₇ ← S₃₅₈ ← S₃₅₉ ← S₃₆₀ ← S₃₆₁ ← S₃₆₂ ← S₃₆₃ ← S₃₆₄ ← S₃₆₅ ← S₃₆₆ ← S₃₆₇ ← S₃₆₈ ← S₃₆₉ ← S₃₇₀ ← S₃₇₁ ← S₃₇₂ ← S₃₇₃ ← S₃₇₄ ← S₃₇₅ ← S₃₇₆ ← S₃₇₇ ← S₃₇₈ ← S₃₇₉ ← S₃₈₀ ← S₃₈₁ ← S₃₈₂ ← S₃₈₃ ← S₃₈₄ ← S₃₈₅ ← S₃₈₆ ← S₃₈₇ ← S₃₈₈ ← S₃₈₉ ← S₃₉₀ ← S₃₉₁ ← S₃₉₂ ← S₃₉₃ ← S₃₉₄ ← S₃₉₅ ← S₃₉₆ ← S₃₉₇ ← S₃₉₈ ← S₃₉₉ ← S₄₀₀ ← S₄₀₁ ← S₄₀₂ ← S₄₀₃ ← S₄₀₄ ← S₄₀₅ ← S₄₀₆ ← S₄₀₇ ← S₄₀₈ ← S₄₀₉ ← S₄₁₀ ← S₄₁₁ ← S₄₁₂ ← S₄₁₃ ← S₄₁₄ ← S₄₁₅ ← S₄₁₆ ← S₄₁₇ ← S₄₁₈ ← S₄₁₉ ← S₄₂₀ ← S₄₂₁ ← S₄₂₂ ← S₄₂₃ ← S₄₂₄ ← S₄₂₅ ← S₄₂₆ ← S₄₂₇ ← S₄₂₈ ← S₄₂₉ ← S₄₃₀ ← S₄₃₁ ← S₄₃₂ ← S₄₃₃ ← S₄₃₄ ← S₄₃₅ ← S₄₃₆ ← S₄₃₇ ← S₄₃₈ ← S₄₃₉ ← S₄₄₀ ← S₄₄₁ ← S₄₄₂ ← S₄₄₃ ← S₄₄₄ ← S₄₄₅ ← S₄₄₆ ← S₄₄₇ ← S₄₄₈ ← S₄₄₉ ← S₄₅₀ ← S₄₅₁ ← S₄₅₂ ← S₄₅₃ ← S₄₅₄ ← S₄₅₅ ← S₄₅₆ ← S₄₅₇ ← S₄₅₈ ← S₄₅₉ ← S₄₆₀ ← S₄₆₁ ← S₄₆₂ ← S₄₆₃ ← S₄₆₄ ← S₄₆₅ ← S₄₆₆ ← S₄₆₇ ← S₄₆₈ ← S₄₆₉ ← S₄₇₀ ← S₄₇₁ ← S₄₇₂ ← S₄₇₃ ← S₄₇₄ ← S₄₇₅ ← S₄₇₆ ← S₄₇₇ ← S₄₇₈ ← S₄₇₉ ← S₄₈₀ ← S₄₈₁ ← S₄₈₂ ← S₄₈₃ ← S₄₈₄ ← S₄₈₅ ← S₄₈₆ ← S₄₈₇ ← S₄₈₈ ← S₄₈₉ ← S₄₉₀ ← S₄₉₁ ← S₄₉₂ ← S₄₉₃ ← S₄₉₄ ← S₄₉₅ ← S₄₉₆ ← S₄₉₇ ← S₄₉₈ ← S₄₉₉ ← S₅₀₀ ← S₅₀₁ ← S₅₀₂ ← S₅₀₃ ← S₅₀₄ ← S₅₀₅ ← S₅₀₆ ← S₅₀₇ ← S₅₀₈ ← S₅₀₉ ← S₅₁₀ ← S₅₁₁ ← S₅₁₂ ← S₅₁₃ ← S₅₁₄ ← S₅₁₅ ← S₅₁₆ ← S₅₁₇ ← S₅₁₈ ← S₅₁₉ ← S₅₂₀ ← S₅₂₁ ← S₅₂₂ ← S₅₂₃ ← S₅₂₄ ← S₅₂₅ ← S₅₂₆ ← S₅₂₇ ← S₅₂₈ ← S₅₂₉ ← S₅₃₀ ← S₅₃₁ ← S₅₃₂ ← S₅₃₃ ← S₅₃₄ ← S₅₃₅ ← S₅₃₆ ← S₅₃₇ ← S₅₃₈ ← S₅₃₉ ← S₅₄₀ ← S₅₄₁ ← S₅₄₂ ← S₅₄₃ ← S₅₄₄ ← S₅₄₅ ← S₅₄₆ ← S₅₄₇ ← S₅₄₈ ← S₅₄₉ ← S₅₅₀ ← S₅₅₁ ← S₅₅₂ ← S₅₅₃ ← S₅₅₄ ← S₅₅₅ ← S₅₅₆ ← S₅₅₇ ← S₅₅₈ ← S₅₅₉ ← S₅₆₀ ← S₅₆₁ ← S₅₆₂ ← S₅₆₃ ← S₅₆₄ ← S₅₆₅ ← S₅₆₆ ← S₅₆₇ ← S₅₆₈ ← S₅₆₉ ← S₅₇₀ ← S₅₇₁ ← S₅₇₂ ← S₅₇₃ ← S₅₇₄ ← S₅₇₅ ← S₅₇₆ ← S₅₇₇ ← S₅₇₈ ← S₅₇₉ ← S₅₈₀ ← S₅₈₁ ← S₅₈₂ ← S₅₈₃ ← S₅₈₄ ← S₅₈₅ ← S₅₈₆ ← S₅₈₇ ← S₅₈₈ ← S₅₈₉ ← S₅₉₀ ← S₅₉₁ ← S₅₉₂ ← S₅₉₃ ← S₅₉₄ ← S₅₉₅ ← S₅₉₆ ← S₅₉₇ ← S₅₉₈ ← S₅₉₉ ← S₆₀₀ ← S₆₀₁ ← S₆₀₂ ← S₆₀₃ ← S₆₀₄ ← S₆₀₅ ← S₆₀₆ ← S₆₀₇ ← S₆₀₈ ← S₆₀₉ ← S₆₁₀ ← S₆₁₁ ← S₆₁₂ ← S₆₁₃ ← S₆₁₄ ← S₆₁₅ ← S₆₁₆ ← S₆₁₇ ← S₆₁₈ ← S₆₁₉ ← S₆₂₀ ← S₆₂₁ ← S₆₂₂ ← S₆₂₃ ← S₆₂₄ ← S₆₂₅ ← S₆₂₆ ← S₆₂₇ ← S₆₂₈ ← S₆₂₉ ← S₆₃₀ ← S₆₃₁ ← S₆₃₂ ← S₆₃₃ ← S₆₃₄ ← S₆₃₅ ← S₆₃₆ ← S₆₃₇ ← S₆₃₈ ← S₆₃₉ ← S₆₄₀ ← S₆₄₁ ← S₆₄₂ ← S₆₄₃ ← S₆₄₄ ← S₆₄₅ ← S₆₄₆ ← S₆₄₇ ← S₆₄₈ ← S₆₄₉ ← S₆₅₀ ← S₆₅₁ ← S₆₅₂ ← S₆₅₃ ← S₆₅₄ ← S₆₅₅ ← S₆₅₆ ← S₆₅₇ ← S₆₅₈ ← S₆₅₉ ← S₆₆₀ ← S₆₆₁ ← S₆₆₂ ← S₆₆₃ ← S₆₆₄ ← S₆₆₅ ← S₆₆₆ ← S₆₆₇ ← S₆₆₈ ← S₆₆₉ ← S₆₇₀ ← S₆₇₁ ← S₆₇₂ ← S₆₇₃ ← S₆₇₄ ← S₆₇₅ ← S₆₇₆ ← S₆₇₇ ← S₆₇₈ ← S₆₇₉ ← S₆₈₀ ← S₆₈₁ ← S₆₈₂ ← S₆₈₃ ← S₆₈₄ ← S₆₈₅ ← S₆₈₆ ← S₆₈₇ ← S₆₈₈ ← S₆₈₉ ← S₆₉₀ ← S₆₉₁ ← S₆₉₂ ← S₆₉₃ ← S₆₉₄ ← S₆₉₅ ← S₆₉₆ ← S₆₉₇ ← S₆₉₈ ← S₆₉₉ ← S₇₀₀ ← S₇₀₁ ← S₇₀₂ ← S₇₀₃ ← S₇₀₄ ← S₇₀₅ ← S₇₀₆ ← S₇₀₇ ← S₇₀₈ ← S₇₀₉ ← S₇₁₀ ← S₇₁₁ ← S₇₁₂ ← S₇₁₃ ← S₇₁₄ ← S₇₁₅ ← S₇₁₆ ← S₇₁₇ ← S₇₁₈ ← S₇₁₉ ← S₇₂₀ ← S₇₂₁ ← S₇₂₂ ← S₇₂₃ ← S₇₂₄ ← S₇₂₅ ← S₇₂₆ ← S₇₂₇ ← S₇₂₈ ← S₇₂₉ ← S₇₃₀ ← S₇₃₁ ← S₇₃₂ ← S₇₃₃ ← S₇₃₄ ← S₇₃₅ ← S₇₃₆ ← S₇₃₇ ← S₇₃₈ ← S₇₃₉ ← S₇₄₀ ← S₇₄₁ ← S₇₄₂ ← S₇₄₃ ← S₇₄₄ ← S₇₄₅ ← S₇₄₆ ← S₇₄₇ ← S₇₄₈ ← S₇₄₉ ← S₇₅₀ ← S₇₅₁ ← S₇₅₂ ← S₇₅₃ ← S₇₅₄ ← S₇₅₅ ← S₇₅₆ ← S₇₅₇ ← S₇₅₈ ← S₇₅₉ ← S₇₆₀ ← S₇₆₁ ← S₇₆₂ ← S₇₆₃ ← S₇₆₄ ← S₇₆₅ ← S₇₆₆ ← S₇₆₇ ← S₇₆₈ ← S₇₆₉ ← S₇₇₀ ← S₇₇₁ ← S₇₇₂ ← S₇₇₃ ← S₇₇₄ ← S₇₇₅ ← S₇₇₆ ← S₇₇₇ ← S₇₇₈ ← S₇₇₉ ← S₇₈₀ ← S₇₈₁ ← S₇₈₂ ← S₇₈₃ ← S₇₈₄ ← S₇₈₅ ← S₇₈₆ ← S₇₈₇ ← S₇₈₈ ← S₇₈₉ ← S₇₉₀ ← S₇₉₁ ← S₇₉₂ ← S₇₉₃ ← S₇₉₄ ← S₇₉₅ ← S₇₉₆ ← S₇₉₇ ← S₇₉₈ ← S₇₉₉ ← S₈₀₀ ← S₈₀₁ ← S₈₀₂ ← S₈₀₃ ← S₈₀₄ ← S₈₀₅ ← S₈₀₆ ← S₈₀₇ ← S₈₀₈ ← S₈₀₉ ← S₈₁₀ ← S₈₁₁ ← S₈₁₂ ← S₈₁₃ ← S₈₁₄ ← S₈₁₅ ← S₈₁₆ ← S₈₁₇ ← S₈₁₈ ← S₈₁₉ ← S₈₂₀ ← S₈₂₁ ← S₈₂₂ ← S₈₂₃ ← S₈₂₄ ← S₈₂₅ ← S₈₂₆ ← S₈₂₇ ← S₈₂₈ ← S₈₂₉ ← S₈₃₀ ← S₈₃₁ ← S₈₃₂ ← S₈₃₃ ← S₈₃₄ ← S₈₃₅ ← S₈₃₆ ← S₈₃₇ ← S₈₃₈ ← S₈₃₉ ← S₈₄₀ ← S₈₄₁ ← S₈₄₂ ← S₈₄₃ ← S₈₄₄ ← S₈₄₅ ← S₈₄₆ ← S₈₄₇ ← S₈₄₈ ← S₈₄₉ ← S₈₅₀ ← S₈₅₁ ← S₈₅₂ ← S₈₅₃ ← S₈₅₄ ← S₈₅₅ ← S₈₅₆ ← S₈₅₇ ← S₈₅₈ ← S₈₅₉ ← S₈₆₀ ← S₈₆₁ ← S₈₆₂ ← S₈₆₃ ← S₈₆₄ ← S₈₆₅ ← S₈₆₆ ← S₈₆₇ ← S₈₆₈ ← S₈₆₉ ← S₈₇₀ ← S₈₇₁ ← S₈₇₂ ← S₈₇₃ ← S₈₇₄ ← S₈₇₅ ← S₈₇₆ ← S₈₇₇ ← S₈₇₈ ← S₈₇₉ ← S₈₈₀ ← S₈₈₁ ← S₈₈₂ ← S₈₈₃ ← S₈₈₄ ← S₈₈₅ ← S₈₈₆ ← S₈₈₇ ← S₈₈₈ ← S₈₈₉ ← S₈₉₀ ← S₈₉₁ ← S₈₉₂ ← S₈₉₃ ← S₈₉₄ ← S₈₉₅ ← S₈₉₆ ← S₈₉₇ ← S₈₉₈ ← S₈₉₉ ← S₉₀₀ ← S₉₀₁ ← S₉₀₂ ← S₉₀₃ ← S₉₀₄ ← S₉₀₅ ← S₉₀₆ ← S₉₀₇ ← S₉₀₈ ← S₉₀₉ ← S₉₁₀ ← S₉₁₁ ← S₉₁₂ ← S₉₁₃ ← S₉₁₄ ← S₉₁₅ ← S₉₁₆ ← S₉₁₇ ← S₉₁₈ ← S₉₁₉ ← S₉₂₀ ← S₉₂₁ ← S₉₂₂ ← S₉₂₃ ← S₉₂₄ ← S₉₂₅ ← S₉₂₆ ← S₉₂₇ ← S₉₂₈ ← S₉₂₉ ← S₉₃₀ ← S₉₃₁ ← S₉₃₂ ← S₉₃₃ ← S₉₃₄ ← S₉₃₅ ← S₉₃₆ ← S₉₃₇ ← S₉₃₈ ← S₉₃₉ ← S₉₄₀ ← S₉₄₁ ← S₉₄₂ ← S₉₄₃ ← S₉₄₄ ← S₉₄₅ ← S₉₄₆ ← S₉₄₇ ← S₉₄₈ ← S₉₄₉ ← S₉₅₀ ← S₉₅₁ ← S₉₅₂ ← S₉₅₃ ← S₉₅₄ ← S₉₅₅ ← S₉₅₆ ← S₉₅₇ ← S₉₅₈ ← S₉₅₉ ← S₉₆₀ ← S₉₆₁ ← S₉₆₂ ← S₉₆₃ ← S₉₆₄ ← S₉₆₅ ← S₉₆₆ ← S₉₆₇ ← S₉₆₈ ← S₉₆₉ ← S₉₇₀ ← S₉₇₁ ← S₉₇₂ ← S₉₇₃ ← S₉₇₄ ← S₉₇₅ ← S₉₇₆ ← S₉₇₇ ← S₉₇₈ ← S₉₇₉ ← S₉₈₀ ← S₉₈₁ ← S₉₈₂ ← S₉₈₃ ← S₉₈₄ ← S₉₈₅ ← S₉₈₆ ← S₉₈₇ ← S₉₈₈ ← S₉₈₉ ← S₉₉₀ ← S₉₉₁ ← S₉₉₂ ← S₉₉₃ ← S₉₉₄ ← S₉₉₅ ← S₉₉₆ ← S₉₉₇ ← S₉₉₈ ← S₉₉₉ ← S₁₀₀₀



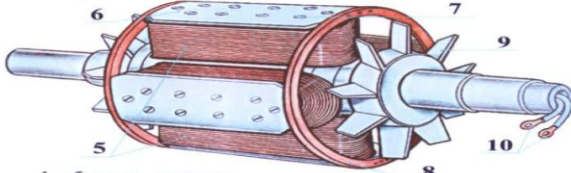
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

РОТОР ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Ротор многополюсной машины

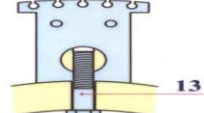


Ротор четырехполюсной машины

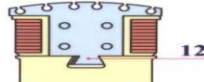


- 1- обмотка ротора;
- 2- демферная (пусковая) обмотка;
- 3- полюсы ротора;
- 4- вал ротора;
- 5- полюсная катушка;
- 6- массивный полюсный наконечник;
- 7- винты крепления полюсных наконечников;
- 8- короткозамкнутое кольцо;
- 9- осевой вентилятор;
- 10- выводные концы обмотки возбуждения;
- 11- Т-образный хвост;
- 12- ласточкин хвост;
- 13- болт крепления полюсов.

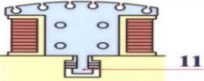
Способы крепления полюсов болтами к массивному ободу



С помощью ласточкинских хвостов



С помощью Т-образных хвостов



Винтами к втулке

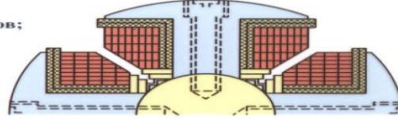
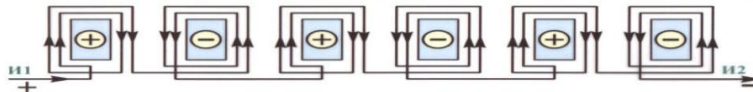


Схема соединения обмотки возбуждения синхронной машины



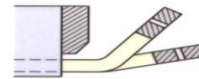
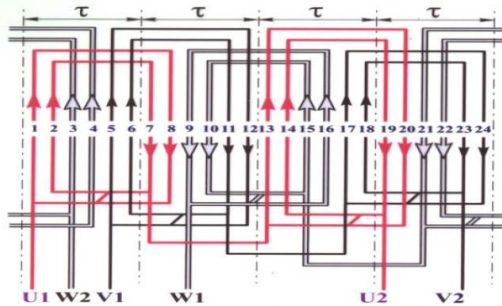
Навоийский Государственный Горный Институт



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

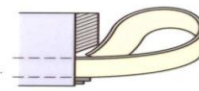
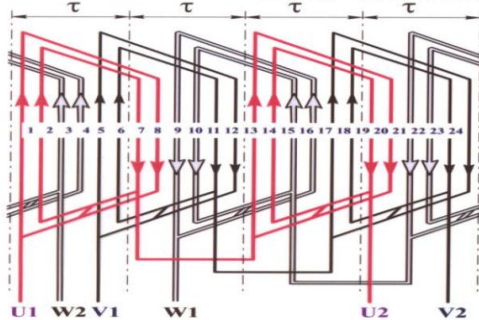
ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема концентрической обмотки



Расположение лобовых частей в двух плоскостях (двухплоскостная обмотка)

Схема шаблонной обмотки



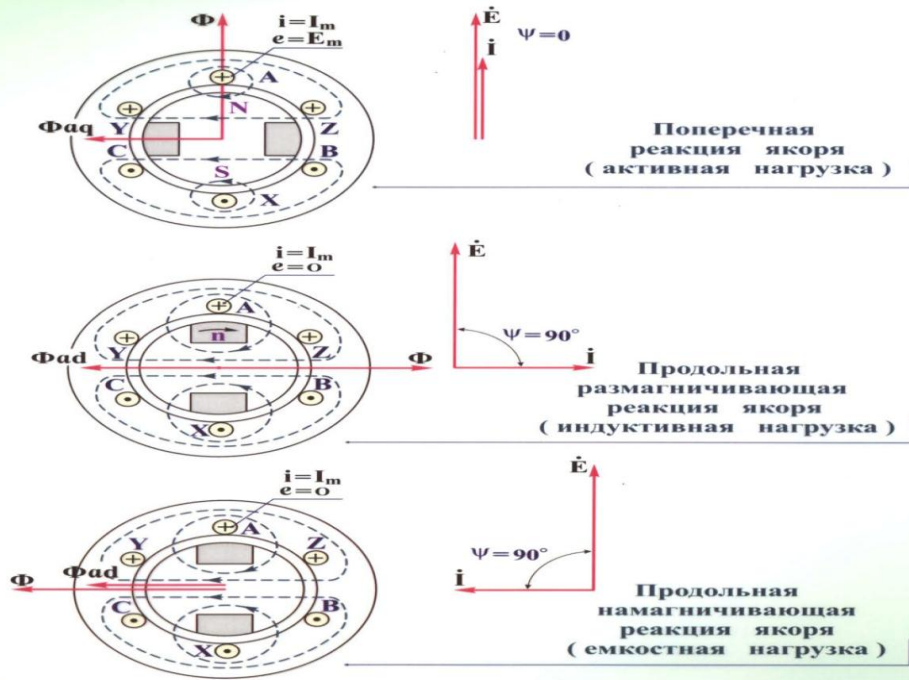
Расположение лобовых частей шаблонной обмотки

Навоийский Государственный Горный Институт



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

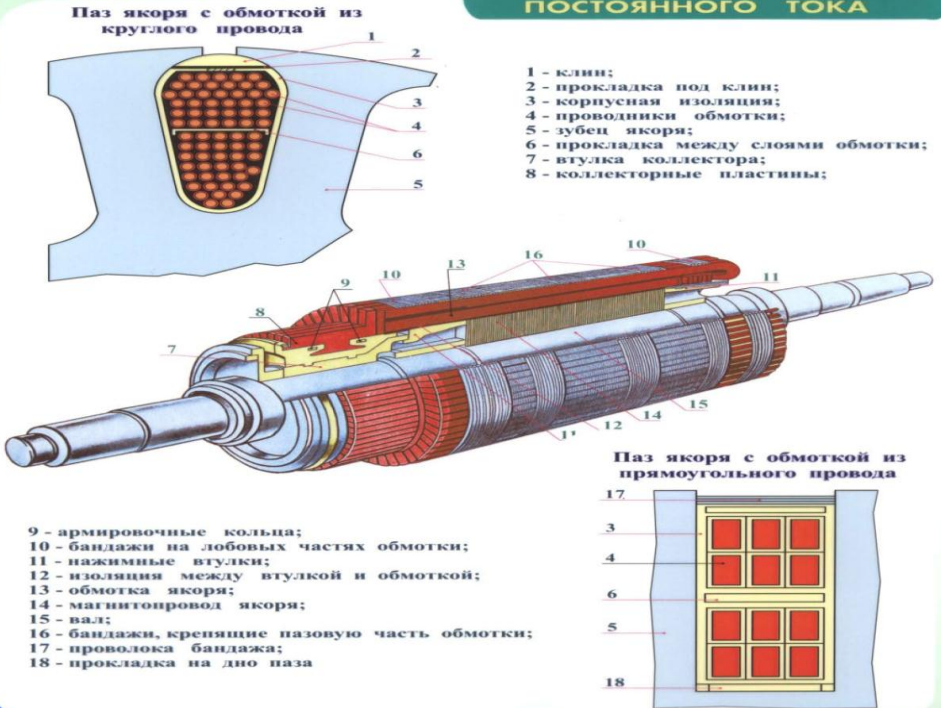


Навоийский Государственный Горный Институт



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЯКОРЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Навоийский Государственный Горный Институт



Т Е С Т Ы

При какой величине скольжения будет начальный или действующий момент?	* $S=0$	$S=0,7$	$S=0,8$	$S=1$
Как зависит нормальный момент от скольжения?	*Обратнопропорционально	прямопропорционально	не зависит	зависит квадратично.
Сколько видов режимов торможения в асинхронных двигателях?	* 3	2	4	5:
Если напряжение асинхронного двигателя уменьшится на 5% , то на сколько изменится момент?	* 7%	5%	9%:	10%
Для асинхронного двигателя регулируемая скорость дает возможность регулирования	* изменение сопротивления	обратное соединение	изменение частоты	изменение пары полюсов.
Сколько существует видов управления двигателями?	* 2	3	4	5:
Что такое режим форсировки ?	*оминальная аксимальная мощность	работа при минимальной нагрузки	работа при максимальной нагрузки	работа при средней нагрузки
Кто изобрел двигатель постоянного тока?	* кобий	Доливо-Добровольский	Яблочкин	Лодигин.
Сколько видов возбуждения в двигателе постоянного тока?	* 4	3	2	5.
Сколько существует видов асинхронных двигателей?	* 2	3	4	5.
Разница между асинхронным и синхронным двигателями ?	* магнитное поле отстает позади	магнитное поле будет впереди	магнитное поле будет одинаково	ответы Б и С
Сколько видов режимов работ в двигателях?	* 2	3	4	5.
Сколько видов электрических схем?	* 5.	3	4	2
Когда и кем был изобретен трехфазный двигатель?	* 1889 г. Доливо-Добровольский	1852 г. Грамм	1870 г. А Багиноми	. 1850 г. Фарадей
Для чего используют-ся трансформаторы при передачи электроэнергии на дальние	* Для увеличения напряжения	Для увеличения тока	Для увеличения мощности коэффицие	Для сбережения цветных металлов.

расстояния ?			нта cosφ	
Что такое трансформатор?	* для изменения напряжения?	для выработки постоянного тока	для передачи электроэнергии	для распределения электроэнергии
Почему магнитная проводимость трансформатора изготавливается из электротехнической стали?	* для уменьшения тока холостого хода	для уменьшения тока короткого замыкания	для уменьшения потерь сверхмагнитопроводности	для уменьшения вихревых токов
По какому закону основывается принцип работы трансформатора?	* по закону электромагнитной индукции	явления индукции и взаимной индукции	по закону полного тока	явление токов изменения
Почему магнитопровод для трансформаторов изготавливается из электротехнической стали?	* Для уменьшения магнитного сопротивления ферромагнитным материалом между первичным и вторичным обмотками	Для увеличения механической прочности трансформатора	Для увеличения прочности обмотки	Для увеличения удельного сопротивления сердечника
Для чего обмотки трансформатора расположены в маслянном баке?	* Для охлаждения обмоток	Для механического воздействия	Для изоляции обмоток и магнитопровода	Для изоляции обмоток
В каких целях проводится режим работы холостого хода?	* Для исследования номинального напряжения	Для вычисления коэффициента трансформации и трансформатора $k = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$	Для вычисления потерь мощности стального сердечника трансформатора РП	Для определения потерь мощности медных обмоток трансформатора
Единица измерения частоты электроэнергии?	* Герц	ампер	генри	Вольт
В каких электрических машинах наблюдается Отставание ротора в системе электромагнитного поля?	* В асинхронных машинах	В синхронных машинах	В коллекторных машинах	В трансформаторах
Единица измерения мощности трансформатора?	* кВА	кВт	кВАР	Вт
Как называется электростатический аппарат, который	* Трансформатор	Генератор	Двигатель	все ответы верны

преобразует частоту без изменения электрической энергии в одну величину напряжения на другую ?				
Как называется состояние соединения сети, когда первичная обмотка трансформатора и вторичная обмотка трансформатора остаются несоединенными?	* Холостой ход трансформатора	Нагрузочный режим	В режиме короткого замыкания трансформатора	Проверка трансформатора
Какой единицей измеряется мощность асинхронного двигателя?	* кВт	кВА	кВАР	Вт
Для чего увеличивается напряжение электрической энергии?	* для уменьшения потерь мощности	для увеличения мощности	для увеличения тока	все ответы верны.
По какому закону работает трансформатор?	* по закону электромагнитной индукции	по закону Джоуль-Ленца	по закону Термодинамики	по закону Электродинамики
Как изменится ток в обмотке, если во вторичной обмотке трансформатора увеличить напряжение в два раза ?	* Уменьшится в 2 раза	Увеличится в 2 раза	В) не изменится	уменьшится
Как изменится напряжение на обмотке трансформатора, если увеличиваются ветки на вторичной обмотке?	* Увеличивается	Уменьшается	Не изменится	Уменьшится в 2 раза
От каких параметров зависит частота вращения АД?	* от количества пар полюсов и частот	от напряжения	от сопротивления и тока	от номинального тока
Какой угол в трехфазных асинхронных двигателях между фазными обмотками?	* 120°	90°	180°	360°
По структуре какой аппарат является трансформатор	* Электростатик	Электродинамик	Термоэлектрик	Термодинамик.
По какой формуле определяется коэффициент трансформации?	$\frac{U_1}{U_2} = K$,	$\frac{S}{t} = K$,	$\frac{I}{R} = K$,	$\frac{N_1}{N_2} = K$,
Чему равен 1 кВА в	* 1000 В·А	100 В·А	50 В·А	10000 В·А.

Вольт/Амперах?				
Может ли быть коэффициент трансформации равен 1?	* нет	да	больше 1	все ответы верны.
Какая установка преобразует механическую энергию в электрическую	* Генератор	Двигатель	Редуктор	Статор.
Для передачи напряжения тока на дальние расстояния как изменяется их параметры?	* за счет повышения напряжения уменьшается сила тока	повышается напряжения, ток не изменяется	уменьшается напряжение, увеличивается ток	не изменяется напряжение, уменьшается сила
Что входит к основным частям трансформатора?	* первичная, вторичная обмотка и магнитопровод	реле газовой, первичная обмотка	вторичная обмотка, расширитель, газовое реле	Изолятор, газовое реле, расширительный бак.
Какое сопротивление трансформатора является основным изоляционным сопротивлением?	* все ответы верны	сопротивление между первичными и вторичными обмотками	между вторичным и магнитопроводом	между первичными, вторичными и магнитопроводом
Что выражает показанная мощность в паспорте АД?	* мощность двигателя	механическую мощность на валу	выражает потери мощности	выражает общую мощность
По какому способу можно включить обмотки трансформаторов и электродвигателей?	* треугольник и звезда	треугольник	звезда	последовательно и параллельно
Можно ли регулировать частоту вращения АД с фазным ротором?	* да	нет	может быть	невозможно
Что называется электрическим напряжением?	* разность потенциалов между двумя точками	упорядоченное движение заряженных частиц	любой потенциал одной точки	действие электрического тока
Что называется непроводящим элементом электрического тока?	* диэлектрики	проводники	электрометалл	полупроводники.
В электроэнергетике сколько Вольт напряжение является высоким напряжением?	* Выше 1000 В	Выше 500 В	Выше 380 В	Выше 3000 В
На сколько видов делится изоляция в электроустановках?	* 2 вида внешняя и внутренняя	3 вида высокая и внутренняя	2 вида высокая и внутренняя	4 вида высокая и внутренняя и внутренняя
К какой изоляции относится изоляция между обмотками	* внутренняя изоляция.	верхняя изоляция	внешняя изоляция	нижняя изоляция

транс-форматора?				
К какой изоляции относится изоляция между проводами воздушной линии?	* внешняя изоляция.	высокая изоляция	внутренняя изоляция	низкая изоляция
Под действием напряженности поля как изменяется изоляция диэлектриков?	* уменьшается	повышается	не изменяется	повышается только в газах
Электростанция это -?	* преобразование механической энергии в электрическую ;	преобразование электрической энергии в механическую;	преобразование электрической энергии в световую;	преобразование световой энергии в электрическую ;
Трансформатор это - ?.	* электростатический аппарат для преобразования напряжения без изменения частоты;	прибор для измерения тока и напряжения;	прибор для измерения частоты и тока;	прибор для измерения мощности;
В чем заключается задача реактора?.	* ограничение токов короткого замыкания;	ограничение напряжения;	ограничение мощности;	ограничение частоты;
В каком ответе верно указаны измерительные трансформаторы?	* трансформаторы тока и напряжения;	силовые трансформаторы;	Автотрансформаторы и силовые трансформаторы;	специальные трансформаторы;
Что происходит в сети во время к.з?	* ток стремится к бесконечности, напряжение стремится к нулю ;	ток и напряжение стремятся к бесконечности;	ток и напряжение стремятся к нулю;	напряжение стремится к нулю;
Что означает нейтральная точка?	* когда обмотки трансформатора и генератора соединены в звезду в центральной точке	нейтральная точка генератора;	нейтральная точка трансформатора;	зануление;
На сколько групп делятся эл. сети по режиму работы нейтрали?	* 4;	3;	5 ;	2;
Частота вращения генератора?	* $n = \frac{60 \cdot f}{P}$;	$n = \frac{60 \cdot f}{P^2}$;	$n = \frac{60^2 \cdot f}{P \cdot J}$;	$n = \frac{60 \cdot f}{2\pi \cdot r}$;
Что такое генератор?	*	преобразование	преобразование	преобразование

	преобразовани е механической энергии в электрическую ;	е электрической энергии в механическую;	ание световой энергии в механическ ую;	ие механическо й энергии в световую;
Что называется двигателем?	* преобразовани е электрической энергии в механическую	преобразовани е механической энергии в электрическую ;	преобразов ание световой энергии в механическ ую;	преобразован ие механическо й энергии в световую;
Рубильник - это?	*аппарат управляемый в ручную в двух положениях;	аппарат управляемый автоматически в двух положениях ;	автоматиче ски управляем ый аппарат ;	Рубильник это отделитель ;
Предохранитель – это....	* аппарат защищающий от к.з;	аппарат защищающий от к.з в несколько раз;	Отключаю щий аппарат;	аппарат выключающ ий соединяющи й
На сколько групп делятся потребители ?	* 3 ;	4;	2;	7;
На сколько групп делятся квалификации по электробезопасности.	* 5;	4;	3;	6 ;
Разъединитель- это...?	* Коммутационн ый *аппарат который предназначен для коммутации электрообору дования в режиме холостого хода ;	Коммутационн ый аппарат который предназначен для коммутации электрообору дования в режиме к.з;	Отключаю щий коммутаци онный аппарат;	аппарат выключающ ий , соединяющи й ;
Короткозамыкатель – это...?	* коммутационн ый аппарат искусственно создающий к.з на землю для работы в защите ;	аппарат выключающий , соединяющий;	Отключаю щий коммутаци онный аппарат;	защищающи й аппарат при к.з ;
В воздушных выключателях для гашения дуги используется....	* воздух;	Газ;	Вода;	Масло;
Для чего служит масло в масляных выключателях	* для гашения дуги и изоляции;	для изоляции;	для гашения дуги;	для охлаждения;

Преимущество воздушных выключателей	* безопасно для взрыва и пожара, можно применять АПВ, отключающая способность высокая;	безопасно для перевозки;	Нет преимуществ	отключающая способность не высокая;
Трансформатор тока – это....	* Измерительный трансформатор;	Специальный трансформатор;	Повышающий трансформатор;	Понижающий трансформатор;
Укажите формулу коэффициента трансформации трансформатора тока?	$K = \frac{I_1}{I_2}$;	$K = \frac{I_2}{I_1}$;	$K = \frac{I_1}{I_2} * 100$;	$K = \frac{I_2}{I_1} * 100$;
Укажите формулу коэффициента трансформации трансформатора напряжения?	$K = \frac{U_1}{U_2}$;	$K = \frac{U_2}{U_1}$;	$K = \frac{U_1^2}{U_2^2}$;	$K = \frac{U_1}{U_2} * 100$;
На сколько групп делятся генераторы непосредственно по способу охлаждения ?	* 4	3	2	5
На сколько групп делятся генераторы по системе охлаждения обмотки?	* 2	3	4	5
На сколько групп делятся системы возбуждения генераторов ?	* 2	3	6	5
Сколько видов систем возбуждения используются в генераторах?	* 4	3	2	5
Сколько методов гашения магнитного поля имеются в генераторе?	* 3	4	2	5
Сколько способов регулирования напряжения применяются в силовых трансформаторах?	* 2	3	4	5
Сколько видов схем соединения обмоток существует в силовых трансформаторах?	* 3	2	4	5
Сколько групп соединений можно создать в трехфазных трансформаторах используя схемы	* 12	10	8	6

соединения?				
Как пошляется электрическая дуга?	* возникает при отключении коммутационных аппаратов между контактами	При выключении выключателя	При включении выключателя	При перенапряжении
Сколько видов ионизации бывает в отключающих аппаратах?	* 4	3	5	2
Сколько способов гашения дуги существует в коммутационных аппаратах напряжением до 1000 в?	* 4	5	6	3
Функция магнитного пускателя?	* Управление пуска трехфазных электродвигателей мощностью до 75 кВт	Управление электродвигателей	Управление пуска трехфазных электродвигателей мощностью до 100 кВт	Управление пуска трехфазных электродвигателей мощностью от 10 кВт до 50 кВт
Основные недостатки воздушных выключателей высокого напряжения?	* Необходимость компрессорной установки, сложность конструкции и дороговизна	Необходимость конденсаторной установки	Неудобно для использования	невозможно применять АПВ;
Как подключается трансформатор тока в сеть?	* Первичная обмотка подключается последовательно к цепи	Первичная обмотка подключается параллельно к цепи	Через сопротивление	Без сопротивления
Сколько видов погрешностей имеет трансформатор тока?	* 2	3	4	5
Как называется электростатический аппарат, который преобразует частоту без изменения электрической энергии в одну величину напряжения на другую?	* Трансформатор	Генератор	Двигатель	все ответы верны
Какой единицей измеряется мощность асинхронного	* кВт	кВА	кВАР	Вт

двигателя?				
Для чего увеличивается напряжение электрической энергии?	* для уменьшения потерь мощности ;	для увеличения мощности;	для увеличения тока;	все ответы верны.
Как работает трансформатор	* по электромагнитной индукции;	по закону Джоуль-Ленца;	по закону Термодинамики;	по закону Электродинамики;
Как изменится ток в обмотке, если во вторичной обмотке трансформатора увеличить напряжение в два раза ?	* Уменьшится в 2 раза;;	Увеличится в 2 раза;	не изменится;	уменьшится;
Как изменится напряжение на обмотке трансформатора, если увеличиваются ветки на вторичной обмотке?	* Увеличивается ;	Уменьшается;	Не изменится;	Уменьшится в 2 раза;
По структуре какой аппарат является трансформатор	* Электростатик;	Электродинамик;	Термоэлектрик;	Термодинамик.
По какой формуле определяется коэффициент трансформации?	$\frac{U_1}{U_2} = K$, * U_2	$\frac{S}{t} = K$,	$\frac{I}{R} = K$,	$\frac{N_1}{N_2} = K$,
Чему равен 1 кВА в Вольт/Амперах?	* 1000 В·А	100 В·А	50 В·А	10000 В·А.
Может ли быть коэффициент трансформации равен 1?	* нет;	да;	больше 1;	все ответы верны.
Какая установка преобразует механическую энергию в электрическую	* Генератор;	Двигатель;	Редуктор;	Статор.
Для передачи напряжения тока на дальние расстояния как изменяется их параметры?	* за счет повышения напряжения уменьшается сила тока;	повышается напряжения, ток не изменяется	уменьшается напряжение , увеличивается ток;	не изменяется напряжение, уменьшается сила
Основные части трансформатора?	* первичная, вторичная обмотка и магнитопровод ;	реле газовые, первичная обмотка;	вторичная обмотка, расширитель, газовое реле;	Изолятор, газовое реле, расширительный бак.
По какому способу можно включить обмотки трансформаторов и электро-двигателей?	* треугольник и звезда;	треугольник;	звезда;	последовательно и параллельно;
Что называется электрическим напряжением?	* разность потенциалов между двумя	упорядоченное движение	любой потенциал одной	действие электрического тока;

	точками;	заряженных частиц;	точки;	
Что называется непроводящий элемент электрического тока?	* диэлектрики;	проводники;	электромет алл	полупроводники.
В электроэнергетике со скольким Вольт напряжение является высоким напряжением?	* Выше 1000 В;	Выше 500 В;	Выше 380 В;	Выше 3000 В;
На сколько видов делится изоляция в электроустановках?	* 2 вида внешняя и внутренняя;	3 вида высокая и внутренняя;	2 вида высокая и внутренняя	4 вида высокая и внутренняя и внутренняя;
К какой изоляции относится изоляция между обмотками трансформатора?	* внутренняя изоляция.	верхняя изоляция;	внешняя изоляция;	нижняя изоляция;
К какой изоляции относится изоляция между проводами воздушной линии?	* внешняя изоляция.	высокая изоляция;	внутренняя изоляция;	низкая изоляция

Основная литература

1. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика. Учебник для вузов. -М.: изд-во «Academia», 2007. -512 с.
2. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Учебник для вузов.- М.: Изд-во МЭИ, 2004. Том. 1 - 652 с, Том 2 - 532 с.
3. Кацман М.М. Сборник задач по электрическим машинам. Учеб. пособие для вузов. -Москва.- Издательский центр «Академия». стр 154.
4. Копылова И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. Москва.: Юрайт, 2012. - 675 с.
5. Набиев Ф.М. Электрические машины. -М.: Изд-во РадиоСофт, 2008. -292 с.
6. Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н., Махмадиев Е.М. «Электр машиналари» курсидан «Трансформаторларни лойихалаш». Укув кулланма. -Т.: ТошДТУ, 2013. - 95 б.
7. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. Darslik.-Т.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011. - 408 b.
8. Салимов Ж.С, Пирматов Н.Б. «Трансформаторлар ва автотрансформаторлар». Укув кулланма. -Т.: Вектор-Пресс. 2010.

Дополнительная литература

1. Бозоров Н.Х, Пирматов Н.Б. Синхрон машиналар. ўқув кулланма. - Т.: ТДТУ, 1995.
2. Иброхимов У. Электр машиналари. Ўқув қўлланма. Т.: Укитувчи, 2001
3. Мажидов С. Электр машиналари ва электр юритма. Ўқув қўлланма. -Т.: Укитувчи, “Зиё-Ношир” КШК, 2002. - 408 б.
4. Nagrath I.J., Kothari D.P. Elektric Machines. Twelfth Reprint. Tata McGraw - Hill,

New - Delhi, 1995. - 684 p.

5.Пирматов Н.Б., Салимов Д.С. Экспериментальные способы определения параметров синхронных машин. -Т.: «KUROPRINT», -85 с.

6.Pirmatov N.B., Yarmuxamedova Z.A., Mustafakulova G.N. Elektr mashinalari fanining transformatorlar qismi bo'yicha kurs loyihasini bajarishga oid o'quv-metodik qo'llanma. -Т.: ToshDTU, 2012. -120 b.

7.Rentzsch H. Elektromotoren. Electric Motors. -ASEA BROWN BOVERI, 1992. 861 p.

8.Salimov J.S.,Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. O'quv qo'llanma. -Т.: "O'qituvchi" NMIU, 2005. -240 b

9.Салимов Ж.С., Ахматов М.Г., Пирматов Н.Б. Ўзгармас ток машиналарининг тавсифлари. Тафсилий тахлил. - Т.: ТошДТУ, I қисм. Ўзгармас ток генераторлари, 1995. - 73 б. II қисм. Ўзгармас ток моторлари. Укув кулланма. 1994 - 86 б.

10.Епифанов А.Г. Электромеханические преобразователи энергии. Учебник для вузов. -СПб.: Изд-во "Лань", 2004. -208 с.

Электронные ресурсы

17. www.Ziyo.net

18. http://dhes.ime.mrsu.ru/studies/tot/tot_lit.htm;

19. <http://rbip.bookchamber.ru/description.aspx?product no=854>;

20. <http://energy-mgn.nm.ru/progr36.htm>;

21. <http://booket.ru/book-57542.html> (“Электромеханические преобразователи энергии”). Епифанов А.Г. Изд-во “Лань”. 2004г.);

22. <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html> (Электронная книга по электромеханике. Леонтьев А.Г.);

23. www.utait.ru Копылова И.П. Электрические машины

24. Ахборот технологиялари: <http://booket.ru/book-57542.html>, <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/Head.html>.