

**Э.Т. ГАЛЯН**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**Учебное пособие**

**Самара**  
**Самарский государственный технический университет**  
**2014**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Э.Т. ГАЛЯН

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Учебное пособие*

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2014

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.313.3(0.75.8)

Г 17

**Галян Э.Т.**

Г 17 **Электрические машины переменного тока:** учеб. пособие / *Э.Т.Галян.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 80 с.: ил.

Представлены устройство, принцип действия электрических машин переменного тока и электромагнитные процессы, протекающие при их работе в различных режимах. Может использоваться при изучении предметов «Электрические машины», «Электромеханика», «Современные проблемы электротехнических и электромеханических преобразователей». Содержит теоретические разделы основных направлений процессов электромагнитных преобразований.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Электромеханика».

УДК 621.313.3(0.75.8)

Г 17

Рецензент канд. техн. наук *В.А.Данилушкин*

© Э.Т. Галян, 2014

© Самарский государственный  
технический университет, 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для подготовки бакалавров по предмету «Электрические машины» необходимо обеспечить курс учебными пособиями в соответствии с требованиями ФГОС. Некоторые пособия уже вышли в изданиях СамГТУ. Это «Трансформаторы» и «Электрические машины постоянного тока». Настоящее учебное пособие завершит серию необходимых материалов по данному курсу и обеспечит студентам непрерывное знакомство со структурой предмета в рамках рабочей программы. Согласно рабочей программе усваивание всего теоретического материала предполагает постепенное и поэтапное изучение содержания курса. В каждом разделе данного пособия наиболее подробно рассматриваются устройство и основные вопросы теории так называемых нормальных типов электрических машин переменного тока, применяемых в качестве источников электрической энергии и приводов для различных машин и механизмов. Опыт показывает, что наиболее трудными для понимания и усвоения являются многообразные взаимосвязанные физические явления и процессы, происходящие в электрических машинах, поэтому в пособии отведено больше места. Изложение, произведенное в простой и ясной форме, позволит студентам облегчить пользование учебниками и сократить время поиска необходимых материалов в различных библиографических изданиях.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение теоретического материала по дисциплине «Электрические машины» должно происходить постепенно, с тем чтобы отдельные положения курса уложились в понимании студентов структурно и не вызвали хаотического знания. Для этого служат различные методические издания, помогающие студентам при подготовке к практическим, лабораторным работам, их проведению и изучении всего теоретического курса.

Данное учебное пособие предполагает изложение материала по довольно большим разделам рабочей программы, касающимся изучения электрических машин переменного тока. В нем постепенно и довольно просто излагаются вопросы классификации электрических машин такого рода, их устройства и принципа работы. Сначала рассматривается теоретический материал раздела «Общие вопросы машин переменного тока», а затем осуществляется переход к разделам по изучению конкретно асинхронных и синхронных машин. Студенты, посещая лекции и конспектируя материал, смогут обращаться к настоящему учебному пособию и вспоминать некоторые упущенные моменты в понимании конкретных вопросов.

# Раздел 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## Тема 1.1. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 1.1.1. Устройство электрических машин переменного тока

В настоящее время [1, 2] применяются преимущественно трехфазные ( $m = 3$ ) машины переменного тока. Машины с другим числом фаз ( $m = 2; 6$ ) используются для специальных целей.

Действие всех многофазных машин основано на принципе вращающегося магнитного поля, и поэтому их теория является общей.

Однофазные машины переменного тока имеют ограниченное применение.

Трехфазные машины переменного тока подразделяются на три основных вида: синхронные, асинхронные и коллекторные.

Все виды машин переменного тока рассчитываются на работу при синусоидальном переменном токе.

В синхронных машинах обычных типов ротор вращается с такой же частотой и в том же направлении, как и вращающееся магнитное поле. Таким образом, вращение ротора происходит в такт, или синхронно, с вращающимся полем, откуда и происходит название этого вида машин.

Синхронные машины используются в качестве генераторов и двигателей.

Ротор асинхронных машин вращается несинхронно, или асинхронно, по отношению к вращающемуся магнитному полю, чем и обусловлено название этих машин.

На практике асинхронные машины используются главным образом в качестве двигателей, и подавляющее число применяемых в промышленности электрических двигателей являются асинхронными.

Коллекторные машины переменного тока также вращаются несинхронно с магнитным полем, следовательно, они являются асинхронными машинами. Однако ввиду наличия у них коллектора и связанных с этим особенностей они выделяются в отдельный вид машин переменного тока. Наибольшее применение коллекторные машины находят в качестве двигателей. Однако их использование ограничено, и поэтому приоритетными видами машин переменного тока являются асинхронные и синхронные машины.

Общие вопросы теории многофазных машин переменного тока целесообразно рассмотреть совместно, предварительно приведя краткое описание принципов действия и устройства основных видов машин переменного тока.

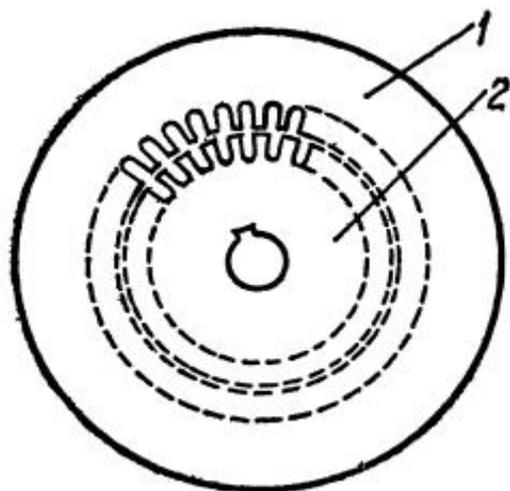


Рис. 1.1. Листы сердечников статора (1) и ротора (2) асинхронной машины малой и средней мощности

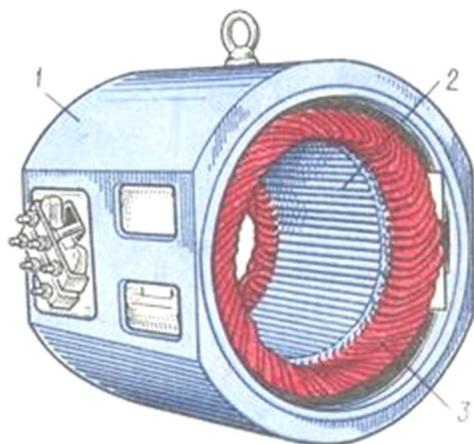


Рис. 1.2. Статор асинхронного двигателя в сборе:  
1 – корпус; 2 – сердечник;  
3 – обмотка статора

Неподвижная часть машины переменного тока называется статором, а подвижная часть – ротором. Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются из листов электротехнической стали (рис. 1.1), которые до сборки обычно покрываются с обеих сторон масляно-канифольным изоляционным лаком. Сердечники машин малой мощности иногда собираются из листов без лакового покрытия, так как в этом случае достаточной изоляцией является естественный или искусственно созданный слой окислов на поверхности листов стали. Сердечники статоров и роторов асинхронных и синхронных машин штампуют из изотропной рулонной холоднокатаной стали, позволяющей при раскрое получать экономию порядка 10-15 % по сравнению с листовой, вследствие чего листовая сталь применяется очень редко.

На рис. 1.2 изображен статор асинхронного двигателя в сборе.

Сердечник статора запрессовывается в станину (корпус), а сердечник ротора (рис. 1.3) закрепляется на валу (машины малой и средней мощности) или на ободу с крестовиной и

втулкой, надетой на вал (машины большой мощности).

Вал ротора вращается в подшипниках<sup>4</sup> (см. рис. 1.3), которые помещаются в подшипниковых щитах<sup>2</sup> (см. рис. 1.3), прикрепляемых

к корпусу статора (машины малой и средней мощности), или на отдельно стоящих подшипниковых стояках.

На внутренней цилиндрической поверхности сердечника статора имеются пазы, в которые укладывается **трёхфазная обмотка**  $\mathcal{Z}$  (см. рис. 1.2). 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 –  $C_4, C_5, C_6$ . По конструкции статоры асинхронных и синхронных машин идентичны, а роторы существенно отличаются. На внешней цилиндрической поверхности ротора асинхронных машин также имеются пазы, в которые закладывается обмотка.

Роторы асинхронных машин бывают двух типов: **короткозамкнутые** и **фазные**. Короткозамкнутый ротор изображен на рис. 1.4. В пазах сердечника короткозамкнутого ротора располагаются алюминиевые стержни  $1$ , которые по концам, при выходе из пазов, замыкаются кольцами  $2$  из того же материала. На кольцах могут быть лопатки  $3$ , образующие вентилятор для охлаждения. В фазном роторе (рис. 1.5) в пазы укладывается трехфазная обмотка  $\mathcal{Z}$  из медного провода, соединенная звездой. Три конца фаз обмотки выведены наружу с помощью трех медных колец  $1$ , напесованных на вал.

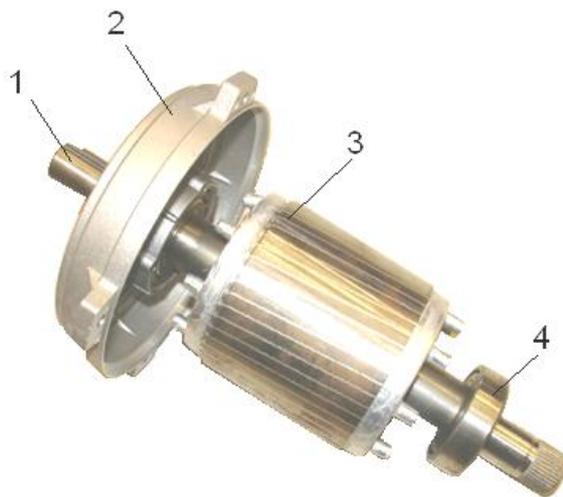


Рис. 1.3. Ротор в сборе:  
1 – вал; 2 – подшипниковый щит;  
3 – пакет ротора с короткозамкнутой обмоткой;  
4 – подшипник

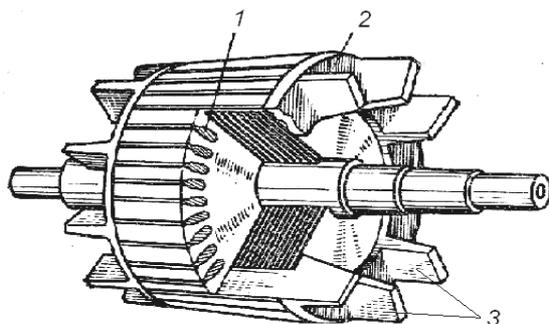


Рис. 1.4. Короткозамкнутый ротор асинхронных машин:  
1 – стержень; 2 – кольцо;  
3 – лопатки

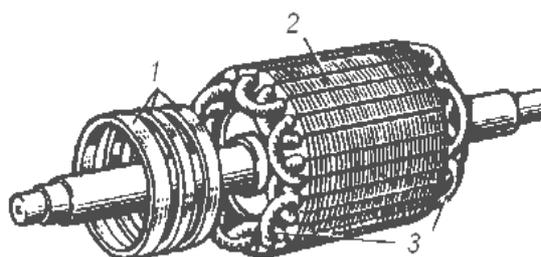


Рис. 1.5. Фазный ротор асинхронных машин:  
1 – кольца; 2 – сердечник;  
3 – обмотка ротора

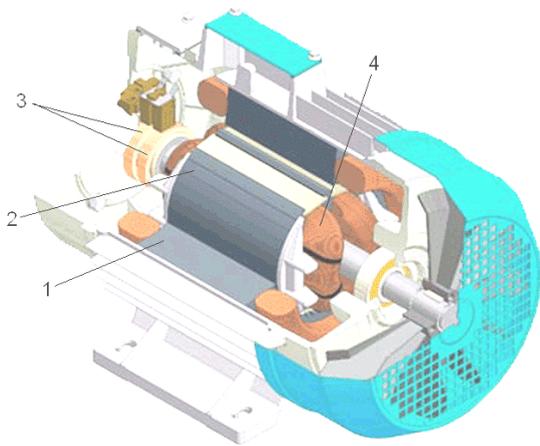


Рис. 1.6. Общий вид синхронного явнополюсного генератора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – медные кольца; 4 – обмотка возбуждения

Роторы синхронных машин могут быть выполнены также двух видов: явнополюсные и неявнополюсные.

Общий вид с разрезом синхронного явнополюсного генератора представлен на рис. 1.6.

Явнополюсный ротор состоит из вала, на котором крепятся полюсы, набранные из листов электротехнической стали. На полюсах размещается однофазная обмотка возбуждения (см. рис. 1.6), создающая магнитный поток. Питается она источником постоянного тока через два медных кольца, напрессованных на вал.

Вид ротора явнополюсного синхронного генератора в разрезе представлен на рис. 1.7. На рис. 1.8 показан вид ротора неявнополюсного синхронного генератора. В сплошной заготовке на  $\frac{3}{4}$  поверхности выфрезеровываются пазы 1, в которые укладываются катушки обмотки возбуждения, концы которой присоединяются к кольцам 2.

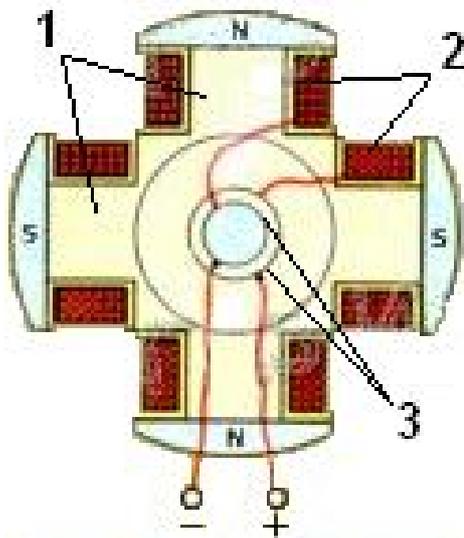


Рис. 1.7. Вид ротора явнополюсного синхронного генератора в разрезе: 1 – полюсы; 2 – катушки обмотки возбуждения; 3 – медные кольца

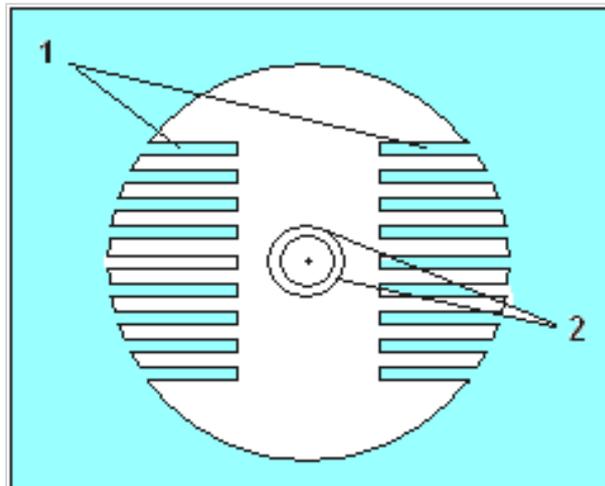
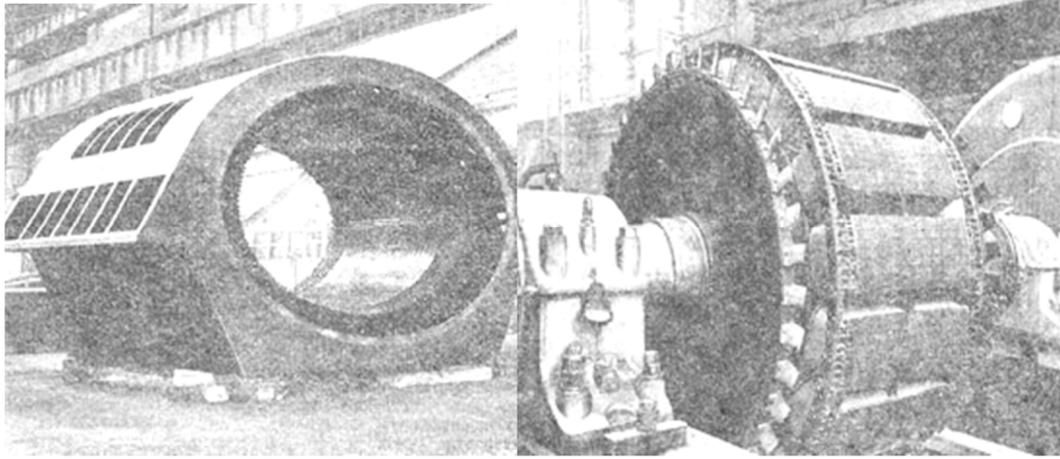


Рис. 1.8. Вид необмотанного ротора неявнополюсного синхронного генератора в разрезе: 1 – пазы; 2 – медные кольца

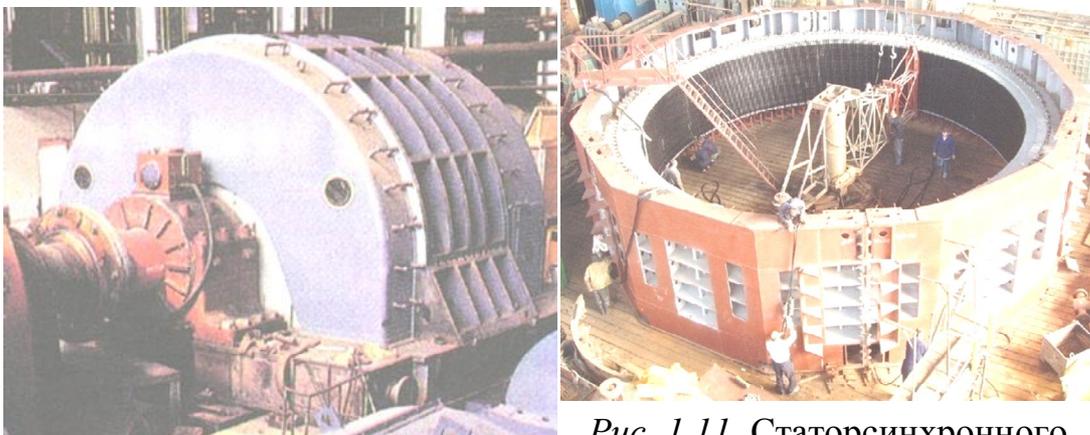
Примеры выполнения синхронных машин и их элементов представлены на рис. 1.9-1.11.



*а*

*б*

*Рис. 1.9.* Статор (*а*) и ротор (*б*) крупных синхронных машин



*Рис. 1.10.* Общий вид синхронного двигателя

*Рис. 1.11.* Статор синхронного гидрогенератора Волжской ГЭС

Электрические машины переменного тока – асинхронные и синхронные, несмотря на различия в устройстве и конструкции, имеют много общего в принципе работы и теории. В этих машинах при прохождении по обмоткам статора или ротора переменного тока, синусоидально изменяющегося во времени, создается вращающееся магнитное поле. Для того чтобы далее рассмотреть принцип работы машин переменного тока, необходимо изучить процесс образования вращающегося магнитного поля.

### **1.1.2. Вращающееся магнитное поле статора**

Изобразим поперечный разрез двухполюсного ( $2p=2$ ) асинхронного двигателя (рис. 1.12) и покажем характер магнитного поля статора в какой-то момент времени.

Каждая фаза состоит из одного витка или двух проводников (1-я фаза – проводники А и Х, 2-я фаза – проводники В и У, 3-я фаза – проводники С и Z). Проводники каждого витка (фазы) расположены друг от друга на расстоянии полюсного деления

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

где  $D_a$  – диаметр внутренней расточки статора, а  $p$  – число пар полюсов

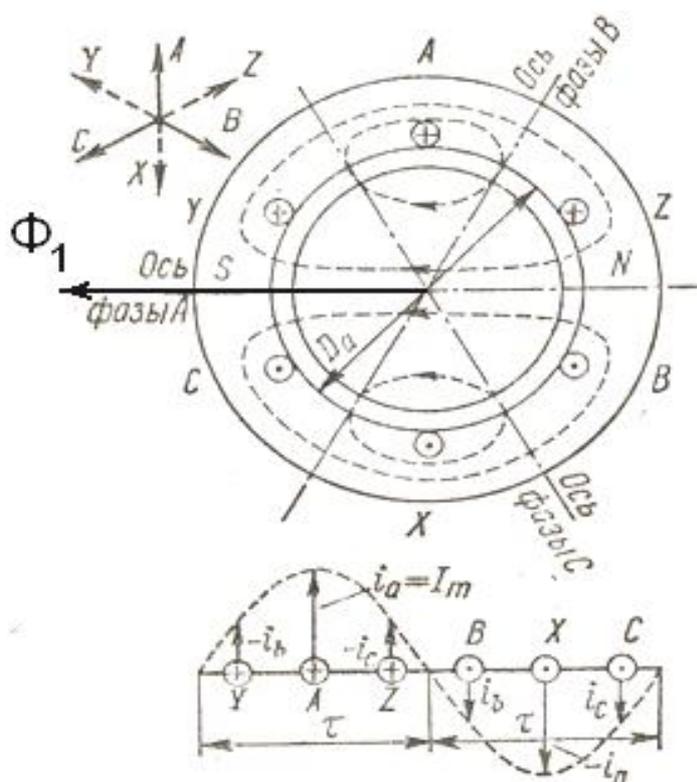


Рис. 1.12. Поперечный разрез двухполюсного ( $2p=2$ ) асинхронного двигателя

Полюсное деление составляет половину окружности. Шаг витка или обмотки  $\tau$  поэтому является полным. Двойному полюсному делению соответствует угол по окружности статора, равный 360 электрических градусов. Начала фаз А, В, С сдвинуты относительно друг друга на 120 эл. градусов. Из этих кривых видно, что токи на поверхности статора распределены по синусоидальному закону.

Токи проводников обмотки статора двухполюсной машины создают двухполюсный магнитный поток,

вектор которого  $\Phi_1$  направлен перпендикулярно плоскости фазы А, проходящей через статор, ротор и воздушный зазор между ними. Теперь возьмем другой момент времени (рис. 1.13) и покажем характер магнитного поля статора. Как видно из рисунка, вектор потока повернулся на некоторый угол. Так как мы взяли произвольный момент времени, получили скачкообразное изменение положения вектора. В действительности ток в фазах изменяется плавно и синусоидально.

Поэтому обмотка статора двухполюсной машины при питании ее трехфазным током создает двухполюсное вращающееся магнитное поле. При этом за один период изменения тока поле поворачивается на  $2\pi$ , или на 360 эл. градусов.

Частота вращения поля статора

$$n_1 = f_1,$$

где  $f_1$  — частота тока статора.

Магнитное поле вращается в направлении чередования фаз А, В, С обмотки статора. Для изменения направления вращения поля на обратное достаточно поменять местами на зажимах обмотки статора концы двух проводников, идущих от питающей сети.

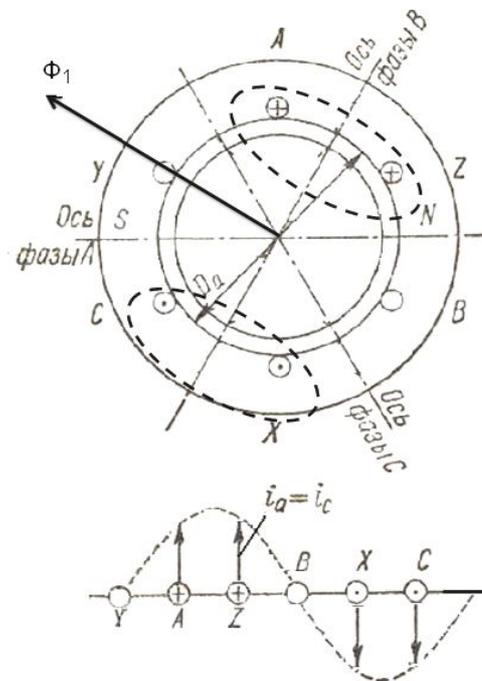


Рис. 1.13. Поперечный разрез двухполюсного ( $2p=2$ ) асинхронного двигателя

### 1.1.3. Принцип действия электрических машин переменного тока

Магнитный поток  $\Phi_1$ , создаваемый обмоткой статора, при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора, индуцирует в них ЭДС  $e_2$ . Если обмотка ротора замкнута, то в ней возникают токи  $i_2$ , частота которых  $f_2$  при  $n=0$  равна первичной частоте  $f_1$ .

Если обмотка ротора является трехфазной, то в ней индуцируется трехфазный ток. Этот ток создает вращающийся поток ротора  $\Phi_2$ , (число полюсов  $2p$ ), направление и частота вращения которого при  $n=0$

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1.$$

Поэтому потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя  $\Phi$ . В результате взаимодействия токов ротора с потоком возникают действующие на проводники ротора механические силы  $F$  и вращающий электромагнитный момент  $M$ . Таким образом, вращающийся момент создается только активной составляющей тока ротора

$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2.$$

Этот вывод имеет общий характер и справедлив также для других видов машин переменного тока.

При пуске всегда  $0 < \psi_2 < 90^\circ$ . Если этот угол выходит за эти пределы, то он не соответствует теории. Эти токи создают момент, и если он больше статического момента на валу, то ротор начинает вращаться с частотой  $n < n_1$ .

Для асинхронных машин следует ввести понятие скольжения.

Скольжение – это следующее соотношение:

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

где  $n_1$  – частота вращения поля статора;

$n$  – частота вращения ротора.

Относительная разность частоты вращения поля статора и ротора называется скольжением.

При пуске двигателя ( $n=0$ ) имеем  $s=1$ . При вращении ротора синхронно с полем статора ( $n=n_1$ )  $s=0$ . В режиме двигателя всегда  $0 < n < n_1$  и  $1 > s > 0$ .

Создаваемое поле  $\Phi$ , в свою очередь, пересекает обмотки статора и ротора (или одну из них) и наводит в них переменную ЭДС. Общность физических процессов обуславливает общность теории и сходность конструкции многофазных обмоток переменного тока.

## **Тема 1.2. ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **1.2.1. Типы обмоток статора машин переменного тока, принцип выполнения**

Обмотки статора переменного тока являются незамкнутыми. В трехфазных машинах они состоят из трех отдельных фаз, которые с помощью дополнительных проводов соединяются в звезду или треугольник.

Согласно ГОСТ к обмоткам предъявляются такие же требования, как и к обмоткам якоря машин постоянного тока. Обмотки статора и ротора укладываются в пазы соответствующих пакетов. Формы сечения пазов статора и ротора машин переменного тока показаны соответственно на рис. 1.14, 1.15.

Обмотки изображаются в виде схем, а для этого необходимо иметь следующие параметры:

$Z$  – число пазов статора;  
 $2p$  – число полюсов;  
 $m$  – число фаз;  
 $q$  – число пазов приходящихся на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2pm};$$

число фазных зон  $2mp$  или в градусах:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m}.$$

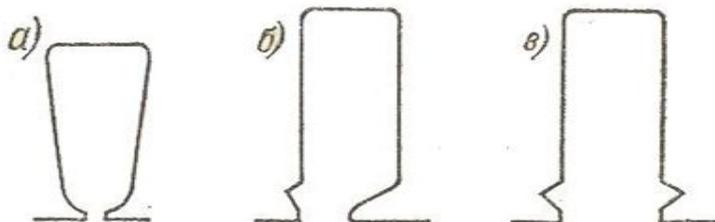


Рис. 1.14. Формы сечения пазов статора:  
 $a$  – полузакрытые;  $b$  – полуоткрытые;  $v$  – открытые

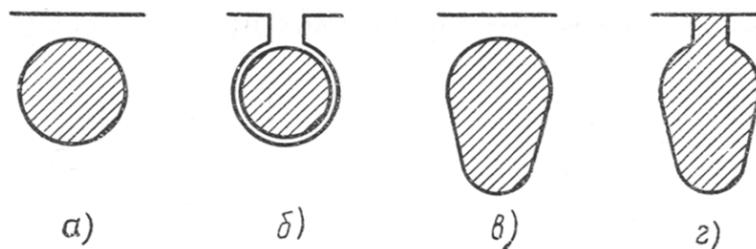


Рис. 1.15. Формы сечения пазов ротора:  
 $a, б$  – круглые;  $в, г$  – овальные

Обмотка статора состоит из катушек. Катушка представляет собой несколько последовательно соединенных витков (рис. 1.16), стороны которых лежат в одних и тех же пазах.

Если сечение проводников будет большим, то для удобства укладки проводники разбивают на несколько параллельных проводов меньшего сечения.

Та часть катушки, которая лежит в пазах и пересекается главным магнитным потоком, называется **активной** частью, а та часть, которая лежит вне пазов, – **лобовой**.

Стороной катушки называются проводники, лежащие в одном пазу.

На практике выполняют  $2p$  катушек и тем самым уменьшают число витков в катушках. Это связано с целью уменьшения объема токов в пазу, величины пазов, перегрева обмоток и габаритов машины. Каждую из  $p$  катушек разбивают на несколько катушек с меньшим числом витков и помещают их рядом друг с другом в соседних пазах. В дальнейшем такие группы катушек называют катушечными группами.

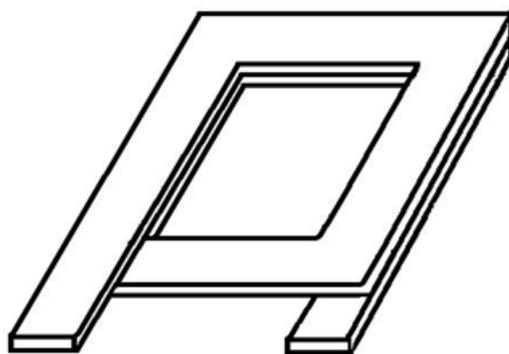


Рис. 1.16. Катушка из прямоугольного провода из двух витков

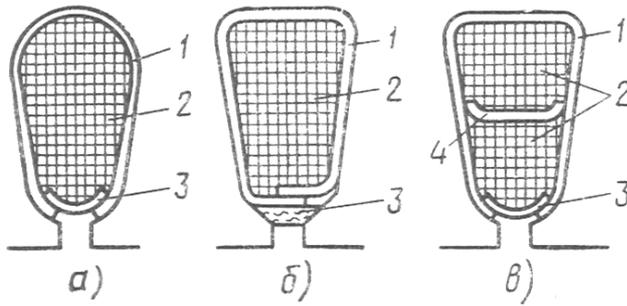


Рис. 1.17. Формы пазов статора и виды укладки:  
*а, б* – овальная, трапецеидальная однослойная; *в* – полуовальная двухслойная; 1, 3 – пазовые изоляция и клин, 2 – проводники обмотки статора, 4 – межслойная прокладка

Обмотки переменного тока подразделяются на однослойные и двухслойные (рис. 1.17). В двухслойной обмотке стороны катушек лежат в пазах в два слоя, и каждая катушка одной стороны лежит в верхнем, а другой – в нижнем слое. При этом все катушки имеют один размер и форму.

Преимущества двухслойной обмотки: 1) возможность укорочения шага на любое число зубцовых делений, что выгодно с

точки зрения подавления высших гармоник ЭДС и н.с. обмоток и уменьшения расхода обмоточного провода; 2) одинаковые размеры и формы всех катушек, что упрощает и облегчает изготовление обмоток; 3) относительно простая форма лобовых частей катушек, что также упрощает изготовление обмотки.

Как и якорные обмотки машин постоянного тока, двухслойные обмотки переменного тока делятся на петлевые и волновые, которые в электромагнитном отношении равноценны. Преимущественно применяются петлевые обмотки. Волновые же обмотки используются обычно при числе витков в катушке, равном единице.

### 1.2.2. Примеры выполнения однослойной и двухслойной обмоток статора электрических машин переменного тока

Прежде чем выполнить обмотки, рисуют их схемы. Для этого существуют определенные правила. На схеме изображают пазы в виде прямых линий. Для однослойных обмоток это одни линии – сплошные. Если обмотки двухслойные, то это двойные линии, верхний слой изображают сплошными линиями, а нижний – пунктирными.

Следует отметить, что бывают обмотки с диаметральной шагом. Диаметральной шагом в буквальном смысле слова может быть названа обмотка, выполненная на машине с числом полюсов  $2p=2$ . Когда стороны катушек расположены по диаметру статора, этот тер-

мин сохраняется и для машин с числом полюсов  $2p > 2$ , при этом подразумевается, что ширина катушки равна ширине полюсного деления. При диаметральном шаге стороны катушек находятся в местах, где индукция одинакова, фазная зона двухслойных катушек составляет 60 электрических градусов.

Однослойные обмотки бывают **концентрическими**. У таких обмоток катушечные группы состоят из концентрических катушек, причем количество в каждой фазе равно числу пар полюсов. Недостатки однослойной катушечной обмотки – увеличение размеров лобовых частей и сложность их выполнения. Схема такой обмотки представлена на рис. 1.18.

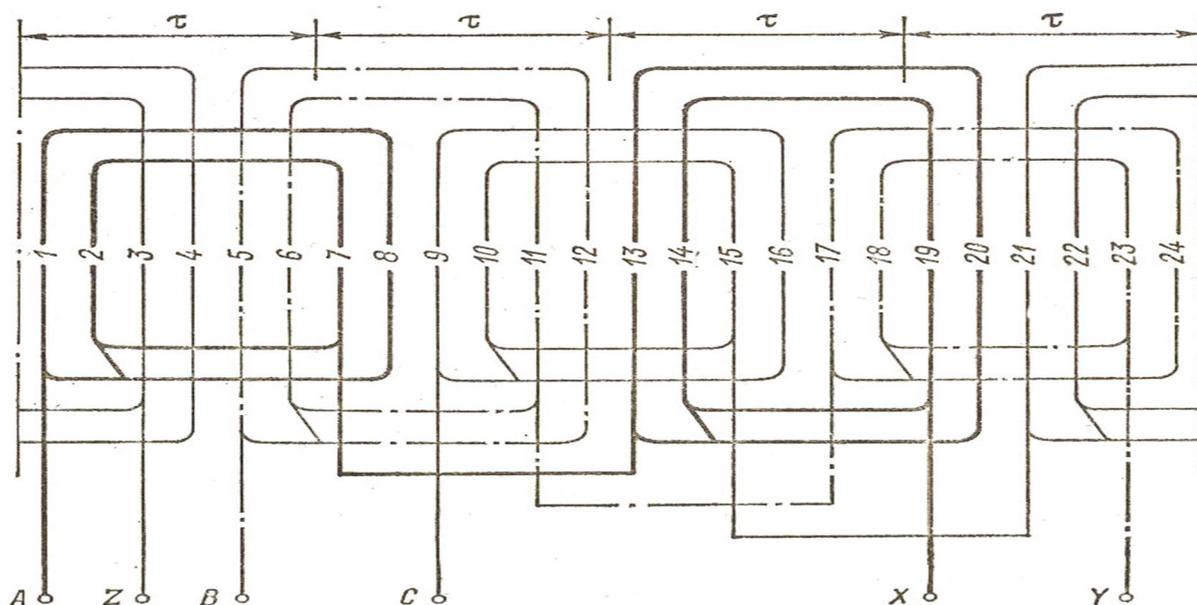


Рис. 1.18. Схема однослойной концентрической обмотки статора при  $Z = 24$ ,  $2p = 4$ ,  $m = 3$

Бывают **шаблонные обмотки**. Они имеют катушки одинаковой формы и ширины, которые наматываются на одном шаблоне. Для удобства изготовления катушки шаблонной обмотки имеют форму трапеции (рис. 1.19).

Они подразделяются на следующие типы: **простая шаблонная обмотка**, **шаблонная в «развалку»** и **цепная обмотка**.

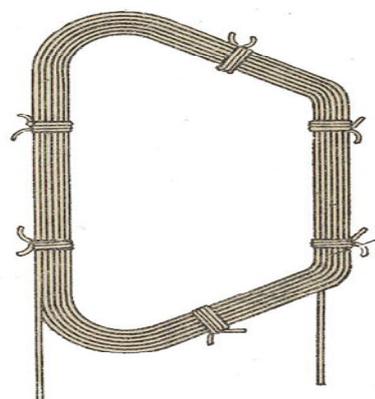


Рис. 1.19. Катушка шаблонной обмотки в форме трапеции

Схема **простой шаблонной обмотки** представлена на рис. 1.20. В этой обмотке лобовые части всей катушечной группы при выходе из пазов отгибаются в одну сторону и шаг обмотки является полным.

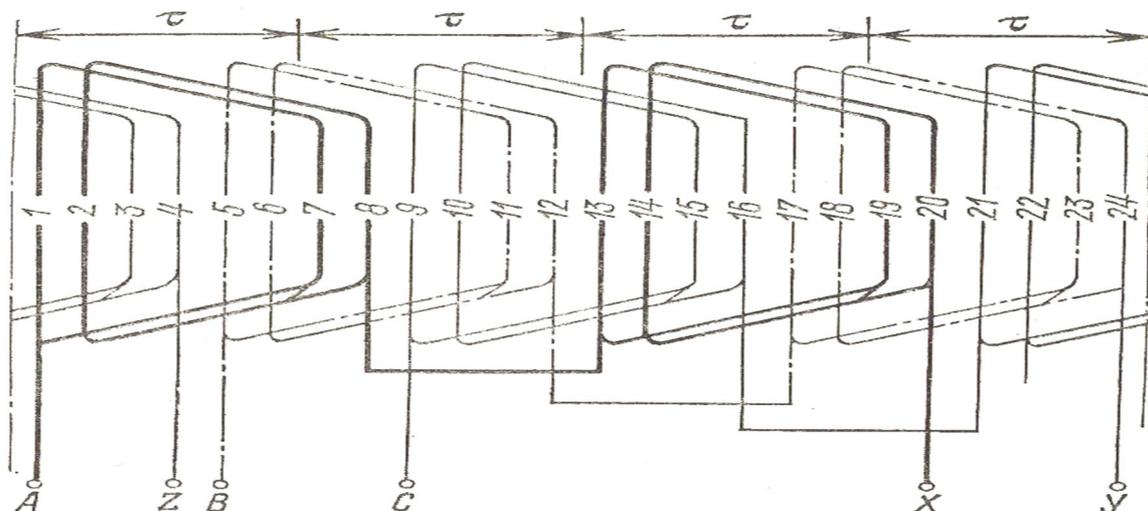


Рис. 1.20. Схема простой шаблонной обмотки

У **шаблонной обмотки в «развалку»** (рис. 1.21) катушечная группа при выходе из пазов делится на две половины, лобовые части которых отогнуты в разные стороны. При этом  $q$  должно быть четным числом. Такая обмотка в электромагнитном отношении также имеет полный шаг.

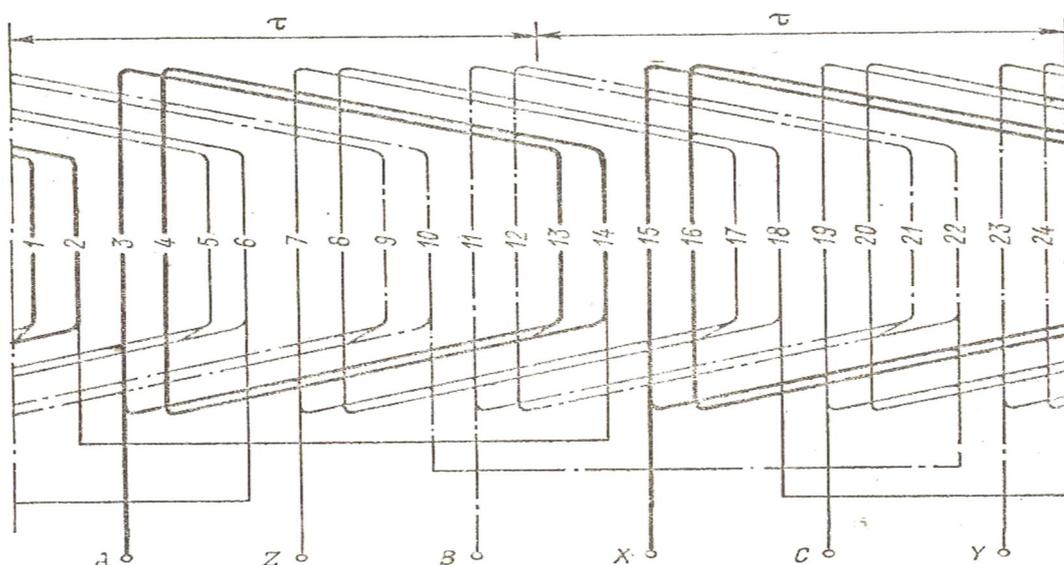


Рис. 1.21. Схема шаблонной обмотки в «развалку»

**Цепная обмотка** (рис. 1.22) отличается от обмотки в «развалку» тем, что в разные стороны отгибаются не лобовые части половин катушечных групп, а лобовые части каждой пары соседних катушек. Она может быть выполнена как при четном, так и при нечетном

$q$ , причем ее шаг по пазам всегда должен быть нечетным, так как одна сторона каждой ее катушки лежит в нечетном пазу, а другая в четном. Поэтому шаг катушки цепной обмотки может быть равен полюсному делению только при нечетном  $q$ , когда  $mp=3q$  равно нечетному числу.

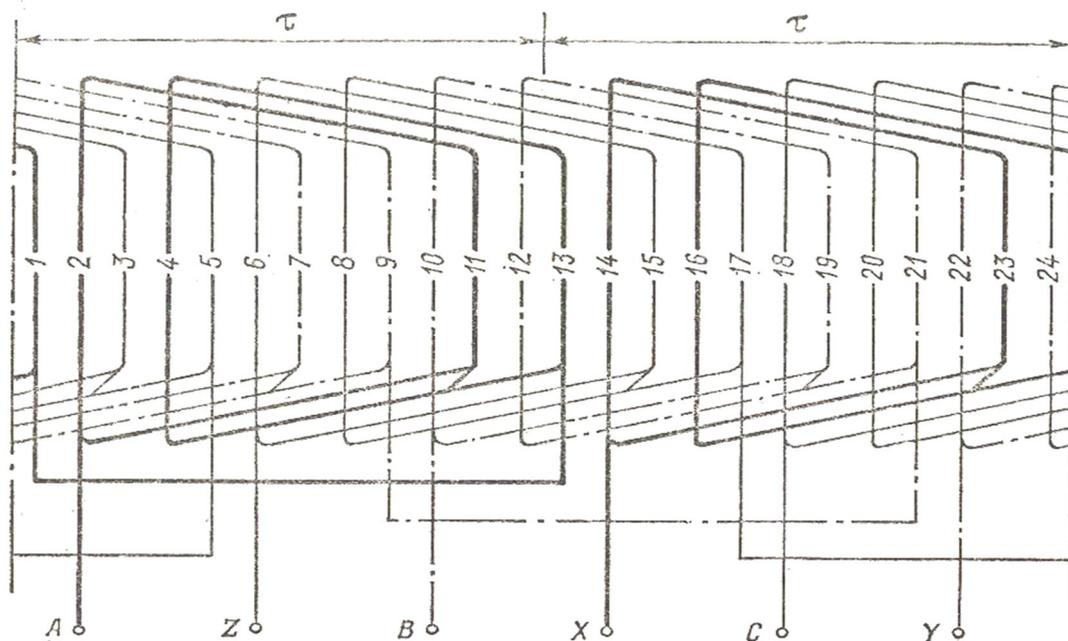


Рис. 1.22. Схема цепной обмотки

Для примера выполнения трехфазной двухслойной обмотки (рис. 1.23) рассчитаем некоторые величины. Рассмотрим обмотку с целым числом пазов на полюс и фазу  $Z = 18$ ,  $2p = 2$ ,  $m = 3$ .

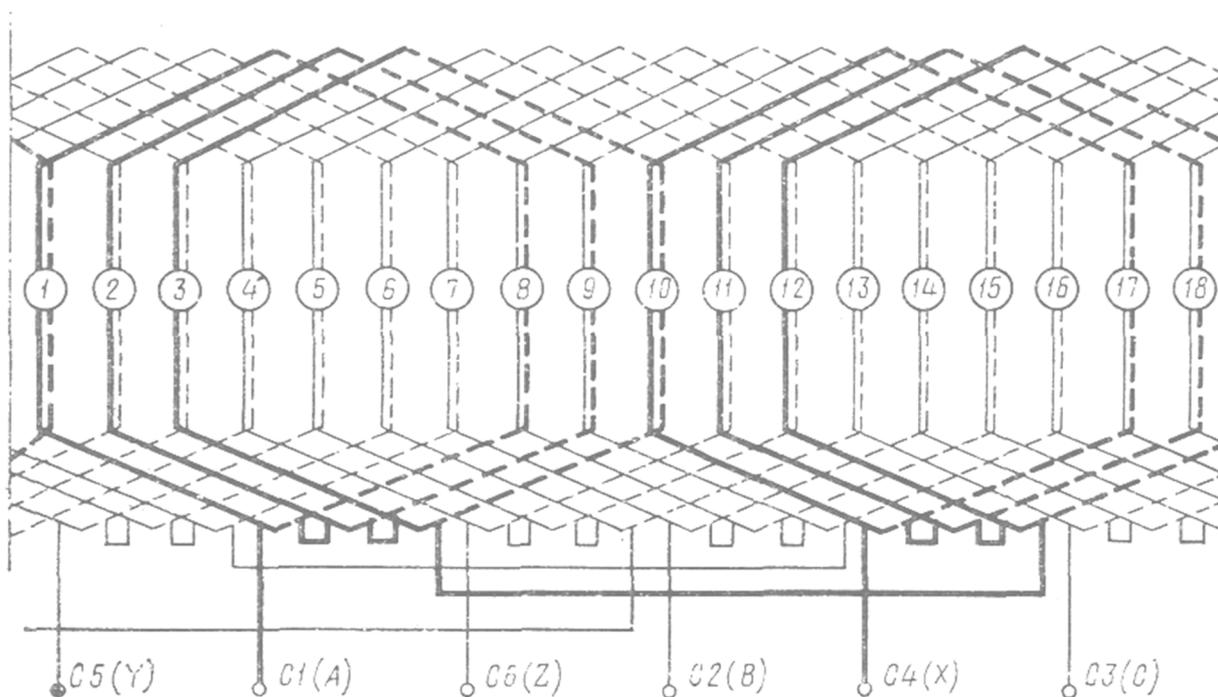


Рис. 1.23. Схема трехфазной двухслойной обмотки статора

Величина полюсного деления в зубцовых делениях и шаг обмотки определяются по следующим формулам:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = q \cdot m = 9;$$

$$y = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – число, которое можно вычесть или прибавить, чтобы получить целое число.

### Тема 1.3. ЭДС И Н.С. ОБМОТОК СТАТОРА

#### 1.3.1. ЭДС проводника, катушки, фазы.

#### ЭДС обмотки с полным и укороченным шагом.

#### Обмоточные коэффициенты.

#### Н.с. обмоток переменного тока

Вращающееся с некоторой скоростью синусоидальное магнитное поле индуцирует в каждом проводнике витка ЭДС

$$e_{np} = E_m \sin \omega t, \quad (1.1)$$

амплитуда которой

$$E_m = B_\delta \ell_\delta V = 2fB_\delta \ell_\delta \tau, \quad (1.2)$$

где  $\ell_\delta$  – расчетная активная длина статора, м;

$B_\delta = B_{m1}$  – амплитуда индукции основной гармоники поля в зазоре, Тл;

$V = \pi D_p n = 2\tau f$  – окружная скорость ротора, м/сек.

Действующее значение ЭДС проводника

$$E_{np} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f B_\delta \ell_\delta \tau. \quad (1.3)$$

Форма кривой ЭДС проводника в зависимости от времени точно совпадает с кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по окружности якоря. Чтобы приблизить вид кривой к синусоиде, нужно создать поле такой же формы, исключив наличие высших

гармонических составляющих. Для этого выполняют неравномерный воздушный зазор  $\delta' = (1,5...2)\delta$ .

В неявнополюсных машинах отношение обмоточной части ротора к его полюсному делению составляет 0,75.

Действующее значение ЭДС проводника

$$E_{np} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e_{np}^2 dt} = \ell \cdot V \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_x^2 dt}, \quad (1.4)$$

где множитель  $B = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_x^2 dt}$  – действующее значение индукции.

Обозначим отношение действующего значения и средней индукции через коэффициент формы кривой поля:

$$\kappa_e = \frac{B}{B_{cp}}. \quad (1.5)$$

Полный магнитный поток одного полюса

$$\Phi = SB_{cp} = \tau \ell B_{cp}. \quad (1.6)$$

Подставляя полученные выражения (1.4), (1.5), (1.6) в (1.3), получим значение ЭДС проводника

$$E_{np} = \tau \ell 2 f \kappa_e B_{cp} = 2 \kappa_e \Phi f. \quad (1.7)$$

Для синусоидальной кривой поля значение коэффициента

$$\kappa_e = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11. \quad (1.8)$$

Тогда, подставляя (1.8) в предыдущее выражение (1.7), получим

$$E_{np} = 2,22 \Phi f. \quad (1.9)$$

В общем случае при несинусоидальном распределении индукции в воздушном зазоре и при условии, что кривая симметрична относительно оси абсцисс и относительно оси полюса, ее можно предста-

вить в виде суммы высших гармонических составляющих для магнитного поля (рис.1.24).

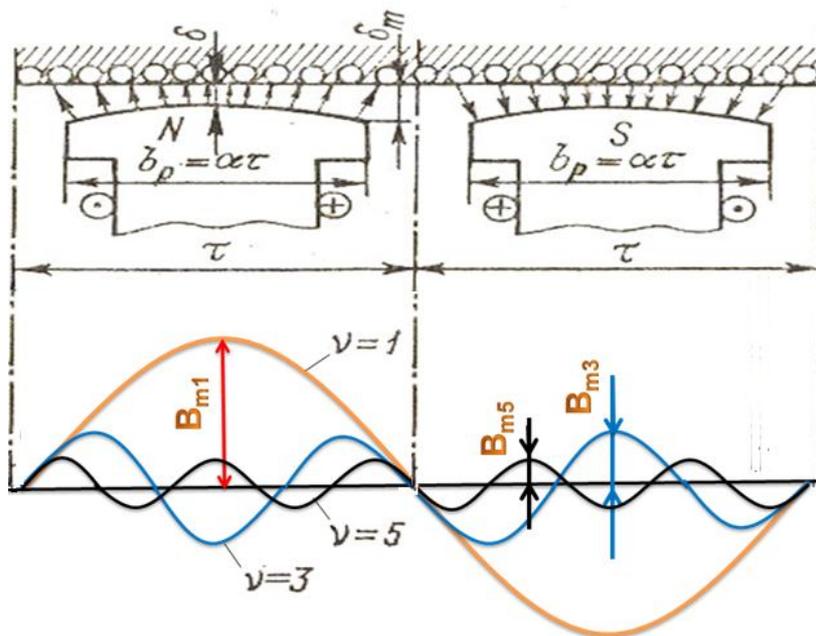


Рис. 1.24. Магнитное поле обмотки с полным шагом

Потоки и ЭДС этих гармонических составляющих можно определить по следующим выражениям для  $\nu = 3, 5$  [ $\nu = 2k \pm 1$ ]:

$$\Phi_1 = \tau \ell B_{cp1} = \frac{2}{\pi} \tau \ell B_{m1};$$

$$\Phi_3 = \tau \ell B_{cp3} = \frac{2}{\pi} \tau \ell B_{m3};$$

$$\Phi_3 = \frac{\tau}{3} \ell B_{cp3} = \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{3} \ell B_{m3};$$

$$\Phi_5 = \frac{\tau}{5} \ell B_{cp5} = \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{5} \ell B_{m5} \text{ и т.д.}$$

$$f_1 = pn; f_3 = 3pn; f_5 = 5pn \dots f_\nu = \nu pn;$$

$$E_{np1} = \sqrt{2} \tau \ell B_{m1} f_1;$$

$$E_{np3} = \sqrt{2} \frac{\tau}{3} \ell B_{m3} f_3;$$

$$E_{np5} = \sqrt{2} \frac{\tau}{5} \ell B_{m5} f_5 \text{ и т.д.}$$

С учетом вышеизложенного, действующее значение ЭДС проводника составит

$$E_{np} = \sqrt{E_{np1}^2 + E_{np3}^2 + E_{np5}^2 \dots + E_{npv}^2} .$$

Допустим, что шаг витка и катушки диаметральный. Тогда ЭДС двух активных сторон витка  $E'_{np}$  и  $E''_{np}$  имеют одинаковое значение, но сдвинуты по фазе на угол  $\pi$ , так как активные проводники витка сдвинуты в магнитном поле на такой угол. Действующее значение ЭДС витка равно геометрической разности ЭДС проводников:

$$E_B = E'_{np} + E''_{np} .$$

Группа последовательно соединенных витков, уложенная в одни и те же пазы и имеющая, помимо изоляции отдельных витков, также общую пазовую изоляцию от стенок паза, называется катушкой. Если катушка содержит  $w_k$  витков, то действующее значение ЭДС катушки:

$$E_k = w_k E_B ;$$

$$E_k = 2\sqrt{2} f w_k E_\delta \ell_\delta .$$

Если поток одного полюса при синусоидальном распределении индукции

$$\Phi = B_{cp} \ell_\delta \tau = \frac{2}{\pi} B_\delta \ell_\delta \tau ,$$

то окончательное выражение для ЭДС катушки

$$E_k = \pi \sqrt{2} f w_k \Phi = 4,44 f w_k \Phi .$$

В многополюсной машине каждая фаза обмотки содержит ряд катушечных групп, лежащих под разными полюсами и содержащих одинаковое число катушек  $q$ . И тогда ЭДС фазы, имеющей число витков  $w_\phi$ , составит

$$E_\phi = \pi \sqrt{2} f w_\phi \Phi = 4,44 f w_\phi \Phi .$$

Прежде чем рассматривать магнитные поля, создаваемые обмоткой переменного тока, необходимо сделать следующие допущения:

- 1) магнитная проницаемость стали сердечников  $\mu_c = \infty$ ;
- 2) пазы и явнополюсные полюсы отсутствуют, и воздушный зазор является равномерным;
- 3) катушечные стороны расположены в воздушном зазоре и имеют в сечении вид бесконечно тонкой ленты с шириной, равной зазору  $\delta$ ;
- 4) зазор  $\delta$  мал по сравнению с радиусом статора и полюсным делением. При этих условиях линии магнитной индукции в воздушном зазоре прямолинейны и перпендикулярны поверхностям зазора.

При этих условиях можно рассматривать н.с. обмоток. Пусть на каждом двойном полюсном делении  $2\tau$  расположено по одной катушке с витками  $W_k$  и шагом  $y = \tau$ . Эти катушки сдвинуты друг относительно друга на  $2\tau$ , принадлежат одной фазе и нагружены током  $i_k$ . При этом магнитное поле будет иметь вид, показанный на рис. 1.25.

Применим к одной из магнитных линий (пунктиром) закон полного тока:

$$\oint H dl = W_k \cdot i_k.$$

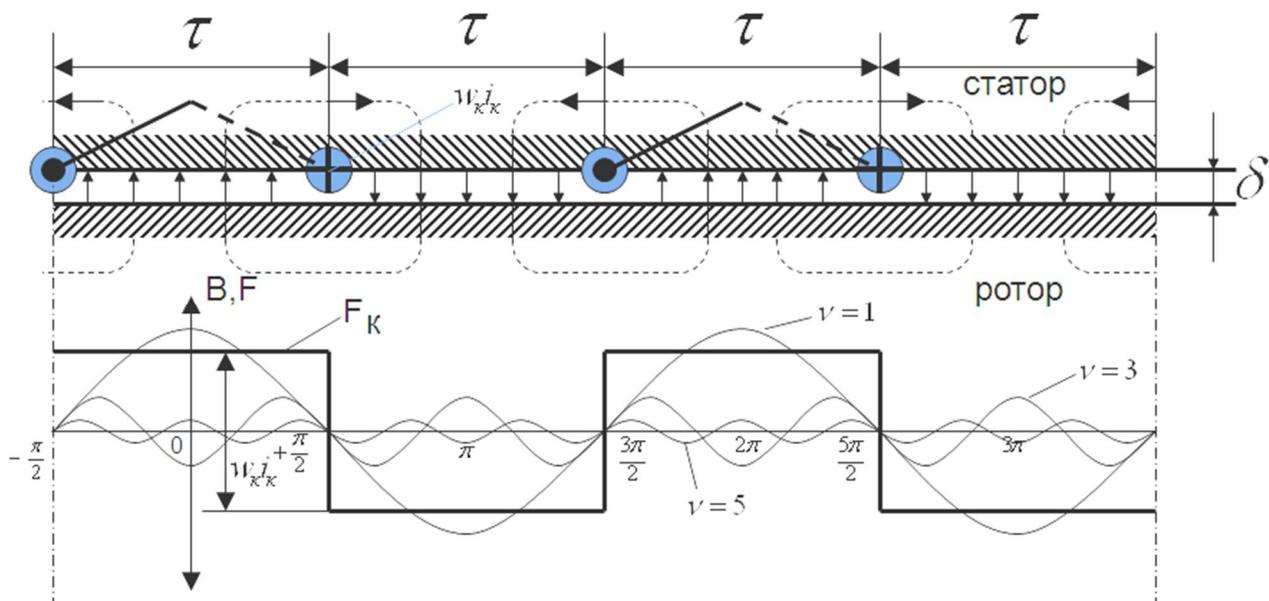


Рис. 1.25. Магнитное поле и н.с. катушек с полным шагом

Так как, согласно принятому допущению,  $\mu_c = \infty$ , в сердечниках напряженность  $H_c = 0$ , тогда закон полного тока можно записать следующим образом:

$$2H \cdot \delta = W_k \cdot i_k.$$

Полученную прямоугольную кривую н.с. можно разложить так:

$$F_{\kappa} = F_{\kappa 1} \cdot \cos \alpha + F_{\kappa 3} \cdot \cos 3\alpha + \dots + F_{\kappa \nu} \cdot \cos \nu \alpha ,$$

где  $\alpha = \pi$  , а так как ток в катушке переменный

$$i_{\kappa} = \sqrt{2} \cdot I_{\kappa} \cos \omega t ,$$

разлагая кривую в ряд Фурье, можно записать

$$F_{\kappa} = \sum_{\nu=1,3,5} F_{\kappa \nu} \cos \omega t \cos \nu \alpha .$$

Как видно, каждая гармоника изменяется как во времени  $\cos \nu \alpha$  , так и в пространстве  $\cos \omega t$  .

Намагничивающая сила однофазной обмотки, имеющей число катушек  $q$ ,

$$F_{\Phi} = \sum_{\nu=1,3,5} q F_{\kappa \nu} \cdot \cos \omega t \cos \nu \alpha .$$

Намагничивающая сила трехфазной обмотки

$$F_{3\Phi} = \sum_{\nu=6\kappa \pm 1} F_{\nu} \cos (\omega t \pm \nu \alpha ) ,$$

где гармоники:

$$\nu = 6\kappa + 1 = 1, 7, 13, 19 \dots ,$$

$$\nu = 6\kappa - 1 = 5, 11, 17 \dots .$$

### Вопросы для самопроверки

1. Сколько фаз преимущественно имеют в настоящее время машины переменного тока?
2. На каком принципе основано действие всех многофазных машин переменного тока?
3. Чем обусловлено название асинхронных и синхронных электрических машин?
4. Как называется неподвижная часть машины переменного тока?
5. Как называется подвижная часть машины переменного тока?
6. Для чего сердечники статоров и роторов асинхронных и синхронных машин набирают из листов электротехнической стали?
7. Из каких основных элементов состоят асинхронные и синхронные электрические машины?
8. Какова классификация асинхронных электрических машин по виду ротора?

9. Какова классификация синхронных электрических машин по виду ротора?
10. Чему равно полюсное деление машин переменного тока?
11. На чем основан принцип действия электрических машин переменного тока?
12. Как работает асинхронный двигатель?
13. Поясните процесс вращения магнитного поля статора электрических машин переменного тока.
14. Какие типы обмоток статора машин переменного тока вам известны?
15. От чего зависит ЭДС проводника?
16. Чему равен коэффициент формы кривой поля синхронных машин?
17. Для чего выполняют неравномерный воздушный зазор в синхронных машинах?

## **Раздел 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

### **Тема 2.1. КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН**

#### **2.1.1. Назначение, области применения, устройство и принцип действия асинхронных машин**

В настоящее время асинхронные машины используются в основном в режиме двигателя [1, 2, 3]. 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 – 1,5 кВт – 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.

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. Мало-мощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Такой широкий спектр применения асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надёжность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота обслуживания. Как было указано выше, по своему устройству ротора, эти электрические машины бывают с короткозамкнутым и фазным ротором. На рис. 2.1 представлены различные виды асинхронных машин и их основные узлы.

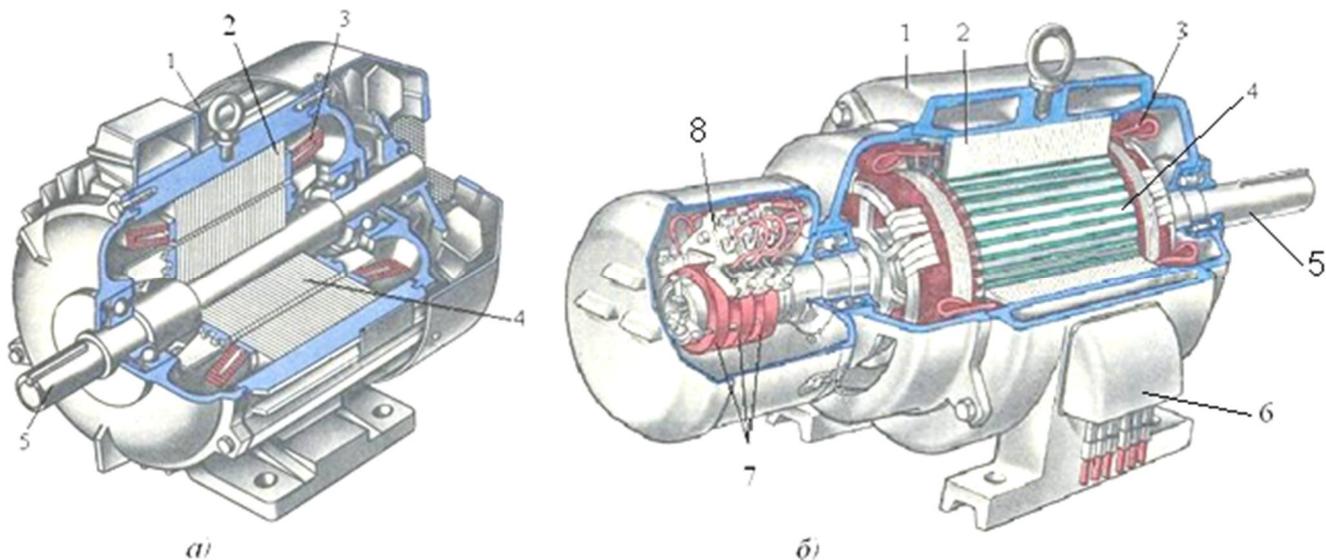


Рис. 2.1. Общий вид асинхронных электрических машин:

*а* – с короткозамкнутым ротором; *б* – с фазным ротором;  
 1 – корпус; 2 – пакет статора; 3 – обмотка статора; 4 – ротор;  
 5 – вал; 6 – коробка выводов; 7 – медные кольца;  
 8 – щеткодержатель

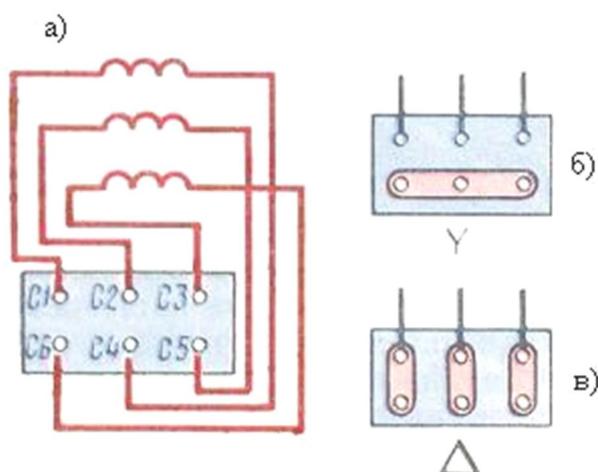


Рис. 2.2. Схема (а) вывода концов фаз обмотки статора и способы соединения их в  $Y$  (б) и  $\Delta$  (в)

Применение асинхронных машин в качестве генератора нецелесообразно, в основном, из экономических соображений. Это связано с тем, что асинхронные машины потребляют реактивный ток. И, к примеру, если две асинхронные машины одинаковой мощности работают как генераторы, то мы должны иметь еще одну машину такой же мощности, чтобы она вырабатывала реактивный ток и отдавала его в эту же сеть.

Обмотки статора могут быть соединены как звездой  $Y$ , так и треугольником  $\Delta$ . И поэтому, чтобы была возможность соединять обмотку указанными способами, в коробку выводов выводятся все шесть концов фаз обмотки статора  $C1, C2, C3, C4, C5, C6$ . Это показано на рис. 2.2.

Принцип работы асинхронного двигателя основан на взаимодействии основного магнитного поля и проводника с током, находящегося в этом поле.

При вращении магнитного поля, образованного трехфазной обмоткой статора, как было отмечено выше, в проводниках обмотки ротора образуется ЭДС. Если это короткозамкнутый ротор, то в проводниках возникает ток.

В результате на проводник с током, находящийся в электромагнитном поле, действует сила. Так как такой проводник находится в пазу поверхности ротора и отстоит от центра на расстояние радиуса  $R$  ротора, образуется момент  $M$ , который начинает вращать ротор. Это можно проиллюстрировать рис. 2.3.

Для примера взят один проводник ротора. Магнитное поле вращается с частотой  $n_1$  относительно неподвижного ротора. По правилу правой руки ток в проводнике течет к нам (изображено точкой). Применяя правило левой руки, видим, что сила  $F$  направлена вправо. Произведение силы на плечо образует момент  $M = F \cdot R$ , в результате чего ротор начинает вращаться с частотой  $n$ . Это справедливо тогда, когда проводник перемещается перпендикулярно относительно магнитных силовых линий. Но так как проводники фазы ротора распределены по пазам, на них действуют различные по величине силы. Поэтому в дальнейшем это будет учтено.

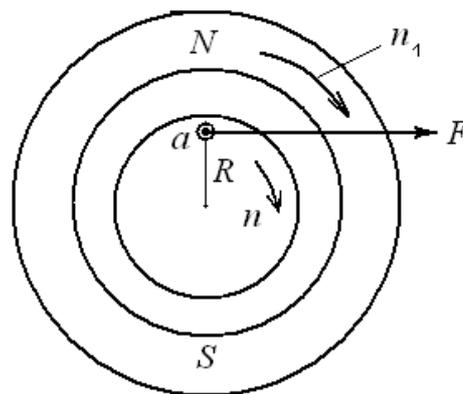


Рис. 2.3. Действие силы на проводник с током

### 2.1.2. Трехфазная асинхронная машина при неподвижном роторе.

#### Холостой ход, короткое замыкание и работа машины при включении нагрузки

При неподвижном роторе асинхронная машина представляет собой трансформатор. Отличается от трансформатора распределенной обмоткой на статоре и роторе, наличием зазора и т.д. Поэтому целесообразно начать изучение асинхронных машин, так же как и трансформаторов, с рассмотрения предельных режимов работы машины – холостого хода и короткого замыкания [2]. Затем следует распространить представление об асинхронной машине с вращающимся ротором. Схема для изучения двигателя с контактными кольцами и реостатом представлена на рис. 2.4.

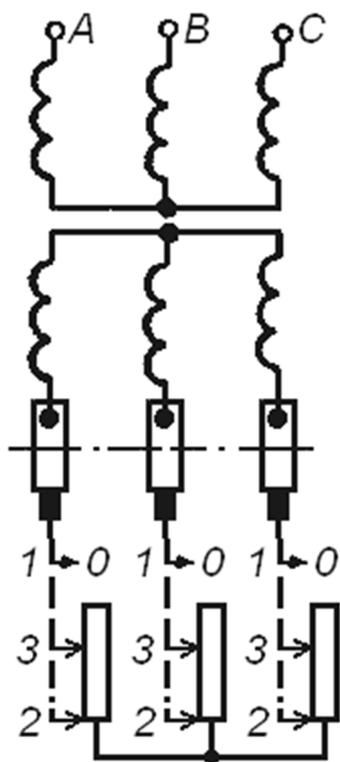


Рис. 2.4. Схема двигателя с контактными кольцами и реостатом

Предположим, что ротор асинхронной машины разомкнут (реостат в положении 1) и неподвижен, а статор включен в сеть с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$ . В этом случае асинхронная машина представляет трансформатор при холостом ходе.

Первичной обмоткой является обмотка статора машины, а вторичной – неподвижная обмотка ротора.

Под действием напряжения  $U_1$  по обмотке статора протекает ток холостого хода  $I_{01}$ .

Образуемая этим током н.с.  $F_1$  [1]

$$F_1 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega_1 k_{o61}}{p} I_{01}$$

создает поток

$$\Phi_1 = \frac{\mu_0}{k_\delta k_\mu \delta} \cdot \frac{2}{\pi} F_1 \tau l_\delta.$$

Эта часть потока  $\Phi_1$  (рис. 2.5) сцеплена с обмотками обеих частей машины, а другая часть  $\Phi_{\sigma 1}$  – только с обмоткой статора.

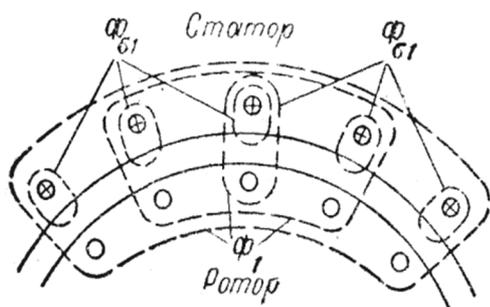


Рис. 2.5. Магнитные потоки асинхронного двигателя при холостом ходе

Первый поток  $\Phi_1$  является основным, а второй –  $\Phi_{\sigma 1}$  – потоком рассеяния. Если  $p$  – число пар полюсов машины, то частота вращения  $n_1$  составляет

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ об/сек.}$$

Основной поток при неподвижном роторе создает в обмотках статора и ротора ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , определяемые формулами:

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f_1 \omega_1 k_{o61} \Phi_1 ;$$

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f_1 \omega_2 k_{o62} k_c \Phi_1,$$

где  $k_c$  – коэффициент скоса пазов.

Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  создает в обмотке статора ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$ , причем

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_{01}x_1,$$

где  $x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

Обмотка статора имеет активное сопротивление  $r_1$ . Учитывая его действие в форме падения напряжения  $I_{01} \cdot r_1$ , можем написать уравнение напряжений первичной обмотки асинхронной машины:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{01} Z_1.$$

Одинаковым уравнениям ЭДС первичной обмотки для трансформатора и асинхронной машины соответствуют принципиально одинаковые Т-образная схема замещения и векторные диаграммы холостого хода (рис. 2.6). Порядок построения векторных диаграмм не приводится, так как это подробно было сделано в пособии [2].

В количественном отношении между диаграммами существует заметная разница. Действительно, в асинхронной машине имеет место относительно большой воздушный зазор  $\delta$ .

Поэтому ток холостого хода обычно составляет:

$I_{01} = (20 \dots 50 \%) I_n$  – в асинхронных машинах;

$I_{01} = (3 \dots 10 \%) I_n$  – в трансформаторах.

По результатам изучения этого вопроса можно сделать следующие выводы:

- ток холостого хода асинхронной машины значительно больше, чем ток холостого хода трансформатора;

- сопротивления обмоток асинхронных машин тоже относительно больше, чем в трансформаторах;

- падение напряжения в обмотке статора асинхронной машины при холостом ходе составляет **2...5 %** от номинального напряжения машины  $U_n$ , тогда как в трансформаторах оно обычно не превышает **0,1...0,4 %** от последнего.

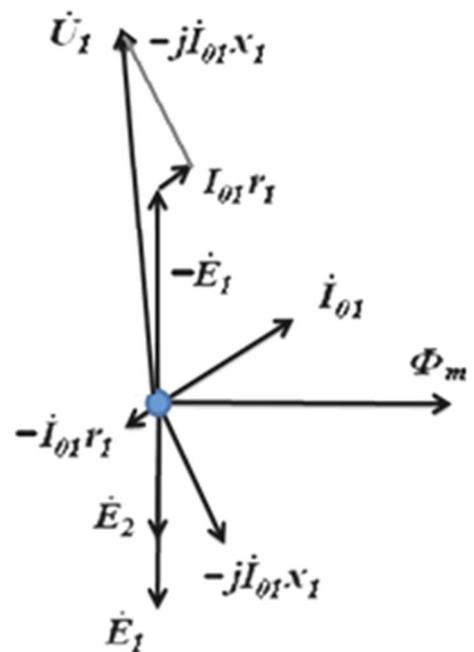


Рис. 2.6. Векторная диаграмма при холостом ходе

Коэффициент трансформации ЭДС асинхронной машины,  $k_e$ , представляющий собой отношение ЭДС  $E_1$  к  $E_2$ , составляет

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sqrt{2} \pi f_1 \omega_1 k_{об1} \Phi}{\sqrt{2} \pi f_1 \omega_2 k_{об2} k_c \Phi_1} = \frac{\omega_1 k_{об1}}{\omega_2 k_{об2} k_c}$$

В асинхронных машинах, как и в трансформаторах, вторичную обмотку приводят к первичной. При этом параметры вторичной обмотки должны быть надлежащим образом пересчитаны, чтобы сохранились реальные энергетические соотношения в машине. ЭДС приведенной вторичной обмотки  $E'_2$  составляет

$$E'_2 = k_e E_2 = E_1.$$

При разомкнутом неподвижном роторе в машине имеются потери в меди статора  $m_1 I_{01}^2 r_1$ , где  $m_1$  — число фаз статора, и потери в стали статора и ротора  $p_{c1} + p_{c2}$ . На покрытие этих потерь идет мощность  $P_{01}$ , потребляемая машиной из сети. Таким же образом приводятся остальные параметры ротора.

Теперь переместим при заторможенном роторе ( $n = 0$ ) подвижный контакт реостата в цепи ротора (см. рис. 2.3) из положения 1 в положение 2. Это будет режим **короткого замыкания** асинхронной машины. При этом, чтобы при коротком замыкании токи  $I_1$  и  $I_2$  в обмотках статора и ротора были ограничены их номинальными значениями, так же как и в трансформаторах, мы должны понизить подводимое к статору напряжение до значения  $U_k = (15 \dots 25 \%) U_H$  в асинхронных машинах. Если это сравнить с трансформаторами, то для них  $U_k = (5 \dots 17 \%) U_H$ .

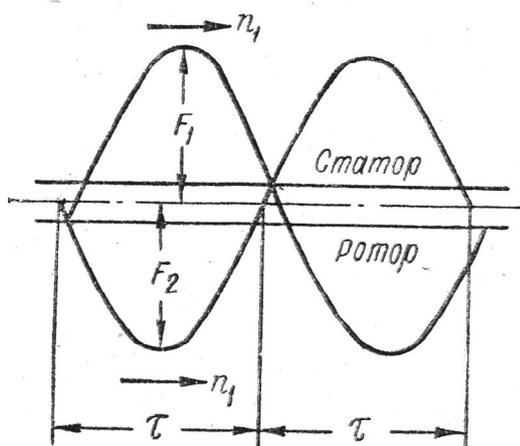


Рис. 2.7. Н.с. статора и ротора асинхронной машины при коротком замыкании

Токи  $I_1$  и  $I_2$  создают н.с. статора и ротора, из которых, согласно условию, выделим первые гармонические  $F_1$  и  $F_2$ .

Они вращаются относительно статора и ротора в одинаковом направлении с одинаковыми частотами, неподвижны относительно друг друга и направлены встречно.

Если это изобразить фрагментарно, то получим рис. 2.7.

При этом образуются результирующая н.с.  $F_k$ , вращающаяся со скоростью  $n_1$ , которая создает основной вращаю-

щийся поток  $\Phi_k$ , сцепленный с обмотками статора и ротора (рис. 2.8).

Кроме того, создаются первичный и вторичный потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$ ,  $\Phi_{\sigma 2}$ , сцепленные со своими обмотками.

Результирующая н.с.  $F_k$  при коротком замыкании относительно мала, соответственно, и поток  $\Phi_k$  мал, и, следовательно, основная магнитная цепь в этом случае не насыщена. Первичный ток  $I_1$  можно представить себе как сумму двух составляющих, из которых одна  $I_m$  создает н.с.  $F_k$ , а вторая ( $-I_2$ ) создает н.с.  $-F_2$ , компенсирующую н.с.  $F_2$  вторичного тока  $I_2$ . Таким образом, имеем:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2) \quad ;$$

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_m + (-\dot{F}_2)$$

или

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m.$$

Подставляя значения  $F_1$  и  $F_2$ , после некоторых преобразований найдем коэффициент трансформации токов

$$k_i = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}'_2} = \frac{m_1 \omega_1 k_{\sigma 61}}{m_2 \omega_2 k_{\sigma 62}}.$$

Уравнения первичных и вторичных напряжений асинхронной машины при коротком замыкании пишутся так же, как и для трансформаторов:

$$\dot{U}_{1к} = -\dot{E}_{1к} + \dot{I}_1 Z_1;$$

$$\dot{E}'_{2к} - \dot{I}'_2 Z'_2 = 0.$$

Векторная диаграмма при коротком замыкании будет иметь вид, представленный на рис. 2.9.

Переведем подвижной контакт реостата в цепи заторможенного ротора в положение 3.

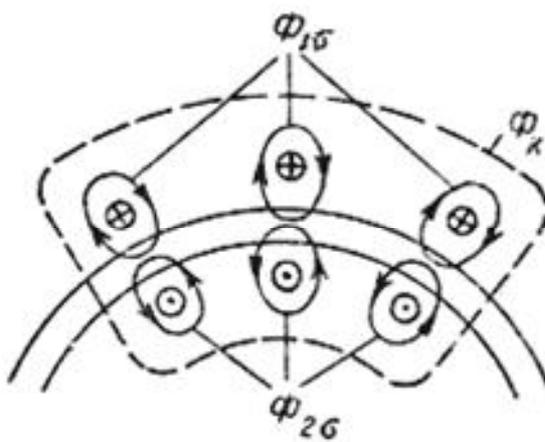


Рис. 2.8. Магнитные потоки асинхронного двигателя при коротком замыкании

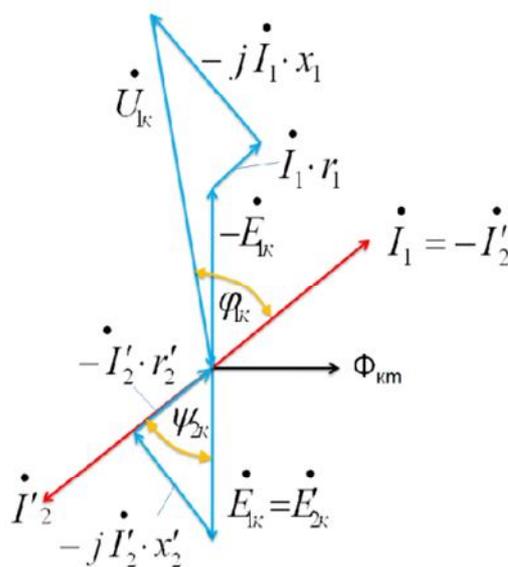


Рис. 2.9. Векторная диаграмма при коротком замыкании

В этом случае асинхронную машину можно рассматривать как трансформатор под **нагрузкой**. В общем случае нагрузка может носить смешанный характер. Физические процессы здесь абсолютноте же, что и в трансформаторах.

### 2.1.3. Уравнение токов и напряжений.

#### Т-образная схема замещения. Векторные диаграммы

Уравнение ЭДС и н.с. статора повторяет уравнение ЭДС трансформатора.

Система уравнений напряжений, токов и н.с. для заторможенной асинхронной машины будет иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{I}'_2 (Z'_2 + Z'_D) &= \dot{E}'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_m \\ \dot{F}_1 + \dot{F}_2 &= \dot{F}_m. \end{aligned}$$

С учетом вышеизложенного, а также системы уравнений и симметрии фаз можно составить Т-образную схему замещения для одной фазы (рис. 2.10).

Векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке представлена на рис. 2.11.

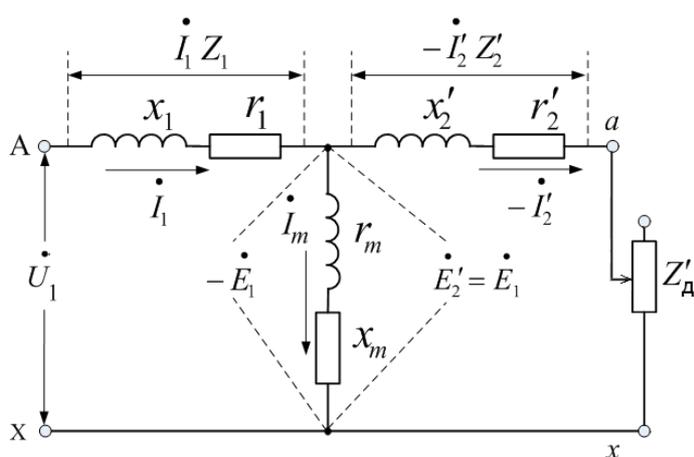


Рис. 2.10. Схема замещения асинхронной машины при заторможенном роторе без учета магнитных потерь

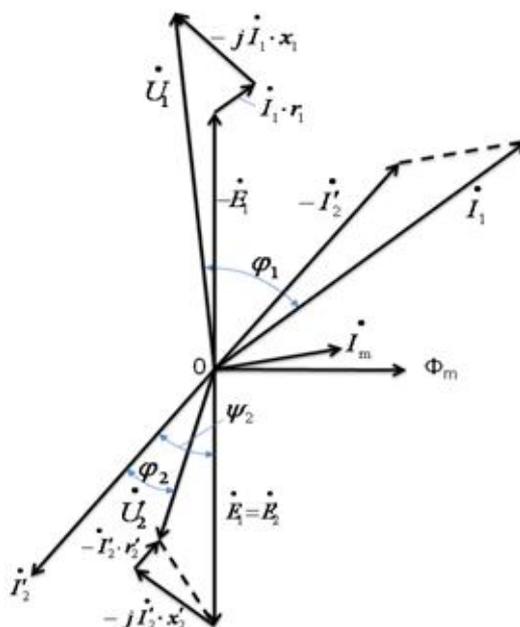


Рис. 2.11. Векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке

## Тема 2.2. ТРЕХФАЗНАЯ АСИНХРОННАЯ МАШИНА ПРИ ВРАЩАЮЩЕМСЯ РОТОРЕ

### 2.2.1. Режимы работы, схемы замещения и векторная диаграмма асинхронного двигателя

Предположим, что статор асинхронной машины включен в сеть с заданным напряжением  $U_1$  и постоянной частотой  $f_1$ , считая, что цепь ротора пока разомкнута. Переведем подвижный контакт реостата в положение 1.

Основной поток вращается с частотой  $n_1 = f_1 / p$  и создает в обмотке статора основную ЭДС  $E_1$ . При различных режимах работы машины ротор может вращаться в том же направлении, что и поле, и в обратном. В первом случае мы будем считать частоту вращения ротора положительной, во втором – отрицательной.

При вращении ротора с частотой  $n$  в магнитном поле, вращающемся с частотой  $n_1$ , все происходит так, как если бы ротор был неподвижен, а поток  $\Phi_m$  вращался относительно него с частотой

$$n_2 = n_1 - n.$$

Следовательно, частота ЭДС, индуцируемой в обмотке ротора:

$$f_2 = pn_2 = p(n_1 - n) = n_1 p \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 s,$$

где  $f_1$  – частота питающей сети и  $s$  – скольжение.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

Таким образом, при заданной частоте, ЭДС в роторе изменяется прямо пропорционально скольжению

$$E_{2s} \equiv s E_2.$$

Согласно общему выражению для ЭДС ротора, имеем:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \omega_2 k_{o\delta 2} \Phi_m = 4,44 f_1 s \omega_2 k_{o\delta 2} \Phi_m = E_2 s$$

или, если обмотка ротора приведена к обмотке статора,

$$E'_{2s} = E'_2 s,$$

т.е. при заданном основном потоке  $\Phi_m$  ЭДС, индуцируемая в роторе при его вращении, равна ЭДС  $E_2$  при неподвижном роторе, умноженной на скольжение  $s$ .

Замкнем ротор на некоторое добавочное сопротивление, для чего переведем подвижный контакт реостата, включенного в цепь ротора, из положения 1 в положение 3.

Условимся считать это сопротивление активным, так как это ближе всего соответствует эксплуатационным условиям работы асинхронной машины с контактными кольцами.

Тогда активное сопротивление цепи ротора составит

$$R_2 = r_2 + r_d = \text{const},$$

где  $r_2$  — активное сопротивление обмотки ротора;

$r_d$  — добавочное сопротивление, включенное в цепь ротора через контактные кольца.

Индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора

$$x_2 = 2\pi f_1 L_{\sigma 2},$$

где  $L_{\sigma 2}$  — индуктивность обмотки ротора. Так как потоки рассеяния проходят главным образом по воздуху,  $L_{\sigma 2} \approx \text{const}$ . Индуктивное сопротивление при вращении ротора  $x_{2s} = x_2 s$  или при приведении к обмотке статора  $x'_{2s} = x'_2 s$ .

Если цепь ротора, имеющая сопротивление  $r_2$ , замкнута, то по ней протекает ток  $I_2$ , создающий поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 2}$  (рис. 2.12).

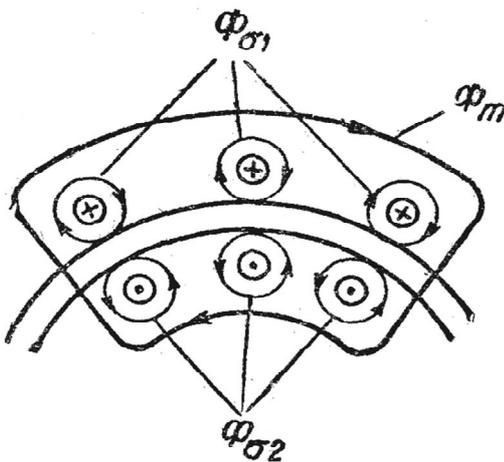


Рис. 2.12. Магнитные потоки асинхронного двигателя при вращающемся роторе

Соответственно, в обмотке ротора существуют ЭДС  $E_{2s} = E_2 s$ , создаваемая основным потоком  $\Phi_m$ , и ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j I_2 x_{2s} = -j I_2 x_2 s.$$

Тогда по второму закону Кирхгофа имеем:

$$\dot{E}_{2s} + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{E}_{2s} - j I_2 x_2 s,$$

или

$$\dot{E}_{2s} = I_2 Z_{2s},$$

где  $Z_{2s} = r_2 + j x_2 s$  — полное сопротивление реального ротора.

Следовательно,

$$I_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_2 s}{r_2 + j x_2 s},$$

$$I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}}.$$

В ряде случаев удобнее иметь дело не с действительной асинхронной машиной, представляющей собой систему двух (или нескольких) электромагнитно связанных контуров, а схему замещения, аналогичную схеме замещения трансформатора.

Выражение

$$i_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{\dot{E}_2 s}{r_2 + jx_2 s}$$

может быть преобразовано следующим образом:

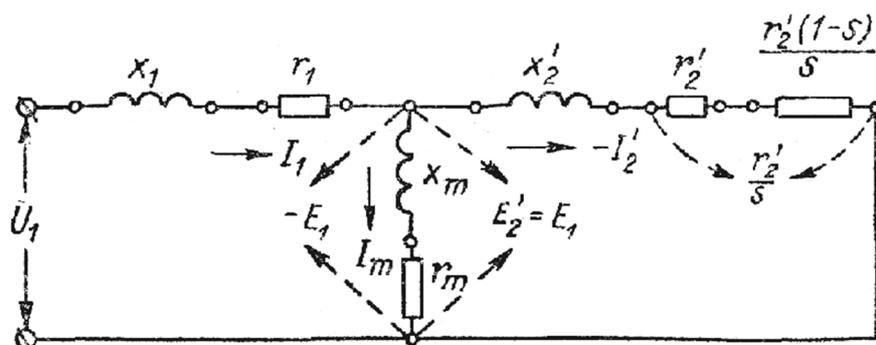
$$i_2 = \frac{\dot{E}_2 s}{r_2 + jx_2 s} = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2}$$

Новое выражение для  $I_2$  имеет новый физический смысл, который может быть сформулирован следующим образом.

Во вторичной цепи теперь вместо ЭДС  $E_{2s}$  при вращении ротора с частотой  $f_1 s$  будет существовать ЭДС  $E_2$  при неподвижном роторе с частотой  $f_1$ . Таким образом, вводится новое сопротивление

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + r_2 \frac{1-s}{s}$$

С учетом этого возможно составить следующие T-образные схемы замещения (рис. 2.13).



или

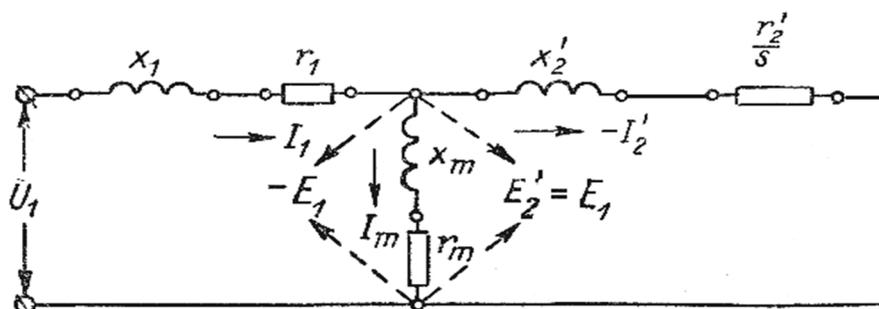


Рис. 2.13. T-образные схемы замещения асинхронной машины при вращающемся роторе

Ток намагничивающей цепи схемы замещения равен геометрической сумме токов  $I_1$  и  $I'_2$

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

и поэтому

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = \dot{I}_m (r_m + jx_m) = \dot{I}_m Z_m.$$

В отличие от трансформатора, асинхронный двигатель, являясь приемником энергии, должен рассматриваться при неизменном напряжении на зажимах, т.е. при  $U_1 = \text{const}$ . При Т-образной схеме замещения этого не происходит.

Поэтому заменяют Т-образную схему замещения Г-образной схемой замещения (рис. 2.14).

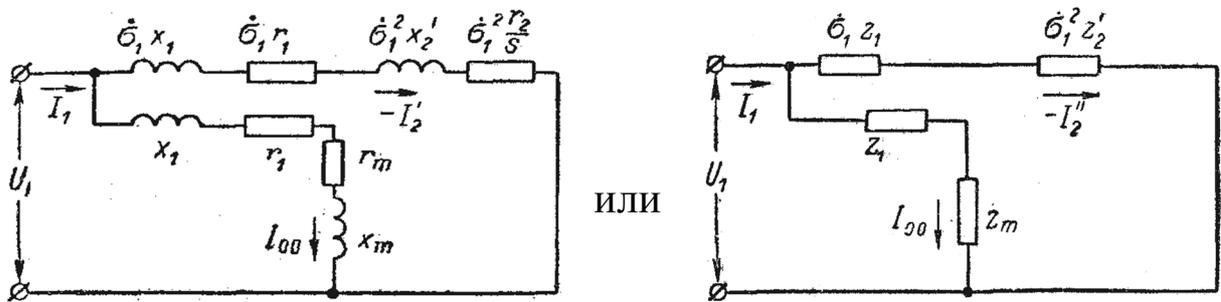


Рис. 2.14. Г-образные схемы замещения асинхронной машины при вращающемся роторе

При изучении процессов, происходящих в асинхронной машине, эта схема имеет существенные преимущества по сравнению с Т-образной. В этих схемах намагничивающий контур представляет собой звено, находящееся между первичной и вторичной стороной, и дает возможность изучать явления при изменении направления потока энергии.

При Г-образной схеме при  $U_1 = \text{const}$  ток  $I_{00}$  в ответвленном контуре при изменении скольжения  $S$  остается постоянным, а изменяется лишь ток в главной цепи.

Генераторный и тормозной режимы в асинхронной машине изучаются также при постоянном напряжении на зажимах  $U_1 = \text{const}$ , поэтому и для этих режимов работы Г-образная схема представляет те же преимущества, что и для двигательного режима.

Поправочный коэффициент  $\dot{\sigma}_1$  изменяет основные параметры главной и намагничивающей цепей и токи по величине и фазовым углам, но он не зависит от скольжения.

$$\dot{\sigma}_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} \approx \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right) - j \frac{r_1}{x_m} = \sigma_1 - j \frac{r_1}{x_m},$$

где

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m}.$$

Векторные диаграммы асинхронной машины, подобно трансформатору, составляются согласно Т-образной схеме замещения машины, которая соответствует физическим условиям работы машины.

При этом диаграммы чертятся на одну фазу машины с обмоткой ротора, приведенной к обмотке статора.

Режим двигателя является основным режимом работы асинхронной машины. В режиме двигателя энергия передается через магнитное поле с первичной стороны на вторичную, как и в трансформаторе. Поэтому векторная диаграмма двигательного режима асинхронной машины вполне аналогична векторной диаграмме трансформатора (рис. 2.15).

Основной поток  $\Phi_m$  индуцирует ЭДС  $E_1 = E_2$ , равные напряжению на зажимах намагничивающего контура Т-образной схемы.

Ток намагничивающего контура  $I_m$  опережает  $\Phi_m$  на угол, соответствующий потерям в стали статора, так как потери в стали ротора малы при небольших скольжениях, имеющих место в нормальных рабочих режимах ( $S = 0 \dots 0,05$ ) и угол также мал.

Ток  $I_2'$  отстает от ЭДС  $E_2'$  на угол  $\psi_2$  и величина и фаза его определяются сопротивлением вторичной цепи  $Z_2'$ .

Первичный ток  $I_1$  равен геометрической сумме тока  $I_m$  и нагрузочной составляющей первичного тока

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

ЭДС вторичной обмотки идет на падения напряжения в активном  $-\dot{I}_2' \frac{r_2'}{s}$  и индуктивном  $-j \dot{I}_2' x_2'$  сопротивлениях.

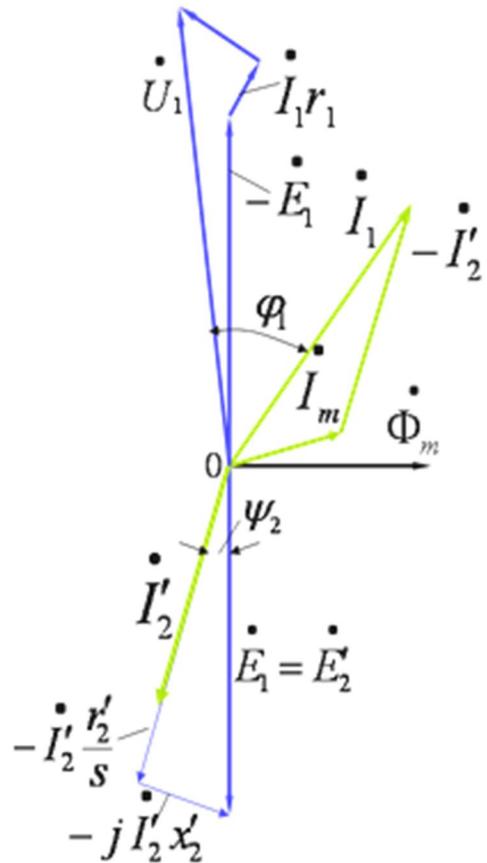


Рис. 2.15. Векторная диаграмма при вращающемся роторе

Первичное напряжение  $U_1$  равно сумме составляющих, уравнивающей ЭДС  $\dot{E}_1$  и падения напряжений  $j \dot{I}_1 x_1$  и  $\dot{I}_1 r_1$ .

Ток  $\dot{I}_1$  отстает от напряжения  $U_1$  на угол  $\varphi_1 \leq \frac{\pi}{2}$ . Мощность при этом

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

### 2.2.2. Энергетические диаграммы асинхронных машин

Преобразование энергии из одного вида в другой неизбежно связано с потерями в различных частях машины [2]. Рассмотрим энергетические диаграммы асинхронной машины (рис. 2.16). Обозначим

$P_1$  — потребляемая мощность;

$P_2$  — полезная мощность.

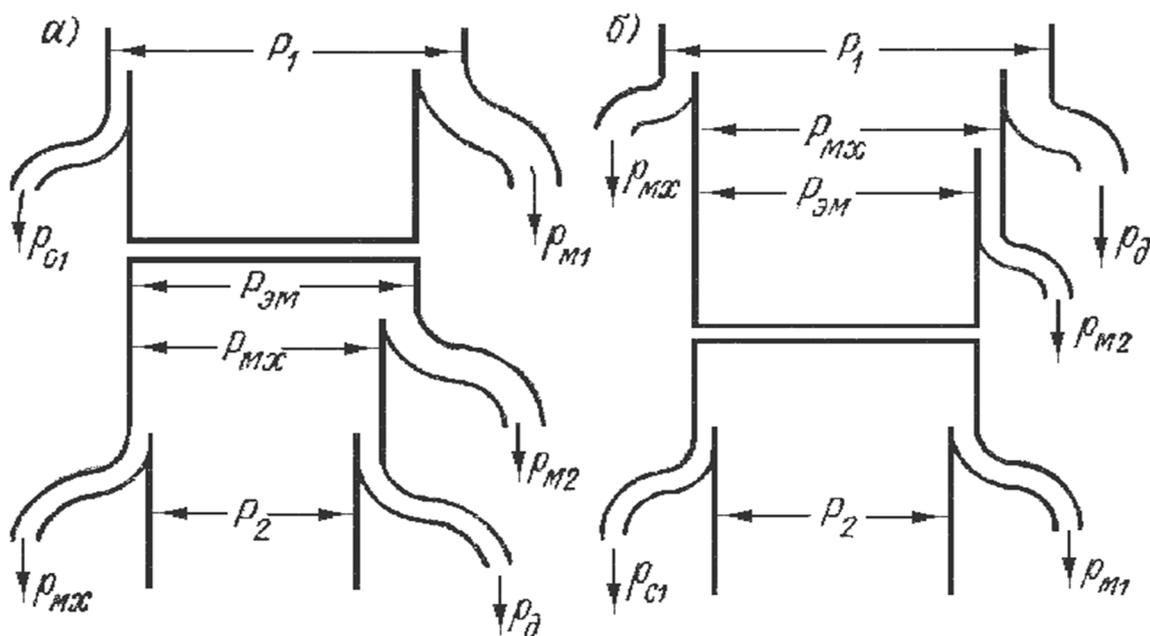


Рис. 2.16. Энергетические диаграммы асинхронного двигателя (а) и генератора (б)

На рисунке показаны следующие обозначения:

$P_{эм}$  — электромагнитная мощность;

$P_{мх}$  — механическая мощность;

$p_{m1}, p_{m2}$  — потери в меди статора и ротора;

$p_{c1}$  — потери в стали статора;

$p_{мх}$  — механические потери;

$p_{д}$  — добавочные потери.

Для двигателя справедливы следующие соотношения:

– потребляемая электрическая мощность

$$P_1 = P_{\text{эм}} + p_{\text{м1}} + p_{\text{с}};$$

– электромагнитная мощность, развиваемая двигателем

$$P_{\text{эм}} = P_1 - p_{\text{м1}} - p_{\text{с}}.$$

– полная механическая мощность

$$P_2 = P_{\text{мх}} - p_{\text{мх}} - p_{\text{д}}.$$

– полезная механическая мощность

$$P_{\text{мх}} = P_{\text{эм}} - p_{\text{м2}}.$$

Для генератора справедливы следующие соотношения

$$P_{\text{мх}} = P_1 - p_{\text{мх}} - p_{\text{д}};$$

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{мх}} - p_{\text{м2}};$$

$$P_2 = P_{\text{эм}} - p_{\text{м1}} - p_{\text{с}}.$$

Коэффициент полезного действия

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

### 2.2.3. Электромагнитный момент асинхронной машины

Так же как в двигателях постоянного тока, асинхронный двигатель при установившемся режиме работы ( $n = \text{const}$ ) преодолевает нагрузочный момент  $M_{\text{нг}}$ , состоящий из тормозного момента при холостом ходе  $M_0$  и полезного тормозного момента  $M_2$ .

Следовательно, электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$ , развиваемый на роторе двигателя, при постоянной частоте вращения имеет две составляющие, каждая из которых находится в равновесии с соответствующей составляющей тормозного момента. Таким образом,

$$M_{\text{эм}} = M_0 + M_2.$$

Каждое из слагаемых равно

$$M_0 = \frac{p_{\text{мх}} + p_{\text{д}}}{\Omega} = \frac{p_{\text{мх}} + p_{\text{д}}}{2\pi n},$$

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n},$$

где  $P_2$  – полезно отдаваемая двигателем механическая мощность, а  $n$  – частота вращения ротора двигателя.

Учитывая это, имеем

$$M_{эм} = \frac{P_{мх} + P_{д}}{2\pi n} + \frac{P_{мх} - P_{мх} - P_{д}}{2\pi n} = \frac{P_{мх}}{\Omega},$$

где  $P_{мх} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \frac{1-s}{s}$  – механическая мощность на роторе.

Угловая частота вращения может быть записана следующим образом:

$$\Omega = 2\pi n = 2\pi(1-s)n_1 = 2\pi(1-s) \frac{f_1}{p} = (1-s) \frac{\omega_1}{p}.$$

Тогда электромагнитный момент

$$M_{эм} = \frac{p m_1}{\omega_1} \cdot I_2'^2 \frac{r_2'}{s}.$$

Согласно Г-образной схеме замещения (см. рис. 2.14),

$$I_2' = \frac{\sigma_1 \cdot U_1}{\sqrt{(\sigma_1 r + \sigma_1^2 \frac{r_2'}{s})^2 + (\sigma_1 x + \sigma_1^2 x_2')^2}}.$$

В результате имеем

$$M_{эм} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \cdot [(r_1 + \sigma_1 \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2]}, \text{ Н/м.}$$

Вывод: Электромагнитный момент при любом скольжении  $S$  пропорционален квадрату напряжения  $U_1^2$ , ион тем меньше, чем больше  $r_2$ .

Анализируя данное выражение при  $U_1 = \text{const}$  изменяя  $S$ , возможно построить зависимость  $M = f(S)$ .

#### 2.2.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Важной характеристикой для асинхронного двигателя является зависимость  $M = f(S)$ . Она представлена на рис. 2.17.

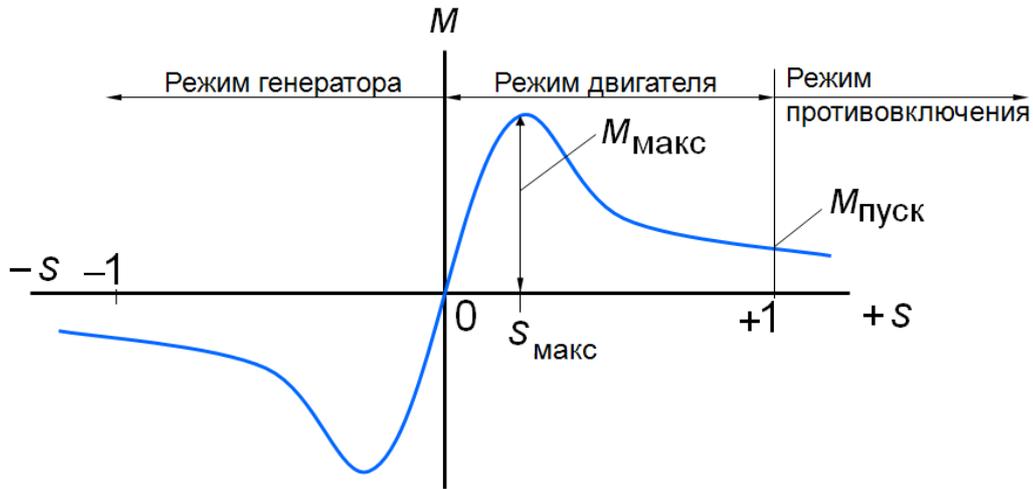


Рис. 2.17. Зависимость момента  $M$  асинхронной машины от скольжения  $S$  при различных режимах работы

Как видно из графика, в режиме двигателя скольжение находится в пределах  $0 < S < 1$ , в режиме генератора  $-0 < S < -1$ , а в режиме противовключения  $-1 < S < \infty$ .

Если рассматривать машину при постоянных параметрах  $r_1, r_2', x_1, x_2'$  и исследовать зависимость  $M=f(S)$  при  $U_1=\text{const}$ ,  $f_2=\text{const}$  на максимум и минимум, то получим критическое значение **скольжения**

$$S_{\text{макс}} = \pm \frac{\sigma_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}},$$

при котором

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{p m_1 \cdot U_1^2}{4\pi f_1 \sigma_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}]}$$

В обычных машинах  $r_1$  мало, поэтому принимая  $r_1=0$ , получим

$$S_{\text{макс}} = \pm \frac{\sigma_1 r_2'}{(x_1 + \sigma_1 x_2')};$$

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{p m_1 \cdot U_1^2}{2\omega_1 \sigma_1 (x_1 + \sigma_1 x_2')}.$$

Отношение моментов

$$k_m = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n} = 1,7 \dots 3,0$$

называется кратностью пускового момента.

При постоянных параметрах возможно получить выражение, называемое формулой Клосса, удобное для некоторых практических расчетов:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{\max}} + \frac{S_{\max}}{S}}$$

Электромагнитный момент, соответствующий скольжению  $S=1$ , называется пусковым моментом и составляет

$$M_{\Pi} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot r'_2}{\omega_1 \cdot [(r_1 + \sigma_1 r'_2)^2 + (x_1 + \sigma_1 x'_2)^2]}, \text{ Н/м.}$$

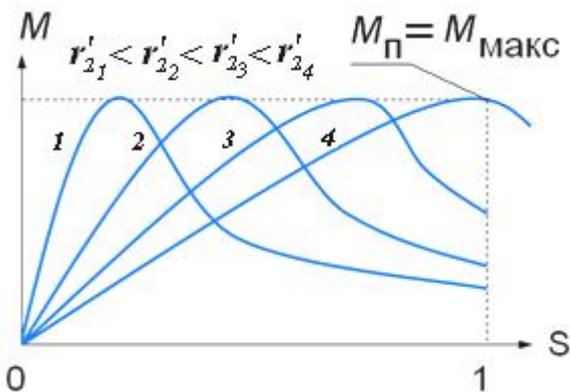


Рис. 2.18. Изменение характеристики момента в зависимости от  $r'_2$

Анализируя это выражение относительно  $r'_2$ , можно увидеть, что максимум момента смещается, не изменяясь по величине. Это дает возможность подобрать такое сопротивление в цепи ротора (рис. 2.18), что пусковой момент станет равным максимальному. Изменяя также  $r'_2$ , можно осуществлять регулирование частоты вращения ротора двигателя.

Зависимость частоты вращения  $n$  ротора от развиваемого момента  $M_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$   $n = f(M_2)$  или, наоборот,  $M_2 = f(n)$ , называется **механической характеристикой**.

Так как  $M_2 = M_{\text{эм}} - M_0$ , а момент  $M_0$  включают в статический момент  $M_{\text{ст}}$  как постоянный, принимают  $M_2 = M_{\text{эм}}$ . И тогда механическую характеристику (рис. 2.19) записывают как  $M_{\text{эм}} = f(n)$ .

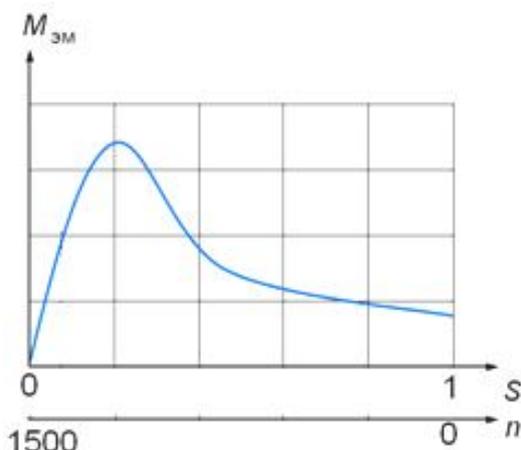


Рис. 2.19. Механическая характеристика асинхронного двигателя  $M_{\text{эм}} = f(n)$

### 2.2.5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики [2] асинхронного двигателя представляют собой зависимости  $n, M, \eta, I_1, P_1, S, \cos \varphi = f(P_2)$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ . На рис. 2.20 представлены рабочие характеристики асинхронного двигателя. Анализ этих характеристик позволяет отметить характерные особенности двигателя при изменении нагрузки на валу. Если обратить внимание на характеристики при холостом ходе, т.е. при  $P_2 = 0$ , то видно, что только  $M$  и  $\eta$  равны нулю. Ток  $I_1$  достаточно велик по сравнению с током холостого хода трансформатора. Частота вращения ротора  $n$  при увеличении нагрузки падает. Параметры  $M, I_1, P_1, S, \cos \varphi$  увеличиваются. КПД  $\eta$  сначала увеличивается, а с ростом нагрузки падает. Максимум  $\eta$  наблюдается при равенстве постоянных и переменных потерь в двигателе.

Кроме того, к важным показателям относится коэффициент перегрузочной способности.

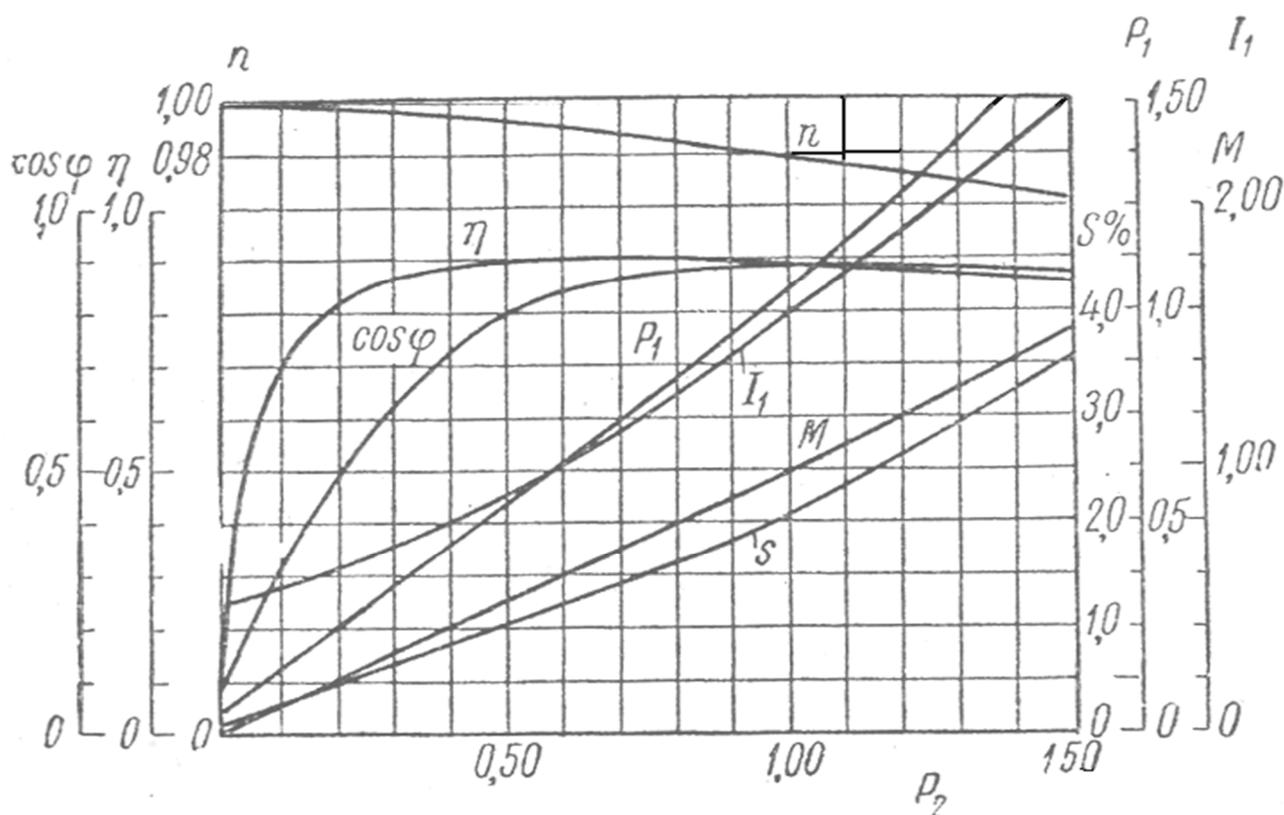


Рис. 2.20. Пример рабочих характеристик асинхронного двигателя

## Тема 2.3. ПУСК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### 2.3.1. Требования, предъявляемые к пуску, способы пуска асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором

Прежде чем рассматривать возможные способы пуска в ход асинхронных двигателей, необходимо учесть следующие основные требования:

1) двигатель должен развивать при пуске достаточно большой пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу;

2) величина пускового тока должна быть ограничена, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети;

3) схема пуска должна быть по возможности простой и иметь малую стоимость.

При пуске асинхронного двигателя на холостом ходу в активном сопротивлении его вторичной цепи выделяется тепловая энергия, которая при пуске под нагрузкой значительно увеличивается.

Выделение энергии в первичной цепи обычно несколько больше, чем во вторичной. При частых пусках, а также при весьма тяжелых условиях пуска возникает опасность перегрева обмоток двигателя. Число пусков асинхронного двигателя в час, допустимое по условиям его

нагрева, тем больше, чем меньше номинальная мощность двигателя и чем меньше соединенные с его валом маховые массы. Двигатели мощностью 3...10 кВт в обычных условиях допускают до 5-10 включений в час.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проще по устройству и обслуживанию, а также дешевле и надежнее в работе, чем двигатели с фазным ротором. Поэтому по возможности применяются двигатели с короткозамкнутым ротором.

Наиболее простым способом пуска двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки его статора непосредственно в сеть на номинальное напряжение обмотки статора (рис. 2.21). Такой пуск называется прямым.

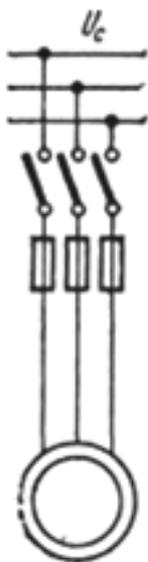


Рис. 2.21. Прямой пуск двигателя с короткозамкнутым ротором

Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются с таким расчетом, чтобы они по условиям нагрева обмоток допускали прямой пуск. Поэтому прямой пуск всегда возможен, так как современные энергетические системы имеют достаточные мощности. Таким образом, осуществляется пуск двигателей мощностью в тысячи киловатт.

Если по условиям падения напряжения в сети прямой пуск двигателя с короткозамкнутым ротором невозможен, применяются различные способы пуска двигателя при пониженном напряжении (рис. 2.22. *а, б, в*). Однако при этом пропорционально квадрату напряжения на зажимах обмотки статора или квадрату пускового тока двигателя понижается также пусковой момент, что является недостатком пуска при пониженном напряжении. Поэтому эти способы пуска применимы, когда возможен пуск двигателя на холостом ходу или под неполной нагрузкой. Необходимость пуска при пониженном напряжении встречается чаще всего у мощных высоковольтных двигателей.

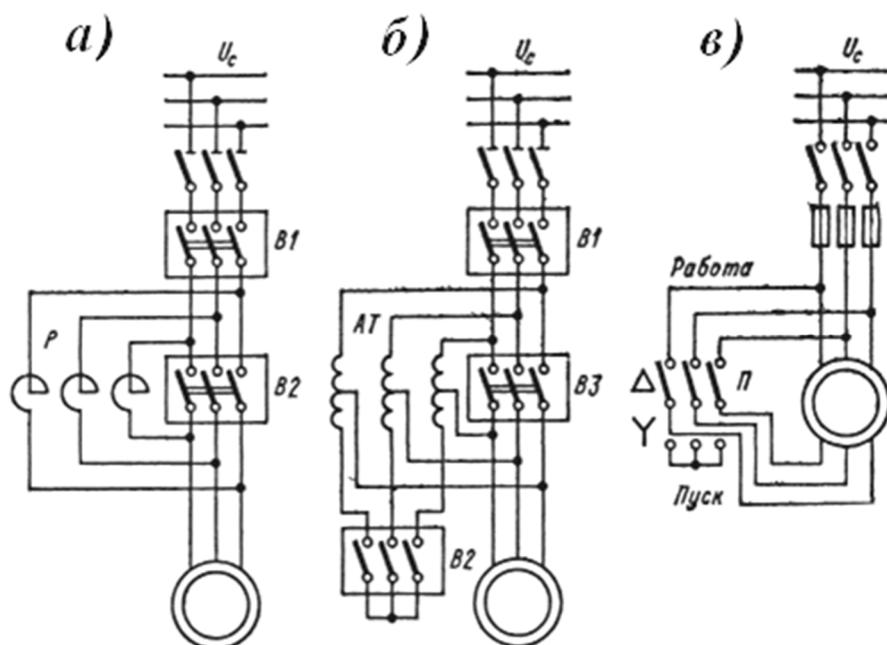


Рис. 2.22. Схемы способов пуска двигателей с короткозамкнутым ротором:  
*а* – реакторный; *б* – автотрансформаторный;  
*в* – с переключением со звезды на треугольник

**Реакторный пуск** осуществляется согласно схеме рис. 2.21, *а*. Сначала включается выключатель *В1*, и двигатель получает питание через трехфазный реактор (реактивную или индуктивную катушку) *Р*, сопротивление которого  $x_p$  ограничивает величину пускового тока. По достижении определенной частоты вращения включается выключо-

чатель  $B2$ , который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается номинальное напряжение.

Пусковые реакторы строятся обычно с ферромагнитным сердечником и рассчитываются по нагреву только на кратковременную работу, что позволяет снизить их вес и стоимость. Для весьма мощных двигателей применяются также реакторы без ферромагнитного сердечника, с обмотками, укрепленными на бетонном каркасе. Выключатель  $B1$  выбирается на такую отключающую мощность, которая позволяет отключить двигатель при глухом коротком замыкании за выключателем, а выключатель  $B2$  может иметь низкую отключающую мощность.

Если составляющие сопротивления короткого замыкания двигателя равны  $r_k$  и  $x_k$ , то начальный пусковой ток при прямом пуске

$$I_{п.п} = \frac{U_n}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}},$$

а при реакторном пуске при пренебрежении активным сопротивлением реактора

$$I_{п.р} = \frac{U_n}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}.$$

Начальный пусковой момент при реакторном пуске  $M_{п.р.}$  уменьшается по сравнению с моментом при прямом пуске  $M_{п.п.}$  в данное количество раз

$$\frac{M_{п.п}}{M_{п.р}} = \frac{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}{r_k^2 + x_k^2}.$$

Автотрансформаторный пуск осуществляется по схеме рис. 2.21, б в следующем порядке. Сначала включаются выключатели  $B1$  и  $B2$ , и на двигатель через автотрансформатор  $AT$  подается пониженное напряжение. После достижения двигателем определенной частоты вращения, выключатель  $B2$  отключается, и двигатель получает напряжение через часть обмотки автотрансформатора  $AT$ , который в данный момент работает как реактор. Затем включается выключатель  $B3$  и на двигатель подается номинальное напряжение. Автотрансформатор рассчитывается на кратковременную работу. Выключатели должны быть подобраны на соответствующую мощность. Автотрансформаторный пуск несколько сложнее и дороже реакторного и применяется реже, при более тяжелых условиях пуска.

Пуск переключением «звезда – треугольник» (рис. 2.21, в) применяется в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает с соединением обмотки статора в треугольник.

При таком способе пуска по сравнению с прямым пуском при соединении обмотки в треугольник напряжение фаз обмотки уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, пусковой момент уменьшается в  $(\sqrt{3})^2=3$  раза, пусковой ток в фазах обмотки уменьшается в  $\sqrt{3}$  раза, а в сети – в  $(\sqrt{3})^2=3$  раза.

Недостатком этого пуска является то, что при переключениях цепь двигателя разрывается и возникают коммутационные перенапряжения. Этот способ в настоящее время используется редко.

Пуск двигателя с фазным ротором осуществляется с помощью пускового реостата. Двигатели с фазным ротором применяются значительно реже двигателей с короткозамкнутым ротором. Они используются в следующих случаях: 1) когда двигатели с короткозамкнутым ротором неприемлемы при регулировании

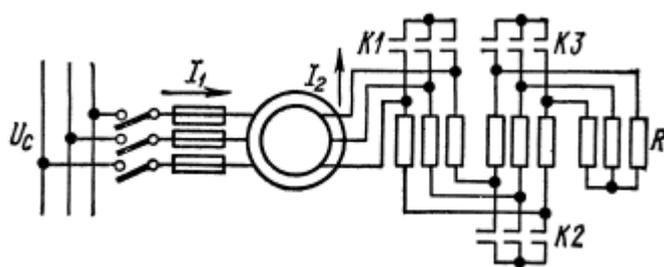


Рис. 2.23. Схема пуска двигателя с помощью пускового реостата

частоты вращения; 2) когда статический момент сопротивления  $M_{ст}$  на валу при пуске велик; 3) когда приводимые в движение массы настолько велики, что выделяемая во вторичной цепи двигателя тепловая энергия вызывает недопустимый нагрев обмотки ротора в виде беличьей клетки.

Пуск двигателей с фазным ротором производится с помощью пускового реостата в цепи ротора (рис. 2.23). Выполняется это путем последовательного замыкания контактов  $K3$ ,  $K2$ ,  $K1$  и выводом из цепи ротора сопротивлений. Что обеспечивает переход последовательно с одной механической характеристики на другую (рис. 2.24).

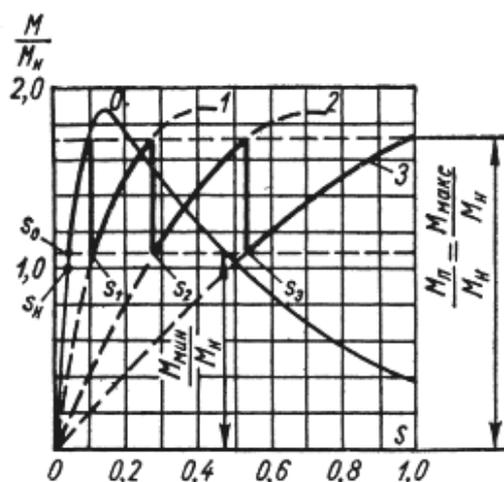


Рис. 2.24. Последовательное изменение вращающего момента при реостатном пуске асинхронного двигателя

Применяются проволочные, с литыми чугунными элементами, а также жидкостные реостаты. По условиям

нагрева реостаты рассчитываются на кратковременную работу. Сопротивления металлических реостатов для охлаждения обычно помещают в бак с трансформаторным маслом.

Металлические реостаты являются ступенчатыми, и переключение с одной ступени на другую осуществляется либо вручную с помощью рукоятки контроллера, существенным элементом которого является вал с укрепленными на нем контактами, либо же автоматически с помощью контакторов или контроллера с электрическим приводом. Жидкостный реостат представляет собой сосуд с электролитом (например, водный раствор соды или поваренной соли), в который опущены электроды. Сопротивление реостата регулируется путем изменения глубины погружения электродов.

### **2.3.2. Понятие о самозапуске**

В электрических сетях в результате коротких замыканий случаются кратковременные, длительностью до нескольких секунд, большие понижения напряжения или перерывы питания. Включенные в сеть асинхронные двигатели при этом начинают затормаживаться и чаще всего полностью останавливаются.

При восстановлении напряжения начинается одновременный самозапуск отключившихся от сети двигателей. Такой самозапуск двигателей способствует быстрейшему восстановлению нормальной работы производственных механизмов и поэтому целесообразен, а в ряде случаев даже чрезвычайно желателен.

Однако одновременный самозапуск большого количества асинхронных двигателей загружает сеть весьма большими токами и большим падением напряжения. Поэтому целесообразно использовать самозапуск только для двигателей наиболее ответственных производственных механизмов, а все остальные двигатели снабдить релейной защитой для их отключения от сети при глубоких падениях напряжения.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Каковы назначение и области применения асинхронных машин?
2. Когда и кем впервые была разработана конструкция трёхфазного асинхронного двигателя?
3. На чем основан принцип действия асинхронных машин?
4. Нарисовать картину магнитных потоков асинхронного двигателя при холостом ходе.

5. Чему равна ЭДС  $E_1$  обмотки статора при холостом ходе?
6. Чему равна ЭДС  $E_2$  обмотки ротора при холостом ходе?
7. Чему равна ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 1}$  в обмотке статора?
8. Как записывается уравнение напряжений первичной обмотки асинхронной машины?
9. Как строится векторная диаграмма асинхронных машин при холостом ходе?
10. Чему равен ток холостого хода асинхронной машины по сравнению с трансформатором?
11. Чему равен коэффициент трансформации ЭДС асинхронной машины?
12. С какой целью в асинхронных машинах, как и в трансформаторах, вторичную обмотку приводят к первичной?
13. Как осуществляется приведение обмоток в асинхронных машинах?
14. Какое напряжение подводят к статору в асинхронных машинах при коротком замыкании и почему?
15. Нарисовать картину магнитных потоков асинхронного двигателя при коротком замыкании и неподвижном роторе.
16. Чему равен коэффициент трансформации токов асинхронных машин при коротком замыкании и неподвижном роторе?
17. Как строится векторная диаграмма асинхронных машин при коротком замыкании?
18. Как пишутся уравнения первичных и вторичных напряжений асинхронной машины при коротком замыкании?
19. Какой вид будет иметь система уравнений напряжений, токов и н.с. для заторможенной асинхронной машины?
20. Как выглядит схема замещения асинхронной машины при заторможенном роторе без учета магнитных потерь?
21. Как построить векторную диаграмму при активно-индуктивной нагрузке для заторможенной асинхронной машины?
22. Какие режимы работы асинхронного двигателя при вращающемся роторе Вам известны?
23. Какова схема замещения и векторная диаграмма асинхронной машины при вращающемся роторе?

## Раздел3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### Тема 3.1. УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН

#### 3.1.1. Назначение, области применения, конструкция и принцип действия синхронных машин

В синхронных машинах в установившихся режимах частота вращения ротора  $n$  равна частоте вращения поля статора  $n_1$ . В обмотке возбуждения, обычно расположенной на роторе, протекает постоянный ток. Синхронные машины могут работать в режимах генератора, двигателя и синхронного компенсатора. Наиболее распространенный режим работы синхронных машин – генераторный. Во всем мире почти вся электроэнергия на электростанциях вырабатывается синхронными генераторами – турбо- и гидрогенераторами.

Синхронные двигатели применяются в электроприводах, где требуется постоянная частота вращения. Преимущество синхронных двигателей перед асинхронными – возможность работы с опережающим  $\cos\varphi$  или с  $\cos\varphi = 1$ , а также большая перегрузочная способность. Однако синхронные двигатели имеют плохие пусковые свойства, и для питания обмотки возбуждения требуется постоянный ток. Синхронные двигатели применяются в основном как мощные двигатели на мощности свыше 600 кВт и как микродвигатели на мощности до 1 кВт.

Синхронные машины находят применение также в качестве синхронных компенсаторов – генераторов реактивной мощности. При параллельной работе с сетью при перевозбуждении синхронная машина выдает в сеть реактивную мощность и является емкостью, а при недозавозбуждении по отношению к сети синхронная машина является индуктивностью и потребляет из сети реактивную мощность. Синхронные компенсаторы используются в энергосистемах как регулируемые емкости или индуктивности.

Устройство синхронных машин уже рассматривалось в разделе 1.

В конструктивном исполнении синхронные машины делятся на явно- и неявнополюсные. Быстроходные машины выполняются с неявнополюсным ротором, а тихоходные – с явнополюсным.

Турбогенераторы предназначены для выработки электроэнергии в продолжительном номинальном режиме работы при непосредственном соединении с паровыми или газовыми турбинами. Турбогенераторы устанавливаются на тепловых и атомных электростанциях.

В зависимости от мощности турбогенераторы подразделяются на три основные группы: мощностью  $2,5 \div 32$  МВт,  $60 \div 320$  МВт и свыше 500 МВт. По частоте вращения различают турбогенераторы четырехполюсные (на частоту вращения 1500 и 1800 об/мин) и двухполюсные (на частоту вращения 3000 и 3600 об/мин) соответственно на частоты сети 50 и 60 Гц.

По виду приводной турбины турбогенераторы классифицируются на генераторы, приводимые во вращение паровой турбиной, и генераторы с приводом от газовой турбины. По системе охлаждения турбогенераторы подразделяются на машины с воздушным, с косвенным водородным, непосредственным водородным и жидкостным охлаждением.

Гидрогенераторы – синхронные генераторы, приводимые во вращение гидравлическими турбинами, выпускаются мощностью до 800 МВт на частоты вращения от 46,9 до 1500 об/мин, напряжением до 18 кВ. По типу гидравлической турбины гидрогенераторы делятся на вертикальные (рис. 3.1) и горизонтальные, а также обратимые для работы в качестве генератора или двигателя. Система вентиляции гидрогенераторов, за исключением машин малой мощности, замкнутая. Гидрогенераторы большой мощности выпускаются с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора.

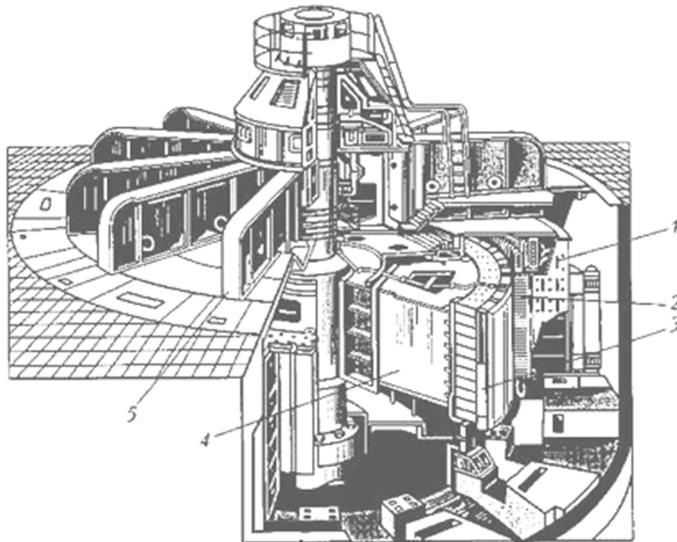
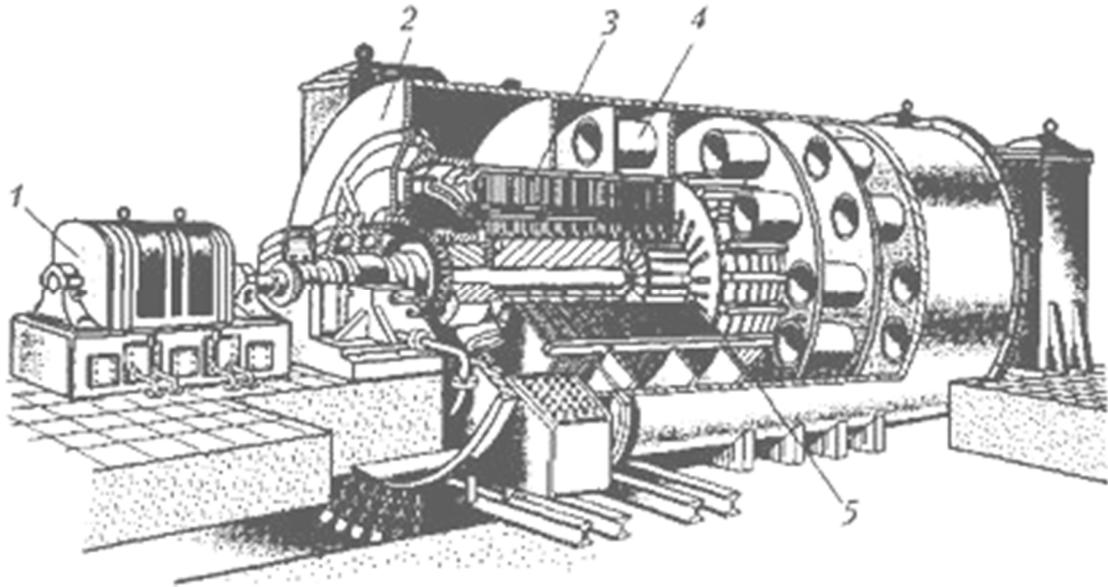


Рис. 3.1. Гидрогенератор (222 МВт; 15,8 кВ; 125 об/мин):

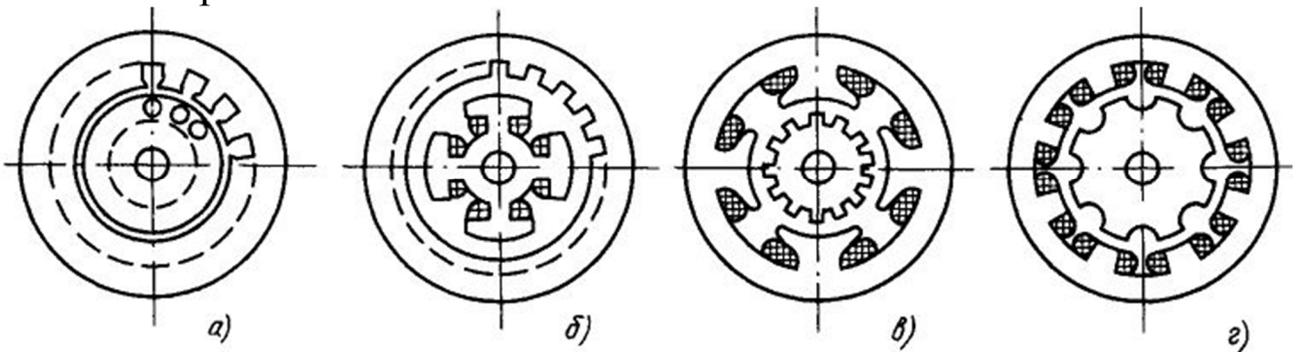
- 1 – корпус статора; 2 – сердечник статора; 3 – полюс ротора;  
4 – обод ротора; 5 – грузонесущая крестовина

По применяемой системе возбуждения турбогенераторы (рис. 3.2) классифицируются на машины со статической системой самовозбуждения, независимой тиристорной системой возбуждения и бесщеточным возбуждением.



*Рис. 3.2.* Турбогенератор:  
 1 – возбудитель; 2 – корпус; 3 – сердечник статора;  
 4 – секции водородного охлаждения; 5 – ротор

Разрез магнитной системы различных синхронных машин представлен на рис. 3.3.



*Рис. 3.3.* Магнитная система синхронных машин:  
 а – неявнополюсных; б – явнополюсных;  
 в, г – специального назначения

Принцип работы также основан на законах электромагнитной индукции.

Если это генератор, то питание осуществляется со стороны ротора. При подаче постоянного тока в обмотку возбуждения создается основное магнитное поле. Оно неподвижно относительно ротора. При вращении ротора с частотой  $n$  с помощью приводного двигателя магнитное поле пересекает проводники обмотки статора, в которых наводится синусоидальная ЭДС. Таким образом, в трех фазах имеем ЭДС, сдвинутые друг относительно друга на  $120^\circ$ .

Если это двигатель, то следует иметь в виду, что питание осуществляется как со стороны ротора – постоянным напряжением, так и со сто-

роны статора – переменным напряжением. Как происходят процессы в синхронных машинах, рассмотрим в последующих параграфах.

### 3.1.2. Магнитное поле и параметры обмотки якоря синхронных машин

Рассмотрим трехфазный синхронный генератор, работающий на симметричную нагрузку так, что все фазы обмотки нагружены равномерно, т.е. в них наводятся одинаковые ЭДС и проходят равные по величине и сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол  $120^\circ$  токи. Как известно, в этих условиях трехфазная обмотка статора создает вращающуюся синхронно с ротором н.с. $F$ .

Вектор н.с. статора может занимать разные пространственные положения относительно оси полюсов ротора.

В неявнополюсной синхронной машине воздушный зазор равномерен, а поэтому пространственное положение вектора н.с.статора относительно оси полюсов ротора не влияет на величину и график распределения магнитного поля статора.

В явнополюсной синхронной машине воздушный зазор неравномерен из-за наличия значительного межполюсного пространства, не заполненного сталью (рис. 3.4), и магнитное сопротивление потоку статора  $\Phi_d$  по продольной оси  $dd$ намного меньше магнитного сопротивления потоку статора  $\Phi_d$  по поперечной оси  $qq$ . Поэтому величина индукции магнитного поля статора и график ее распределения в воздушном зазоре в явнополюсных машинах зависят от пространственного положения вектора н.с.обмотки статораили его составляющих.

В общем случае, когда  $0 \leq \psi \leq 90^\circ$  ток  $\dot{I}$  можно разложить на две составляющие(см. рис. 3.4):

$$\dot{I}_d = \dot{I} \sin \psi;$$

$$\dot{I}_q = \dot{I} \cos \psi.$$

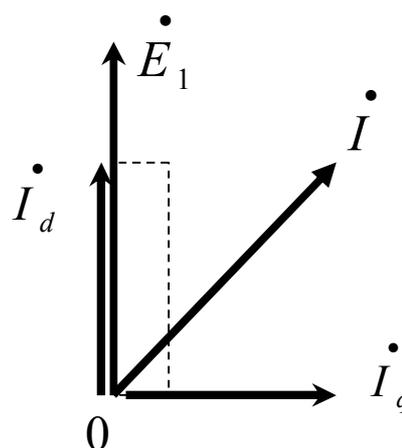


Рис. 3.4. Разложение тока по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям машины

Рассмотрим основные гармоники н.с. якоря при симметричной нагрузке (рис. 3.5).

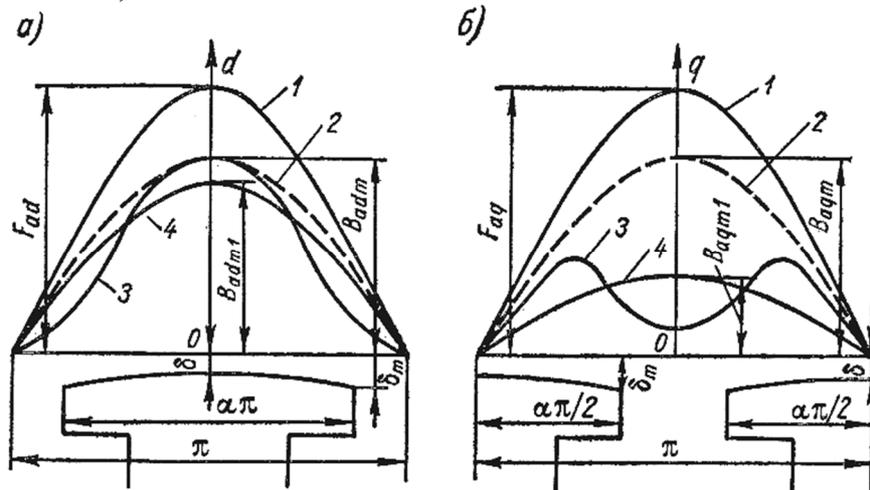


Рис. 3.5. Кривые поля реакции якоря внолюсной синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

Продольный ток  $\dot{I}_d$  создает продольную н.с. якоря с амплитудой

$$F_{ad} = \frac{m \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega k_{об}}{p} I_d,$$

А поперечный ток  $\dot{I}_q$  создает поперечную н.с. якоря с амплитудой

$$F_{aq} = \frac{m \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega k_{об}}{p} I_q.$$

полная н.с. якоря

$$F_a = \frac{m \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega k_{об}}{p} I,$$

причем

$$F_{ad} = F_a \sin \psi;$$

$$F_{aq} = F_a \cos \psi.$$

Если бы величина зазора была по всей окружности одинакова и равна его значению под серединой полюсного наконечника, то н.с.  $F_{ad}$  и  $F_{aq}$  создали бы синусоидальные пространственные волны магнитного поля (кривые 2) с амплитудами:

$$B_{adm} = \frac{\mu_0}{k_{\delta} k_{\mu d} \delta} F_{ad};$$

$$B_{aqm} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu q} \delta} F_{aq},$$

где  $k_{\mu d}$ ,  $k_{\mu q}$  – коэффициенты насыщения по продольной и поперечной осям.

По величине они разные, так как условия насыщения по этим осям различны.

Вследствие неравномерности воздушного зазора действительные кривые индукции  $\mathcal{Z}$  на рис. 3.5 не будут синусоидальными. Эти кривые можно разложить на гармоники  $\nu = 1, 3, 5, \dots$ , причем на рисунке в виде кривых  $\mathcal{A}$  представлены основные гармоники ( $\nu = 1$ ) поля продольной и поперечной реакции якоря с амплитудами  $B_{adm1}, B_{aqm1}$ .

ЭДС, индуктируемые полями реакции якоря, в действительности практически синусоидальны. Поэтому в теории синхронных машин учитываются только основные гармоники поля.

### 3.1.3. Продольная и поперечная реакции якоря и их магнитные поля

При нагрузке обмотки якоря синхронной машины током она создает собственное магнитное поле, которое называется полем реакции якоря.

В отличие от машин постоянного тока в синхронной машине влияние реакции якоря на величину магнитного потока весьма значительно. Это обусловлено прежде всего тем, что в синхронной машине возникают значительные продольная и поперечная реакции якоря, усиливающие или ослабляющие поток полюсов. Поэтому реакция якоря синхронной машины оказывает весьма значительное влияние на характеристики и поведение синхронной машины как при установившихся, так и при переходных режимах работы. Ввиду несимметричного устройства ротора возникает необходимость рассматривать действие реакции якоря по продольной и поперечной осям в отдельности.

Рассмотрим действие реакции якоря многофазной синхронной машины при установившейся симметричной нагрузке.

Для наглядности будем иметь в виду двухполюсную машину и предположим, что она работает в режиме генератора (рис. 3.6). Изобразим машину для трех режимов. Режим обеспечиваем тем, что направления токов в фазах остаются неизменными, а положение ротора относительно статора меняется. Направления токов трудно установить по правилу правой руки (рис. 3.6, а). Они указаны на рисунках крестиками и точками. Для простоты и наглядности каждая фаза обмотки статора

изображена в виде одного витка с полным шагом ( $A-X, B-Y, C-Z$ ), буквами  $N, S$  указана полярность поля возбуждения.

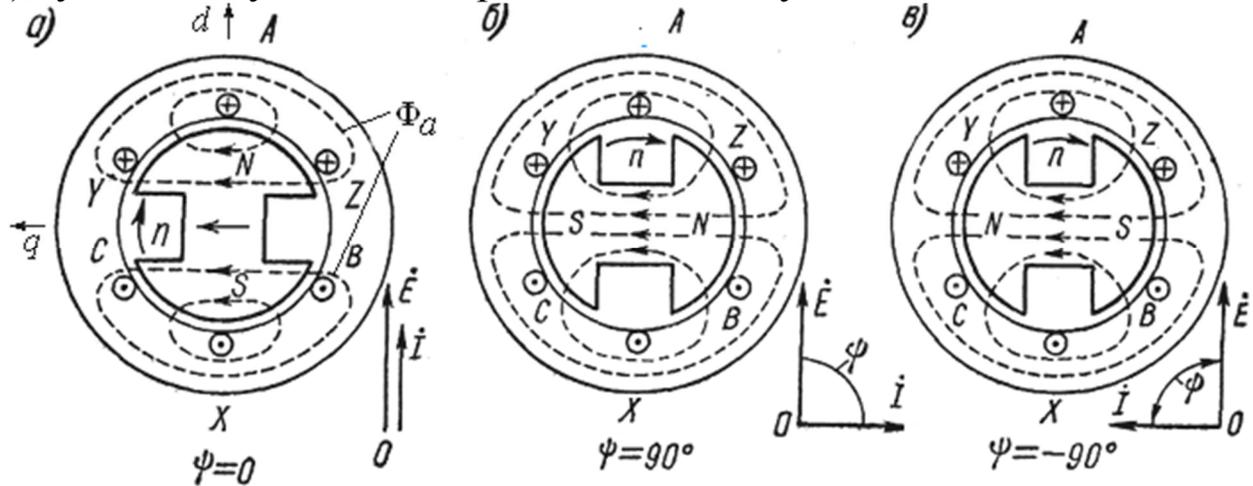


Рис.3.6. Двухполюсный генератор в различных режимах работы

Ротор вращается с электрической угловой частотой

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi n_1}{p}$$

Сначала рассмотрим случай (см. рис. 3.6, а), когда угол сдвига фаз

$\psi$  между током якоря  $\dot{I}$  и ЭДС  $\dot{E}$ , индуцируемой в обмотке якоря током или полем возбуждения, равен нулю и при положении ротора, изображенном на рис. 3.6, а, ЭДС фазы  $A$  максимальна. Так как  $\psi = 0$ , ток этой фазы также максимален и

$$i_a = I_m; i_b = i_c = -\frac{1}{2} I_m.$$

При этих направлениях токов магнитные линии поля  $\Phi_a$  реакции якоря в полюсах и теле якоря направлены поперек оси полюсов  $d$ . Это и есть **поперечная реакция якоря**. Такой характер поля реакции якоря при  $\psi = 0$  сохраняется при любом положении вращающегося ротора, так как ротор и поле реакции якоря вращаются синхронно.

Далее рассмотрим случай (рис. 3.6, б), когда угол сдвига

фаз  $\psi$  между током якоря  $\dot{I}$  и ЭДС  $\dot{E}$ , индуцируемой в обмотке якоря током или полем возбуждения, равен  $90^\circ$ , т.е. при индуктивной нагрузке. При этих направлениях токов и положении ротора магнитные линии поля  $\Phi_a$  реакции якоря в полюсах и теле якоря направлены вдоль оси полюсов  $d$ . Это будет **продольная реакция якоря**.

Так как магнитные линии поля якоря  $\Phi_a$  направлены встречно основному магнитному полю, эта реакция будет **размагничивающей**.

Третий случай – при емкостной нагрузке (рис. 3.6, в), когда угол сдвига фаз  $\psi$  между током якоря  $\dot{I}$  и ЭДС  $\dot{E}$ , индуцируемой в обмотке якоря током или полем возбуждения, равен  $-90^\circ$ . При этих направлениях токов магнитные линии поля  $\Phi_a$  реакции якоря в полюсах и теле якоря направлены также вдоль оси полюсов  $d$ . Это также будет **продольная реакция якоря**.

Так как магнитные линии поля якоря  $\Phi_a$  направлены **согласно** основному магнитному полю, то эта реакция будет **намагничивающей**.

### 3.1.4. Уравнения напряжений синхронных генераторов при симметричной нагрузке

**Явнополюсная машина.** Напряжение фазы обмотки генератора равно сумме индуцируемых в этой обмотке ЭДС минус падение напряжения в активном сопротивлении фазы обмотки якоря  $r_a$ .

В соответствии с этим можно записать уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I} = \dot{E}_\delta + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I}. \quad (3.1)$$

ЭДС реакции якоря и рассеяния можно выразить через соответствующие токи и индуктивные сопротивления:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ad} &= -jx_{ad} \dot{I}_d; \\ \dot{E}_{aq} &= -jx_{aq} \dot{I}_q; \\ \dot{E}_{\sigma a} &= -jx_{\sigma a} \dot{I}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

При этом, подставляя (3.2) в (3.1), получим

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad} \dot{I}_d - jx_{aq} \dot{I}_q - jx_{\sigma a} \dot{I} - r_a \dot{I} = \dot{E}_\delta - jx_{\sigma a} \dot{I} - r_a \dot{I}. \quad (3.3)$$

**Неявнополюсная машина.** В этом случае  $x_{aq} = x_{ad}$ ,  $x_q = x_d$ , поэтому нет необходимости разлагать ток  $\dot{I}$  на составляющие  $\dot{I}_d$  и  $\dot{I}_q$ .

В соответствии с этим можно записать уравнение напряжения неявнополюсного синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I} = \dot{E}_{\delta} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I},$$

или

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad} - jx_{\sigma a} \dot{I} - r_a \dot{I} = \dot{E}_{\delta} - jx_{\sigma a} \dot{I} - r_a \dot{I}. \quad (3.4)$$

### 3.1.5. Основные виды векторных диаграмм напряжений неявнополюсных и явнополюсных синхронных генераторов без учета насыщения и с его учетом

**Явнополюсная машина.** Уравнению напряжений

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I} = \dot{E}_{\delta} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I} \quad (3.5)$$

соответствуют векторные диаграммы явнополюсного синхронного генератора. В случае, показанном на рис. 3.7, а, генератор имеет смешанную активно-индуктивную нагрузку, когда угол сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi > 0$ , а на рис. 3.7, б, когда генератор имеет смешанную активно-емкостную нагрузку, когда угол сдвига фаз равен  $\varphi < 0$ .

Правила построения уже были изучены ранее в [3].

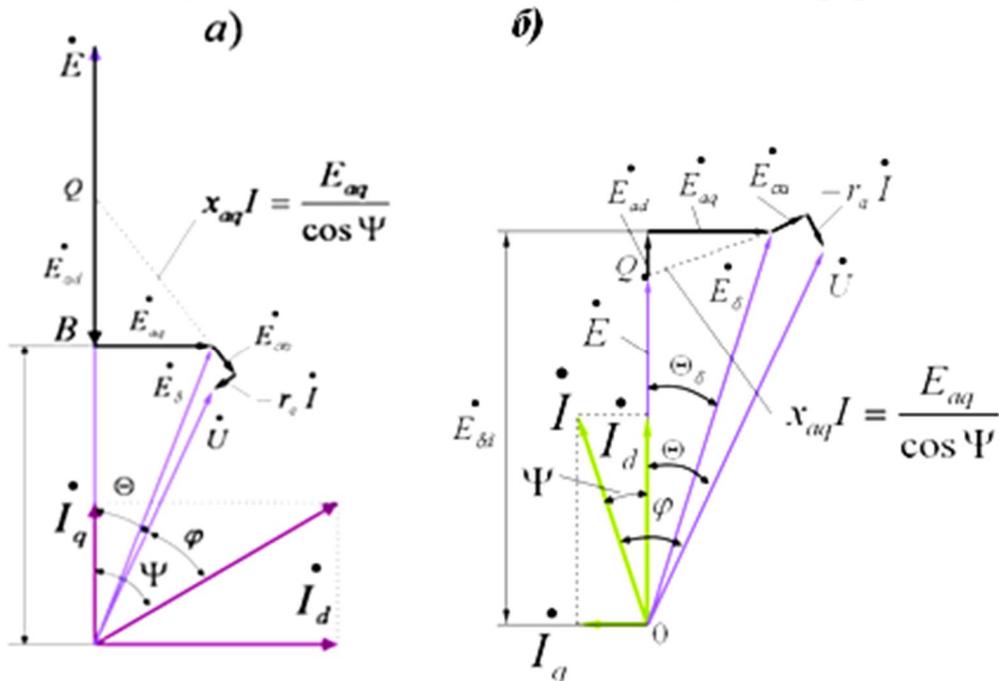


Рис. 3.7. Векторные диаграммы синхронных генераторов при различных нагрузках:

$a$  – при активно-индуктивной;  
 $b$  – при активно-емкостной

Угол  $\Theta$  между векторами  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  называется углом нагрузки. В генераторном режиме работы ЭДС всегда опережает напряжение.

Угол  $\Theta$  при этом считается положительным. Название этого угла происходит от того, что величина  $\Theta$  зависит от нагрузки генератора

$$P = mUI \cos \varphi.$$

Действительно, из диаграммы видно, что, например, при  $\varphi < 0$  и при уменьшении абсолютной величины  $\varphi$  составляющая тока якоря увеличивается, соответственно, увеличиваются  $\Theta$ .

Первая векторная диаграмма также называется в литературе [2] диаграммой Blondеля.

ЭДС  $\dot{E}_{\sigma a}$  тоже можно разложить на составляющие:

$$\dot{E}_{\sigma a} = -jx_{\sigma a} \dot{I} = -jx_{\sigma a} \dot{I}_d - jx_{\sigma a} \dot{I}_q, \quad (3.6)$$

а сопротивления  $x_{ad}, x_{aq}$  можно объединить с сопротивлением  $x_{\sigma a}$  в синхронные сопротивления:

$$\begin{aligned} x_d &= x_{ad} + x_{\sigma a}; \\ x_q &= x_{aq} + x_{\sigma a}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Тогда, подставляя (3.6) и (3.7) в (3.5), получим уравнение:

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_d \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q - r_a \dot{I} \quad (3.8)$$

и соответствующее перестроение векторных диаграмм.

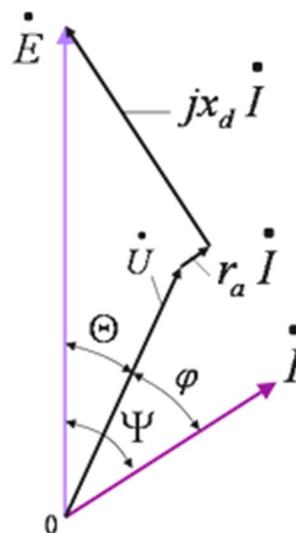


Рис. 3.8. Векторная диаграмма синхронного генератора

**Неявнополюсная машина.** В этом случае  $x_{aq} = x_{ad}, x_q = x_d$ , поэтому нет необходимости раскладывать ток  $\dot{I}$  на составляющие  $\dot{I}_d$  и  $\dot{I}_q$

.Соответственно, векторная диаграмма напряжений неявнополюсного синхронного генератора будет иметь вид, показанный на рис. 3.8.

### 3.1.6. Характеристики синхронных генераторов

Одними из основных характеристик синхронных генераторов являются те, которые определяют зависимость между напряжением  $U$  на зажимах якоря, током якоря  $I$  и током возбуждения при  $f = f_n$  или  $n = n_n$  и  $\varphi = \text{const}$  в установившемся режиме работы. Эти характеристики дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов.

Они могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм или по данным соответствующих опытов последующим схемам (рис. 3.9).

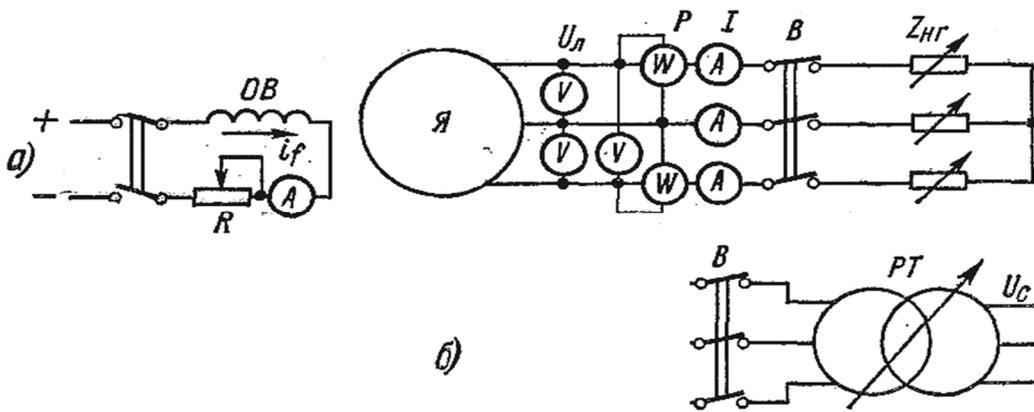


Рис. 3.9. Схемы для снятия характеристик синхронного генератора при различных нагрузках

**Характеристика холостого хода (х.х.х.).** Представляет зависимость

$U = f(i_f)$  при  $I = 0$  и  $f = f_n$ . В режиме холостого хода  $U = E$ . Построение характеристик производится в относительных единицах, т.е. отнесенным к соответствующим номинальным данным.

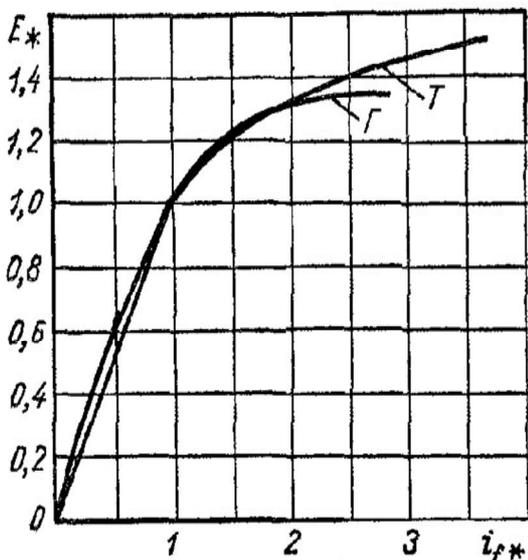


Рис. 3.10. Характеристики холостого хода турбо- (Т) и гидрогенераторов (Г)

$$U_* = \frac{U}{U_n}; i_{f*} = \frac{i_f}{i_{fn}}$$

где  $i_{fn}$  – ток возбуждения генератора, когда  $U = U_n$ .

На рис. 3.10 представлен пример характеристик холостого хода турбо- и гидрогенераторов.

**Характеристика короткого замыкания (х.к.з.).** Снимается при замыкании зажимов всех фаз обмотки якоря накоротко (симметричное короткое замыкание) и определяет зависимость  $I = f(i_f)$  при  $U = 0$  и  $f = f_n$ .

Если пренебречь весьма незначительным активным сопротивлением якоря  $r_a = 0$ , то сопротивление цепи якоря в режиме короткого замыкания будет чисто индуктивным.

ЭДС  $E_\delta$  от результирующего потока воздушного зазора мала, вследствие чего и поток  $\Phi_\delta$  мал. Поэтому при коротком замыкании магнитная цепь не насыщена и х.к.з. прямолинейна (рис. 3.11).

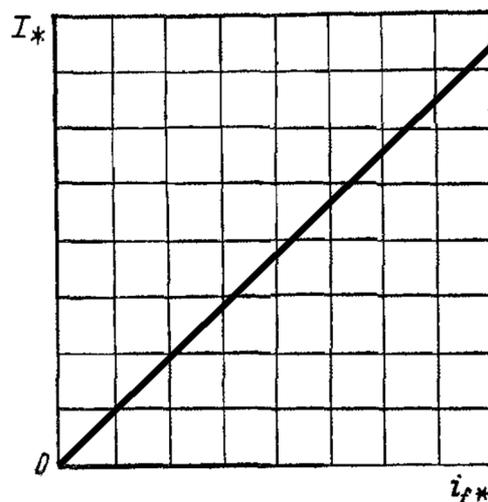


Рис. 3.11. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

Для характеристики синхронных генераторов имеет существенное значение величина, называемая отношением короткого замыкания (о.к.з.). Отношением короткого замыкания  $k_{о.к.з.}$ , согласно ГОСТ 183-66, называется отношение установившегося тока  $I_{ко}$  короткого замыкания при токе возбуждения, который при холостом ходе и  $n = n_n$  дает  $E = U_n$ , к номинальному току якоря  $I_n$ :

$$k_{o.k.z.} = \frac{I_{xo}}{I_H}$$

У гидрогенераторов обычно  $k_{o.k.z.} = 0,8 \dots 1,8$ , а у турбогенераторов  $k_{o.k.z.} = 0,4 \dots 1$ .

**Внешняя характеристика** представляет зависимость  $U = f(I)$  при  $i_f = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ,  $f = f_H$  и показывает, как изменяется напряжение  $U$  машины при изменении величины нагрузки и неизменном токе возбуждения (рис. 3.12).

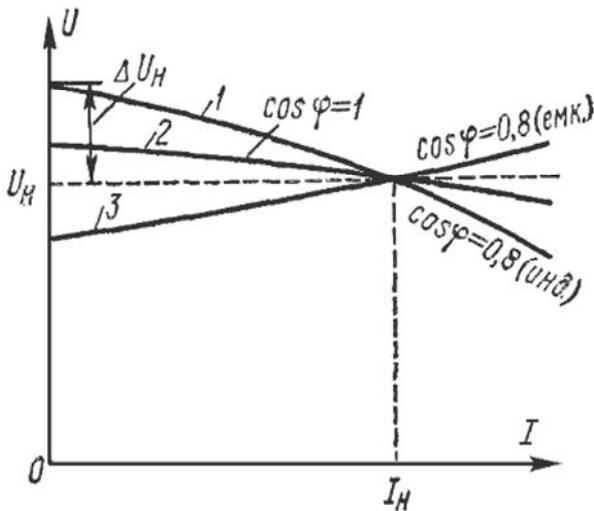


Рис. 3.12. Внешние характеристики синхронного генератора при различных нагрузках

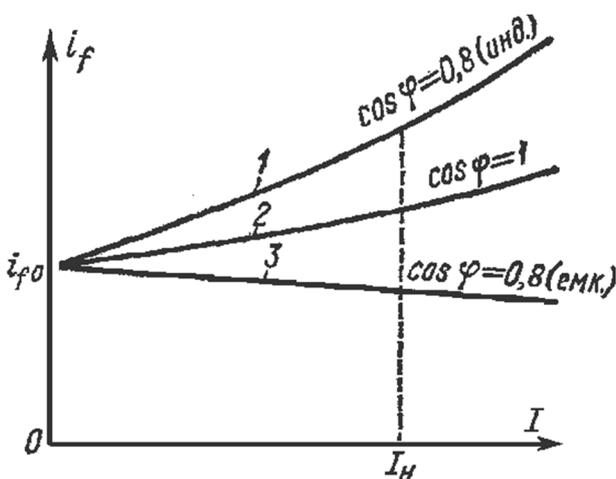
Так как при нагрузке генераторов происходит изменение напряжения, в теории принято такое понятие, как **номинальное изменение напряжения** синхронного генератора  $\Delta U_H$  – это изменение напряжения на зажимах генератора (при его работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и неизменном токе возбуждения.

Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной нагрузкой при отстающем токе и  $\cos \varphi = 0,8$ .

Это изменение напряжения обычно происходит в пределах

$$\Delta U_{H\%} = \frac{\Delta U_H}{U_H} \cdot 100 = 25 \dots 35 \%$$

и измеряется в процентах.



**Регулировочная характеристика** представляет зависимость  $i_f = f(I)$  при  $U = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$  и  $f = \text{const}$  и показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным (рис. 3.13).

Рис. 3.13. Регулировочные характеристики синхронного генератора при различных нагрузках

**Нагрузочная характеристика** представляет зависимость  $U = f(i_f)$  при  $I = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$  и  $f = \text{const}$  и показывает, как изменяется напряжение  $U$  ге-

нератора с изменением тока возбуждения  $i_f$  при условии постоянства тока нагрузки  $I$  и  $\cos \varphi$ . Из числа разнообразных нагрузочных характеристик наибольший практический интерес представляет так называемая индукционная нагрузочная характеристика (кривая 2), которая соответствует чисто индуктивной нагрузке генератора, когда  $\cos \varphi = 0$  (инд.). Кривая 1 представляет характеристику холостого хода (рис. 3.14).

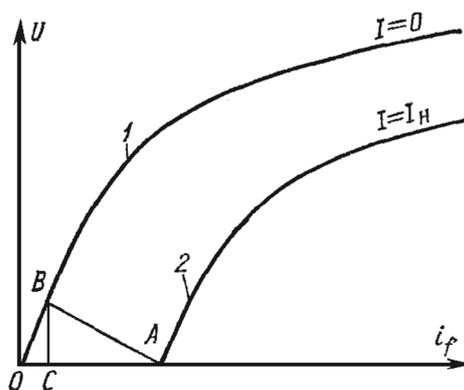


Рис. 3.14. Нагрузочная характеристика синхронного генератора при условии постоянства тока нагрузки

### 3.1.7. Условия включения синхронных генераторов на параллельную работу

На каждой электрической станции обычно бывает установлено несколько генераторов, которые включаются на параллельную работу в общую сеть. В современных энергосистемах на общую сеть, кроме того, работает целый ряд электростанций, и поэтому параллельно на общую сеть работает большое число синхронных генераторов. Благодаря этому достигается большая надежность энергоснабжения потребителей, снижение мощности аварийного и ремонтного резерва, возможность маневрирования энергоресурсами сезонного характера и другие выгоды.

Все параллельно работающие генераторы должны отдавать в сеть ток одинаковой частоты. Поэтому они должны вращаться строго в

такт, или, как говорят, синхронно, т.е. их частоты вращения  $n_1, n_2, n_3, \dots$  должны быть в точности обратно пропорциональны числам пар полюсов:

$$n_1 = \frac{f}{p_1}; \quad n_2 = \frac{f}{p_2}; \quad n_3 = \frac{f}{p_3} \dots$$

Режим работы генератора на холостом ходу перед его включением на параллельную работу необходимо отрегулировать таким образом, чтобы в определенный момент времени включить генератор в сеть. Совокупность этих операций называется синхронизацией генератора.

Идеальные условия для включения генератора на параллельную работу достигаются при соблюдении следующих требований:

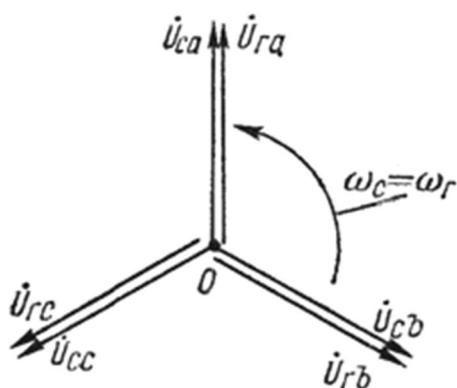


Рис. 3.15. Векторы напряжений генератора и сети

1) напряжение включаемого генератора  $U_g$  должно быть равно напряжению сети  $U_c$  или уже работающего генератора;

2) частота генератора  $f_g$  должна быть равна частоте сети  $f_c$ ;

3) чередование фаз генератора и сети должно быть одинаково;

4) напряжения  $U_g$  и  $U_c$  должны быть в фазе.

При указанных условиях векторы напряжений генератора и сети совпадают и вращаются с одинаковой частотой (рис. 3.15). Разности напряжений между

контактами выключателя при включении генератора:

$$\dot{U}_{ga} - \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{gb} - \dot{U}_{cb} = \dot{U}_{gc} - \dot{U}_{cc} = 0.$$

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения генератора и контролируется с помощью вольтметра.

Изменение частоты и фазы напряжения генератора достигается изменением частоты вращения генератора.

Правильность чередования фаз необходимо проверять только при первом включении генератора после монтажа или сборки схемы.

Совпадение напряжений по фазе контролируется помощью ламп, нулевых вольтметров или специальных синхроскопов, а в авто-

матических синхронизаторах – с помощью специальных измерительных элементов.

Неправильная синхронизация может вызвать серьезную аварию.

## Тема 3.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ

### 3.2.1. Угловая характеристика активной мощности синхронных машин

Мощность синхронной машины  $P$  зависит от угла нагрузки  $\theta$  между векторами ЭДС  $\vec{E}$  и напряжения  $U$  машины. Зависимость  $P = f(\theta)$  при  $E = \text{const}$  и  $U = \text{const}$  называется **угловой характеристикой активной мощности** синхронной машины (рис. 3.16).

Спроектируем на векторных диаграммах векторы ЭДС, напряжений и падений напряжения на направление вектора  $\vec{E}$  и на направление, перпендикулярное ему. Тогда получим

$$E = x_d I_d + U \cos \theta; \quad x_q I_q = U \sin \theta,$$

откуда

$$I_d = \frac{E - U \cos \theta}{x_d}; \quad I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}.$$

Учитывая, что  $\varphi = \psi - \theta$ , для мощности генератора имеем

$$P = mUI \cos \varphi = mUI \cos (\psi - \theta) = \\ = mU (I_q \cos \theta + I_d \sin \theta).$$

или

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Это равенство и является искомым математическим выражением угловой характеристики мощности, согласно которому

$$P = f(E, U, \theta, x_d, x_q).$$

У неявнополюсной машины  $x_d = x_q$ , тогда

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \theta.$$

Наряду с рассмотренными выше характеристиками активной мощности представляют интерес также угловые характеристики реактивной мощности

$$Q = mUI \sin \varphi = mUI \sin (\psi - \theta) = \\ = mU (I_d \cos \theta - I_q \sin \theta).$$

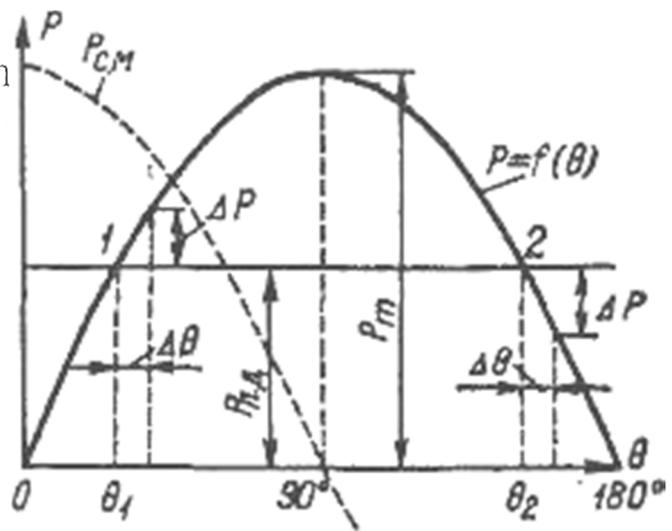


Рис. 3.16. Угловая характеристика активной мощности неявнополюсного синхронного генератора

или

$$Q = \frac{mEU}{x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta - \frac{mU^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right).$$

Построив зависимость, получим график, показанный на рис. 3.17.

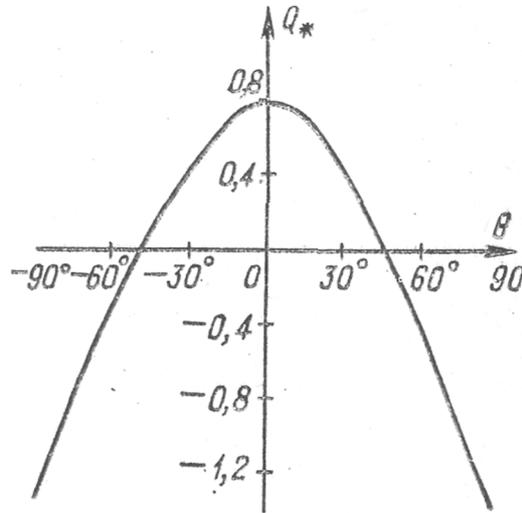


Рис. 3.17. Угловая характеристика реактивной мощности явнополюсного генератора

Из этой кривой видно, что если при  $\theta = 0$  генератор отдает в сеть реактивную мощность, то с увеличением  $\theta$  величина  $Q$  начинает падать и при некотором  $\theta$  изменяет знак, т.е. машина начинает потреблять реактивную мощность из сети.

### 3.2.2. V-образные характеристики. Рабочие характеристики

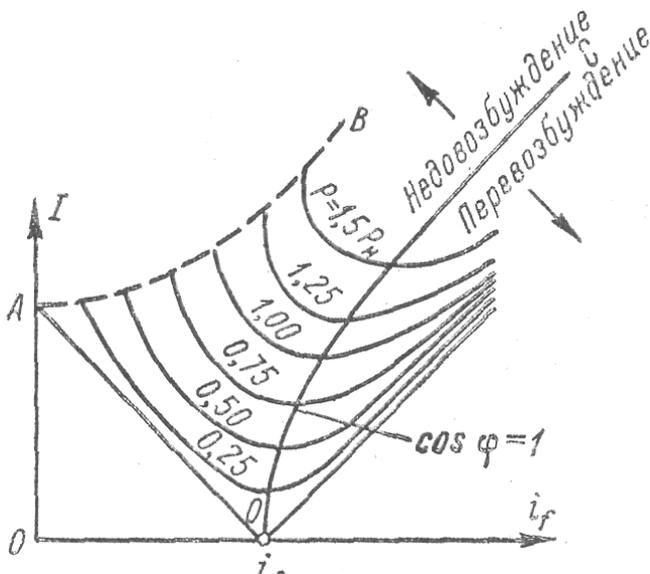


Рис. 3.18. V-образные характеристики синхронной машины

Изменение тока возбуждения вызывает изменение только реактивных составляющих тока и мощности якоря. Рассмотрим зависимость (рис. 3.18) величины тока  $I$  от тока возбуждения  $i_f$  при  $P = \text{const}$  в случае параллельной работы машины с сетью бесконечной мощности ( $U = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ).

Минимальное значение  $I$  для каждой кривой определяет активную составляющую тока якоря  $I_a$  и величину мощности, для

которой построена данная кривая. Нижняя кривая соответствует  $P=0$ , причем  $i_{f0}$  – значение тока возбуждения при  $E=U$ . Правые части кривых соответствуют перевозбужденной машине и отдаче в сеть индуктивного тока и реактивной мощности, а левые части – недозабужденной машине, отдаче в сеть емкостного тока и потреблению реактивной мощности.

Эти зависимости по виду называются также  $U$ -образными характеристиками синхронной машины.

## **Тема 3.3. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

### **3.3.1. Назначение, особенности конструкции, способы пуска синхронных двигателей**

Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными большое преимущество, заключающееся в том, что благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с  $\cos\varphi = 1$  и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе с перевозбуждением даже отдают реактивную мощность в сеть.

В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален  $U$ , а асинхронного двигателя –  $U^2$ , поэтому при понижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность. Кроме того, использование возможности увеличения тока возбуждения синхронных двигателей позволяет увеличивать надежность их работы при аварийных понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях условия работы энергосистемы в целом.

С другой стороны, конструкция синхронных двигателей сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск и регулирование частоты вращения синхронных двигателей также сложнее.

Вследствие большей величины воздушного зазора добавочные потери в стали и в клетке ротора синхронных двигателей меньше, чем у асинхронных, благодаря чему КПД синхронных двигателей обычно

выше. Преимущество синхронных двигателей настолько велико, что при  $P_H > 200 \dots 300$  кВт их целесообразно применять всюду, где не требуется частых пусков и остановок и регулирования частоты вращения (дизель-генераторы, мощные насосы, вентиляторы, компрессоры, мельницы, дробилки и пр.). В подавляющем большинстве случаев применяется асинхронный пуск синхронных двигателей.

Обычно синхронные двигатели имеют на своем валу возбудитель в виде генератора постоянного тока параллельного возбуждения. При пуске по схеме контакты 7 разомкнуты, а контакт 8 замкнут (рис. 3.19).

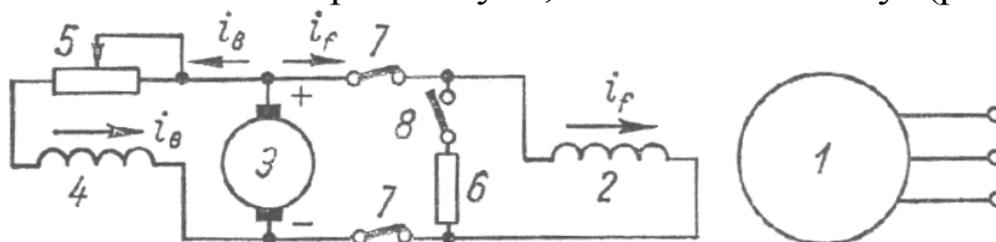


Рис. 3.19. Схема пуска синхронных двигателей

При этом обмотка возбуждения двигателя 2 замкнута через сопротивление 6 и асинхронный пуск происходит в наиболее благоприятных условиях.

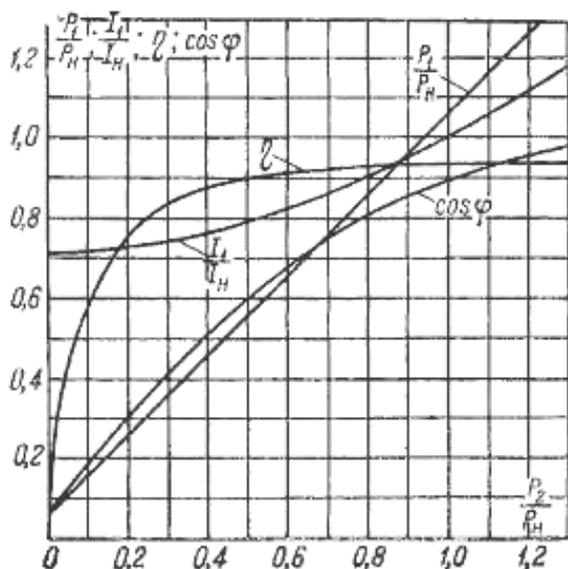


Рис. 3.20. Рабочие характеристики явнополюсного синхронного Двигателя с  $P_H = 560$  кВт,  
 $U_H = 6000$  В,  $f = 50$  Гц,  
 $n_H = 600$  об/мин,  $\cos \varphi_H = 0,9$   
 (перевозбуждение)

### 3.3.2. Рабочие характеристики

Рабочие характеристики синхронного двигателя [2] мощностью  $P_H = 560$  кВт при  $U = U_n$ ,  $f = f_n$ , и  $i_f = i_{fn} = \text{const}$  изображены в относительных единицах на рис. 3.20. Двигатель работает с перевозбуждением, его  $\cos \varphi$  с уменьшением полезной мощности  $P_2$  также уменьшается, а отдаваемая в сеть реактивная мощность  $Q$  увеличивается. Отсюда следует, что перевозбужденные недогруженные синхронные двигатели в отличие от асинхронных способствуют улучшению коэффициента мощности сети. Ток холостого хода синхронных двигателей несколько выше, чем у асинхронных.

### 3.3.3. Внезапное короткое замыкание синхронных машин

На практике встречаются случаи, когда мощные однофазные потребители нарушают симметричную нагрузку фаз синхронных генераторов (тяговые подстанции железных дорог, электрифицируемых на переменном токе, и т.д.). Еще более часто, хотя и кратковременно, несимметричная нагрузка фаз генераторов возникает при несимметричных коротких замыканиях в электрических сетях: при однофазном коротком замыкании – между линейным и нулевым проводами, при двухфазном коротком замыкании – между двумя линейными проводами и при двухфазном коротком замыкании на нейтраль – между двумя линейными и нулевым проводами (рис. 3.21). На рис. 3.22 представлены схемы для определения сопротивления обратной последовательности ( $a$ ,  $b$ ,  $v$ ) по данным опыта двухфазного короткого замыкания, нулевой последовательности ( $z$ ) по данным опыта двухфазного короткого замыкания на нейтраль. Роль нулевого провода в сетях высокого напряжения играет земля, так как нулевые точки в таких сетях обычно заземляются. Несимметричные короткие замыкания существуют кратковременно, так как поврежденные участки сетей отключаются релейной защитой, однако они оказывают сильное влияние на работу генераторов и сети в целом. При внезапных несимметричных коротких замыканиях возникают переходные процессы. Они изучаются также, как установившиеся несимметричные режимы работы.

Общим методом исследования несимметричных режимов является метод симметричных составляющих, при котором несимметричная система токов раскладывается на симметричные составляющие, и действие последних учитывается по отдельности. Согласно ГОСТ 183-66, допускается длительная работа турбо- и гидрогенераторов с несимметричной нагрузкой, если токи фаз не превышают номинальных значений и разность токов в фазах не превышает 10 % номинального тока фазы.

При внезапном коротком замыкании главный интерес представляют величины токов обмотки якоря и закономерности их изменения. Процесс внезапного короткого замыкания обмотки якоря в основном аналогичен короткому замыканию в любой цепи переменного тока, например внезапному короткому замыканию вторичной обмотки трансформатора. Это значит, что при коротком замыкании в фазах обмотки якоря возникают вынужденные периодические токи и свободные аperiodические токи, затухающие с определенными посто-

янными временами, причем сумма этих токов в каждой фазе в начальный момент времени короткого замыкания при холостом ходе равна нулю. Однако ввиду вращения ротора и наличия переходных процессов в обмотках индуктора процесс короткого замыкания синхронного генератора значительно более сложен.

Более подробно внезапные несимметричные короткие замыкания рассматриваются в специальных руководствах [5-10].

Здесь мы рассмотрим только возможные схемы испытаний для получения параметров коротких замыканий и их последствия для электрических машин.

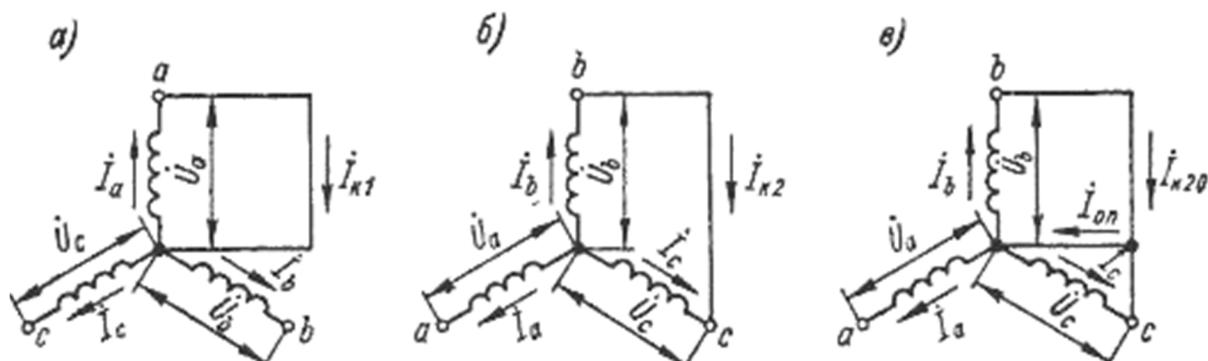


Рис. 3.21. Схемы однофазного (а), двухфазного (б) и двухфазного на нейтраль (в) короткого замыкания синхронного генератора

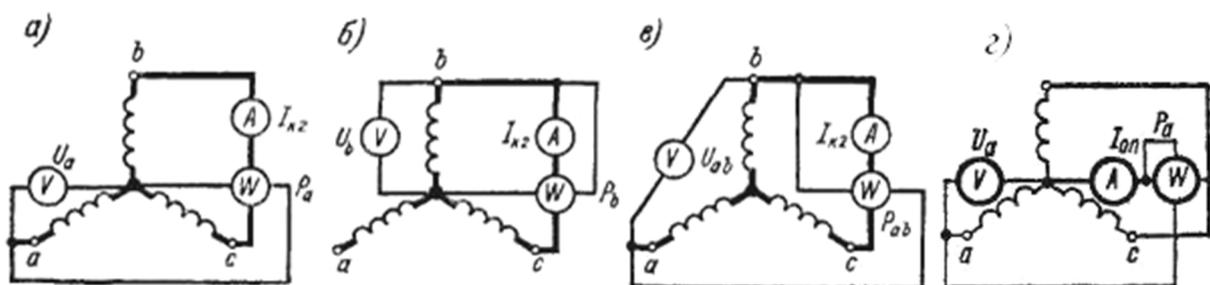


Рис. 3.22. Схемы для определения сопротивления обратной последовательности (а, б, в) по данным опыта двухфазного короткого замыкания, нулевой последовательности (г) по данным опыта двухфазного короткого замыкания на нейтраль

Результатом внезапного короткого замыкания является возникновение в обмотках возбуждения, успокоительной и в массивных частях ротора вторичных токов двойной частоты, которые вызывают соответствующие потери и нагрев ротора, а также уменьшение КПД машины.

Поэтому при значительной несимметрии нагрузки возникает чрезмерный и опасный нагрев успокоительных обмоток и массивных роторов.

Высокая температура тела ротора турбогенератора вызывает опасные деформации ротора и вероятность повреждения изоляции обмотки возбуждения. Нагрев успокоительной обмотки явнополюсной машины мало влияет на температуру обмотки возбуждения ввиду удаленности этих обмоток друг от друга и лучших условий охлаждения обмотки возбуждения явнополюсных машин.

Токи, индуктируемые обратным полем в обмотке возбуждения, меньше из-за большего сопротивления рассеяния этой обмотки. Поэтому в явнополюсных машинах дополнительный нагрев обмотки возбуждения при несимметричной нагрузке невелик.

В результате взаимодействия потока возбуждения и потока обратной последовательности статора, а также поля прямой последовательности статора и поля токов двойной частоты ротора при несимметричной нагрузке на ротор и статор действуют знакопеременные вращающие моменты и тангенциальные силы.

Кроме того, вследствие этих же причин возникают пульсирующие радиальные силы притяжения и отталкивания между полюсами полей статора и ротора, стремящиеся деформировать статор и ротор. Эти силы вызывают вибрацию частей машины, шум и ослабление запрессовки сердечника статора. Пульсирующие силы двойной частоты ввиду усталостных явлений могут также вредно отразиться на прочности сварных соединений, в особенности при наличии дефектов сварки. Все указанные факторы, естественно, тем сильнее, чем больше несимметрия нагрузки.

## **Тема 3.4. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН**

### **3.4.1. Проблема регулирования возбуждения синхронных машин и требования к системам возбуждения**

Системой возбуждения синхронной машины называется совокупность машин, аппаратов и устройств, предназначенных для питания ее обмотки возбуждения постоянным током  $i_f$  и регулирования величины этого тока.

К системам возбуждения предъявляются следующие основные требования: 1) высокая надежность в работе; 2) возможно большая простота и малая стоимость. Кроме того, необходимость регулирования напряжения и обеспечения устойчивой работы синхронных машин налагает на системы возбуждения ряд дополнительных требований.

Для поддержания постоянства напряжения  $U$  на зажимах генератора при изменении нагрузки необходимо регулировать  $i_f$ , соответственно,  $u_{\text{в}}$  в широких пределах. Согласно ГОСТ 533-68, минимальная устойчивая величина напряжения возбуждения  $u_{\text{ф}}$  турбогенератора должна быть не больше  $0,2 u_{\text{н}}$ . В возбудителях в виде генераторов параллельного возбуждения это достигается с помощью мостиков насыщения в магнитной цепи. Мощные синхронные генераторы, а во многих случаях и генераторы небольшой мощности, снабжаются автоматическими регуляторами тока возбуждения, целью которых являются: 1) поддержание постоянства напряжения  $U$  при изменениях нагрузки; 2) повышение статической и динамической устойчивости генератора. Вторая задача в особенности важна для мощных генераторов, при этом к системам и регуляторам возбуждения предъявляются повышенные требования.

При медленных изменениях  $U$  для поддержания  $U = U_{\text{н}} = \text{const}$  достаточно осуществлять так называемое пропорциональное регулирование, когда регулятор возбуждения или напряжения реагирует на изменение  $U$ , т.е. на величину  $\Delta U = U - U_{\text{н}}$ , и в зависимости от величины и знака  $\Delta U$  оказывает воздействие на орган, изменяющий соответствующим образом величину  $i_f$ . Например, для маломощных генераторов применяются угольные регуляторы напряжения, которые состоят из столбика угольных или графитовых дисков, пружины, сжимающей этот столбик, и электромагнита. Угольный столбик заменяет реостат возбуждения в схемах рис. 3.19, а катушка электромагнита присоединяется к зажимам генератора. При увеличении  $U$  электромагнит ослабляет давление пружины, сила сжатия столбика уменьшается, его сопротивление в результате этого увеличивается и  $i_f$  уменьшается. При уменьшении  $U$  действия происходят в обратном порядке.

Однако при быстрых изменениях  $U$ , как это имеет место при переходных процессах, и для увеличения устойчивости такое регулирование малоэффективно вследствие механической инерции подобного регулятора, имеющего подвижные части, и электромагнитной инерции цепи возбуждения, обладающей большой индуктивностью. Вследствие такой инерции  $i_f$  будет изменяться с запаздыванием и не будет успевать за изменением  $U$ , вследствие чего выдержать условие  $U = U_{\text{н}} = \text{const}$  необходимой точностью невозможно. Во избежание этого для мощных генераторов, во-первых, применяют статические электромагнитные регуляторы, состоящие из элементов (электронные усилители и пр.), которые не имеют подвижных частей. Во-вторых,

для преодоления влияния электромагнитной инерции цепи возбуждения необходимо, чтобы действие регулятора было пропорционально не только  $U$ , но также скорости изменения  $U$ , т.е.  $dU/dt$ .

Регуляторы, которые реагируют не только на величины отклонения определенных параметров, но и на величины их производных во времени, называются регуляторами сильного действия.

Классическая система возбуждения синхронных машин, широко используемая и в настоящее время, состоит из возбудителя в виде генератора параллельного возбуждения на общем валу с синхронной машиной (см. рис. 3.19). У тихоходных машин мощностью до  $P_a = 5000$  кВт для уменьшения веса и стоимости возбудителей последние иногда соединяют с валом синхронной машины с помощью клиноременной передачи.

Гидрогенераторы также обычно имеют возбудитель на одном валу с генератором. Однако при этом у мощных тихоходных генераторов с  $n_n = 60 \dots 150$  об/мин размеры и стоимость возбудителя в связи со значительной его мощностью и тихоходностью получаются большими. Кроме того, тихоходные возбудители вследствие своих значительных размеров обладают большой электромагнитной инерцией, что снижает эффективность автоматического регулирования и форсировки возбуждения. Поэтому применяют также системы возбуждения в виде отдельного быстроходного агрегата ( $n = 750 \dots 1500$  об/мин), состоящего из асинхронного двигателя и генератора постоянного тока. Асинхронный двигатель при этом получает питание от специального вспомогательного синхронного генератора, расположенного на одном валу с главным гидрогенератором, а в некоторых случаях – с шин собственных нужд гидростанции или с выводов главного гидрогенератора. В последнем случае возбудительный агрегат подвержен влиянию аварий в энергосистеме (короткие замыкания и пр.), поэтому для повышения его надежности приводные асинхронные двигатели выполняют с повышенным максимальным моментом ( $M_m > 4M_n$ ), а иногда эти агрегаты снабжают также маховиками. В виде отдельных возбудительных агрегатов выполняются также агрегаты резервного возбуждения электростанций, служащие для резервирования собственных возбудителей-генераторов в случае аварий и неисправностей.

Турбогенераторы мощностью до  $P_n = 100$  тыс. кВт также обычно имеют возбудители в виде генераторов постоянного тока на своем валу. Однако при  $P_n \gg 100$  тыс. кВт мощность возбудителей становится настолько большой, что их выполнение при  $n_n = 3000 \dots 3600$  об/мин по

условиям коммутационной надежности становится затруднительным или даже невозможным. При этом применяются разные решения. Например, за границей широко используются возбудители с частотой вращения  $n_n = 750 \dots 1000$  об/мин, соединяемые с валом турбогенератора с помощью редуктора, а также возбудительные агрегаты с асинхронными двигателями, получающими питание с шин станции или с выводов генератора.

Применяются также некоторые разновидности систем возбуждения с машинами постоянного тока. Например, мощные возбудители крупных машин иногда имеют подвозбудители (рис. 3.23), которые служат для возбуждения возбудителя.

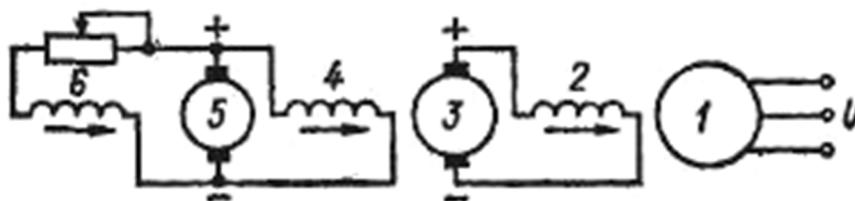


Рис. 3.23. Система возбуждения с возбудителем и подвозбудителем постоянного тока

Выше рассматривались независимые системы возбуждения, в которых вся энергия или ее часть для возбуждения синхронного генератора получалась от возбудителей в виде машин постоянного или переменного тока.

Наряду с ними применяются также системы самовозбуждения, в которых эта энергия вырабатывается в цепи якоря самого генератора. Особенно широко такие системы возбуждения применяются для генераторов малой и средней мощности, работающих в автономных системах (лесоразработки, транспортные установки и т.д.). В последние годы системы самовозбуждения все чаще начинают применять для крупных генераторов, работающих в мощных энергосистемах, и для синхронных двигателей. При этом обычно используется также принцип компаундирования.

Типичная схема компаундированного генератора с самовозбуждением изображена на рис. 3.24. Вторичная ЭДС параллельного трансформатора 3 пропорциональна  $U$ , а вторичная ЭДС последовательного трансформатора 5 пропорциональна  $I$ . Вторичные обмотки этих трансформаторов включены параллельно и ток возбуждения  $i_f \sim I_f$  зависит не только от величины тока нагрузки  $I$ , но и от его фазы, вследствие чего схема на рис. 3.24 называется схемой фазового ком-

паундирования. Это позволяет усиливать компаундирующее действие системы возбуждения при индуктивной нагрузке генератора, поскольку индуктивная составляющая тока нагрузки генератора вызывает наибольшее падение напряжения.

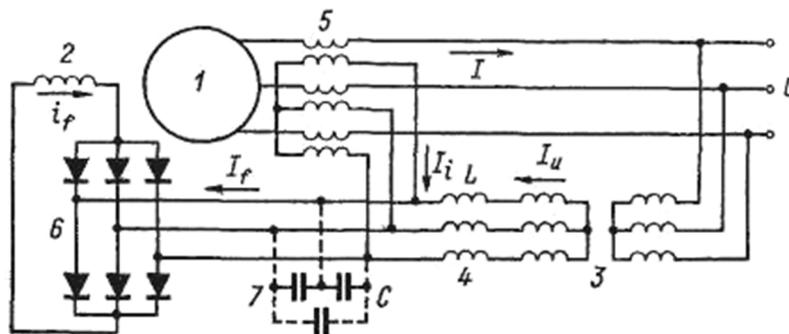


Рис.3.24. Схема компаундированного генератора с самовозбуждением

В схемах возбуждения вида (см. рис. 3.24), как правило, применяются полупроводниковые выпрямители. Благодаря своей простоте, надежности и хорошим регуливающим свойствам подобные схемы возбуждения получают все более широкое применение. Для защиты от перенапряжений при асинхронном ходе и других необычных условиях выпрямители обычно шунтируются высокоомными или нелинейными сопротивлениями.

### Вопросы для самопроверки

1. В каких режимах могут работать синхронные машины?
2. Что такое «турбогенераторы»?
3. Что такое «гидрогенераторы»?
4. Каковы воздушные зазоры в явнополюсных и неявнополюсных синхронных машинах?
5. Что такое «компенсатор» и для чего он предназначен?
6. Что такое «продольная и поперечная реакция якоря»?
7. Как записать формулы амплитуд синусоидальных пространственных волн магнитного поля?
8. Как записывается уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора?
9. Чему равны ЭДС реакции якоря и рассеяния явнополюсного синхронного генератора?
10. Как записывается уравнение напряжения неявнополюсного синхронного генератора?
11. Как построить векторную диаграмму явнополюсных синхронных генераторов при активно-индуктивной нагрузке?
12. Как построить векторную диаграмму явнополюсных синхронных генераторов при активно-емкостной нагрузке?

13. Как построить векторную диаграмму неявнополюсных синхронных генераторов?
14. Что такое «характеристика холостого хода турбо- и гидрогенераторов»?
15. Что представляет собой характеристика короткого замыкания синхронного генератора?
16. Что представляет собой внешняя характеристика синхронного генератора?
17. Что представляет собой регулировочная характеристика синхронного генератора?
18. Что представляет собой нагрузочная характеристика синхронного генератора?
19. Зачем включают на параллельную работу синхронные генераторы?
20. Какие условия включения синхронных генераторов на параллельную работу Вам известны?
21. Для чего нужны угловые характеристики активной и реактивной мощности явнополюсного генератора?
22. Что представляют собой V-образные характеристики синхронной машины?
23. Что представляет собой схема пуска синхронных двигателей?
24. Какие способы пуска синхронных двигателей Вам известны?
25. Что представляют собой рабочие характеристики явнополюсного синхронного двигателя?
26. Что такое «внезапное короткое замыкание синхронных машин»?

## **ВЫВОДЫ**

Представленный материал учебного пособия отражает основные вопросы по изучению машин переменного тока. Подробно рассмотрено устройство, принцип действия и основные электромагнитные процессы, происходящие в машинах при различных режимах их работы. Материал изложен таким образом, чтобы последовательно знакомиться с конструкциями машин, с устройством отдельных узлов и деталей, их функциями и различными особенностями.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данное пособие может быть рекомендовано для студентов как электротехнических, так и других специальностей для расширения кругозора в области электротехники. Учебное пособие связано с учебной программой, регламентированной определенным временем. Материал изложен таким образом, что позволяет, изучая различные вопросы, представить в итоге весь объем предмета, касающегося электрических машин переменного тока. Книга поможет студенту систематизировать материал, облегчая процесс познания и экономя затраченное время и энергию.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 2004. – 607 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – Издание 1-е. – СПб.:Издательский дом «Питер», 2010.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1, 2. – М.: Энергия, 1973.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
Раздел 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	5
Тема 1.1. Конструкции электрических машин переменного тока .....	5
1.1.1. Устройство электрических машин переменного тока .....	5
1.1.2. Вращающееся магнитное поле статора .....	9
1.1.3. Принцип действия электрических машин переменного тока .....	11
Тема 1.2. Обмотки машин переменного тока.....	12
1.2.1. Типы обмоток статора машин переменного тока, принцип выполнения.....	12
1.2.2. Примеры выполнения однослойной и двухслойной обмоток статора электрических машин переменного тока.....	14
Тема 1.3. ЭДС и н.с. обмоток статора.....	18
1.3.1. ЭДС проводника, катушки, фазы. ЭДС обмотки с полным и укороченным шагом. Обмоточные коэффициенты. Н.с. обмоток переменного тока .....	18
Вопросы для самопроверки .....	23
Раздел 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....	25
Тема 2.1. Конструкция асинхронных машин .....	25
2.1.1. Назначение, области применения, устройство и принцип действия асинхронных машин.....	25
2.1.2. Трехфазная асинхронная машина при неподвижном роторе. Холостой ход, короткое замыкание и работа машины при включении нагрузки.....	27
2.1.3. Уравнение токов и напряжений. Т-образная схема замещения. Векторные диаграммы .....	32
Тема 2.2. Трехфазная асинхронная машина при вращающемся роторе .....	33
2.2.1. Режимы работы, схемы замещения и векторная диаграмма асинхронного двигателя.....	33
2.2.2. Энергетические диаграммы асинхронных машин .....	38
2.2.3. Электромагнитный момент асинхронной машины .....	39
2.2.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя .....	40
2.2.5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя .....	43
Тема 2.3. Пуск трехфазных асинхронных двигателей.....	44
2.3.1. Требования, предъявляемые к пуску, способы пуска асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором.....	44
2.3.2. Понятие о самозапущке .....	48
Вопросы для самопроверки .....	48

Раздел 3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ .....	50
Тема 3.1. Устройство синхронных машин .....	50
3.1.1. Назначение, области применения, конструкция и принцип действия синхронных машин .....	50
3.1.2. Магнитное поле и параметры обмотки якоря синхронных машин ....	53
3.1.3. Продольная и поперечная реакции якоря и их магнитные поля .....	55
3.1.4. Уравнения напряжений синхронных генераторов при симметричной нагрузке .....	57
3.1.5. Основные виды векторных диаграмм напряжений неявнополюсных и явнополюсных синхронных генераторов без учета насыщения и с его учетом .....	58
3.1.6. Характеристики синхронных генераторов .....	60
3.1.7. Условия включения синхронных генераторов на параллельную работу .....	63
Тема 3.2. Режимы работы генераторов .....	66
3.2.1. Угловая характеристика активной мощности синхронных машин ....	66
3.2.2. <i>V</i> -образные характеристики. Рабочие характеристики .....	67
Тема 3.3. Синхронные двигатели .....	68
3.3.1. Назначение, особенности конструкции, способы пуска синхронных двигателей .....	68
3.3.2. Рабочие характеристики .....	69
3.3.3. Внезапное короткое замыкание синхронных машин .....	70
Тема 3.4. Системы возбуждения синхронных машин .....	72
3.4.1. Проблема регулирования возбуждения синхронных машин и требования к системам возбуждения .....	72
Вопросы для самопроверки .....	76
ВЫВОДЫ .....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	77

*Учебное издание*

*ГАЛЯН Эдуард Тихонович*

**Электрические машины переменного тока**

Редактор *Ю.А.Петропольская*

Верстка *И.О.Миняева*

Выпускающий редактор *Н.В.Беганова*

Подписано в печать 20.03.14

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Усл. п. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,63.

Тираж 50 экз. Рег. № 7/14

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8