



**А.Н. Ткачёв, В.В. Селунский**

## **Электрические машины**

*Учебное пособие*

Челябинск

2021

**УДК 621.313**  
**ББК 31.261**  
**Т 48**

Ткачёв, А.Н., Селунский, В.В.

Электрические машины: учебное пособие / А.Н. Ткачёв, В.В. Селунский. – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», 2021. – Режим доступа: <https://www.inueco.ru/gio/2021/978-5-6046573-3-1.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – 131 с.

Авторы: А.Н. Ткачёв – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии» ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»;

В.В. Селунский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии» ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», доцент кафедры «Электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Рецензенты:

Е.Н. Елишков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии» ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»;

И.Б. Царев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ»;

Ю.П. Ильин – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ».

ISBN 978-5-6046573-3-1

Содержание учебного пособия соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриат).

Порядок изложения материала подобен порядку, принятому в большинстве учебников и методических указаний по электрическим машинам для обучающихся электромеханических и электроэнергетических специальностей. Методическое пособие начинается с общих сведений по электрическим машинам, затем рассматриваются трансформаторы, электродвигатели постоянного тока, асинхронные, синхронные электродвигатели и специальные электрические машины.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, является единым для всех форм обучения.

### **Текстовое электронное издание**

#### **Минимальные системные требования:**

Компьютер: процессор AMD, Intel от 1ГГц, 100 Мб HDD, ОЗУ от 1 Гб,

Видеоадаптер от 1024 Мб, Сетевой адаптер 10/100/1000 Мб/с;

Клавиатура; Мышь; Монитор с разрешением от 800x600;

Операционная система: Windows XP SP3/Vista/7/8/10;

Программное обеспечение: Adobe Acrobat Reader, браузер Internet Explorer, Mozilla Firefox и др. Скорость подключения от 10 Мб/с.

© ОУ ВО «Южно-Уральский  
технологический университет», 2021  
© А.Н. Ткачёв, В.В. Селунский, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Однофазные трансформаторы .....	8
1.1 Назначение трансформаторов .....	8
1.2 Электромагнитная схема и принцип действия трансформатора .....	10
1.3 Устройство трансформаторов .....	13
1.4 Коэффициент полезного действия трансформатора .....	18
1.5 Контрольные вопросы .....	22
2. Трехфазные трансформаторы .....	24
2.1 Трехфазная группа .....	24
2.2 Схемы соединения обмоток .....	26
2.3 Особенности режима холостого хода .....	28
2.4 Группы соединения обмоток трансформаторов .....	31
2.4.1 Однофазные трансформаторы .....	31
2.4.2 Трехфазные трансформаторы .....	32
2.5 Параллельная работа трансформаторов .....	34
2.5.1 Условия включения на параллельную работу .....	34
2.5.2 Распределение нагрузок .....	36
2.6 Контрольные вопросы .....	38
3. Электрические машины постоянного тока .....	40
3.1 Назначение и принцип действия .....	40
3.2 Устройство электрической машины постоянного тока .....	43
3.3 Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока .....	46
3.4 Схемы включения электродвигателей постоянного тока .....	50
3.5 Регулирование скорости электродвигателей постоянного тока .....	54
3.6 Контрольные вопросы .....	57
4. Асинхронные электрические машины .....	59
4.1 Устройство трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором .....	61
4.2 Принцип действия асинхронного электродвигателя .....	63
4.3 Механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого двигателя .....	64
4.4 Схемы включения асинхронного двигателя в сеть .....	65
4.5 Способы ограничения пусковых токов асинхронных короткозамкнутых двигателей .....	68

4.6	Асинхронных электродвигателей серии 4А. ....	73
4.6.1	Основные характеристики серии 4А .....	73
4.6.2	Маркировка электродвигателей серии 4А .....	75
4.7	Основные сведения о трехфазных асинхронных двигателях новых серий 5А, 6А, АИР .....	76
4.8	Асинхронные генераторы. ....	83
4.9	Трехфазная асинхронная машина в режиме индукционного регулятора и регулируемого индукционного сопротивления .....	86
4.9.1	Режим индукционного регулятора. ....	86
4.9.2	Регулируемое индуктивное сопротивление. ....	88
4.10	Контрольные вопросы. ....	90
5.	Синхронные электрические машины .....	92
5.1	Назначение синхронных машин .....	93
5.2	Принцип действия синхронных машин .....	94
5.3	Конструктивная схема синхронной машины. ....	97
5.4	Питание обмотки возбуждения синхронной машины .....	100
5.5	Особенности конструкции синхронных машин большой мощности ...	102
5.6	Контрольные вопросы. ....	104
6.	Специальные электрические машины. ....	106
6.1	Волновые электродвигатели. ....	106
6.2	Электродвигатели с катящимся ротором .....	109
6.3	Линейные электродвигатели. ....	114
6.4	Шаговые электродвигатели .....	120
6.5	Контрольные вопросы. ....	128
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	130

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для помощи обучающимся в усвоении разделов трансформаторов и электрических машин дисциплины «Электрические машины».

Электрические машины являются основными элементами энергетических установок, различных машин, механизмов, технологического оборудования, современных средств транспорта, связи и др. Они вырабатывают электрическую энергию, осуществляют высокоэкономичное преобразование ее в механическую, выполняют разнообразные функции по преобразованию и усилению различных сигналов в системах автоматического регулирования и управления.

Электрические машины широко применяются во всех отраслях народного хозяйства. Их преимущества – высокий КПД, достигающий в мощных электрических машинах 95...99%, сравнительно малая масса и габаритные размеры, а также экономное использование материалов. Электрические машины могут быть выполнены на различные мощности (от долей ватта до сотен мегаватт), частоты вращения и напряжения. Они характеризуются высокой надежностью и долговечностью, простотой управления и обслуживания, удобством подвода и отвода энергии, небольшой стоимостью при массовом и крупносерийном производстве и являются экологически чистыми.

Теоретическим фундаментом для развития электромашиностроения послужили открытие *М. Фарадея* закона электромагнитной индукции и работы *Д. Максвелла* и *Э. Ленца*. На основании теоретических исследований этих ученых в середине XIX в. появились первые образцы электрических машин и трансформаторов. Большие заслуги в разработке первых образцов электрических машин и трансформаторов принадлежат выдающимся русским ученым и изобретателям, среди которых особенно можно выделить *Б. С. Якоби*, *П. Н. Яблочкова* и *М. О. Доливо-Добровольского*. В конце XIX и начале XX в. были известны практически все виды электрических машин и в основном создана их теория.

Двадцатое столетие характеризуется бурным развитием электромашиностроения: непрерывно возрастают как количество выпускаемых электрических машин, так и их размеры и мощность; совершенствуется

конструкция электрических машин; повышается их надежность и снижается масса, приходящаяся на единицу мощности. Развертывается массовое производство электрических микромашин для различных автоматических устройств и электробытовых приборов.

Эти успехи в электромашиностроении были бы немислимы без дальнейшего совершенствования методов расчета и уточнения теории электрических машин, особенно в области переходных процессов, возникающих при резких колебаниях нагрузки и в аварийных режимах.

Цель освоения дисциплины – формирование у обучающихся системы научно-практических знаний в области электромеханического преобразования энергии, осуществляемого при посредстве различных электрических машин, а также практического применения электрических машин и трансформаторов в области производства, передачи и распределения электроэнергии.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-3: Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин;

ОПК-3.5: Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и вращающихся электрических машин различных типов, использует знание их режимов работы и характеристик.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать:

– установившиеся режимы работы и характеристики трансформаторов и вращающихся электрических машин различных типов.

Уметь:

– анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и вращающихся электрических машин различных типов, использовать знание их режимов работы и характеристик.

Владеть:

– навыками анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и вращающихся электрических машин различных типов, использовать знание их режимов работы и характеристик.

Порядок изложения материала подобен порядку, принятому в большинстве учебников и методических указаний по электрическим машинам для обучающихся электромеханических и электроэнергетических

специальностей. Методическое пособие начинается с общих сведений по электрическим машинам, затем рассматриваются трансформаторы, электродвигатели постоянного тока, асинхронные, синхронные электродвигатели и специальные электрические машины.

По каждому типу электрических машин вначале показывается её назначение, устройство и особенности конструкции. Затем приводятся теоретические сведения, объясняющие принцип работы данной машины. Далее определяются условия эксплуатации, обслуживания и ремонта. В конце разделов и тем приводятся контрольные вопросы, позволяющие объективно оценить усвоение обучающимися предлагаемого материала. Пособие иллюстрировано большим количеством схем и рисунков.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриат), соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования (ФГОС ВО) по данному направлению подготовки и является единым для всех форм обучения.

## **1. Однофазные трансформаторы**

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или больше индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

### **1.1 Назначение трансформаторов**

С помощью трансформаторов выполняются следующие функции:

- 1) повышается или понижается напряжение;
- 2) изменяется число фаз;
- 3) преобразуется частота переменного тока.

### **Области применения трансформаторов**

Трансформаторы широко используют для следующих целей.

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

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

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

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

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

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

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

## 1.2 Электромагнитная схема и принцип действия трансформатора

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рисунок 1.1), размещенных на замкнутом магнитопроводе, выполненном из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины.

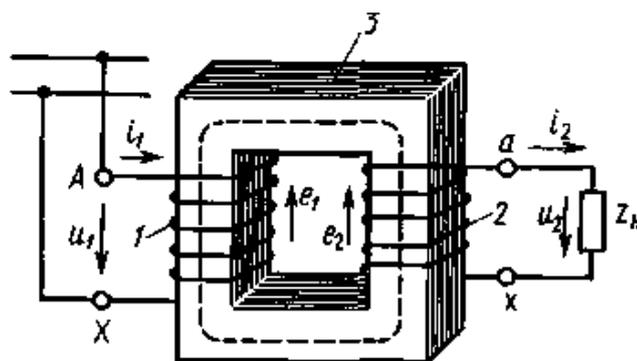


Рисунок 1.1 – Электромагнитная система однофазного трансформатора:  
1, 2 – первичная и вторичная обмотки; 3 – магнитопровод

Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока – электрической сети с напряжением  $u_1$ . К вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки  $Z_M$ .

Обмотку более высокого напряжения называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН), а низкого напряжения – *обмоткой низшего напряжения* (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами *A* и *X*; обмотки НН – буквами *a* и *x*.

## Принцип действия

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток  $i_1$  который создает переменный магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток  $\Phi$  индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС –  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону электромагнитной индукции, числами витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $\frac{d\Phi}{dt}$ .

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

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяются выражением (1.1):

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.1)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – действующие значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках, В;

$e_1$  и  $e_2$  – мгновенные значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках, В;

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

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.2)$$

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

## Коэффициент трансформации $k$

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

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.3)$$

Коэффициент  $k$  всегда больше единицы.

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

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}, \quad (1.4)$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в  $k$  раз по сравнению с первичным напряжением, ток  $i_2$  во вторичной обмотке соответственно уменьшается в  $k$  раз, по сравнению с первичным током  $i_1$ .

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

ЭДС  $E_1$  в первичной обмотке ток  $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$  весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать нагрузочное сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление  $R$  через трансформатор с коэффициентом трансформации  $k$ , то для цепи источника справедливо выражение (1.5):

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

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

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

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

### 1.3 Устройство трансформаторов

Основные конструктивные элементы трансформатора – магнитная система, обмотки, система изоляции, вводы.

#### Магнитная система

В зависимости от конфигурации магнитной системы трансформаторы подразделяют на *стержневые* (рисунок 1.2, а), *броневые* (рисунок 1.2, б) и *тороидальные* (рисунок 1.2, в). *Стержнем* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. *Ярмом* называют часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

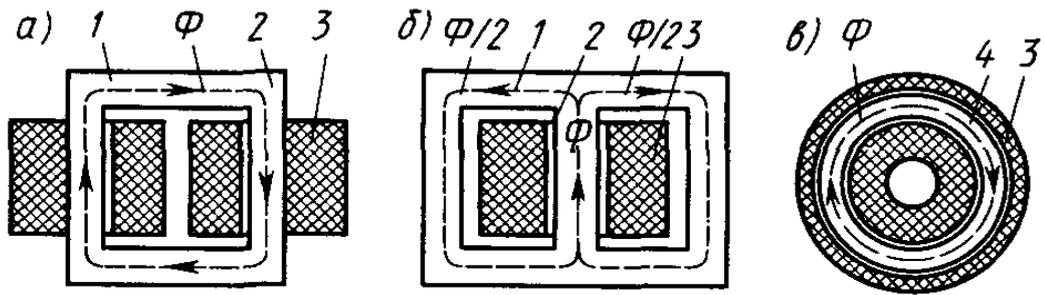


Рисунок 1.2 – Основные типы однофазных трансформаторов:  
Стержневой (а); броневой (б); тороидальный (в).

1 – ярмо; 2 – стержень; 3 – обмотки; 4 – тороидальный магнитопровод

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов (рисунок 1.3) собираются из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28...0,5 мм при частоте 50 Гц.

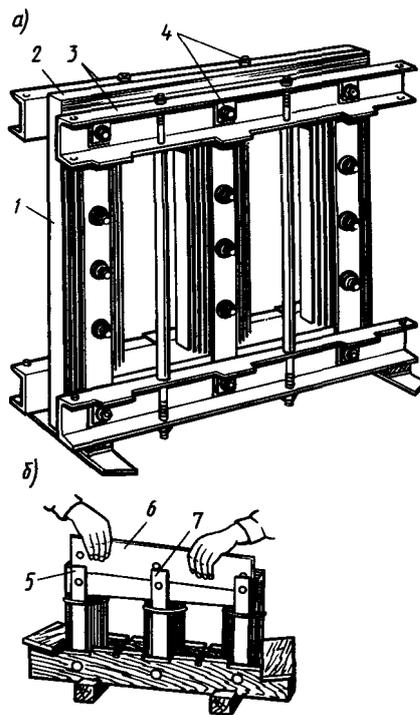


Рисунок 1.3 – Магнитная система силового трансформатора: а) общий вид:

1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – опорные балки; 4 – стяжные шпильки

По способу сборки различают стыковые и шихтованные магнитопроводы. В *стыковых магнитопроводах* стержни и ярма собирают и скрепляют отдельно, затем устанавливают встык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки.

В шихтованных магнитопроводах ярма и стержни собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка («впереплет»). Каждый слой состоит из двух-трех листов. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях располагают так, что листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место. Шихтованные магнитопроводы имеют значительно меньшее магнитное сопротивление, чем стыковые; поэтому последние (стыковые магнитопроводы) применяют сейчас только в микротрансформаторах.

### **Обмотки трансформаторов**

Совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС, наведенные в отдельных витках, называют обмоткой трансформатора. Обмотка состоит из проводников и изоляционных деталей, защищающих витки от электрического пробоя, препятствующих их смещению под действием электромагнитных сил и создающих каналы для охлаждения.

Обмотки трансформаторов различаются взаимным расположением на стержне, направлением и способом намотки, числом витков, классом напряжения, схемой соединения концов обмоток между собой. Начала и концы обмоток НН трехфазных трансформаторов обозначают буквами «а», «в», «с» (начала) и «х», «у», «z» (концы), обмоток ВН – соответственно «А», «В», «С» и «Х», «У», «Z».

Обмотки, располагающиеся на стержнях, делятся на два типа – концентрические и чередующиеся, в зависимости от их взаимного расположения (рисунок 1.4).

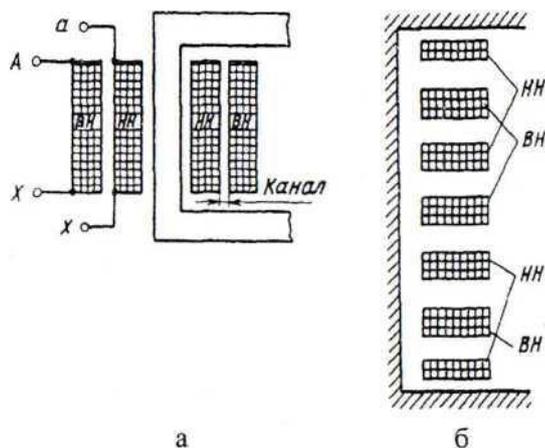


Рисунок 1.4 – Концентрические (а) и чередующиеся (б) обмотки

Концентрические обмотки изготавливаются в виде цилиндров, расположенных один в другом на стержне магнитопровода. Чередующиеся обмотки НН и ВН трансформатора располагают в осевом направлении на стержне магнитопровода. Чередующаяся обмотка обычно подразделяется на симметричные группы, каждая из которых состоит из одной или нескольких частей обмотки ВН и расположенных по обе стороны от них частей обмотки НН. Чередующиеся обмотки применяют только в специальных трансформаторах (например, электропечных, испытательных).

Наиболее распространены концентрические обмотки. Обычно первой на стержне располагают обмотку НН для уменьшения расходов на изоляцию обмотки относительно стержня. Если первой на стержне разместить обмотку высшего напряжения (ВН), то надо значительно увеличивать толщину изоляции между этой обмоткой и магнитопроводом из-за возможности электрического пробоя.

По конструкции и способу намотки обмотки делятся на три типа:

- 1) цилиндрические (одно- или многослойные);
- 2) винтовые;
- 3) катушечные.

Обмотку, состоящую из расположенного на цилиндрической поверхности слоя витков без промежутков, называют цилиндрической.

Винтовая состоит из ряда витков, следующих один за другим по винтовой линии с каналами между ними.

Группу последовательно соединенных витков, наматываемых в виде плоской спирали и отделенную от других таких же групп, называют катушкой,

а обмотку, состоящую из ряда катушек, расположенных в осевом направлении, катушечной. Катушечные обмотки могут быть дисковыми и непрерывными. Дисковая обмотка набирается из отдельно намотанных катушек, которые соединяют друг с другом электрической пайкой или другим способом.

Непрерывная обмотка наматывается без разрывов, т. е. переход из одной катушки в другую производится без паяк. Для этого при намотке перекладывают витки каждой нечетной катушки так, чтобы один переход (из катушки в катушку) был снаружи обмотки, а другой – внутри.

### **Вводы трансформатора**

Для вывода наружу концов от обмоток в трансформаторах, охлаждаемых маслом или негорючим жидким диэлектриком, используют проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или на стенке бака. Проходной изолятор вместе с токоведущим стержнем и крепежными деталями называют *вводом*.

Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность (рисунок 1.5, а), а вводы трансформаторов, предназначенных для наружной установки, снабжают ребрами (рисунок 1.5, б), число которых зависит от напряжения соответствующей обмотки трансформатора. При наличии ребер увеличивается расстояние между токоведущим стержнем и корпусом по поверхности изолятора и уменьшается вероятность поверхностного разряда во время дождя, при попадании на изолятор листьев и т. п. Крепление ввода к крышке бака и токоведущего стержня в изоляторе должно быть прочным, а применяемые уплотнения – маслостойкими.

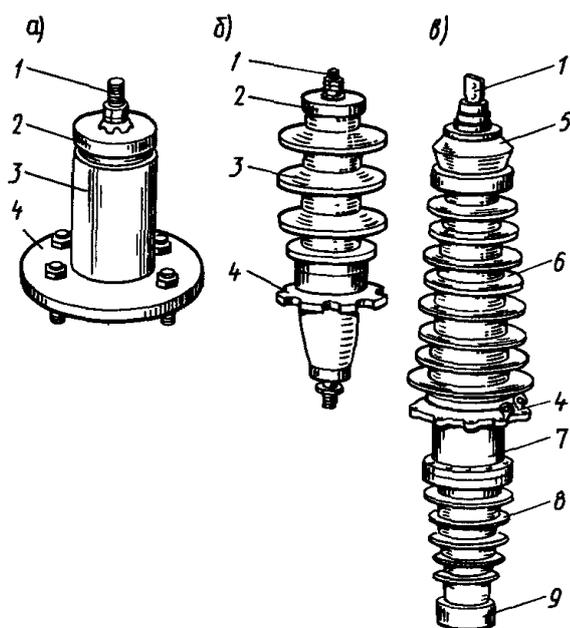


Рисунок 1.5 – Вводы трансформаторов для внутренней установки (а); для наружной установки (б); маслонаполненные для напряжения ПOkВ (в):

1 – токоведущий стержень; 2 – колпак; 3 – фарфоровый изолятор; 4 – металлический фланец; 5 – маслорасширитель с масляным затвором; 6 – верхняя фарфоровая покрывка; 7 – соединительная чугунная втулка; 8 – нижняя фарфоровая покрывка; 9 – алюминиевый экран

При напряжениях свыше ПOkВ вводы часто выполняют составными: из двух фарфоровых изоляторов (рисунок 1.5, в). Внутри такой ввод заполняют маслом, не сообщаемым с маслом, находящимся в баке трансформатора. Токоведущий кабель проходит внутри металлической трубы, которую изолируют кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми цилиндрами с установленными в них металлическими обкладками из фольги (для выравнивания электрического поля).

#### 1.4 Коэффициент полезного действия трансформатора

При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают электрические потери мощности в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток  $\Delta P_{эл1}$  и  $\Delta P_{эл2}$ , а также магнитные потери в стали магнитопровода  $\Delta P_m$  (от вихревых токов и гистерезиса).

## Энергетическая диаграмма

Процесс преобразования энергии в трансформаторе характеризует энергетическая диаграмма (рисунок 1.6).

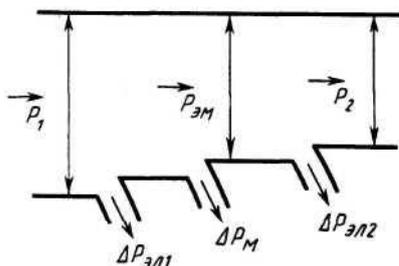


Рисунок 1.6 – Энергетическая диаграмма трансформатора

В соответствии с этой диаграммой мощность, отдаваемая трансформатором нагрузке, равна выражению:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_m, \quad (1.6)$$

где  $P_1$  – мощность, поступающая из сети в первичную обмотку, Вт;

$\Delta P_{эл1}$  и  $\Delta P_{эл2}$  – электрические потери мощности в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмотки, Вт;

$\Delta P_m$  – магнитные потери в стали магнитопровода (от вихревых токов и гистерезиса), Вт.

Мощность  $P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_m$ , поступающую во вторичную обмотку, называют *внутренней электромагнитной мощностью трансформатора*. Она определяет габаритные размеры и массу трансформатора.

## Коэффициент полезного действия

*Коэффициентом полезного действия трансформатора* называют отношение отдаваемой мощности  $P_2$  к мощности  $P_1$  (мощность, потребляемая из сети):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cos\varphi_1}, \quad (1.7)$$

или

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}, \quad (1.7.1)$$

где  $\Delta P$  – суммарные потери в трансформаторе, Вт.

Высокие значения КПД трансформаторов не позволяют определять его с достаточной степенью точности путем непосредственного измерения мощностей  $P_1$  и  $P_2$ , поэтому его вычисляют *косвенным методом* по значению потерь мощности.

С учетом энергетической диаграммы формулу (1.7) можно представить в виде формулы (1.8).

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{м}}} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{м}}}{P_2 + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{м}}}, \quad (1.8)$$

Согласно требованиям ГОСТа, потери мощности в трансформаторе определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. Получаемый при этом результат имеет высокую точность, так как при указанных опытах трансформатор не отдает мощность нагрузке. Следовательно, вся мощность, поступающая в первичную обмотку, расходуется на компенсацию имеющихся в нем потерь.

При опыте холостого хода ток  $I_0$  невелик и электрическими потерями мощности в первичной обмотке можно пренебречь. В то же время магнитный поток практически равен потоку при нагрузке, т. к. его значение определяется приложенным к трансформатору напряжением. Магнитные потери в стали пропорциональны квадрату значения магнитного потока. Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что *магнитные потери в стали магнитопровода равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении*, т. е.

$$\Delta P_{\text{м}} \approx P_0. \quad (1.9)$$

За расчетную температуру обмоток – условную температуру, к которой должны быть отнесены потери мощности  $\Delta P_{\text{эл}}$  и напряжения  $u_{\text{к}}$ , принимают: для масляных и сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В температуру  $75^\circ \text{С}$ ; для трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости F, H – температуру  $115^\circ \text{С}$ .

Величину  $\Delta P_{\text{эл.ном}} \approx I_{2\text{ном}}^2 \cdot R_{\text{к}} \approx I_{\text{ном}}^2 \cdot R_{\text{к}}$  можно с достаточной степенью точности принять равной мощности  $P_{\text{к}}$ , потребляемой трансформатором при опыте короткого замыкания, который проводится при номинальном токе нагрузке. При этом магнитные потери в стали  $\Delta P_{\text{м}}$  весьма малы по сравнению с потерями  $\Delta P_{\text{эл}}$  из-за сильного уменьшения напряжения  $U_1$  а следовательно, и магнитного потока трансформатора и ими можно пренебречь. Таким образом,

$$\Delta P_{\text{эл}} = \beta^2 \cdot P_{\text{к}}, \quad (1.10)$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$  – коэффициент нагрузки.

Полные потери:

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{к}}, \quad (1.11)$$

Подставляя полученные значения  $P$  в формулу (1.8) и учитывая, что  $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \approx \beta \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2$ , находим:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 \cdot P_{\text{к}} + P_0}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot P_{\text{к}} + P_0}, \quad (1.12)$$

Эта формула рекомендуется ГОСТом для определения КПД трансформатора. Значения  $P_0$  и  $P_{\text{к}}$  для силовых трансформаторов приведены в соответствующих стандартах и каталогах.

### Зависимость КПД от нагрузки

По формуле (12) можно построить зависимость КПД от нагрузки (рисунок 1.7, а). При  $\beta = 0$  полезная мощность и КПД равны нулю. С увеличением отдаваемой мощности КПД увеличивается, так как в энергетическом балансе уменьшается удельное значение магнитных потерь в стали, имеющих постоянное значение. При некотором значении ( $\beta_{\text{опт}}$  кривая КПД достигает максимума, после чего начинает уменьшаться с увеличением нагрузки. Причиной этого является сильное увеличение электрических потерь в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, т. е. пропорционально  $\beta^2$ , в то время как полезная мощность  $P_2$  возрастает пропорционально коэффициенту нагрузки  $\beta$ .

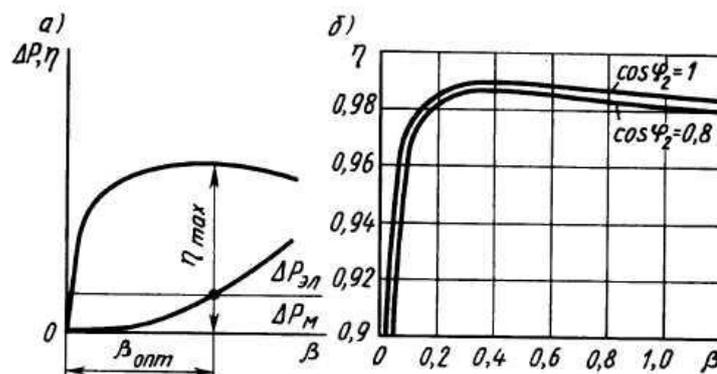


Рисунок 1.7 – Зависимости КПД трансформатора  $\eta$  от нагрузки  $\beta$

Максимальное значение КПД в трансформаторах большой мощности достигает весьма высоких пределов (0,98...0,99). Оптимальный коэффициент нагрузки  $\beta_{\text{опт}}$ , при котором КПД имеет максимальное значение, можно определить, взяв первую производную  $d\eta/d\beta$  по формуле (1.12) и приравняв ее нулю. При этом:

$$\beta_{\text{опт}}^2 \cdot P_{\text{к}} = P_0 \text{ или } \Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{м}}. \quad (1.13)$$

Следовательно, КПД *имеет максимум при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали.* Это условие (равенство постоянных и переменных потерь) приближенно справедливо и для других типов электрических машин. Для серийных силовых трансформаторов

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к}}}} \approx \sqrt{0,2...0,25} \approx 0,45...0,5. \quad (1.14)$$

Указанные значения  $\beta_{\text{опт}}$  получены при проектировании трансформаторов на минимум приведенных затрат (на их приобретение и эксплуатацию). Наиболее вероятная нагрузка трансформатора соответствует  $\beta = 0,5...0,7$ .

В трансформаторах максимум КПД выражен сравнительно слабо, т. е. он сохраняет высокое значение в довольно широком диапазоне изменения нагрузки ( $0,4 < \beta < 1,5$ ). При уменьшении  $\cos \varphi_2$  КПД снижается (рисунок 1.7, б), так как возрастают токи  $I_2$  и  $I_1$ , при которых трансформатор имеет заданную мощность  $P_2$ .

## 1.5 Контрольные вопросы

1. Трансформаторы. Определение и назначение.
2. Области применения трансформаторов различных типов.
3. Какие трансформаторы относятся к «силовым» трансформаторам?
4. Привести и объяснить электромагнитную схему однофазного трансформатора.
5. Обозначение и маркировка обмоток высшего и низшего напряжения трансформаторов.
6. Принцип действия трансформаторов.
7. Коэффициент трансформации трансформаторов.

8. Конструкция и области применения трехобмоточных трансформаторов.
9. Почему трансформаторы не могут работать в сетях постоянного тока?
10. Объяснить способность трансформатора преобразовывать нагрузочное сопротивление, как и для чего оно используется?
11. Магнитная система трансформатора, назначение и устройство.
12. Обмотки трансформатора, назначение и устройство.
13. Вводы трансформаторов различных типов, назначение и устройство.
14. Основные потери мощности в трансформаторе, где они возникают и от чего они зависят?
15. Энергетическая диаграмма трансформатора.
16. КПД трансформатора, основные формулы и зависимости.
17. Какая температура принимается за расчетную у трансформаторов различных типов?
18. Что такое коэффициент загрузки трансформатора и как он определяется?
19. Как КПД трансформатора зависит от загрузки трансформатора?
20. Какому значению равняется максимальное значение КПД трансформаторов?
21. При каком значении коэффициента загрузки наблюдается максимум КПД трансформатора?

## 2. Трехфазные трансформаторы

Преобразование трехфазного тока можно осуществлять с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или посредством одного трехстержневого трехфазного трансформатора. Обычно используют трехстержневые трансформаторы. Только при очень больших мощностях (более 10 МВА в фазе) в ряде случаев применяют группы из трех однофазных трансформаторов, которые имеют существенные преимущества при транспортировке и монтаже (мощные высоковольтные трехфазные трансформаторы нетранспортабельны).

### 2.1 Трехфазная группа

На рисунке 2.1 показано включение трех однофазных трансформаторов в трехфазную сеть. Первичные обмотки трансформаторов включены звездой и, следовательно, обмотка каждого трансформатора включена на фазовое напряжение.

Если имеется нулевой провод, то работа трансформатора в трехфазной группе ничем не отличается от рассмотренной выше работы однофазного трансформатора. Поэтому можно использовать векторную диаграмму и все уравнения однофазного трансформатора.

При симметричной нагрузке необходимость в нулевом проводе отпадает. В этом случае также можно рассматривать работу только одной фазы, т. е. однофазный трансформатор.

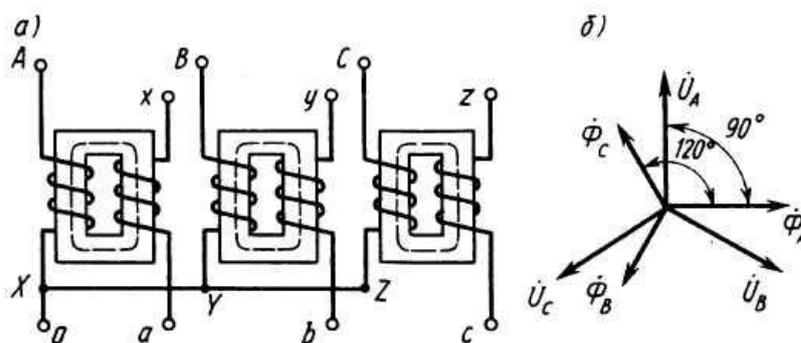


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема трансформаторной группы из трех однофазных трансформаторов (а) и векторная диаграмма (б) потоков и напряжений в отдельных фазах

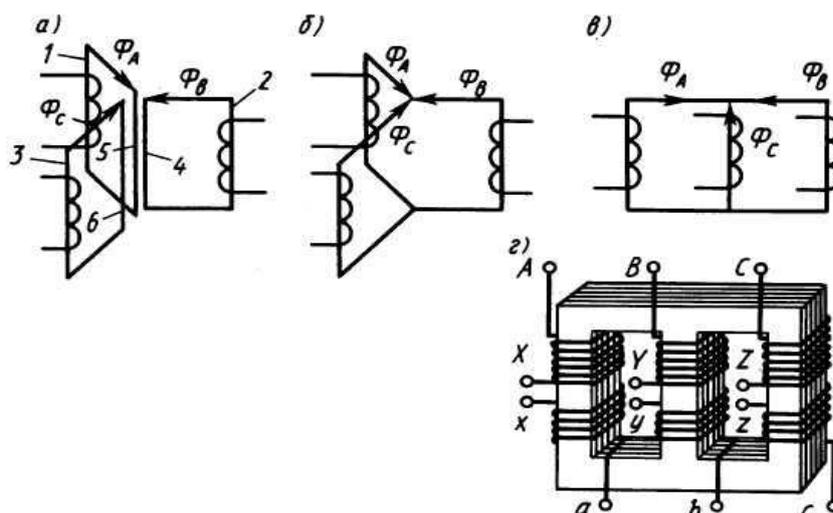


Рисунок 2.2 – Схемы, характеризующие образование трехстержневого трансформатора из трех однофазных

Трехстержневой трехфазный трансформатор. Для объяснения принципа действия трехстержневого трехфазного трансформатора представим его в виде трех однофазных трансформаторов (рисунок 2.2, а), у которых катушки размещены на стержнях 1, 2 и 3, а ярма 4, 5 и 6 конструктивно объединены в одно общее ярмо. Через это ярмо проходит суммарный поток  $\dot{\Phi}_{\text{рез}} = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C$ . Однако если на первичные обмотки этих трансформаторов подать систему симметричных трехфазных напряжений (рисунок 2.2, б), то сумма  $\dot{\Phi}_A$ ,  $\dot{\Phi}_B$  и  $\dot{\Phi}_C$  в любой момент времени будет равна нулю. Следовательно, трехфазный трансформатор можно выполнить без объединенного ярма для замыкания потоков отдельных фаз. Полученный таким образом симметричный трехстержневой трансформатор (рисунок 2.2, б) можно сделать более компактным, несколько уменьшив длину магнитной цепи, по которой замыкается поток  $\dot{\Phi}_C$ , исключив из нее два ярма (рисунок 2.2, в). Возникшая при этом небольшая магнитная несимметрия контуров, по которым проходят потоки отдельных фаз, вызывает несимметрию токов холостого хода этих фаз. Однако при нагрузке ток холостого хода оказывает весьма малое влияние на токи в первичной и вторичной обмотках. В результате получаем трехстержневой трансформатор (рисунок 2.2, г), в котором первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне. При симметричном питающем напряжении и равномерной нагрузке (являющейся

наиболее распространенной) все фазы трехфазного трансформатора находятся практически в одинаковых условиях. Поэтому выведенные выше формулы и схемы замещения для однофазного трансформатора справедливы и для трехфазного трансформатора. Однако в режиме холостого хода, на который большое влияние оказывает схема соединения обмоток, имеются особенности.

## 2.2 Схемы соединения обмоток

Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам «звезда», «звезда с выведенной нулевой точкой», «треугольник» или «зигзаг с выведенной нулевой точкой». Обычно обмотку высшего напряжения соединяют по схеме «звезда», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе. Схему соединения «звезда» обозначают знаком  $Y$ , русской буквой  $У$  или латинской  $Y$ ; схему «треугольник» – знаком  $\Delta$  или русской буквой  $Д$ ; схему «зигзаг» – латинской буквой  $Z$ . Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у буквенного обозначения ставят индекс «н». Начала и концы обмотки ВН обозначают  $A, B, C$  и  $X, Y, Z$ ; для обмотки НН –  $a, b, c$  и  $x, y, z$ ; вывод нулевой точки –  $O$  (для ВН) и  $o$  (для НН). Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов, применяемых в России, приведены в таблице 1.

Трехфазные трансформаторы характеризуются фазным и линейными коэффициентами трансформации.

Фазный коэффициент равен отношению числа витков  $w_{ВН}$  фазы обмотки ВН к числу витков  $w_{НН}$  фазы обмотки НН или отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}} = \frac{U_{\text{оф.ВН}}}{U_{\text{оф.НН}}}. \quad (2.1)$$

Линейный коэффициент равен отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$k_{\text{л}} = \frac{U_{\text{ол.ВН}}}{U_{\text{ол.НН}}}. \quad (2.2)$$

Таблица 1 – Схемы соединения обмоток трансформаторов

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y/Y_H-0$
				$Y/\Delta-11$
				$Y_H/\Delta-11$
				$Y/Z_H-11$
				$\Delta/Y_H-11$

При соединении обмотки трансформатора по схеме  $Z_H$  (рисунок 2.3, а) каждая фаза состоит из двух одинаковых катушек, размещенных на разных стержнях и соединенных между собой встречно так, чтобы векторы индуцируемых в них ЭДС вычитались (рисунок 2.3, б).

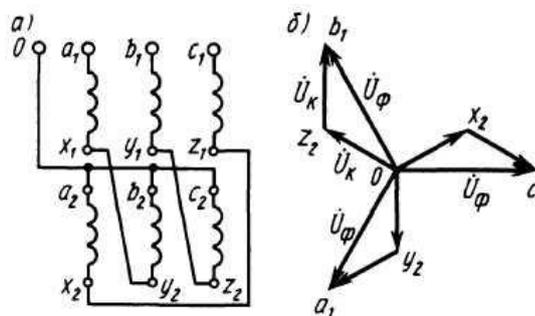


Рисунок 2.3 – Схема «зигзаг» (а) и её векторная диаграмма (б)

Схема  $Z_H$  неэкономична, так как при одном и том же фазном напряжении  $U_\phi$  она требует большего расхода обмоточного провода, чем при схемах  $Y$  и  $\Delta$ .

Это объясняется тем, что в рассматриваемой схеме фазное напряжение  $U_\phi$  в  $\sqrt{3}$  раз больше напряжения  $U_\phi$  на каждой катушке, а при размещении двух катушек на одном стержне и их последовательном соединении  $U_\phi = 2U_k$ . Поэтому обычно схему  $Z_n$  не применяют, ее используют только в трансформаторах для выпрямителей.

### 2.3 Особенности режима холостого хода

В однофазном трансформаторе из-за насыщения магнитной цепи ток холостого хода при синусоидальном магнитном потоке оказывается несинусоидальным, т. е. возникает ряд высших гармонических:

$$i_0 \approx I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots \quad (2.3)$$

В трехфазном трансформаторе выражения для тока холостого хода в фазах имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{0A} &\approx I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots; \\ i_{0B} &\approx I_{01m} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + I_{03m} \sin 3 \left( \omega t - \frac{\pi}{3} \right) + \dots; \\ i_{0C} &\approx I_{01m} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + I_{03m} \sin 3 \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \dots \end{aligned} \right\} (2.4)$$

Третьи гармонические токов во всех фазах совпадают по времени:  $i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = i_{03m} \sin 3\omega t$ . При некоторых схемах включения обмоток это оказывает влияние на форму кривой магнитного потока трансформатора, а следовательно, и на форму кривой ЭДС.

При соединении обмоток трансформатора по схеме  $Y_n/Y$  третьи гармонические фазных токов замыкаются по нулевому проводу. При этом ток холостого хода  $i_0$  в каждой фазе содержит третью гармоническую  $i_{03}$ , а поток  $\Phi$  является синусоидальным, как в однофазном трансформаторе (рисунок 2.4, а). При соединении обмоток по схеме  $Y/Y$  путь для замыкания третьих гармонических фазных токов отсутствует и ток холостого хода оказывается синусоидальным. В результате этого кривая магнитного потока  $\Phi$  искажается (рисунок 2.4, б) и приобретает плоскую форму; при этом поток содержит третью гармоническую  $\Phi_3$ . Несинусоидальными являются и ЭДС, индуцированные в фазах, – они имеют заостренную форму. Построение кривой

изменения магнитного потока  $\Phi$  при синусоидальном изменении тока  $i_\mu$  (рисунок 2.4, в).

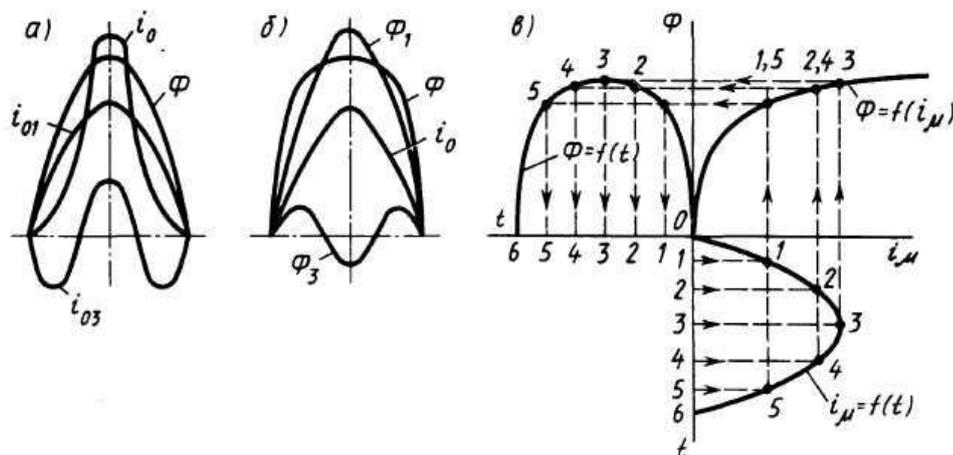


Рисунок 2.4 – Кривые потока  $\Phi$  и тока холостого хода  $i_0$  при соединении первичной обмотки трехфазного трансформатора по схемам  $Y/Y$  и  $Y_n/Y$  (а – в)

Отметим, что в трехстержневом трансформаторе возникающие третьи гармонические потоков фаз  $\Phi_{A3}$ ,  $\Phi_{B3}$ ,  $\Phi_{C3}$  не могут замыкаться по стальному магнитопроводу, т. к. они аналогично третьим гармоническим токам совпадают по времени и, следовательно, в любой момент времени направлены по контуру магнитопровода встречно (рисунок 2.5, а). Поэтому эти гармонические выходят из стержней и замыкаются от ярма к ярму через воздух, т. е. по пути, имеющему большое магнитное сопротивление. Вследствие этого третьи гармонические потоков малы и потоки фаз  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$  в трехстержневом трансформаторе мало отличаются от синусоидальных.

Обычно амплитуды потоков фаз отличаются на 5... 10% от амплитуд их первых гармонических, что вызывает соответствующее небольшое искажение формы кривой фазных ЭДС. Еще одним отрицательным последствием возникновения третьих гармонических потоков фаз является увеличение потерь мощности. Эти потоки в трехстержневом трансформаторе замыкаются главным образом по стенкам бака, стяжным болтам и другим металлическим конструктивным деталям, окружающим магнитопровод (рисунок 2.5, б). При этом в них индуцируются вихревые токи, создающие дополнительные потери мощности и местный нагрев соответствующих деталей. Дополнительные потери значительны только в трансформаторах мощностью свыше 1000 кВА. В трансформаторах меньшей мощности их практически можно не учитывать.

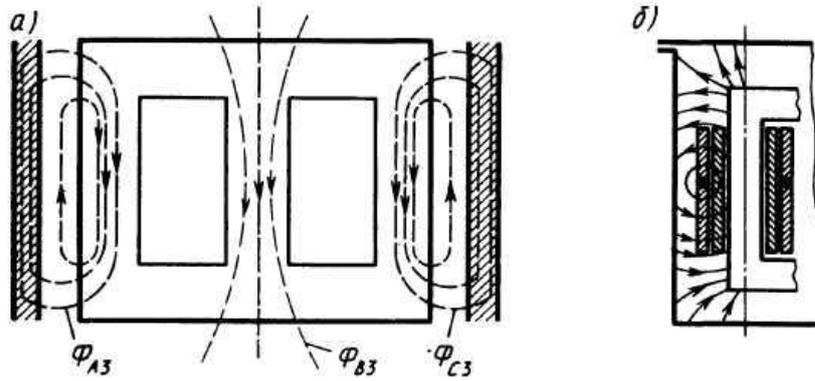


Рисунок 2.5 – Пути прохождения третьих гармонических потоков стержней в трехфазном трансформаторе

В группах, состоящих из трех однофазных трансформаторов, третьи гармонические потоки фаз могут замыкаться по тому же пути, что и основная гармоническая, и вследствие этого достигают недопустимой величины. Поэтому для таких групп схему  $Y/Y$  не применяют.

Если одна из обмоток трансформатора соединена треугольником, то фазные потоки трансформатора становятся практически синусоидальными. Это объясняется тем, что в обмотке, соединенной треугольником, совпадающие по времени третьи гармонические ЭДС вызывают ток тройной частоты  $I_{23}$ , который циркулирует по обмоткам фазы (рисунок 2.6, а) и уменьшает третьи гармонические потоки. Упрощенно можно считать, что результирующий поток тройной частоты является суммой третьих гармонических потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками  $\dot{\Phi}_{рез3} = \dot{\Phi}_{13} + \dot{\Phi}_{23}$ .

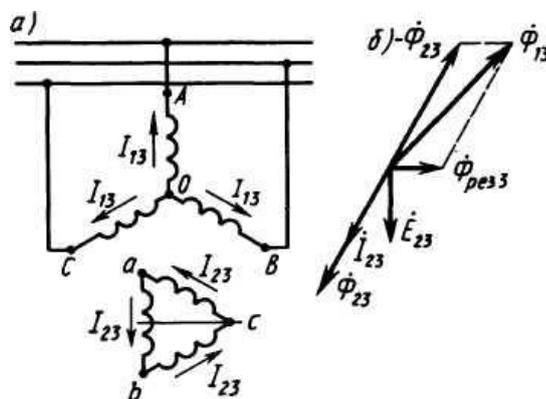


Рисунок 2.6 – Схема прохождения третьих гармонических тока по фазам трансформатора (а) и векторная диаграмма (б) созданных ими потоков и ЭДС

Из векторной диаграммы (рисунок 2.6, б) следует, что результирующий поток  $\dot{\Phi}_{рез3}$  незначителен, т. к. для токов тройной частоты обмотка, соединенная треугольником, является короткозамкнутой и даже небольшая ЭДС  $\dot{E}_{23}$  вызывает значительный ток  $\dot{I}_{23}$ .

Таким образом, *обмотки трехстержневых трансформаторов лучше всего соединять по схемам  $Y/\Delta$  и  $Y_n/\Delta$* , которые позволяют практически устранить третьи гармонические в кривых потока и в ЭДС. Силовые трансформаторы средней мощности при вторичных напряжениях не более 400 В можно соединять и по схемам  $Y/Y_n$  и  $\Delta/Y_n$ , т. к. это позволяет получать от вторичной обмотки не только линейное напряжение 380 В, используемое в силовых цепях, но и фазное напряжение 220 В, требуемое для осветительных установок.

## 2.4 Группы соединения обмоток трансформаторов

Трансформаторы делят на группы в зависимости от сдвига по фазе между линейными напряжениями, измеренными на одноименных зажимах.

### 2.4.1 Однофазные трансформаторы

В однофазных трансформаторах напряжения первичной и вторичной обмоток могут совпадать по фазе или быть сдвинутыми на  $180^\circ$ . Это зависит от направления намотки обмоток и обозначения выводов, т. е. от маркировки. Если обмотки трансформатора намотаны в одну сторону и имеют симметричную маркировку выводов (рисунок 2.7, а), то индуцированные в них ЭДС имеют одинаковое направление. Следовательно, совпадают по фазе и напряжения холостого хода\*. При изменении маркировки выводов одной из фаз или направления намотки одной фазы (рисунок 2.7, б) получается сдвиг по фазе между векторами первичного и вторичного напряжения, равный  $180^\circ$ .

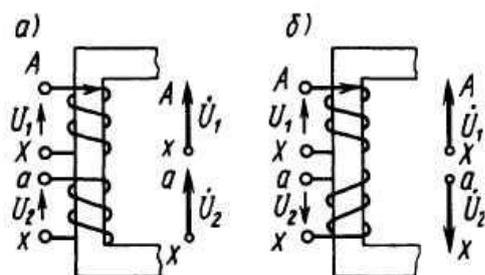


Рисунок 2.7 – Группы соединений обмоток однофазного трансформатора

Группы соединений обозначают целыми числами от 0 до 11. Номер группы определяют величиной угла, на который вектор линейного напряжения обмотки НН отстает от вектора линейного напряжения обмотки ВН. Для определения номера группы этот угол следует разделить на  $30^\circ$ .

Для однофазных трансформаторов возможны только две группы соединений: нулевая (рисунок 2.7, а) и шестая (рисунок 2.7, б). Однако **отечественная промышленность выпускает однофазные трансформаторы только нулевой группы**, у которых напряжения первичной и вторичной обмоток совпадают по фазе.

### 2.4.2 Трехфазные трансформаторы

В них фазные ЭДС двух обмоток, расположенных на одном и том же стержне, могут так же, как и в однофазных трансформаторах, совпадать или быть противоположными по фазе. В зависимости от схемы соединения обмоток (Y и  $\Delta$ ) и порядка соединения их начал и концов получаются различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями. Для примера на рисунке 2.8 показаны схемы соединения обмоток Y/Y и соответствующие векторные диаграммы для нулевой (а) и шестой (б) групп; на рисунке 2.9 показаны схемы соединения обмоток Y/ $\Delta$  и соответствующие векторные диаграммы для одиннадцатой (а) и пятой (б) групп.

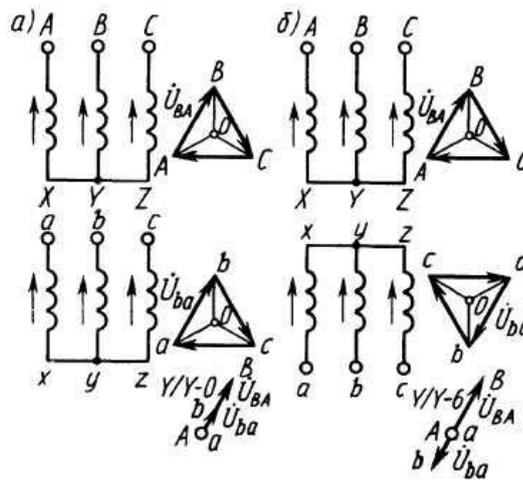


Рисунок 2.8 – Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Y

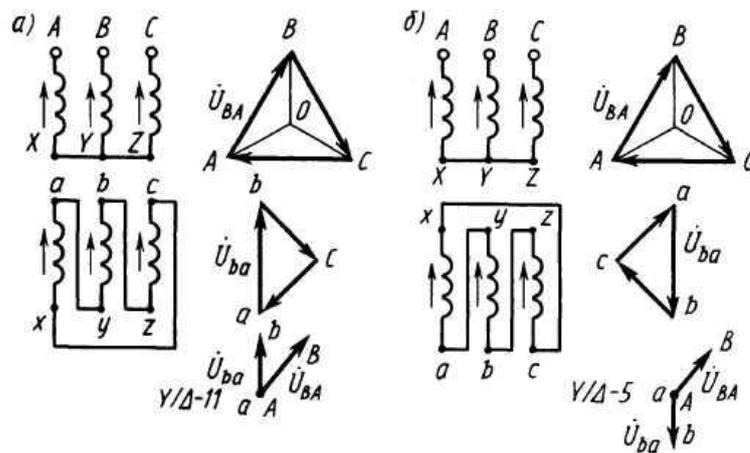


Рисунок 2.9 – Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Delta

Изменяя маркировку выводов обмоток можно получить и другие группы соединений: при схеме Y/Y – четные: вторую, четвертую и т. д., при схеме Y/Delta – нечетные: первую, третью и др. Согласно ГОСТу, **отечественная промышленность выпускает трехфазные силовые трансформаторы только двух групп: нулевой и одиннадцатой** (см. таблицу 1). Это облегчает практическое включение трансформаторов на параллельную работу.

При соединении обмотки НН по схеме  $Z_{\text{нн}}$ , а обмотки ВН по схеме Y (рисунок 2.10) фазные напряжения обмотки НН сдвинуты относительно соответствующих фазных напряжений обмотки ВН (например,  $\dot{U}_{a10}$  относительно  $\dot{U}_{A0}$ ) на угол  $330^\circ$ , т. е. при таком соединении имеем

одиннадцатую группу. Это объясняется тем, что между векторами линейных напряжений (не показанных на рисунке 2.10) имеется такой же угол.

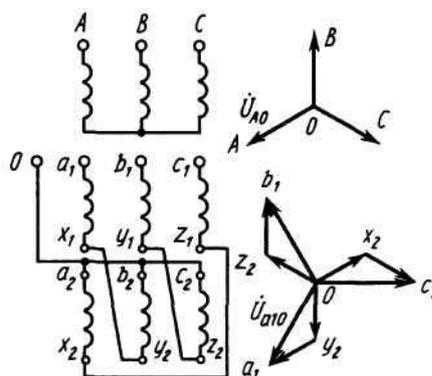


Рисунок 2.10 – Группа соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме  $Y/Z_n$

## 2.5 Параллельная работа трансформаторов

В большинстве случаев при значительной мощности электрической установки целесообразно иметь не один, а несколько трансформаторов меньшей мощности, включенных параллельно на общую нагрузку. Такое дробление общей трансформаторной мощности позволяет лучше решать проблему энергоснабжения потребителей, отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки, проще проводить профилактический ремонт трансформаторов и пр.

### 2.5.1 Условия включения на параллельную работу

Для включения трансформаторов Тр1 и Тр2 на параллельную работу (рисунок 2.11, а) требуется, чтобы выполнялись следующие требования:

- при холостом ходе трансформаторов в их обмотках не возникали уравнительные токи;
- нагрузка распределялась между обоими трансформаторами в соответствии с их номинальной мощностью.

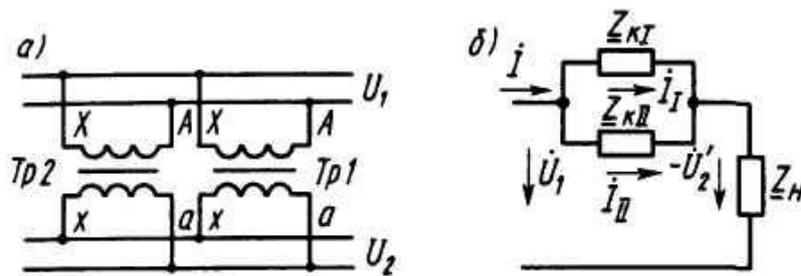


Рисунок 2.11 – Схема включения трансформаторов при параллельной работе (а) и схема замещения их (б)

Чтобы выполнялись оба требования необходимо соблюдать определенные условия.

При неравенстве ЭДС  $E_{20I}$  и  $E_{20II}$  параллельно работающих трансформаторов (их вторичных напряжений при холостом ходе – рисунок 2.12) возникает уравнительный ток. Этот ток вызывает циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому, а, следовательно, неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь и нагрева. Уравнительный ток определяется по формуле 2.5:

$$\dot{I}_{ур} = \frac{(\dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II})}{(Z_{кI} + Z_{кII})}. \quad (2.5)$$

1. Первым необходимым условием для включения трансформаторов на параллельную работу, как следует из формулы (2.5), является **равенство их вторичных ЭДС**, т. е. вторичных напряжений холостого хода. Предполагается, что первичные напряжения у них одинаковы, т. е. что трансформаторы подключены к одной и той же первичной сети. При этом трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации. На практике допускается параллельная работа силовых трансформаторов, имеющих различие в коэффициентах трансформации не более 0,5%, а для трансформаторов с  $k > 3$  – не более 1%. При таком различии в коэффициентах трансформации разность вторичных ЭДС  $\Delta \dot{E}$  (рисунок 2.12, а) небольшая и уравнительный ток незначительный.

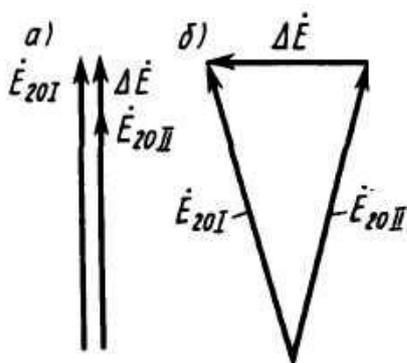


Рисунок 2.12 – Векторные диаграммы напряжения при параллельной работе трансформаторов одной группы с различными  $k$  (а) и разных типов с одинаковыми  $k$  (б)

2. Вторым необходимым условием является совпадение по фазе ЭДС  $\dot{E}_{20I}$  и  $\dot{E}_{20II}$ , с тем чтобы их векторная разность  $\dot{E}_{20I} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}$  равнялась нулю. Для этого параллельно работающие трансформаторы должны **принадлежать к одной группе соединений**. При невыполнении этого условия между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает разность ЭДС  $\Delta \dot{E}$  (рисунок 2.12, б), вызывающая появление уравнительного тока. Так, например, если трансформаторы принадлежат даже к ближайшим группам (например, одиннадцатой и нулевой), сдвиг по фазе между их вторичными ЭДС составляет  $30^\circ$ , и в контуре параллельно соединенных вторичных обмоток возникает большая разность ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II} = 2E_{20} \sin 15^\circ \approx 0,52E_{20}$ . При этом уравнительный ток в несколько раз больше номинального.

### 2.5.2 Распределение нагрузок

Распределение нагрузок производится согласно выражению (2.6), полученного для упрощенной схемы замещения трансформаторов (см. рисунок 2.11, б), можно найти распределение нагрузок между параллельно включенными трансформаторами:

$$\dot{I}_I \cdot Z_{кI} = \dot{I}_{II} \cdot Z_{кII} = \dot{I}_{III} \cdot Z_{кIII} = \dots + \dot{I}_n \cdot Z_{кn}. \quad (2.6)$$

полученного для упрощенной схемы замещения трансформаторов (см. рисунок 2.11, б), можно найти распределение нагрузок между параллельно включенными трансформаторами.

Пренебрегая различием в фазе токов, которое зависит от соотношения активных и реактивных сопротивлений короткого замыкания (различие обычно невелико), и заменяя комплексные величины их модулями, получают выражение (2.7):

$$I_I : I_{II} : I_{III} = \left( \frac{1}{Z_{кI}} \right) : \left( \frac{1}{Z_{кII}} \right) : \left( \frac{1}{Z_{кIII}} \right), \quad (2.7)$$

т. е. токи распределяются между трансформаторами обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания. Уравнение (7) можно привести к виду (2.8):

$$I_I : I_{II} : I_{III} = \frac{I_{НОМ I}}{I_{НОМ I} \cdot Z_{кI}} : \frac{I_{НОМ II}}{I_{НОМ II} \cdot Z_{кII}} : \frac{I_{НОМ III}}{I_{НОМ III} \cdot Z_{кIII}}. \quad (2.8)$$

Умножаем левую часть (2.8) на  $U_2 \cdot \cos \varphi_2$ , а правую – на  $\frac{U_{НОМ}^2}{100}$  получим выражение (2.9):

$$P_I : P_{II} : P_{III} = \frac{I_{НОМ I}}{I_{НОМ I} \cdot Z_{кI}} : \frac{I_{НОМ II}}{I_{НОМ II} \cdot Z_{кII}} : \frac{I_{НОМ III}}{I_{НОМ III} \cdot Z_{кIII}}. \quad (2.9)$$

Следовательно, для того чтобы нагрузки распределялись между параллельно включенными трансформаторами прямо пропорционально их номинальным мощностям, они должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания. Практически удовлетворительное распределение нагрузки получается в случаях, когда напряжения короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов отклоняются от их среднеарифметического значения не более чем на  $\pm 10\%$ .

Если при параллельной работе напряжения  $u_k$  не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением  $u_k$ , т. е. с меньшим сопротивлением  $Z_k$ . В этом случае придется уменьшить общую нагрузку всей группы параллельно работающих трансформаторов, т. е. установленная мощность трансформаторов недоиспользуется.

При неравенстве активных  $u_{к.а}$  и реактивных  $u_{к.р}$  составляющих напряжений короткого замыкания токи параллельно работающих трансформаторов сдвинуты по фазе на некоторый угол. При этом суммарный ток, отдаваемый нагрузке, равен векторной сумме токов всех трансформаторов,

т. е. меньше их алгебраической суммы. В этом случае номинальная мощность трансформаторов используется не полностью.

У трансформаторов различных мощностей составляющие  $u_{к.а}$  и  $u_{к.р}$  различны: у трансформаторов большей мощности  $u_{к.р}$  больше, а  $u_{к.а}$  меньше, чем у трансформаторов меньшей мощности. Поэтому не рекомендуется включение на параллельную работу трансформаторов с отношением номинальных мощностей больше трех.

## 2.6 Контрольные вопросы

1. С помощью каких устройств можно производить преобразование трехфазного тока?
2. Что понимается под трехфазной группой трансформаторов, для чего она применяется?
3. Как устроен трехфазный трехстержневой трансформатор? Изобразить его схему.
4. Перечислить возможные схемы соединения первичных и вторичных обмоток трехфазного трансформатора.
5. Изобразить схему соединения трехфазного трансформатора «звезда – звезда».
6. Изобразить схему соединения трехфазного трансформатора «звезда – звезда с выведенной нулевой точкой».
7. Изобразить схему соединения трехфазного трансформатора «звезда – треугольник».
8. Изобразить схему соединения трехфазного трансформатора «звезда – зигзаг с выведенной нулевой точкой».
9. Записать формулу для определения фазного и линейного коэффициентов трансформации трехфазного трансформатора.
10. Где находят применение трехфазные трансформаторы со схемой соединения «зигзаг»?
11. В чем заключается причина возникновения высших гармонических составляющих тока холостого хода трехфазного трансформатора?

12. Перечислить способы уменьшения высших гармонических составляющих в кривых магнитного потока и ЭДС трехфазного трансформатора.

13. Что понимается под группой соединения обмоток трансформатора?

14. Какие группы соединений могут иметь однофазные трансформаторы?

15. Какие группы соединений могут иметь трехфазные трансформаторы?

16. Какие группы соединений могут иметь трехфазные трансформаторы со схемой соединений «звезда – звезда».

17. Какие группы соединений могут иметь трехфазные трансформаторы со схемой соединений «звезда – треугольник».

18. Какие группы соединений могут иметь трехфазные трансформаторы со схемой соединений «звезда – зигзаг с выведенной нулевой точкой».

19. Трансформаторы с какими группами соединения обмоток выпускает отечественная промышленность?

20. Перечислить условия включения трансформаторов на параллельную работу.

21. 21. Что понимается под уравнивающим током, возникающим при параллельном включении трансформаторов. Как он определяется?

22. Записать формулу распределения нагрузок при параллельном включении трансформаторов.

23. Как распределяются токи при параллельном включении трансформаторов?

24. Как распределяются мощности при параллельном включении трансформаторов?

25. У каких трансформаторов больше величина напряжения короткого замыкания  $U_k$  (большей или меньшей мощности)?

### **3. Электрические машины постоянного тока**

#### **3.1 Назначение и принцип действия**

Машины постоянного тока применяют в качестве электродвигателей и генераторов. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получать жесткие и мягкие механические характеристики.

Электродвигатели постоянного тока широко используют для привода различных механизмов в черной металлургии (прокатные станы, кантователи, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, тепловозы, электропоезда, электромобили), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны, шахтные подъемники, экскаваторы), на морских и речных судах, в металлообрабатывающей, бумажной, текстильной, полиграфической промышленности и др. Двигатели небольшой мощности применяют во многих системах автоматики.

Конструкция двигателей постоянного тока сложнее и их стоимость выше, чем асинхронных двигателей. Однако в связи с широким применением автоматизированного электропривода и тиристорных преобразователей, позволяющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти электродвигатели широко используют в различных отраслях народного хозяйства.

Генераторы постоянного тока ранее широко использовались для питания электродвигателей постоянного тока в стационарных и передвижных установках, а также как источники электрической энергии для заряда аккумуляторных батарей, питания электролизных и гальванических ванн, для электроснабжения различных электрических потребителей на автомобилях, самолетах, пассажирских вагонах, электровозах, тепловозах и др.

Недостаток машин постоянного тока – наличие щеточно-коллекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины. Поэтому в последнее время генераторы постоянного тока в стационарных установках вытесняются полупроводниковыми преобразователями, а на транспорте – синхронными генераторами, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

Машина постоянного тока, обычного исполнения, (рисунок 3.1, а) имеет обмотку возбуждения, расположенную на явно выраженных полюсах статора. По этой обмотке проходит постоянный ток  $I_B$ , создающий магнитное поле возбуждения  $\Phi_B$ . На роторе расположена двухслойная обмотка, в которой при вращении ротора индуцируется ЭДС. Таким образом, ротор машины постоянного тока является якорем, а конструкция машины сходна с конструкцией обращенной синхронной машины.

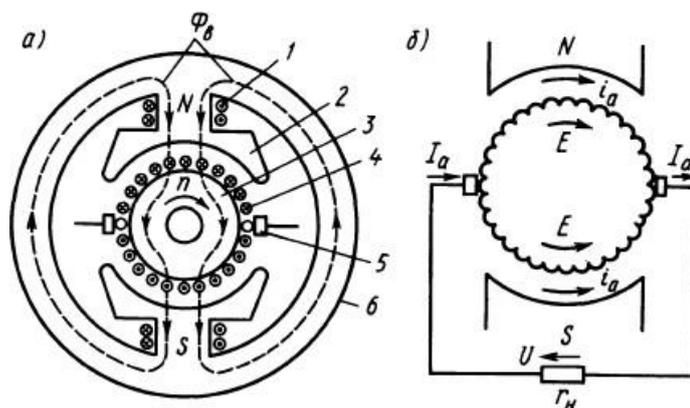


Рисунок 3.1 – Электромагнитная схема двухполюсной машины постоянного тока (а) и эквивалентная схема ее обмотки якоря (б): 1 – обмотка возбуждения; 2 – главные полюсы; 3 – якорь; 4 – обмотка якоря; 5 – щетки; 6 – корпус (станина)

При заданном направлении вращения якоря направление ЭДС, индуцируемой в его проводниках, зависит только от того, под каким полюсом находится проводник. Поэтому во всех проводниках, расположенных под одним полюсом, направление ЭДС одинаковое и сохраняется таким независимо от частоты вращения. Иными словами, характер кривой, отображающей направление ЭДС на рисунке 3.1, а, неподвижен во времени: в проводниках, расположенных выше горизонтальной оси симметрии, которая разделяет полюсы (геометрическая нейтраль), ЭДС всегда направлена в одну сторону; в проводниках, лежащих ниже геометрической нейтрали, – в противоположную сторону.

При вращении якоря проводники обмотки перемещаются от одного полюса к другому; ЭДС, индуцируемая в них, изменяет знак, т. е. в каждом проводнике наводится переменная ЭДС. Однако количество проводников, находящихся под каждым полюсом, остается неизменным. При этом суммарная

ЭДС, индуцируемая в проводниках, находящихся под одним полюсом, также неизменна по направлению и приблизительно постоянна по величине. Эта ЭДС снимается с обмотки якоря с помощью скользящего контакта, включенного между обмотками и внешней цепью.

Обмотка якоря выполняется замкнутой, симметричной (рисунок 3.1, б). При отсутствии внешней нагрузки ток по обмотке не проходит, т. к. ЭДС, индуцируемые в различных частях обмотки, взаимно компенсируются.

Если щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой якоря, расположить на геометрической нейтрали, то при отсутствии внешней нагрузки к щеткам прикладывается напряжение  $U$ , равное ЭДС  $E$ , индуцированной в каждой из половин обмоток. Это напряжение практически неизменно, хотя и имеет некоторую переменную составляющую, обусловленную изменением положения проводников в пространстве. При большом количестве проводников пульсации напряжения весьма незначительны.

При подключении к щеткам сопротивления нагрузки  $R_H$  через обмотку якоря проходит постоянный ток  $I_a$ , направление которого определяется направлением ЭДС  $E$ . В обмотке якоря ток  $I_a$  разветвляется и проходит по двум параллельным ветвям (токи  $i_a$ ).

Для обеспечения надежного токосъема щетки скользят не по проводникам обмотки якоря (как это было в начале развития электромашиностроения), а по **коллектору**, выполняемому в виде цилиндра, который набирается из медных пластин, изолированных одна от другой. К каждой паре соседних коллекторных пластин присоединяют часть обмотки якоря, состоящую из одного или нескольких витков; эту часть называют **секцией обмотки якоря**.

Если машина работает в генераторном режиме, то коллектор вместе со скользящими по его поверхности щетками является выпрямителем. В двигательном режиме, когда к якорю подводится питание от источника постоянного тока и он преобразует электрическую энергию в механическую, коллектор со щетками можно рассматривать как преобразователь частоты, связывающий сеть постоянного тока с обмоткой, по проводникам которой проходит переменный ток.

Таким образом, **главная особенность машины постоянного тока – наличие коллектора и скользящего контакта между обмоткой якоря и внешней электрической цепью.**

### 3.2 Устройство электрической машины постоянного тока

По конструктивному выполнению машина постоянного тока (рисунок 3.2) подобна обращенной синхронной машине, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения – на статоре. Основное отличие заключается в том, что машина постоянного тока имеет на якоре *коллектор*, а на статоре кроме главных полюсов с обмоткой возбуждения *добавочные полюсы*, которые служат для уменьшения искрения под щетками.

**Статор.** На статоре расположены главные полюсы с катушками обмотки возбуждения и добавочные полюсы (на рисунке 3.2 не показаны) с соответствующими катушками. Полюсы крепят болтами к стальному корпусу, который является частью магнитной цепи машины. Главные полюсы (рисунок 3.3) выполняют шихтованными (из стальных штампованных листов), а добавочные полюсы – массивными или также шихтованными. Шихтованная конструкция уменьшает потери в стали и, тем самым, повышает КПД электромашин.

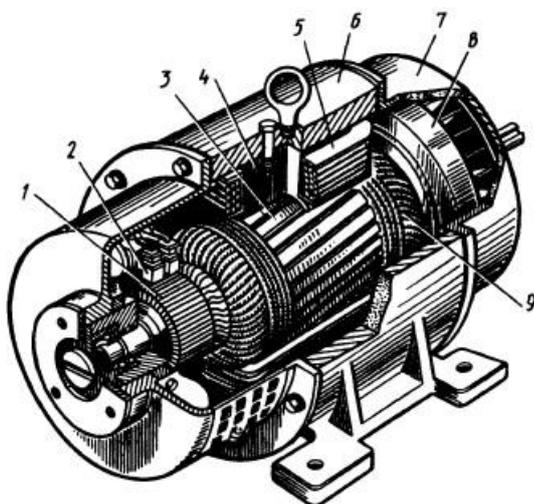


Рисунок 3.2 – Устройство машины постоянного тока: 1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – главный полюс; 5 – катушки обмотки возбуждения; 6 – корпус (станина); 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

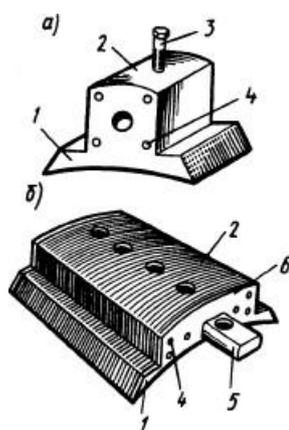


Рисунок 3.3 – Устройство главных полюсов (а, б): 1 – полюсный наконечник; 2 – сердечник полюса; 3 – установочный болт; 4 – заклепки; 5 – установочный стержень; 6 – нажимные щетки

Катушки главных и добавочных полюсов изготавливают из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения.

**Якорь.** Сердечник якоря, так же как в синхронной машине, собирают из изолированных листов электротехнической стали. Обмотка якоря состоит из отдельных, заранее намотанных якорных катушек (рисунок 3.4), которые укладывают в пазы сердечника якоря.

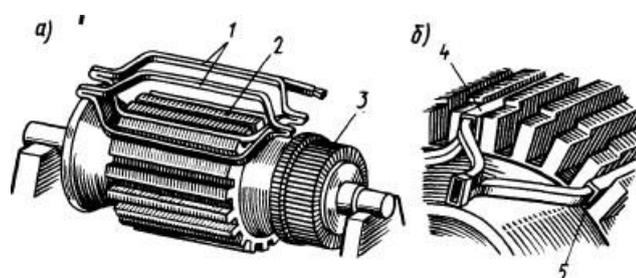


Рисунок 3.4 – Устройство якорных катушек (а) и расположение их в пазах (б): 1 – якорные катушки; 2 – сердечник якоря; 3 – коллектор; 4, 5 – верхняя и нижняя стороны якорной катушки

Обмотку выполняют двухслойной; в каждом пазу укладывают две стороны различных якорных катушек – одну поверх другой. Каждая якорная катушка включает в себя несколько секций, концы которых припаивают к соответствующим коллекторным пластинам; секции могут быть одно- и многовитковыми.

**Коллектор.** Обычно коллектор выполняют в виде цилиндра (рисунок 3.5), собранного из медных пластин; между пластинами располагают

изоляционные прокладки. Секции обмотки якоря впаивают в прорези, имеющиеся в выступающей части коллекторных пластин.

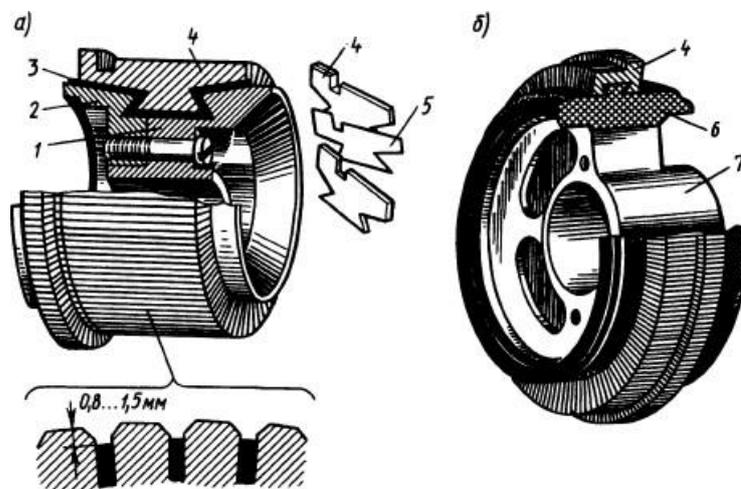


Рисунок 3.5 – Устройство коллектора машины постоянного тока с металлическим (а) и пластмассовым (б) корпусом: 1 – корпус; 2 – нажимной фланец; 3 – изоляционные манжеты; 4 – коллекторные пластины; 5 – изоляционные прокладки; 6 – пластмасса; 7 – втулка

В машинах малой и средней мощности широко применяют коллекторы, в которых медные пластины и миканитовые прокладки запрессованы в пластмассу (рисунок 3.5, б).

**Щеточный аппарат.** По цилиндрической части коллектора скользят щетки, установленные в щеткодержателях. Щетки представляют собой прямоугольные бруски, изготовленные путем прессовки и термической обработки из материалов, составленных на основе графита.

Коллекторно-щеточный узел служит для следующих целей:

- 1) служит для связи обмоток якоря с внешней цепью;
- 2) преобразует переменную ЭДС в якоря в постоянное напряжение на щетках, если машина работает в режиме генератора;
- 3) при работе в режиме двигателя осуществляет обратное преобразование для получения вращающего момента. При этом постоянное напряжение сети преобразуется в переменное на обмотках якоря, что обеспечивает непрерывность вращения.

### 3.3 Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока

Электромашины постоянного тока, как и все электрические машины, могут работать и в качестве генераторов, и в качестве электродвигателей. Генератор преобразует механическую энергию в электрическую, то есть энергия движителя (турбины или двигателя внутреннего сгорания) превращается в электрическую энергию на выходных клеммах генератора. Принцип действия генератора постоянного тока (как и всех эл. машин) основан на явлении электромагнитной индукции. Сущность этого явления состоит в том, что в проводнике, перемещающемся в магнитном поле и пересекающем его силовые линии наводится электродвижущая сила (ЭДС), см. рисунок 3.6.

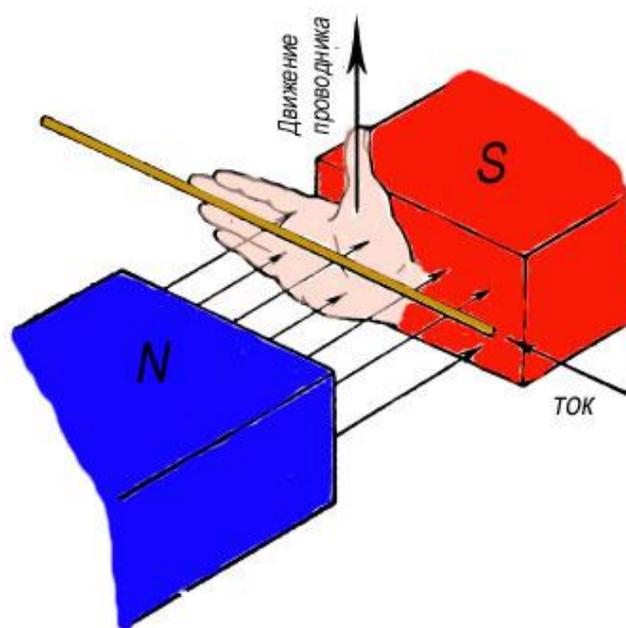


Рисунок 3.6 – Определение направления индуктированной ЭДС по «правилу правой руки»

В данном случае действует «правило правой руки». «Правило правой руки» состоит в том, что, если поместить правую руку в магнитное поле так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а большой палец указывал направление движения проводника, то остальные четыре пальца покажут направление индукционного тока, возникающего в проводнике.

Величина наведенной в проводнике ЭДС ( $\epsilon$ ) прямо пропорциональна магнитной индукции  $B$  (Тл), активной длине проводника  $l$  (м) и скорости его

перемещения  $v$  (м/сек). Если проводник перемещается перпендикулярно вектору магнитной индукции, то наводимая в проводнике ЭДС ( $e$ ):

$$e = B \cdot l \cdot v, \quad (3.1)$$

где  $l$  – длина проводника, м;

$v$  – линейная скорость движения, м/сек;

$B$  – магнитная индукция, Тл.

Если учесть, что магнитный поток  $\Phi = B \cdot S$  ( $S$  – площадь сечения полюса) и перевести линейную скорость в обороты в минуту, учтя количество всех проводников и разбивку их на параллельные ветви, получим выражение (3.2):

$$E = C_e \cdot n \cdot \Phi, \quad (3.2)$$

где  $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$  – конструктивная постоянная,

где  $p$  – число пар полюсов;

$N$  – число проводников якоря;

$a$  – число пар параллельных ветвей.

При появлении тока  $I_{я}$  в якоре, вращающемся в магнитном поле, возникает сила, создающая момент вращения (3.3):

$$M = C_m \cdot I_{я} \cdot \Phi, \quad (3.3)$$

где  $C_e = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$  – конструктивная постоянная.

В генераторах при появлении тока в якоре на валу возникает тормозной момент. В электродвигателях при вращении якоря и пересечения проводниками магнитного поля наводится противо-ЭДС – это электродвижущая сила (ЭДС), направленная встречно току.

Так как проводники якоря имеют сопротивление  $R_{я}$ , при появлении тока возникает падение напряжения в этом сопротивлении  $R_{я} \cdot I_{я}$ . Таким образом, уравнение якорной цепи генератора – напряжение на клеммах генератора равно ЭДС минус падение напряжения в цепи якоря (3.4):

$$U = E - R_{я} \cdot I_{я}. \quad (3.4)$$

Для электродвигателей – напряжение, приложенное к клеммам двигателя, уравновешивается противо-ЭДС плюс падение напряжения в цепи якоря (3.5):

$$U = E + R_{я} \cdot I_{я}. \quad (3.5)$$

Следует отметить, что  $E$ , индуцируемая в генераторе, составляет (1,01...1,15) от напряжения на клеммах при номинальной нагрузке; а противо-

ЭДС, появляющаяся в якоре двигателя при номинальной нагрузке составляет (0,9...0,95) от напряжения сети.

Если между полюсами электрической машины (где образуется магнитный поток) находится проводник с током, то в результате взаимодействия тока  $I$  с магнитным полем возникает электромагнитная сила  $F_{эм}$ , действующая на проводник (3.6):

$$F_{эм} = B \cdot l \cdot I, \quad (3.6)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$l$  – длина проводника, м;

$I$  – сила тока, А.

Направление силы  $F_{эм}$  можно определить по «правилу левой руки», см. рисунок 3.7.

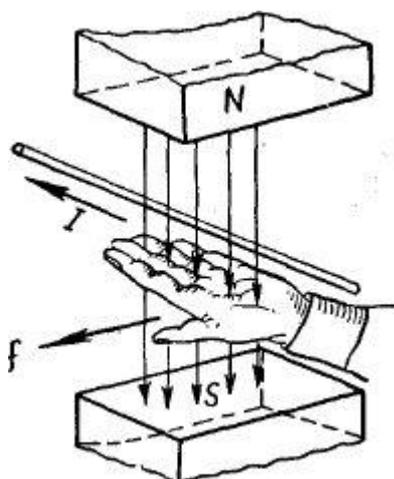


Рисунок 3.7 – Направление электромагнитной силы «правило левой руки»

Направление электромагнитной силы определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ее ладонь, а вытянутые в плоскости ладони пальцы указывали направление тока проводника  $I$ , то отогнутый в плоскости ладони на  $90^\circ$  большой палец покажет направление действия силы.

В генераторах электромагнитная сила  $F_{эм}$  является тормозящей по отношению к движущей силе  $F$ .

При равномерном движении проводника движущая сила равна тормозящей электромагнитной силе  $F = F_{эм}$ . Умножим обе части этого равенства на скорость движения проводника  $v$ , получим (3.7):

$$F \cdot v = F_{эм} \cdot v. \quad (3.7)$$

Подставим значение  $F_{эм}$  из формулы (3.6) получим (3.8):

$$F \cdot v = B \cdot l \cdot I \cdot v = E \cdot I. \quad (3.8)$$

Левая часть равенства ( $F \cdot v$ ) определяет величину механической мощности, затраченной на перемещение проводника в магнитном поле; правая же часть равенства ( $E \cdot I$ ) определяет величину электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре электрическим током  $I$ . Знак равенства между этими частями показывает, что в генераторе механическая мощность, затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую. Если же внешней силы  $F$  к проводнику не прикладывать, а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение  $U$  так, чтобы в проводнике протекал электрический ток  $I$ , то на проводник будет действовать только электромагнитная сила  $F_{эм}$ . Под действием этой силы проводник начнет передвигаться в магнитном поле. При этом в проводнике индуцируется ЭДС с направлением, противоположным приложенному к проводнику напряжению  $U$ . Таким образом, часть этого напряжения уравнивается электродвижущей силой  $E$ , наведенной в этом проводнике, а другая часть составляет падение напряжения в проводнике, см. формулу (3.9):

$$U = E + I \cdot R, \quad (3.9)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника, Ом.

Умножим обе части выражения (3.5) на ток  $I$ . Получаем выражение (3.10):

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot R, \quad (3.10)$$

Подставляя вместо  $E$  значение ЭДС из формулы (3.1), получим формулу (3.11):

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot R, \quad (3.11)$$

Или, согласно формуле (3.6):

$$U \cdot I = F_{эм} \cdot v + I^2 \cdot R, \quad (3.12)$$

Из выражения (3.12) следует, что электрическая мощность ( $U \cdot I$ ), поступающая в проводник, частично преобразуется в механическую мощность ( $F_{эм} \cdot v$ ), а частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике ( $I^2 \cdot R$ ). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитное поле, можно рассматривать как элементарный электродвигатель.

Из вышесказанного можно сделать вывод: **необходимым условием работы электрической машины является наличие проводников и магнитного поля.** При этом преобразование энергии в электрической машине может происходить в любом направлении, т. е. электрическая машина может работать как в качестве генератора, так и в качестве электродвигателя. То есть **электрическая машина обратима.**

### 3.4 Схемы включения электродвигателей постоянного тока

Существует три схемы включения в сеть двигателей постоянного тока.

- 1) Параллельного (независимого возбуждения). (*Шунтовые*)
- 2) Последовательного возбуждения. (*Серийные*)
- 3) Смешанного возбуждения. (*Компаундные*)

На рисунке 3.8 – 3.10 изображены электрические схемы включения в сеть двигателя постоянного тока.

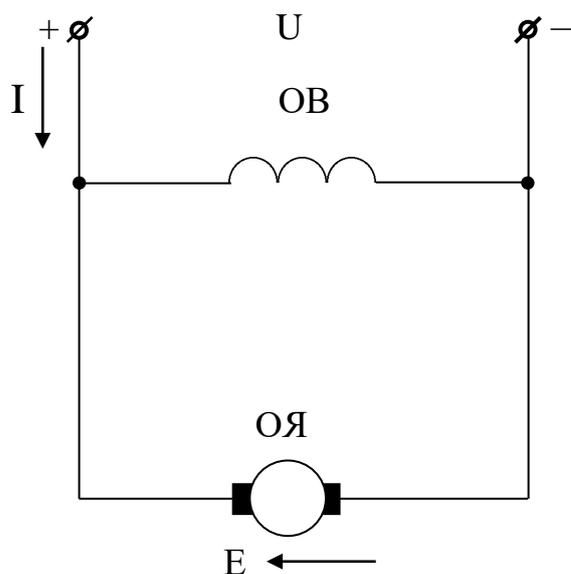


Рисунок 3.8 – Схема включения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения (шунтовая)

Здесь  $U$  – напряжение подведенное к электродвигателю,  $I$  – ток, потребляемый электродвигателем из сети,  $E$  – противо-э.д.с., возникающая в обмотке якоря как реакция на вращение её в магнитном поле, ОЯ – обмотка якоря, ОВ – обмотка возбуждения.

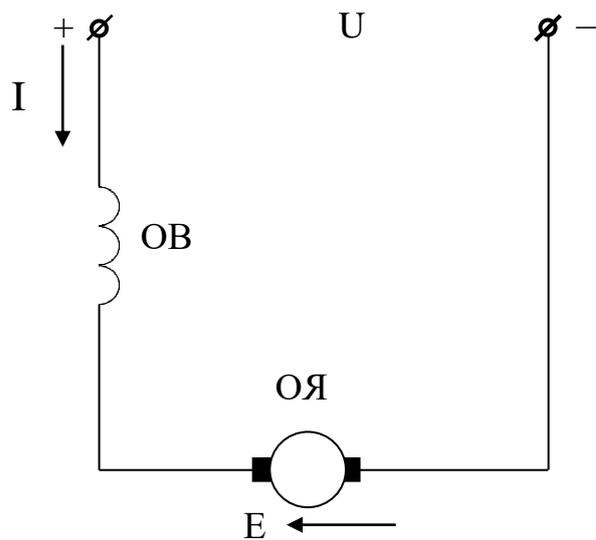


Рисунок 3.9 – Схема включения электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения (серийная)

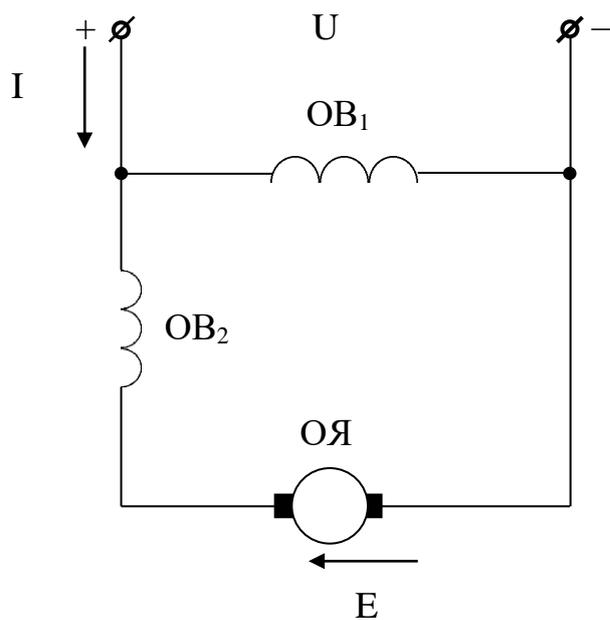


Рисунок 3.10 – Схема включения электродвигателя постоянного тока смешанного возбуждения (компаундная)

Уравнение равновесия электродвижущих сил и напряжений в цепи якоря при установившемся режиме:

$$U = E + I \cdot R, \quad (3.13)$$

где  $E$  – противо-ЭДС, В;

$R$  – сопротивление цепи якоря, Ом;

$I$  – ток в цепи якоря, А.

Из первого уравнения определим ток:

$$I = \frac{U}{R} - \frac{E}{R}. \quad (3.14)$$

Электродвижущая сила  $E$ :

$$E = c_E \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3.15)$$

где  $c_E = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a}$  – коэффициент ЭДС двигателя, зависящий от конструктивных параметров.

Электродвижущая сила  $E$  зависит от:

- 1) от параметров машины;
- 2) магнитного потока;
- 3) скорости якоря.

Решая совместно уравнения (3.3) и (3.5) получаем:

$$I = \frac{U}{R} - \frac{c_E \Phi}{R} \omega. \quad (3.16)$$

Эта зависимость ( $I = f(\omega)$ ) называется уравнением электромеханической или скоростной характеристики двигателя постоянного тока

Выражение для электромагнитного момента:

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I, \quad (3.17)$$

где  $c_M$  – коэффициент пропорциональности между моментом током и магнитным потоком.

Решая совместно уравнения (3.16) и (3.17) получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

Подставляем значения, получаем уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$M = \frac{U \cdot c_M \cdot \Phi}{R} - \frac{c_E \cdot c_M \cdot \Phi^2}{R} \cdot \omega; \quad (3.18)$$

для системы СИ (если угловая скорость выражена в рад/с, а моменты – в Н · м, то коэффициенты:  $c_E = c_M$ ).

## Механические и электромеханические характеристики ДПТ

Механическая характеристика это зависимость:  $\omega = f(M)$ , Естественная механическая характеристика одна, искусственных – множество.

Естественная механическая характеристика – это характеристика, снятая при следующих условиях:

- 1) при номинальном напряжении сети;
- 2) при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя;
- 3) при включении электродвигателя по схеме, предусмотренной заводом-изготовителем.

Если хотя бы одно условие нарушается, возникает искусственная механическая характеристика электродвигателя.

Искусственные механические характеристики используются:

- для пуска в ход электродвигателя;
- для регулирования скорости электродвигателя.

На рисунке 3.11 изображены механические характеристики двигателя постоянного тока:

– механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (1);

– механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (2);

– механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (3).

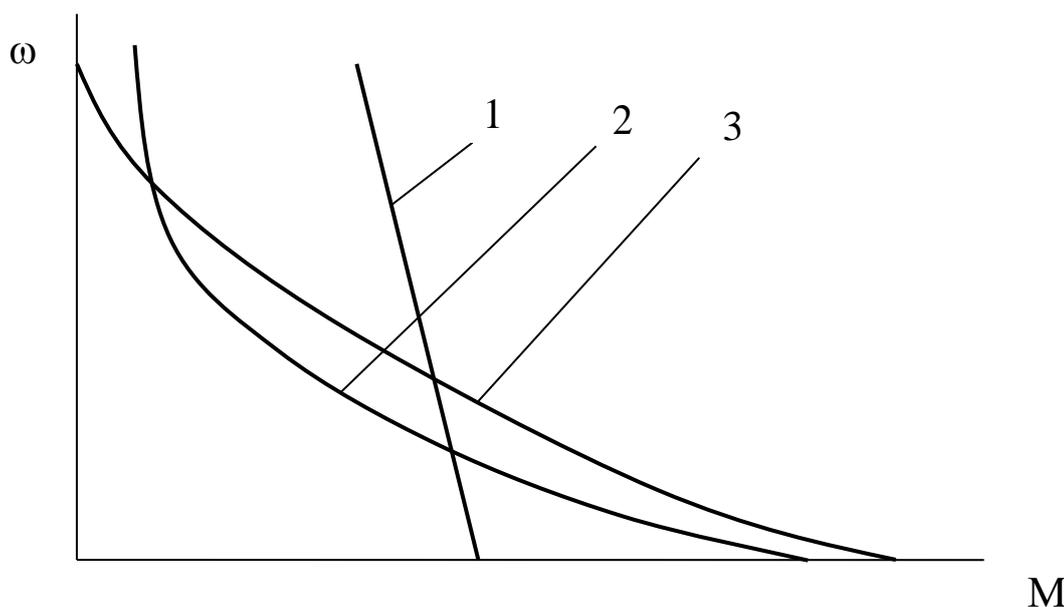


Рисунок 3.11 – Механические характеристики двигателей постоянного тока

Механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения – прямая линия. Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения постоянного тока – «жесткая», т. е. двигатель поддерживает постоянство скорости при изменении нагрузки на валу.

Механическая характеристика электродвигателя последовательного возбуждения – параболического типа. Механическая характеристика – «мягкая». Электродвигатели последовательного возбуждения не имеют скорости холостого хода. Их нельзя включать без нагрузки на валу.

Двигатели смешанного возбуждения, по виду механической характеристики, занимают промежуточное положение между двигателями параллельного и последовательного возбуждения.

### 3.5 Регулирование скорости электродвигателей постоянного тока

1. Регулирование путем изменения величины питающего напряжения.

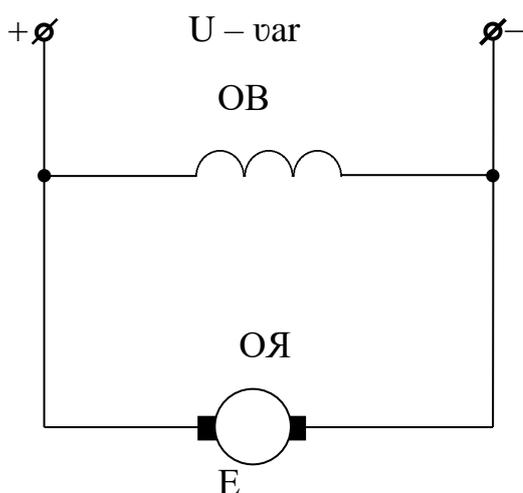


Рисунок 3.12 – Регулирование скорости двигателя постоянного тока путем регулирования величины питающего напряжения

Регулирование путем изменения сопротивления цепи якоря.

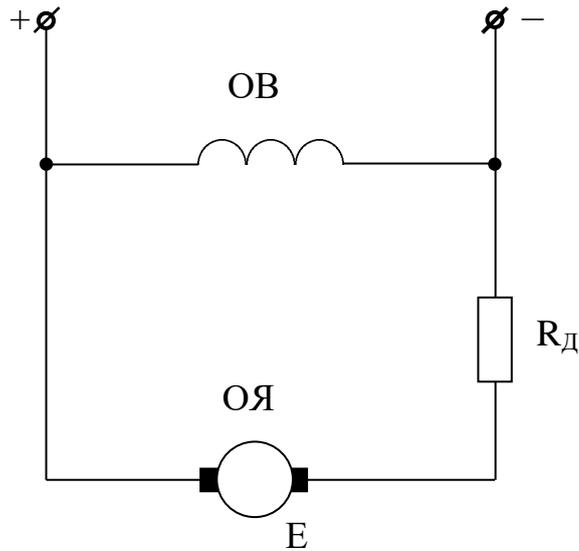


Рисунок 3.13 – Регулирование скорости двигателя постоянного тока путем изменения сопротивления цепи якоря

2. Регулирование путем ослабления магнитного потока.

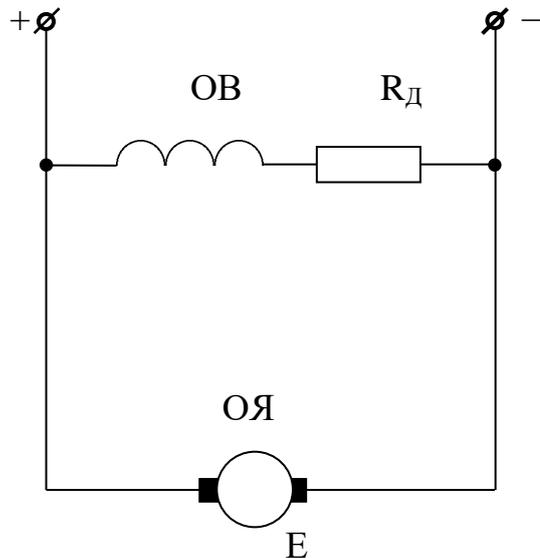


Рисунок 3.14 – Регулирование скорости двигателя постоянного тока путем ослабления магнитного потока

### **Тормозные режимы двигателей постоянного тока**

Электрические машины обладают свойством обратимости, то есть могут работать в следующих режимах: 1) в двигательном режиме; 2) в тормозном режиме.

Под тормозным режимом понимают такой режим, при котором создаваемый двигателем момент противодействует его вращению. Если в двигательном режиме моменты ( $M$ ) и скорости ( $\omega$ ) направлены в одну сторону (имеют одинаковые знаки), то в режиме торможения знаки моменты ( $M$ ) и скорости ( $\omega$ ) – разные.

Изобразим механические характеристики в четырех квадрантах координатной плоскости (рисунок 3.15):

Координаты I и III соответствуют двигательному режиму прямого ( $+\omega$ ) и обратного ( $-\omega$ ) направлений вращения. В квадрантах II и IV изображаются характеристики двигателя в тормозных режимах, т. к. моменты и скорости имеют различные знаки.

Электрические двигатели используются не только для вращения механизмов, но и для их торможения. Электрическое торможение позволяет быстро остановить механизм или уменьшить частоту его вращения без применения механических тормозов.

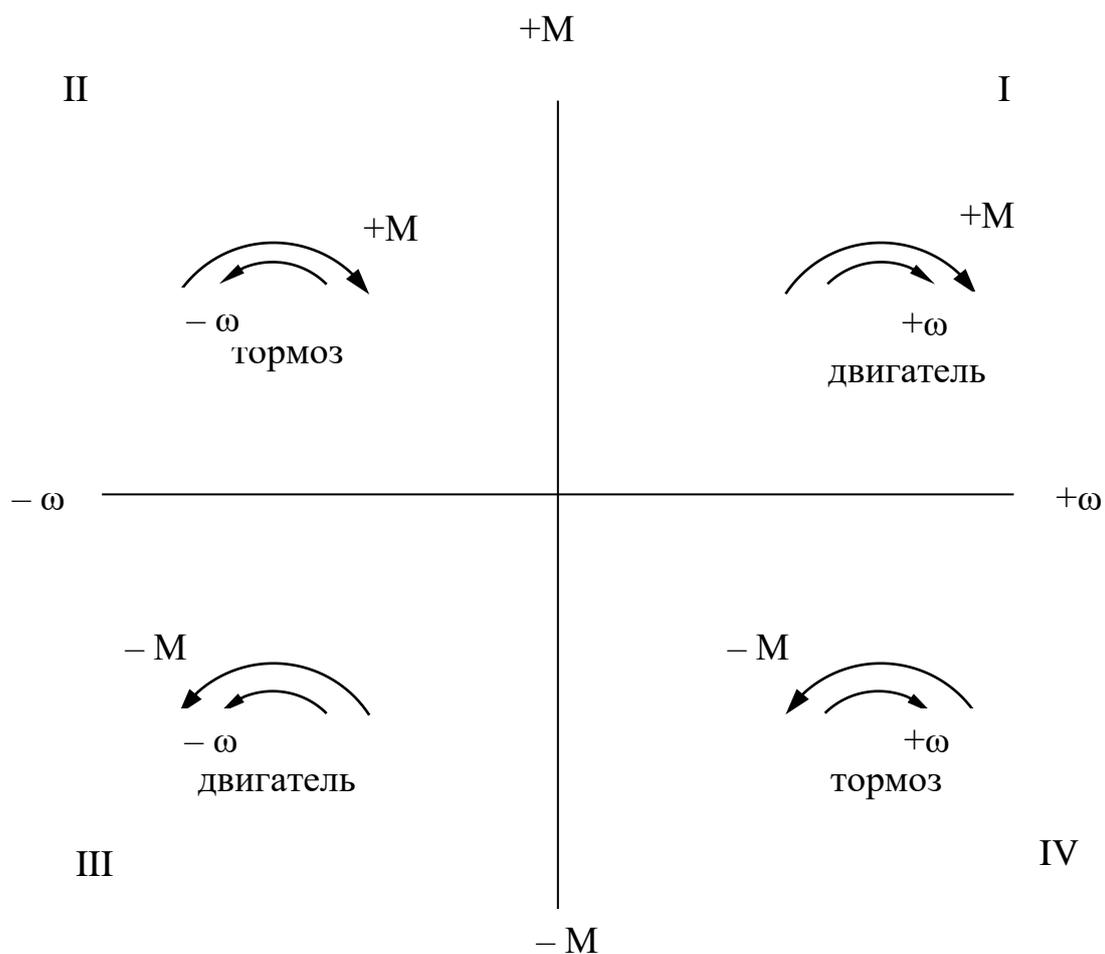


Рисунок 3.15 – Координатная плоскость

Известны следующие тормозные режимы двигателя постоянного тока параллельного (независимого возбуждения):

- 1) генераторное (рекуперативное);
- 2) противовключением;
- 3) динамическое.

### **3.6 Контрольные вопросы**

1. Для каких целей используются и в каких сферах применяются электромашин постоянного тока?
2. Преимущества и недостатки машин постоянного тока в сравнении с машинами переменного тока?
3. Как устроена машина постоянного тока? Назвать основные узлы, входящие в её состав.
4. Как устроен коллектор у различных типов и различных мощностей машин постоянного тока?
5. Где размещаются обмотки якоря и обмотки возбуждения у электромашин обычного исполнения?
6. Как выполняются обмотки якоря у электродвигателей постоянного тока?
7. В чем заключается главная особенность машин постоянного тока?
8. Какую роль выполняют добавочные полюсы в конструкции машин постоянного тока?
9. Почему полюсы, а также сердечник якоря машин постоянного тока выполняются «шихтованными», то есть состоящими из отдельных листов электротехнической стали?
10. Для каких целей служит коллекторно-щеточный узел в машинах постоянного тока?
11. На каком принципе основана работа машины постоянного тока? Чем принципиально генератор постоянного тока отличается от электродвигателя постоянного тока?
12. По какому правилу можно определить направление индуцированной в проводнике ЭДС при его перемещении в магнитном поле?
13. Как определить величину наводимой в проводнике ЭДС при его перемещении в магнитном поле?

14. Как определить суммарную ЭДС обмотки якоря при его вращении в магнитном поле?
15. Как определит вращающий момент ротора машины постоянного тока при подаче тока в обмотку якоря?
16. Привести уравнения якорной цепи генератора и электродвигателя постоянного тока и объяснить, что такое противо-ЭДС?
17. По какому правилу можно определить направление действия электромагнитной силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле?
18. Назвать необходимые условия работы электромашин постоянного тока.
19. Назвать и зарисовать существующие схемы включения двигателей постоянного тока в сеть.
20. Привести выражение электромеханической (скоростной) характеристики двигателя постоянного тока.
21. Привести выражение механической характеристики двигателя постоянного тока.
22. Дать понятие естественной и искусственной характеристик двигателя постоянного тока.
23. Для каких целей используются искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока?
24. Изобразить механические характеристики электродвигателей постоянного тока с различными способами возбуждения и дать им сравнительную характеристику.
25. Каким способом можно осуществлять регулирование скорости электродвигателей постоянного тока?

#### 4. Асинхронные электрические машины

Асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства механизмов, используемых во всех отраслях народного хозяйства.

Асинхронные электродвигатели общего назначения мощностью от 0,06 кВт до 400 кВт на напряжение до 1000 В – наиболее широко применяемые электрические машины. В народнохозяйственном парке электродвигателей они составляют по количеству 90%, по мощности – примерно 55% [1]. Потребность, а, следовательно, и производство асинхронных двигателей на напряжение до 1000 В в России растет неуклонно из года в год [2].

Уже в настоящее время асинхронные двигатели потребляют более 40% вырабатываемой в стране электроэнергии, на их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов: обмоточной меди, изоляции, электротехнической и других. Затраты на обслуживание и ремонт асинхронных двигателей в эксплуатации составляют более 5% затрат на ремонт и обслуживании всего установленного оборудования [1]. Поэтому создание новых серий высокоэкономичных и надежных асинхронных двигателей является важнейшей народнохозяйственной задачей, а правильный выбор двигателей, их эксплуатация и высококачественный ремонт играют первоочередную роль в экономии материальных и трудовых ресурсов.

Первая единая серия асинхронных двигателей – серия А мощностью от 0,6 до 100 кВт была разработана в 1946–1949 гг. В серии А впервые была принята твердая шкала мощностей, имеющая 15 ступеней. Помимо основного исполнения был предусмотрен ряд модификаций, удовлетворяющих требованиям привода в части характеристик (двигатели с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные, со встроенным тормозом, с фазным ротором) и специализированных исполнений по условиям окружающей среды (влаго-, химо- и тропикостойкие двигатели).

В 1969–1972 гг. в СССР и ряде стран – членов СЭВ была разработана серия асинхронных двигателей 4А. Эта серия охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 высотах оси вращения – от 50 мм до 355 мм. В серии 4А за счет применения новых электротехнических материалов и рациональной конструкции мощность двигателей при данных высотах оси вращения повышена на две-три ступени по

сравнению с мощностью двигателей серии А и А2, что дало большую экономию дефицитных материалов [1].

В настоящее время отечественной промышленностью (на владимирском электромоторном заводе) выпускаются асинхронные электродвигатели новых серий 5А, 6А, которые используются вместо старых серий 4А и АО [2]. Электродвигатели выпускаются в базовом и модифицированном исполнениях [2].

Основное (базовое) исполнение – к этой группе относятся трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором монтажного исполнения IM1001, рассчитанный на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты IP54 (IP55) или IP23. Двигатели основного исполнения выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот осей вращения, они обладают типовыми техническими характеристиками, соответствующими требованиям стандартов.

Модифицированное исполнение – к этой группе относятся двигатели, изготовленные на основе узлов основных (базовых) двигателей с необходимыми конструктивными отличиями по способу монтажа, степени защиты, климатическому исполнению и другими отличиями. К двигателям модифицированного исполнения относятся двигатели специального назначения – двигатели, предназначенные для узкоспециализированного применения, например, электродвигатели привода лифтов, грузоподъемных механизмов и др.

Серия асинхронных двигателей 5А и 6А охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,37 до 250 кВт и выполнена на 10 высотах оси вращения – от 80 мм до 315 мм. Двигатели новых серий имеет лучшую степень защиты, по сравнению с электродвигателями старых серий, а также лучшие пусковые и энергетические показатели. Кроме того, электродвигатели серий 5А, 6А имеют изоляционную систему с более высоким классом нагревостойкости изоляции – F (температурный индекс 155 °С) по сравнению с двигателями старых серий [2].

#### 4.1 Устройство трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором состоит из неподвижного статора 1, вращающегося ротора 2 и двух подшипниковых щитов 3 с подшипниками качения или скольжения в центре щитов (рисунок 4.1).

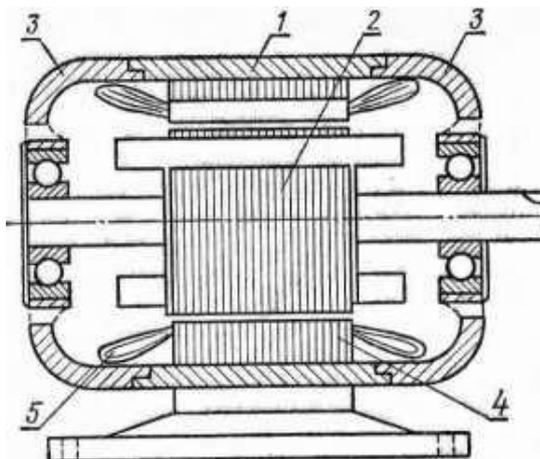


Рисунок 4.1 – Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором

Статор двигателя состоит из корпуса 1, сердечника 4 и трехфазной обмотки 5. Корпус изготавливается из чугуна или из сплавов алюминия.

Сердечник статора (рисунок 4.2) набирается из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,3 или 0,5 мм, покрытых изоляционным лаком. Такая конструкция ротора называется «шихтованной», она позволяет снижать потери в сердечнике от вихревых токов, которые образуются в стали сердечника при работе электродвигателя.

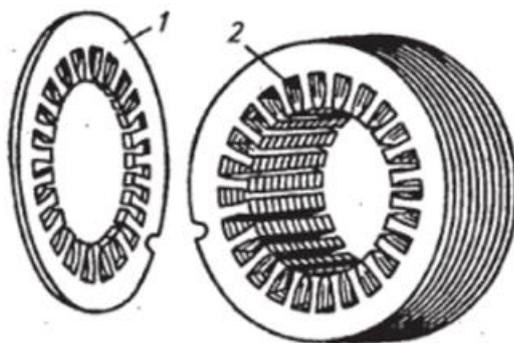


Рисунок 4.2 – Сердечник статора трехфазного асинхронного электродвигателя:  
1 – лист; 2 – сердечник статора

На внутренней поверхности сердечника имеются пазы для укладки в них трехфазной обмотки, выполненной из изолированного провода. Обмотки-фазы расположены симметрично под углом  $120^\circ$  друг к другу. Начала и концы обмоток промаркированы определенным образом. Маркировка показана в таблице 2.

Ротор асинхронного электродвигателя состоит из вала, опирающегося на подшипники, сердечника и обмотки. Сердечник ротора также набирается из штампованных листов электротехнической стали.

Таблица 2 – Маркировка обмоток статора асинхронного электродвигателя

Фазы	Начала	Концы
А	С1	С4
В	С2	С5
С	С3	С6

На внешней поверхности сердечника имеются пазы, в которых размещаются медные или алюминиевые стержни обмотки ротора без изоляции. Концы стержней надежно путем сварки или литья под давлением присоединены к кольцам (рисунок 4.3). В результате получается короткозамкнутая обмотка ротора, напоминающая беличье колесо.

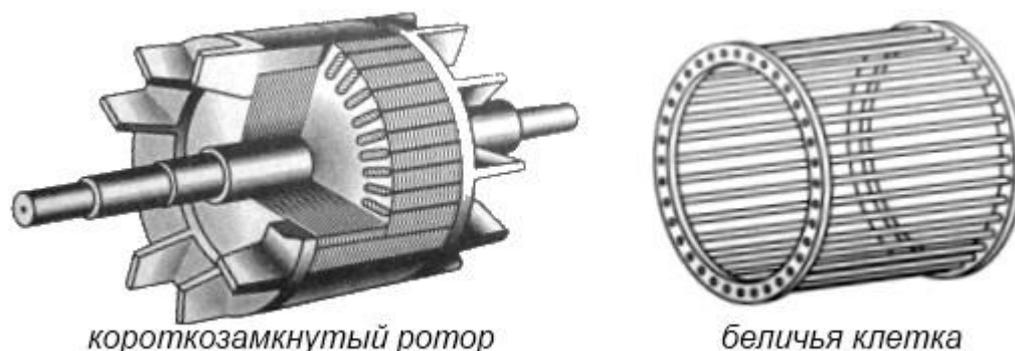


Рисунок 4.3 – Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного электродвигателя

## 4.2 Принцип действия асинхронного электродвигателя

При подключении обмотки статора к сети трехфазного переменного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле. Ч вращения магнитного поля определяется по формуле (4.1):

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (4.1)$$

где  $n_0$  – частота вращения магнитного поля, об/мин;  $f$  – частота тока, Гц;  $p$  – число пар магнитных полюсов двигателя.

Силовые линии вращающегося магнитного поля пересекают стержни короткозамкнутой обмотки ротора, и в них индуцируется электродвижущая сила, которая вызывает появление тока и магнитного потока в роторе двигателя.

Взаимодействие магнитного поля статора с током ротора создает механический вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться. Частота вращения ротора несколько меньше частоты вращения магнитного поля, поэтому двигатель называется асинхронным. Величина, характеризующая отставание ротора от магнитного поля в относительных единицах, называется скольжением и определяется оно по формуле (4.2).

$$s = \frac{n_0 - n_1}{n_0}, \quad (4.2)$$

где  $n_0$  – частота вращения магнитного поля, об/мин;  $n_1$  – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Скольжение величина безразмерная, иногда оно может быть выражена в процентах (%), в этом случае скольжение может быть определено по формуле (4.3):

$$s = \frac{n_0 - n_1}{n_0} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

### 4.3 Механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого двигателя

Механической характеристикой асинхронного электродвигателя называется зависимость скорости (или угловой скорости) ротора от момента, создаваемого электродвигателем  $n_1 = f(M)$  или  $\omega_1 = f(M)$ .

Механические характеристики делятся на «естественные» и «искусственные». У каждого электродвигателя существует одна «естественная» механическая характеристика и множество искусственных. «Естественная» механическая характеристика – это характеристика снятая:

- 1) при номинальном напряжении сети;
- 2) при номинальной частоте питающего напряжения;
- 3) при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях обмоток электродвигателя;
- 4) при включении электродвигателя по схеме, предусмотренной заводом-изготовителем.

Если хотя бы одно из перечисленных условий нарушается, образуется «искусственная» механическая характеристика.

Механическую характеристику (рисунок 4.4) можно условно разделить на два участка (две ветви). Первый участок ABC называется «пусковой ветвью» механической характеристики. На этом участке двигатель не может устойчиво работать. Он либо разгоняется, либо тормозится. Второй участок CDN называется «рабочей ветвью» механической характеристики. На этом участке двигатель может устойчиво работать. Точка A называется «пусковой точкой», она имеет следующие координаты:  $M = M_{\text{п}}; n_1 = 0; s = 1$ . Точка B называется «точкой минимальной работы», координаты этой точки:  $M = M_{\text{мин}}; n_1 = n_{\text{мин}}; s_{\text{мин}} = \frac{6}{7}$ . Точка C – «точка критической работы», её координаты:  $M = M_{\text{к}}; n_1 = n_{\text{к}}; s = s_{\text{к}}$ . Точка D – «точка номинальной работы», координаты:  $M = M_{\text{н}}; n_1 = n_{\text{н}}; s = s_{\text{н}}$ . Точка N – «точка холостого хода», координаты  $M = 0; n_1 = n_0; s = 0$ .

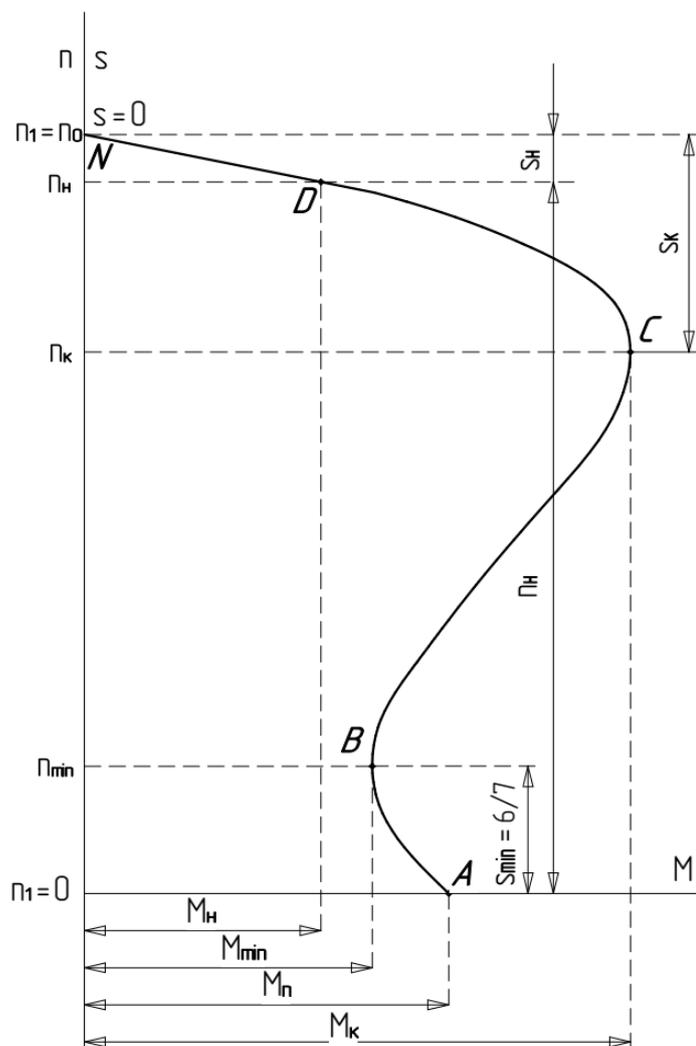


Рисунок 4.4 – Механическая характеристика асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

В последних выражениях:  $M_{п}$ ,  $M_{\min}$ ,  $M_{к}$ ,  $M_{н}$  – величины пускового, минимального, критического и номинального моментов соответственно (Н·м);  $n_{\min}$ ,  $n_{к}$ ,  $n_{н}$ ,  $n_0$  – величины минимальной, критической, номинальной скорости вращения ротора и скорости вращения магнитного поля соответственно (об/мин.);  $s_{\min}$ ,  $s_{к}$ ,  $s_{н}$  – величины минимального, критического и номинального скольжения соответственно.

#### 4.4 Схемы включения асинхронного двигателя в сеть

Для включения двигателя в сеть его статорные обмотки должны быть соединены в «звезду» или в «треугольник». Выводы обмоток двигателей

маркируются следующим образом: начала обмоток обозначают символами С1, С2, С3, соответствующие им концы – С4, С5, С6. Чтобы включить двигатель по схеме «звезда», нужно все концы обмоток (С4, С5, С6) соединить в одну точку, а все начала обмоток (С1, С2, С3) подсоединить к фазам А, В, С трехфазной сети. Необходимо отметить, что включить двигатель по схеме «звезда» можно соединив вместе все начала обмоток (С1, С2, С3), а напряжение трехфазной сети подвести к концам обмоток (С4, С5, С6). При этом двигатель будет точно так же запускаться и работать.

Для включения двигателя по схеме «треугольник» нужно конец первой обмотки С4 соединить с началом второй обмотки С2, конец второй обмотки С5 соединить с началом третьей обмотки С3, конец третьей обмотки С6 соединить с началом первой обмотки С1. Места соединений обмоток подключить к трем фазам сети. Схемы включения обмоток в «звезду» и в «треугольник» приведены на рисунке 4.5.

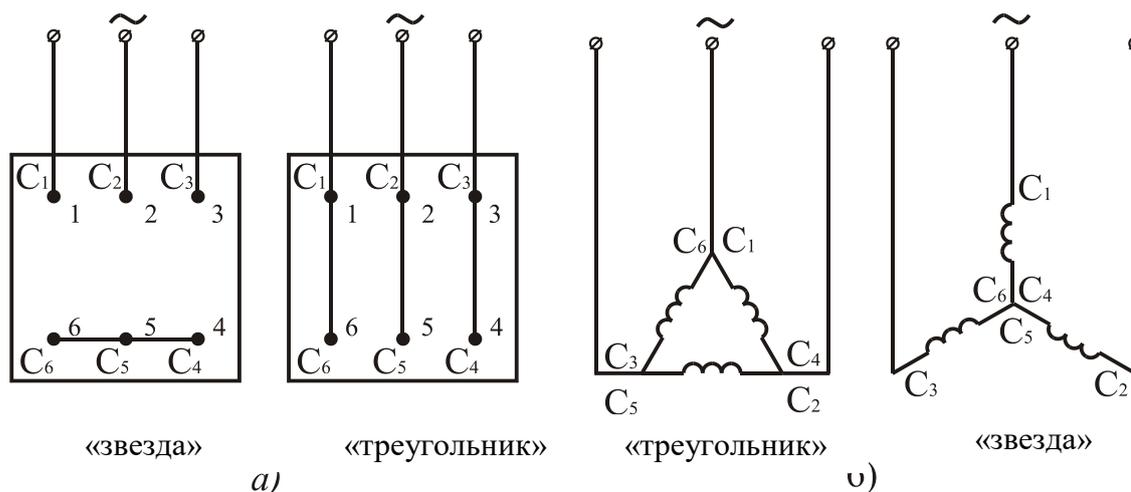


Рисунок 4.5 – Схема включения обмоток асинхронного двигателя:

а – соединения на щитке зажимов; б – схемы включения

Если линейное напряжение в трехфазной сети (напряжение между двумя фазами) совпадает с большим напряжением, указанным в паспорте двигателя, то обмотки необходимо соединять в «звезду». Если линейное напряжение сети совпадает с меньшим напряжением, указанным на двигателе, то обмотку статора необходимо соединять в «треугольник». Если же напряжение в сети не совпадает ни с одним из напряжений, указанных на двигателе, то такой двигатель не может быть использован в данной сети. Неправильный выбор схемы соединений обмоток двигателя может привести к выходу его из строя.

**Пример:** В трехфазной сети линейное напряжение равняется 380 В. Имеются три двигателя, рассчитанные на различные напряжения.

1. Двигатель рассчитан на напряжение 127/220 В.
2. Двигатель – 220/380 В.
3. Двигатель – 380/660 В.

Необходимо определить, какую схему включения необходимо выбрать для каждого из двигателя.

**Ответ:**

1. Двигатель (127/220 В) – не может быть использован в указанной трехфазной сети, так как линейное напряжение этой сети не совпадает ни с одним из напряжений, указанных в паспорте двигателя.

2. Двигатель (220/380 В) – обмотку двигателя необходимо включить в «звезду», так как линейное напряжение сети (380 В) совпадает с большим напряжением, указанным в паспорте двигателя.

3. Двигатель (380/660 В) – обмотку двигателя необходимо включить в «треугольник», так как линейное напряжение сети (380 В) совпадает с меньшим напряжением, указанным в паспорте двигателя.

Для изменения направления вращения трехфазного асинхронного двигателя достаточно поменять местами любые две фазы, подходящие из сети, независимо от схемы включения электродвигателя.

Трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором имеют следующие преимущества перед электродвигателями других типов:

- 1) простота конструкции;
- 2) высокая надежность в работе;
- 3) большой срок службы;
- 4) низкая стоимость;
- 5) небольшие масса-габаритные показатели на единицу мощности.

Наряду с преимуществами асинхронные короткозамкнутые электродвигатели обладают существенным недостатком: при их пуске возникает большой пусковой ток, величина которого в 5...7 раз превышает значение номинального тока [3]. Большой пусковой ток, на который электрическая сеть обычно не рассчитывается, вызывает значительное снижение напряжения при пуске, что может привести к отключению или сбою в работе соседних электроприёмников (при пониженном напряжении могут отключаться магнитные пускатели, электродвигатели останавливаться,

газоразрядные лампы – гаснуть). Кроме того, запускаемый асинхронный электродвигатель может создать в сети такое падение напряжения, что сам не сможет запуститься и развить номинальную скорость. Это может привести к выходу его из строя.

#### **4.5 Способы ограничения пусковых токов асинхронных короткозамкнутых двигателей**

Для уменьшения (ограничения) пускового тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором могут применяться следующие способы:

- 1) переключением обмоток статора во время пуска со «звезды» на «треугольник»;
- 2) понижением напряжения на статоре во время пуска с помощью автотрансформатора (трансформаторный пуск);
- 3) понижением напряжения на статоре во время пуска с помощью тиристорного регулятора напряжения;
- 4) включением добавочного активного или индуктивного сопротивления в цепь статора.

Рассмотрим указанные способы.

##### **1. Переключение со «звезды» на «треугольник»**

При этом способе ограничения пускового тока асинхронный двигатель, рассчитанный на включение в номинальном режиме по схеме «треугольник», вначале включается по схеме «звезда» (контакты  $KM_{пуск}$  – замкнуты, контакты  $KM_{раб}$  – разомкнуты), (рисунок 4.6). После разгона электродвигателя производится переключение: контакты  $KM_{раб}$  – замыкаются, контакты  $KM_{пуск}$  – размыкаются, при этом собирается схема включения «треугольник».

При включении обмоток статора по схеме «звезда» пусковой ток снижается в 3 раза по сравнению со схемой включения в «треугольник». Снижается также в 3 раза и мощность, развиваемая электродвигателем при пуске [3]. Поэтому данный способ снижения пускового тока можно применять лишь при нагрузке не более  $1/3$  номинальной. К тому же, как было выше сказано, данный способ применим лишь в случае, когда номинальная схема включения обмоток статора – «треугольник».

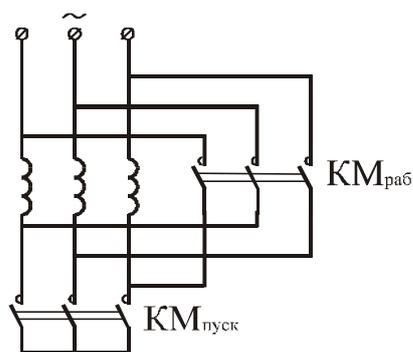


Рисунок 4.6 – Схема переключения обмоток статора со «звезды» на «треугольник» при пуске

## 2. Понижением напряжения на статоре во время пуска с помощью автотрансформатора

Схема трансформаторного пуска представлена на рисунке 4.7.

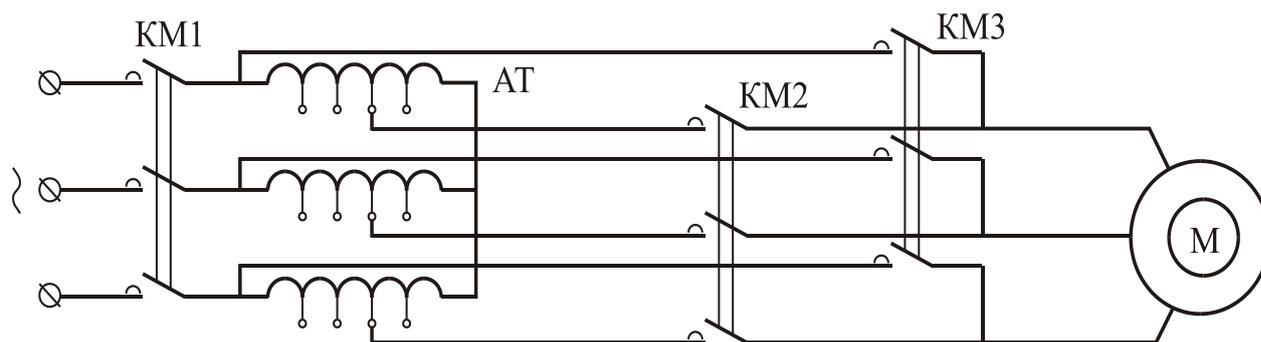


Рисунок 4.7 – Схема автотрансформаторного пуска асинхронного электродвигателя

Схема работает следующим образом: при пуске включается пускатель КМ1, затем КМ2 (КМ3 – разомкнут). По мере разгона двигателя пускатель КМ2 отключают и включают КМ3, который подает на двигатель полное напряжение. Во время пуска на двигателе может быть установлена практически любая величина напряжения (от 0 до напряжения сети). Кроме того, во время пуска также можно проводить регулирование напряжения, тем самым устанавливать и регулировать величину пускового тока в широких пределах.

*Преимущества* этого способа ограничения пускового тока:

- 1) пусковой ток может регулироваться плавно и в широких пределах;

2) этот способ регулирования пускового тока применим для всех типов асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, при любой схеме включения статорных обмоток и любой величине питающего напряжения.

*Недостатками* этого способа является то, что мощность и масса-габаритные показатели автотрансформатора соответствуют мощности и массе двигателя, что существенно повышает первоначальные затраты на оборудование. Кроме того, регулирование величины напряжения во время пуска двигателя предполагает применение специального устройства автоматики, что также удорожает конструкцию. Поэтому данный способ снижения пусковых токов применяется редко.

### 3. Снижение пускового тока помощью тиристорного регулятора напряжения (ТРН)

Силовая часть (ТРН) выполняется по одной из схем (рисунок 4.8).

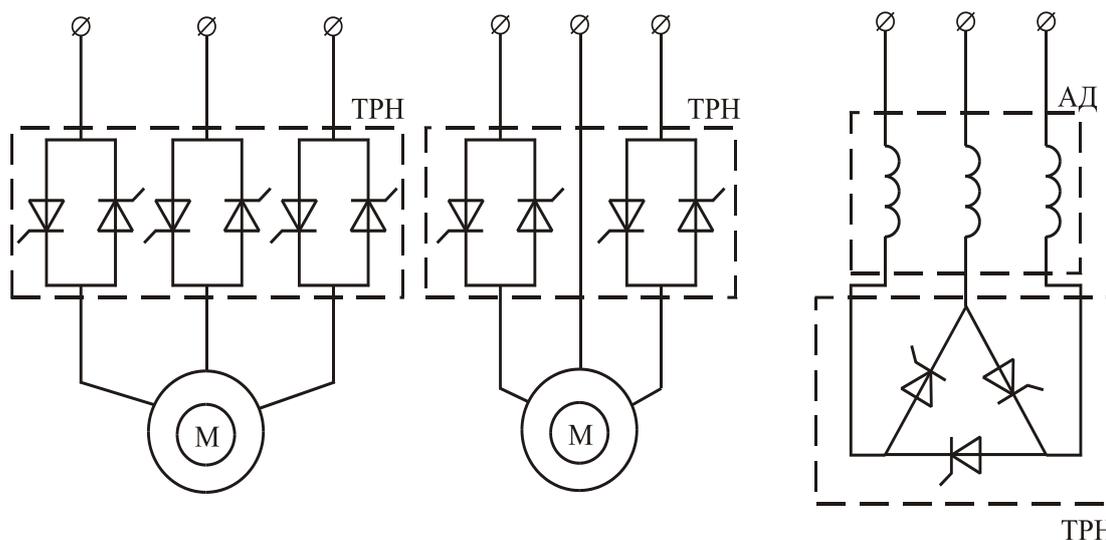


Рисунок 4.8 – Схема включения тиристорного регулятора напряжения

Значение напряжения на статоре асинхронного двигателя изменяют с помощью системы импульсно-фазового управления тиристоров. Рассмотрим особенности этого способа. С целью упрощения задачи возьмем только одну фазу, состоящую из двух встречно-параллельно включенных тиристоров VS1, VS2 и нагрузки  $Z_n$  (рисунок 4.9).

*Принцип регулирования напряжения на статоре:* система управления СУ выработывает сигнал, который подается на управляющий электрод тиристора VS1 или VS2 (рисунок 4.9, а). Момент открытия тиристора или угол регулирования  $\alpha$  задает система управления (СУ). Когда  $\alpha = 0$  то к статору двигателя прикладывается номинальное напряжение сети, пусковой ток максимален. Если система управления задержит момент открытия тиристорov на угол  $\alpha > 0$ , то к двигателю будет прикладываться часть напряжения (заштрихованная область на рисунке 4.9, б). Поэтому, снизится и пусковой ток двигателя. При угле регулирования  $\alpha = 180^\circ$  для однофазной нагрузки и  $\alpha = 150^\circ$  – для трехфазной или отсутствии сигнала управления пусковой ток будет равен нулю. Таким образом, изменяя угол  $\alpha$  в нужных пределах, регулируют пусковой ток асинхронного короткозамкнутого двигателя.

*Преимущества* этого способа ограничения пускового тока:

- 1) пусковой ток может регулироваться плавно и в широких пределах;
- 2) этот способ регулирования пускового тока применим для всех типов асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, при любой схеме включения статорных обмоток и любой величине питающего напряжения.

*Недостатками* этого способа является то, что устройство тиристорного регулятора напряжения (ТРН) получается достаточно дорогим (однако с быстрым развитием силовой электроники, происходит ее удешевление, поэтому этот способ ограничения пусковых токов – перспективен).

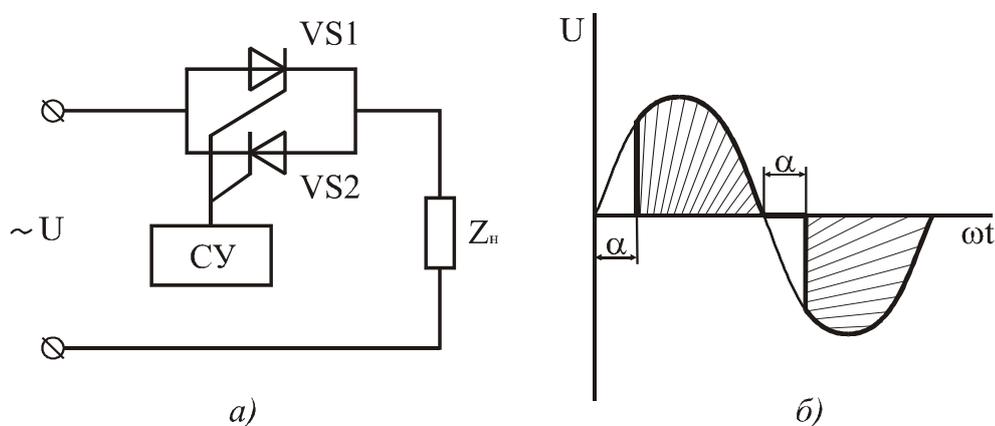


Рисунок 4.9 – Схема (а) и диаграмма регулирования напряжения (б) на нагрузке одной фазы

Другим недостатком применения ТРН является то, что при его работе возникает несинусоидальное напряжение и ток, которые оказывают отрицательное влияние на работу соседних электроприёмников, кроме того, при работе ТРН возникают радиопомехи, которые оказывают вредное воздействие на приборы и обслуживающий персонал.

#### 4. Включение добавочных сопротивлений в цепь обмотки статора

При этом активные ( $R_{доб}$ ) или индуктивные сопротивления ( $X_{доб}$ ) вводят в цепь обмоток статора для уменьшения пусковых значений тока и момента. Схема включения изображена на рисунке 4.10.

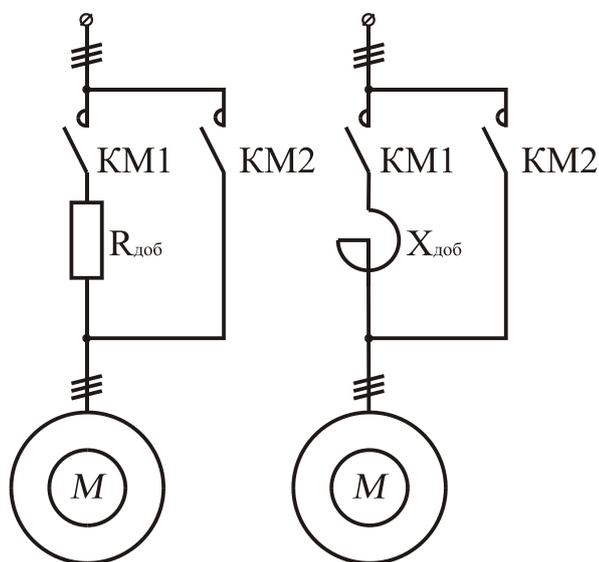


Рисунок 4.10 – Схема включения добавочных сопротивлений в цепь статора

В качестве активных сопротивлений применяют ящики резисторов с чугунными, проволочными или ленточными элементами. Индуктивные сопротивления выполняют в виде катушек с сердечником или без него. Пусковые токи мощных электродвигателей снижают реакторами, применяемыми для ограничения токов короткого замыкания.

*Преимущества* этого способа ограничения пускового тока:

- 1) простота осуществления и относительная дешевизна;
- 2) этот способ регулирования пускового тока применим для всех типов асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, при любой

схеме включения статорных обмоток и любой величине питающего напряжения.

*Недостатком* этого способа является то, пуск двигателя получается излишне затяжным, т. к. в начале пуска, когда наблюдается максимальный пусковой ток, на добавочных сопротивлениях наблюдается наибольшее падение напряжения, а на двигателе, соответственно – минимальное.

## **4.6 Асинхронных электродвигателей серии 4А**

### **4.6.1 Основные характеристики серии 4А**

Эта серия охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 высотах оси вращения – от 50 мм до 355 мм. Двигатели мощностью до 11 кВт выпускаются с тремя, а по заказу потребителя – с шестью выводными концами. Соединение обмотки – треугольник или звезда. Двигатели мощностью выше 15 кВт изготавливают с шестью выводными концами.

Показатели надёжности асинхронных двигателей:

- средний срок службы – 15 лет при наработке 40000 часов;
- средний срок службы до первого капитального ремонта – 8 лет при наработке 20000 часов;

Серия асинхронных двигателей 4А включает:

- 1) двигатели основного исполнения;
- 2) модификации;
- 3) двигатели специализированного исполнения.

#### **1. Двигатели основного исполнения**

Они выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот оси вращения. Это трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанный на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты **IP 44** или **IP 23**.

Под понятием «степень защиты электрических машин» подразумевается защита обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машин, и защита от попадания внутрь твердых, посторонних тел и воды. Нормы защиты обозначаются двумя

латинскими буквами **IP** и двух цифр. **Первая цифра** характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в неё твердых посторонних тел; **вторая цифра** – степень защиты от проникновения воды внутрь машины.

**Первая цифра** может быть 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6. Чем больше цифра, тем лучше защита. Цифра **2** означает: защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм. Цифра **4** означает: защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и от проникновения твердых тел размером более 1 мм.

**Вторая цифра** может быть 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8. Чем больше цифра, тем лучше защита. Цифра **3** означает: защита от дождя (дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие). Цифра **4** означает: защита от брызг (вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие).

## **2. Модификации**

Модификации (как и двигатели специализированного исполнения) построены на базе машин основного исполнения. Они выпускаются отдельными отрезками серий на определенные мощности и предназначены для применения в механизмах, работающих в специфических условиях, отличных от нормальных.

### **2.1) Электрические модификации асинхронных двигателей:**

- а) двигатели с повышенным пусковым моментом;
- б) двигатели с повышенным номинальным скольжением;
- в) многоскоростные двигатели;
- г) двигатели с частотой питания 60 Гц.

### **2.2) Конструктивные модификации асинхронных двигателей:**

- а) двигатели с фазным ротором;
- б) малошумные двигатели;
- в) двигатели со встроенными электромагнитными тормозами;
- г) двигатели со встроенной температурной защитой;
- д) встраиваемые (для моноблочных насосов и др.).

2.3) Модификации исполнений по условиям окружающей среды:

- а) двигатели тропического исполнения;
- б) химостойкие двигатели;
- в) двигатели сельскохозяйственного исполнения;
- г) двигатели влагоморозостойкого исполнения;
- д) двигатели пылезащищённого исполнения;
- е) двигатели рудничного исполнения.

### 3. Двигатели специализированного исполнения:

- 1) высокоточные двигатели;
- 2) двигатели привода лифтов;
- 3) частотно-управляемые двигатели;
- 4) двигатели привода деревообрабатывающих станков.

#### 4.6.2 Маркировка электродвигателей серии 4А

Ниже представлена маркировка асинхронных электродвигателей серии 4А:

$$\frac{4A}{1} \quad \frac{X}{2} \quad \frac{X}{3} \quad \frac{X}{4} \quad \frac{X}{5} \quad \frac{X}{6} \quad \frac{X}{7} \quad \frac{X}{8}$$

где 1 – название серии (4А);

2 – исполнение асинхронного двигателя по способу защиты: если на втором месте стоит буква **Н** – исполнение **IP 23**, отсутствие на втором месте буквы означает исполнение **IP 44**;

3 – исполнение асинхронного двигателя по материалу станины и щитов: **А** – станина и щиты алюминиевые; **Х** – станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов), отсутствие буквы – станина и щиты чугунные или стальные;

4 – высота оси вращения, мм (две или три цифры);

5 – установочный размер по длине станины: буквы **S**, **M** или **L** (меньший, средний или больший);

6 – длина сердечника: **А** – меньшая, **В** – большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что приданном

установочном размере (**S**, **M** или **L**) выполняется только одна длина сердечника;

7 – число полюсов асинхронного двигателя (одна или две цифры);

8 – климатическое исполнение и категория размещения.

Климатическое исполнение:

**У** – электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озёрах для микроклиматических районов с умеренным климатом; **ХЛ** – то же самое, но с холодным климатом; **ТВ** – то же самое, но с влажным тропическим климатом; **ТС** – то же самое, но с сухим тропическим климатом; **Т** – то же самое, но как с сухим так и с влажным тропическим климатом; **О** – для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение); **М** – электрические машины, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренно-холодным морским климатом; **ТМ** – то же самое, но с морским тропическим климатом; **В** – электрические машины, предназначенные для всех микроклиматических районов на суше и на море.

Категория размещения:

1 – для эксплуатации на открытом воздухе; 2 – для эксплуатации на открытом воздухе или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе; 3 – для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий; 4 – для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например в закрытых отапливаемых производственных помещениях); 5 – для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотпливаемых и неветилируемых помещениях, в том числе в шахтах).

#### **4.7 Основные сведения о трехфазных асинхронных двигателях новых серий 5А, 6А, АИР**

В настоящее время отечественная промышленность выпускает электродвигатели следующих серий: АИР, АИВ, 4А, 5А, 6А [1]. Электродвигатели выпускаются в базовом и модифицированном исполнениях.

1. Основное (базовое) исполнение – к этой группе относятся трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором монтажного исполнения IM1001, рассчитанный на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты

IP54 (IP55) или IP23. Двигатели основного исполнения выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот осей вращения, они обладают типовыми техническими характеристиками, соответствующими требованиям стандартов.

2. Модифицированное исполнение – к этой группе относятся двигатели, изготовленные на основе узлов основных (базовых) двигателей с необходимыми конструктивными отличиями по способу монтажа, степени защиты, климатическому исполнению и другими отличиями. К двигателям модифицированного исполнения относятся двигатели специального назначения – двигатели, предназначенные для узкоспециализированного применения, например, электродвигатели привода лифтов, грузоподъемных механизмов и др.

Ниже приведена структура обозначения электродвигателей [1]:

$$\begin{array}{cccccc} \frac{XX}{1\ 2} & \frac{X}{3} & \frac{X}{4} & \frac{X}{5} & \frac{X}{6} & \frac{X}{7} \end{array}$$

где 1 – обозначение серии;

2 – признак модификации;

3 – габарит (высота оси вращения, мм);

4 – установочный размер;

5 – число полюсов;

6 – признак отличия по назначению;

7 – климатическое исполнение.

1. Обозначение серии: АИР, АИВ, 5А, 6А и др.

2. Признак модификации:

1) пристраиваемые – П; 2) модернизированные – М; 3) с алюминиевой станиной – Х; 4) с фазным ротором – К; 5) повышенного скольжения – С; 6) с самовентиляцией – Н; 7) с принудительным охлаждением – Ф; 8) встраиваемые – В; 9) однофазные – ЕУ; 10) для транспорта – Э; 11) с повышенным пусковым моментом – Р.

3. Габарит (высота оси вращения, мм): две или три цифры (80, 112 и др.).

4. Установочный размер по длине станины: S (меньшая), M (средняя), L (большая); вариант длины сердечника: А (меньший), В (большой). Отсутствие в обозначении буквы А или В означает, что при данном установочном размере (S, M или L) выполняется только одна длина сердечника.

5. Число полюсов: однозначное или двухзначное четное число 2; 4; 6; 8; 10; 12 или 2/4 и др. (для двухскоростных двигателей).

6. Признак отличия по назначению:

1) с датчиком температурной защиты обмотки – Б; 2) с датчиком температуры подшипника – Б1; 3) с датчиком и антиконденсатным подогревателем – Б2; 4) повышенной точности по установочным размерам – П; 5) малошумные – Н; 6) для лифтов – Л; 7) для станков качалок – С; 8) для сушильных шкафов – СШ; 9) для АЭС – А (А1, А2, А3).

7. Климатическое исполнение и категория размещения:

Двигатели имеют исполнения для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным (У), тропическим (Т), умереннохолодным (УХЛ) и холодным климатом (ХЛ) в условиях, определяемых категориями размещения: 1 – на открытом воздухе; 2 – под навесом при отсутствии прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков; 3 – в закрытых помещениях без искусственного регулирования климатических условий; 4 – в закрытых помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями.

В таблице 3 приведены значения климатических факторов – температуры и влажности воздуха для перечисленных выше условий.

Таблица 3 – Климатические факторы

Климатическое исполнение	Категория размещения	Рабочая температура		Максимальное значение Относительной влажности
		верхнее значение	нижнее значение	
У	1, 2	+ 40 °С	– 45 °С	100 при 25 °С
У	3	+ 40 °С	– 45 °С	98 при 25 °С
УХЛ	4	+ 35 °С	+ 1 °С	80 при 25 °С
Т	2	+ 50 °С	– 10 °С	100 при 35 °С
ХЛ, УХЛ	1, 2	+ 40 °С	– 60 °С	100 при 25 °С

В дополнение к обозначению двигателя указывается:

А) монтажное исполнение – ИМ;

Б) напряжение питающей сети – 380 В (220/380 В и др.);

В) степень защиты – IP.

А. Монтажное исполнение (ИМ) обозначается четырьмя цифрами:

Первая цифра в обозначении – конструктивное исполнение двигателя:

1 – двигатель на лапах с подшипниковыми щитами;

2 – двигатель на лапах с подшипниковыми щитами и фланцем на одном подшипниковом щите;

3 – двигатель без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на одном подшипниковом щите;

5 – двигатель без станины и подшипниковых щитов.

Вторая и третья цифры в обозначении – способ монтажа двигателя (на лапах, на фланце, вертикальное, горизонтальное и др.).

Четвертая цифра в обозначении – исполнение вала двигателя:

0 – без вала;

1 – с одним цилиндрическим концом вала;

2 – с двумя цилиндрическими концами вала.

В. Степень защиты (IP) обозначается двумя цифрами:

Первая цифра характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в неё твердых посторонних тел.

Первая цифра может быть 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6. Чем больше цифра, тем лучше защита. Например, цифра 2 означает: защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размером свыше 12 мм. Цифра 4 означает: защита от проникновения внутрь оболочки проволоки диаметром более 1 мм.

Вторая цифра – степень защиты от проникновения воды внутрь машины.

Вторая цифра может быть 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8. Чем больше цифра, тем лучше защита. Цифра 3 означает: защита от дождя (дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие). Цифра 4 означает: защита от брызг (вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие).

В обозначении двигателя может применяться использование нескольких отличительных признаков модификации и назначения. Обозначение двигателя пишется слитно, пробел не применяется.

## **Пример маркировки электродвигателя и расшифровки его параметров**

5АМХ132М2БПУ2 – электродвигатель серии 5А; модернизированный, с алюминиевой станиной; высота оси вращения – 132 мм; установочный размер по длине станины – М (средняя); в данном типоразмере двигателя выполняется только одна длина сердечника (деление на меньший или больший не предусмотрено); число полюсов – 2 (это означает, что двигатель имеет синхронную скорость  $n_0 = 3000$  об/мин); двигатель имеет датчик температурной защиты (Б), а также повышенную точность по установочным размерам (П); двигатель предназначен для эксплуатации в макроклиматических районах с умеренным климатом (У); категория размещения – 2 (под навесом при отсутствии прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков).

В зависимости от уровня коэффициента полезного действия (КПД) все электродвигатели делятся на 2 группы:

1. Двигатели с нормальным КПД;
2. Двигатели с повышенным КПД.

Суммарные потери двигателей с повышенным КПД примерно на 20% меньше, чем у двигателей с нормальным КПД. Двигатели с повышенным КПД дополнительно маркируются строчной буквой «е».

Пример: 5АМ280М4еУ2

### **Сервис-фактор**

Электродвигатели основного (базового) исполнения могут иметь сервис-фактор, равный 1,1 или 1,15, то есть допускать перегрузку на 10 и 15% соответственно при номинальных напряжениях и частоте. При этом превышение температуры обмоток двигателя составляет не более 10%. При длительной работе двигателя с сервис-фактором (перегрузкой), его ресурс снижается, при этом повышение температуры подшипникового узла требует более частой смены смазки.

Двигатели, имеющие сервис-фактор 1,15 могут длительно работать при отклонении напряжения  $\pm 10\%$  и номинальной нагрузке.

Двигатели могут длительно работать при температуре окружающей среды, превышающей максимальную рабочую температуру. В этом случае во

избежание недопустимого превышения температуры обмоток отдаваемая мощность должна быть снижена до значений, указанных в таблице 4 [1].

Таблица 4 – Снижение мощности двигателя в зависимости от температуры окружающей среды

Температура окружающей среды, °С	+ 40	+ 45	+ 50	+ 55	+ 60
Отдаваемая мощность, %	100	96	92	87	82

Двигатели, имеющие сервис-фактор 1,15, допускают длительную эксплуатацию при номинальной мощности и номинальном напряжении при температуре окружающей среды до + 50°С.

Двигатели серий АИР, 5А, 6А имеют изоляционную систему класса нагревостойкости F (температурный индекс 155 °С). При этом превышение температуры обмоток статора над температурой окружающей среды двигателей, имеющих сервис-фактор 1,15 – не более 83 °С, двигателей, имеющих сервис-фактор 1,1 не более 90 °С.

Двигатели предназначены для эксплуатации на высоте до 1000 метров над уровнем моря. Двигатели могут эксплуатироваться на высоте, превышающей 1000 м над уровнем моря, однако их отдаваемая мощность должна быть снижена до значений, указанных в таблице 5 [1].

Таблица 5 – Снижение мощности двигателя в зависимости от высоты над уровнем моря

Высота над уровнем моря, м	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4300
Отдаваемая мощность, %	100	98	95	92	88	84	80	74

### Пусковые характеристики

Пусковые характеристики определяются величинами кратности пускового ( $M_{п}$ ), минимального ( $M_{мин}$ ) и максимального (критического) ( $M_{к}$ ) момента к номинальному моменту ( $M_{н}$ ). Также к пусковым характеристикам относится кратность пускового тока – отношение величины тока при пуске ( $I_{п}$ ) к номинальному току двигателя ( $I_{н}$ ).

## Механические характеристики

Механическая характеристика (кривая моментов) это зависимость угловой скорости вращения от момента, развиваемого двигателем в процессе его пуска  $\omega = f(M)$ . Также механическая характеристика может быть определена как зависимость частоты вращения от момента  $n = f(M)$ , а также скольжения от момента  $s = f(M)$ .

Типичные механические характеристики трехфазных электродвигателей основного исполнения (серий 5А, 6А, АИР) приведены на рисунке 4.11.

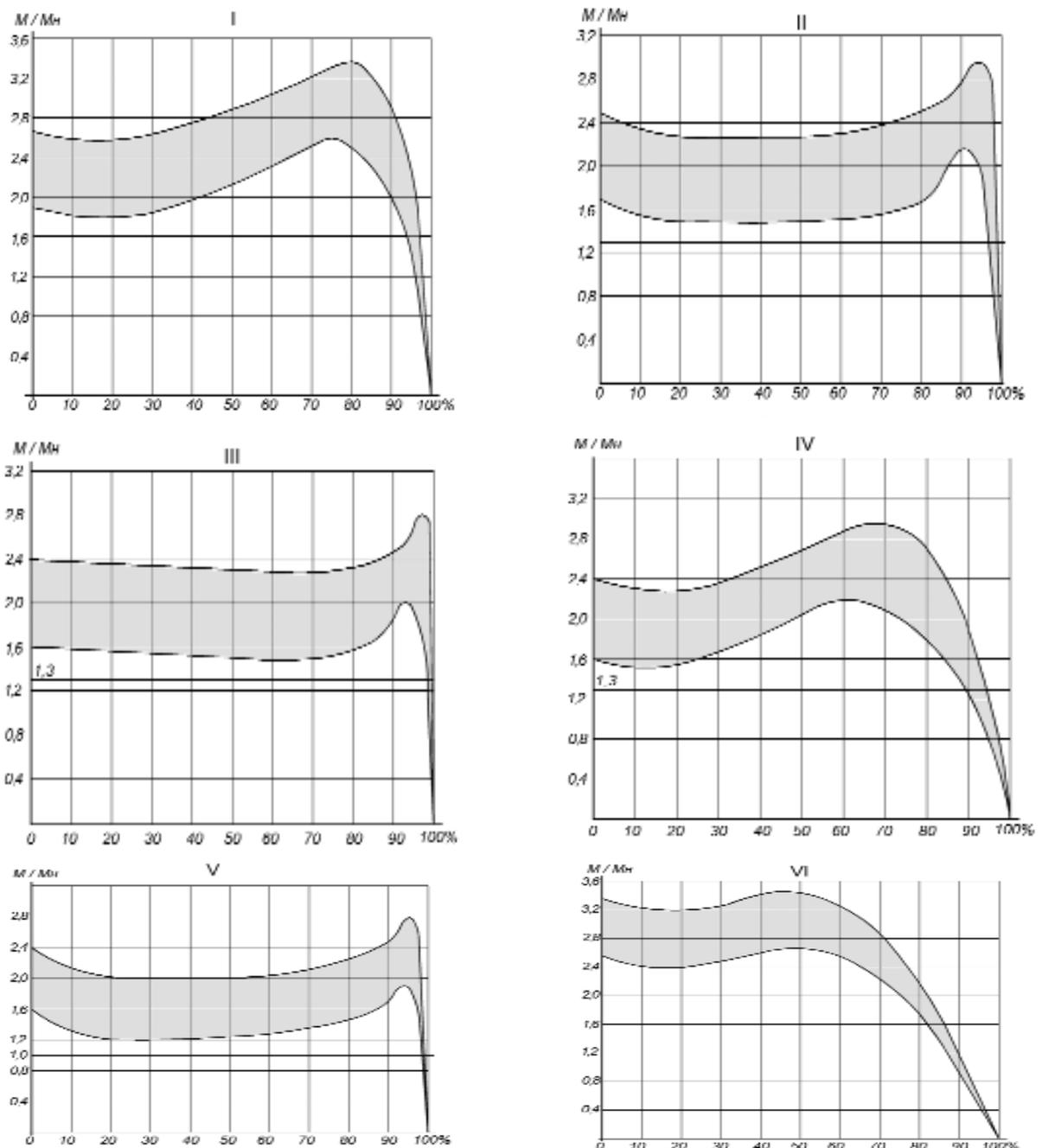


Рисунок 4.11 – Типичные механические характеристики электродвигателей серий 5А, 6А, АИР

## 4.8 Асинхронные генераторы

Генераторный режим асинхронной машины может быть осуществлен в двух случаях:

1) Асинхронный двигатель работает на сеть, питаемую синхронным генератором (схема независимого возбуждения).

2) Асинхронный двигатель работает на изолированную сеть, если в сети есть батарея конденсаторов достаточной ёмкости.

То есть в обоих случаях для возбуждения асинхронной машины в режиме генератора требуется реактивный намагничивающий ток, примерно равный току холостого хода машины в режиме двигателя.

В первом случае (схема независимого возбуждения) асинхронный генератор получает необходимый реактивный ток от синхронного генератора, загружая его и сеть соответствующей реактивной мощностью, что снижает коэффициент мощности всей установки.

Во втором случае (схема самовозбуждения) асинхронная машина получает необходимое возбуждение за счет емкостного тока батареи конденсаторов, присоединенной параллельно обмотки статора.

Если ротор асинхронной машины, включенной в сеть переменного тока, раскрутить в направлении поля статора со скоростью выше синхронной ( $n_2 > n_0$ ), то машина окажется в области отрицательных скольжений (генераторный режим) и будет отдавать активную мощность в сеть.

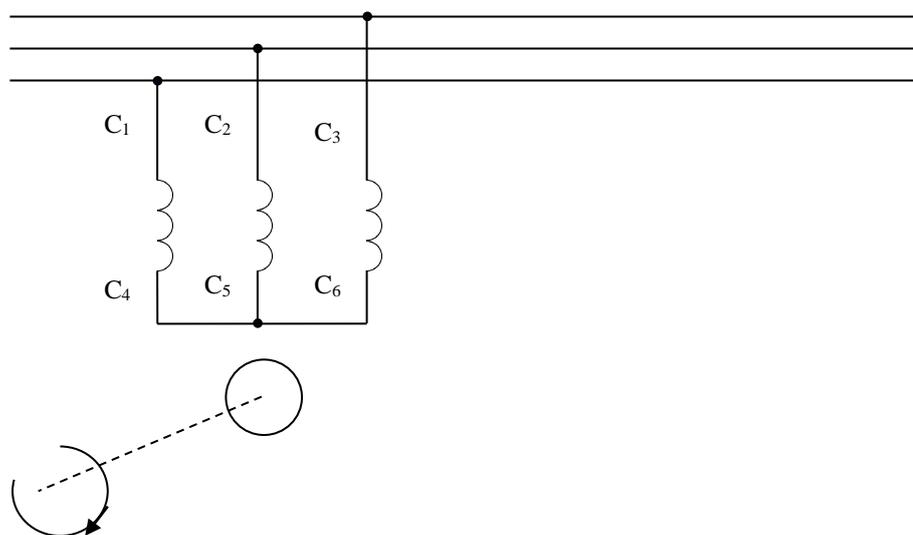


Рисунок 4.12 – Схема асинхронного генератора

Активную мощность, отдаваемую асинхронным генератором в сеть, регулируют незначительным и плавным изменением величины отрицательного скольжения (числа оборотов ротора  $n_2$ ), меняя механическую мощность, подводимую со стороны первичного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного генератора при независимом возбуждении от сети.

Рабочие характеристики асинхронного генератора:

1) Ток статора  $I_1$  от активной мощности, которую вырабатывает асинхронный генератор  $P_1$ :  $I_1 = f(P_1)$ ;

2) Подводимой к генератору механической мощности  $P_2$  от активной мощности, которую вырабатывает асинхронный генератор  $P_1$ :  $P_2 = f(P_1)$ ;

3) Коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  от активной мощности, которую вырабатывает асинхронный генератор  $P_1$ :  $\cos \varphi_1 = f(P_1)$ ;

4) Коэффициента полезного действия  $\eta$  от активной мощности, которую вырабатывает асинхронный генератор  $P_1$ :  $\eta = f(P_1)$ ;

5) Скольжения  $s$  от активной мощности, которую вырабатывает асинхронный генератор  $P_1$ :  $s = f(P_1)$ ;

Все эти зависимости снимаются при постоянных: напряжении сети  $U_1$ ; частоте  $f_1$ .

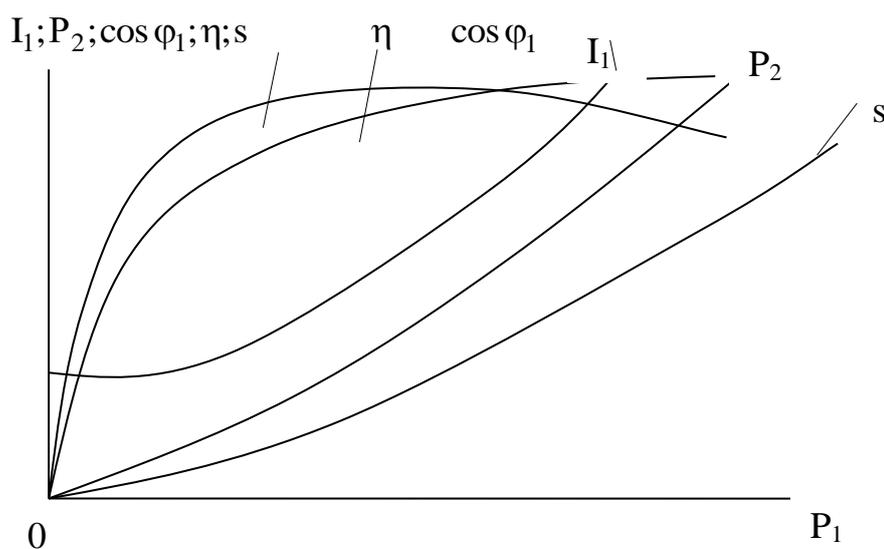


Рисунок 4.13 – Рабочие характеристики асинхронного генератора независимого возбуждения

Для загрузки машины в режиме генератора её переводят в область отрицательных скольжений, для чего несколько увеличивают число оборотов первичного двигателя. После чего загружают асинхронный генератор до его номинальной мощности (до номинального тока статора по паспорту машины). При этом снимают и рассчитывают рабочие характеристики генератора. При этом необходимо пользоваться формулами:

Скольжение:

$$s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100, \quad (4.4)$$

где  $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$  — число оборотов вращающегося поля статора;

$n_2$  — число оборотов ротора.

Отдаваемая генератором мощность:

$$P_1 = 3 \cdot P_{1\phi}. \quad (4.5)$$

Коэффициент мощности генератора:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1}. \quad (4.6)$$

Подводимая к генератору механическая мощность от первичного двигателя:

$$P_2 = U \cdot (I_{\text{я}} + I_{\text{в}}) \cdot \eta_{\text{дв}}, \quad (4.7)$$

где  $U$  — постоянное напряжение подводимое к приводному двигателю постоянного тока;

$I_{\text{я}}$  — ток в цепи якоря двигателя;

$I_{\text{в}}$  — ток в цепи возбуждения двигателя;

$\eta_{\text{дв}}$  — КПД двигателя;

КПД асинхронного генератора:

$$\eta_{\text{г},\%} = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100. \quad (4.8)$$

## 4.9 Трехфазная асинхронная машина в режиме индукционного регулятора и регулируемого индукционного сопротивления

Асинхронная машина с контактными кольцами помимо основного режима (как двигатель) можно использовать еще в следующих режимах:

- 1) в качестве поворотного трансформатора (фазорегулятора), при заторможенном роторе.
- 2) в качестве индукционного регулятора (поворотного автотрансформатора), при заторможенном роторе.
- 3) в качестве регулируемого индуктивного сопротивления, при заторможенном роторе.

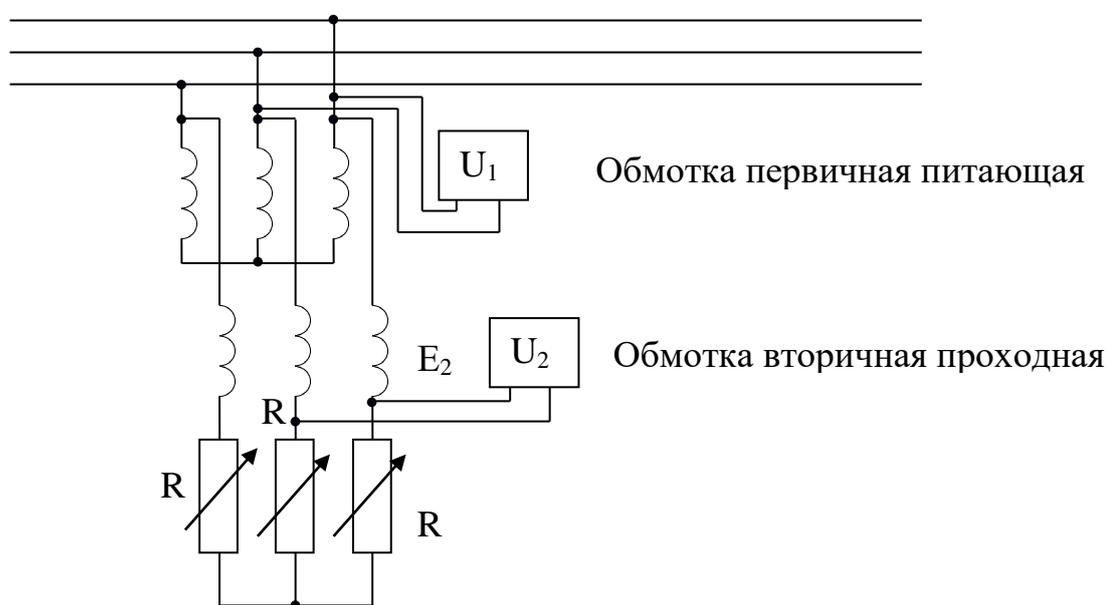


Рисунок 4.14 – Схема включения индукционного регулятора

### 4.9.1 Режим индукционного регулятора

В данном режиме одну из обмоток асинхронной машины-статора или ротора, называемую первичной или питающей присоединяют к сети, а другую, называемую вторичной или проходной, включают между сетью и нагрузкой, требующей плавного изменения напряжения.

При выборе, какую обмотку принять за питающую (статора или ротора) сравнивают напряжение сети и номинальное напряжение обмотки. При равенстве этих напряжений схему можно собирать.

В схеме индукционного регулятора, ток, протекающий по первичной обмотки, создает вращающееся магнитное поле, которое наводит в фазах проходной обмотки э. д. с.  $E_2$ . Вторичное напряжение найдется как:  $U_2 = \sqrt{3}(\dot{U}_{1\phi} + \dot{E}_2)$ . Поворачивая ротор на любой угол  $\alpha$ , то есть изменяя взаимное расположение осей обмоток соответствующих фаз ротора и статора вызывают сдвиг по фазе между э. д. с.  $E_2$  и первичным напряжением  $U_{1\phi}$ . Поэтому вторичное напряжение  $U_2$  изменяется от  $U_{2\max} = \sqrt{3}(U_{1\phi} + E_2)$  до  $U_{2\min} = \sqrt{3}(U_{1\phi} - E_2)$ , что является пределами регулируемого напряжения.

При  $E_2 = U_{1\phi}$  напряжение  $U_{2\max} = 2\sqrt{3}U_{1\phi}$ ,  $U_{2\min} = 0$ . Одновременно с изменением величины напряжения  $U_2$  изменяется его фаза, что в некоторых случаях является недостатком. Чтобы устранить этот недостаток (чтобы не менялась фаза) применяются сдвоенные индукционные регуляторы.

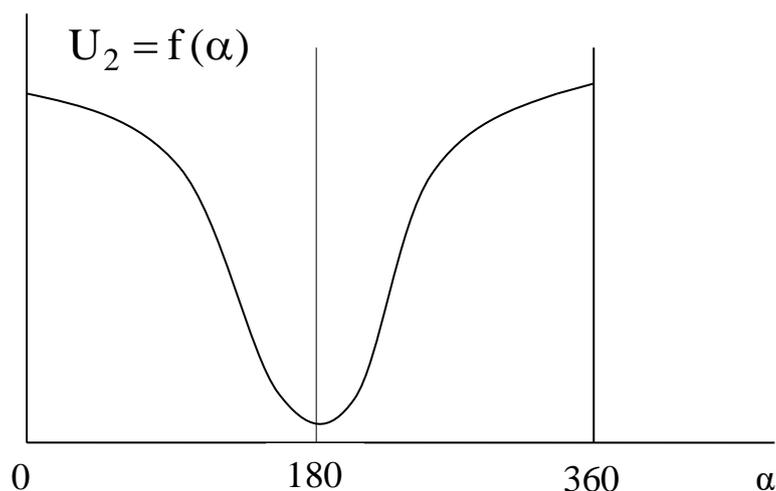


Рисунок 4.15 – Зависимость вторичного напряжения индукционного регулятора от угла поворота ротора

Внешняя характеристика индукционного регулятора представляет зависимость вторичного напряжения  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$ :  $U_2 = f(I_2)$  при следующих условиях:  $U_1 = \text{постоянное}$ ;  $\alpha = \text{постоянное}$ ;  $\cos \varphi_2 = \text{постоянное}$ ;

Опыт проводят по вышеприведенной схеме в следующем порядке:

- 1) при отключенной нагрузке устанавливают вторичное напряжение  $U_2 \approx U_1$ ;

2) подключают нагрузку, при неизменном положении ротора, постепенно нагружают индукционный регулятор до тока, равного номинальному току проходной обмотки;

3) по опытным данным снимают зависимость  $U_2 = f(I_2)$ .

Изменение напряжения при переходе от холостого хода к нагрузке в индукционном регуляторе больше, по сравнению с обычным автотрансформатором из-за большего индуктивного сопротивления его обмоток.

#### 4.9.2 Регулируемое индуктивное сопротивление

В таком режиме может работать асинхронная машина с заторможенным ротором при последовательном или параллельном соединении обмоток статора и ротора.

Выбор схемы при данном напряжении сети определяется:

- 1) напряжением обмоток;
- 2) требуемым диапазоном регулирования тока.

Чаще используют схему последовательного соединения обмоток. Такая схема позволяет получить на выходе минимальное значение тока, близкое к 0.  $I_{\min} \approx 0$ .

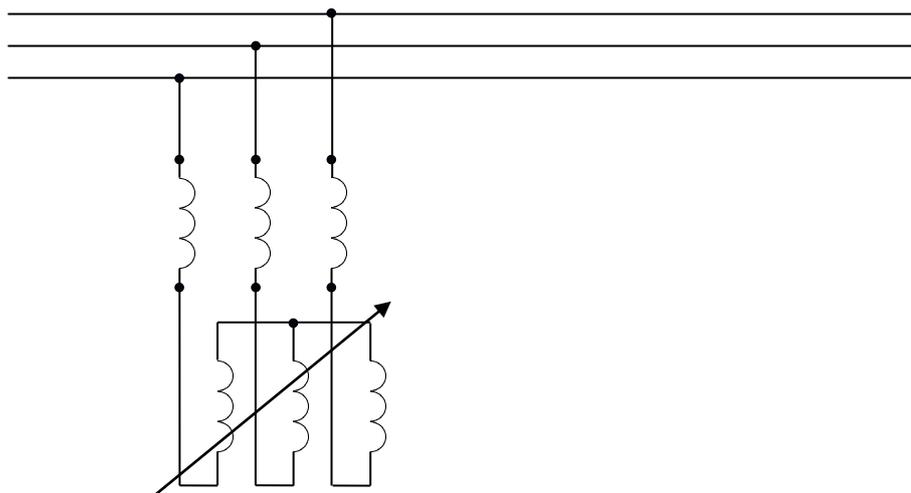


Рисунок 4.16 – Схема включения индукционного регулятора при использовании его в режиме регулируемой реактивной катушки

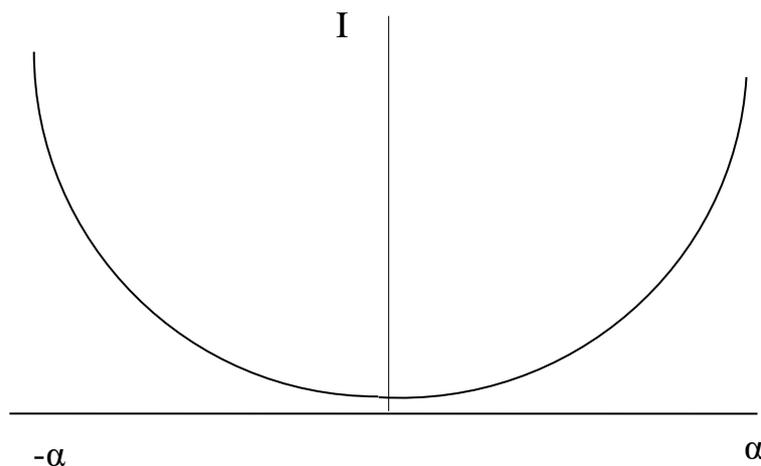


Рисунок 4.17 – Зависимость тока реактивной катушки от угла  $\alpha$  поворота ротора

Подключают схему к сети, предварительно установив ротор в положение, обеспечивающее минимальное значение потребляемого тока  $I_{\min}$ , при этом угол  $\alpha$  между осями обмоток соответствующих фаз статора и ротора равен нулю ( $\alpha = 0$ ). При изменении угла поворота в пределах:  $-180^\circ < \alpha < +180^\circ$  ток меняется от максимального, через минимальный до максимального.

Характер кривой тока объясняется изменением магнитной связи обмоток статора и ротора и, следовательно, индуктивного сопротивления фазы при изменении угла  $\alpha$ .

### Контрольные вопросы:

1. Где используются электромагнитные индукционные насосы?
2. Устройство и принцип действия винтового индукционного насоса.
3. Основные уравнения для расчета винтового индукционного насоса.
4. Как определяется механическая мощность насоса?
5. Устройство и принцип действия плоского индукционного насоса.
6. Как определяется скольжение в плоском индукционном насосе?
7. Генераторный режим работы асинхронной машины. При каких условиях возникает этот режим?
8. Привести электрическую схему асинхронного генератора.
9. Что требуется для возбуждения асинхронной машины, работающей в режиме генератора?

10. Каким образом регулируется активная мощность, отдаваемая асинхронным генератором в сеть?

11. Перечислить и изобразить рабочие характеристики асинхронного генератора.

12. В каких режимах (кроме двигательного) может работать асинхронная машина с контактными кольцами.

13. Охарактеризовать режим индукционного регулятора асинхронной машины, привести схему включения.

14. Что понимается под внешней характеристикой индукционного регулятора?

15. Охарактеризовать режим регулируемого индуктивного сопротивления асинхронной машины. Привести схему включения.

#### **4.10 Контрольные вопросы**

1. В чем асинхронные электродвигатели новых серий 5А и 6А превосходят электродвигатели старых серий А2 и 4А?

2. Назвать основные узлы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором?

3. Как устроены сердечники статора и ротора асинхронного электродвигателя. Почему они собираются из отдельных пластин электротехнической стали с изоляцией из диэлектрика?

4. На чем основан принцип действия асинхронного электродвигателя. Почему этот двигатель называется асинхронным?

5. От чего зависит и как определяется частота вращения магнитного поля асинхронного электродвигателя?

6. Каким образом и за счет чего в обмотке ротора появляется электрический ток?

7. В чем заключается физический смысл скольжения, как оно определяется и в каких единицах измеряется?

8. Что такое механическая характеристика асинхронного электродвигателя. Перечислить разновидности механических характеристик и как они определяются?

9. На какие два участка условно делится механическая характеристика. Как ведет себя электродвигатель на каждом из этих участков?

10. Назвать характерные точки механической характеристики асинхронного электродвигателя и координаты каждой из точек?
11. Какими символами обозначаются начала и концы обмоток статора. Как соединяются между собой обмотки статора, и к каким точкам подключаются фазы трехфазной обмотки?
12. Как правильно выбрать необходимую схему включения обмоток статора?
13. Как произвести реверсирование (изменение направления вращения) трехфазного асинхронного двигателя?
14. Перечислить преимущества асинхронных короткозамкнутых двигателей, по сравнению с двигателями других типов?
15. Назвать недостатки асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором?
16. Перечислить способы снижения пусковых токов асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором и охарактеризовать каждый из них?
17. Какие асинхронные электрические двигатели входят в состав серии 4А?
18. Что такое модификации и двигатели специализированного исполнения и чем они отличаются от электродвигателей основного исполнения серии 4А?
19. Перечислить модификации и двигатели специализированного исполнения?
20. Как производится маркировка электродвигателей серии 4А?
21. Расшифровать двигатели следующих марок: (4АНХ160SA2ТВ2; 4АА100МВ4У5; 4А200L6О4; 4АН100L2У3)

## 5. Синхронные электрические машины

Синхронные двигатели нашли применение в электроприводе благодаря высоким технико-экономическим показателям. В сельскохозяйственном производстве синхронные двигатели применяют в качестве электропривода насосов систем орошения, когда установленная мощность двигателя превышает 300 кВт [1]. Электрическая промышленность выпускает синхронные двигатели различного назначения. Двигатели СД2 и СД3 мощностью от 132 до 1000 кВт, СДМ-2 и СДМ-3 мощностью от 315 до 4000 кВт – общего применения. Двигатели СДК, СДКП, СДКМ мощностью от 315 до 5800 кВт выпускаются специально для привода компрессоров, мельниц и т.д. В настоящее время синхронные двигатели применяют в станкостроении, робототехнике, гибких производственных системах и т. д.

Синхронный двигатель состоит из статора и ротора. На статоре, как и у асинхронного двигателя, располагаются обмотки переменного тока, соединенные в «звезду» или «треугольник», на роторе находится обмотка возбуждения постоянного тока. Магнитная система машины выполняется явно- или неявнополюсной. Ее исполнение зависит от синхронной скорости и мощности двигателя. При частоте вращения 3000 об/мин синхронные двигатели выполняются с неявнополюсным ротором, при частоте 1500 об/мин и ниже – ротор явнополюсный. Возбуждение синхронных двигателей осуществляется от полупроводниковых статических преобразователей. Питание преобразователей может осуществляться от сети или специальной обмотки, размещенной в пазах статора. Существует бесщеточная система возбуждения от специальной обмотки, заложенной в пазы ротора машины.

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии магнитного потока ротора с вращающимся полем статора. При изменении нагрузки на валу от холостого хода до максимально-допустимого значения скорость двигателя остается неизменной равной  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{P}$ . Механическая характеристика имеет вид прямой, проходящей через  $\omega_0$  параллельно оси моментов. Приведенная механическая характеристика показывает зависимость установившегося значения скорости ротора от момента на валу. В действительности при изменении нагрузки на валу в переходных режимах мгновенное значение скорости не равно синхронной  $\omega_0$ . Так, при увеличении

нагрузки ротор начинает притормаживать, при уменьшении – разгоняться. В установившемся режиме скорость равна  $\omega_0$ .

Но всё же большая часть синхронных машин используется главным образом в качестве синхронных генераторов – источников электрической энергии переменного тока (однофазных и трехфазных)

## 5.1 Назначение синхронных машин

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока; их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, а также на передвижных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах). Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода. В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы. Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, гидрогенераторы – гидротурбинами, дизель-генераторы – двигателями внутреннего сгорания. Синхронные машины широко используют и в качестве электродвигателей при мощности 100 кВт и выше для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения. Для генерирования или потребления реактивной мощности с целью улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения применяют синхронные компенсаторы.

В электробытовых приборах (магнитофонах, проигрывателях, киноаппаратуре) и системах управления широкое применение получили различные синхронные микромашины – с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые, линейные. Микромашины – это машины, имеющие мощность до 500 В (0,5 кВт)

В 1876 г. русский ученый *П. Н. Яблочков* разработал несколько образцов многофазных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением и электрически несвязанными фазами, предназначенных для питания созданных им дуговых электрических ламп (свечи Яблочкова). Первый трехфазный синхронный генератор изобрел известный русский электротехник *М.О. Доливо-Добровольский*. Этот генератор имел мощность 230 кВт·А, приводился во

вращение от гидротурбины и обеспечивал электроснабжение международной электротехнической выставки в г. Франкфурте в 1891 г. по четырехпроводной электрической линии трехфазного тока.

Основная электромагнитная схема синхронных машин с тех пор оставалась неизменной, но усовершенствовалось их конструктивное выполнение и возросли электромагнитные нагрузки, что позволило значительно улучшить массогабаритные и энергетические показатели и нагрузочную способность синхронных машин. Особенно большие выгоды в этом отношении дало применение в крупных машинах водородного и водяного охлаждения.

В разработке теорий синхронных машин и совершенствовании их конструкции важная роль принадлежит советским ученым *А.Е. Алексееву, А.А. Гореву, Р.А. Лютеру, М.П. Костенко, В.А. Толвинскому* и др. Синхронные генераторы большой мощности разрабатывались на основе работ *А.И. Бертинова, А.И. Глебова, Д.Е. Ефремова, В.В. Романова, И.Д. Урусова, Г.М. Хуторецкого* и др.

В настоящее время советской электропромышленностью для тепловых и атомных электростанций разработана и выпускается серия унифицированных турбогенераторов мощностью 63, 125, 320, 500 и 800 МВт и уникальные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для атомных электростанций и 1200 МВт для тепловых электростанций. Для гидроэлектростанций созданы гидрогенераторы мощностью 350, 590 и 640 МВт, а также обратимые генераторы-двигатели для гидроаккумулирующих электростанций мощностью 200-300 МВт. Для высоковольтных линий электропередачи выпускаются синхронные компенсаторы мощностью до 350 МВ·А. Планируется начать разработки турбогенераторов мощностью 1600 – 2000 МВт и гидрогенераторов мощностью 1000 МВт.

## **5.2 Принцип действия синхронных машин**

Статор *1* синхронной машины (рисунок 1, *а*) выполнен так же, как и асинхронной: на нем расположена трехфазная (в общем случае многофазная) обмотка *3*. Обмотку ротора *4*, питаемую от источника постоянного тока, называют *обмоткой возбуждения*, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения. Вращающуюся обмотку ротора соединяют с внешним

источником постоянного тока посредством контактных колец 5 и щеток 6 (рисунок 5.1, б).

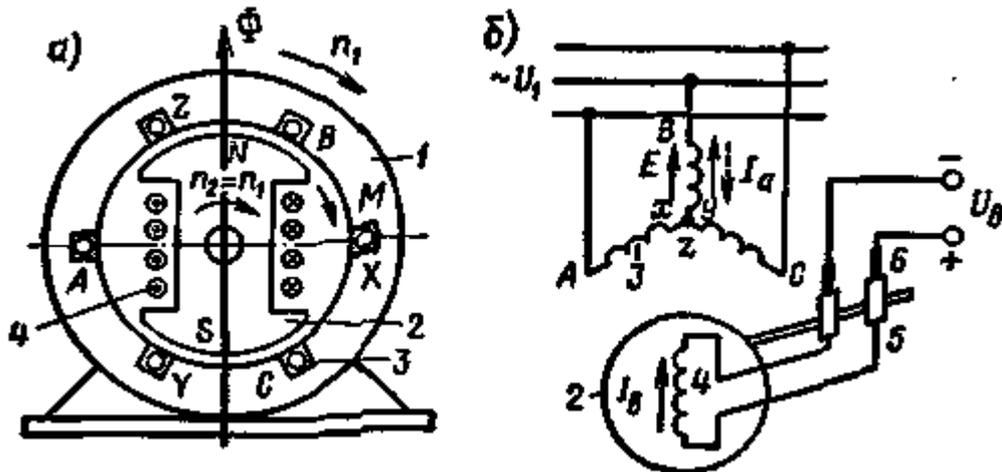


Рисунок 5.1 – Электромагнитная схема синхронной машины и схема её включения

При вращении ротора 2 с некоторой частотой  $n_2$  поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС  $E$ , изменяющуюся с частотой, определяемой по формуле (5.1):

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60}, \quad (5.1)$$

где  $p$  – число пар полюсов статора;  $n_2$  – частота вращения ротора, об/мин;

$f_1$  – частота ЭДС ( $E$ ), которая наводится в обмотке статора, Гц;

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по этой обмотке многофазный ток  $I_a$  создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по формуле (5.2):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (5.2)$$

Из выражений (5.1) и (5.2) следует, что  $n_1 = n_2$ , т. е. что ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Поэтому рассматриваемую машину называют синхронной. Результирующий магнитный поток  $\Phi_{рез}$  синхронной машины создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В синхронной машине обмотку, в которой индуцируется ЭДС и проходит ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, – индуктором. Следовательно, в приведенной машине (рисунок 5.1) статор является якорем, а ротор – индуктором. Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения – вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с обращенной конструктивной схемой: обмотку якоря, к которой подключают нагрузку, располагают на роторе, а обмотку возбуждения, питаемую постоянным током, – на статоре. Такую машину называют обращенной. Обращенные машины имеют сравнительно небольшую мощность, так как у них затруднен отбор мощности от обмотки ротора.

Синхронная машина может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к ней нагрузку, или параллельно с сетью, к которой присоединены другие генераторы. При работе параллельно с сетью она может отдавать или потреблять электрическую энергию, т. е. работать генератором или двигателем. При подключении обмотки статора к сети с напряжением  $U$  и частотой  $f_1$  проходящий по обмотке ток создает, так же как в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по формуле (5.2). В результате взаимодействия этого поля с током  $I_B$ , проходящим по обмотке ротора, создается электромагнитный момент  $M$ , который при работе машины в двигательном режиме является вращающим, а при работе в генераторном режиме – тормозным. В рассматриваемой машине в отличие от асинхронной поток возбуждения (холостого хода) создается обмоткой постоянного тока, расположенной обычно на роторе. В установившемся режиме ротор неподвижен относительно магнитного поля и вращается с частотой вращения  $n_1 = n_2$  независимо от механической нагрузки на валу ротора или электрической нагрузки.

Таким образом, для установившихся режимов работы синхронной машины характерны следующие особенности:

а) ротор машины, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах, вращается с постоянной частотой, равной частоте вращающегося магнитного поля, т. е.  $n_2 = n_1$ ;

б) частота изменения ЭДС (Е), индуцируемой в обмотке якоря, пропорциональна частоте вращения ротора;

в) в установившемся режиме ЭДС в обмотке возбуждения не индуцируется; МДС этой обмотки определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы машины.

### 5.3 Конструктивная схема синхронной машины

Синхронные машины выполняют с неподвижным или вращающимся якорем. Машины большой мощности для удобства отвода электрической энергии со статора или подвода ее выполняют с неподвижным якорем (рисунок 5.2, а). Поскольку мощность возбуждения невелика по сравнению с мощностью, снимаемой с якоря (0,3 – 2%), подвод постоянного тока к обмотке возбуждения с помощью двух колец не вызывает особых затруднений. Синхронные машины небольшой мощности выполняют как с неподвижным, так и с вращающимся якорем. В обращенной синхронной машине с вращающимся якорем и неподвижным индуктором (рисунок 5.2, б) нагрузка подключается к обмотке якоря посредством трех колец.

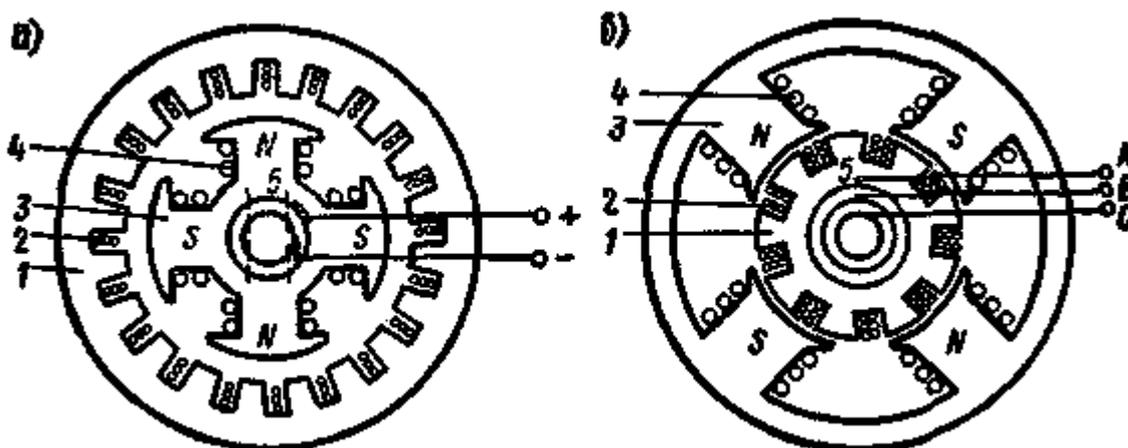


Рисунок 5.2 – Конструктивная схема синхронной машины с неподвижным и вращающимся якорем: 1 – якорь; 2 – обмотка якоря; 3 – полюсы индуктора; 4 – обмотка возбуждения; 5 – кольца и щетки

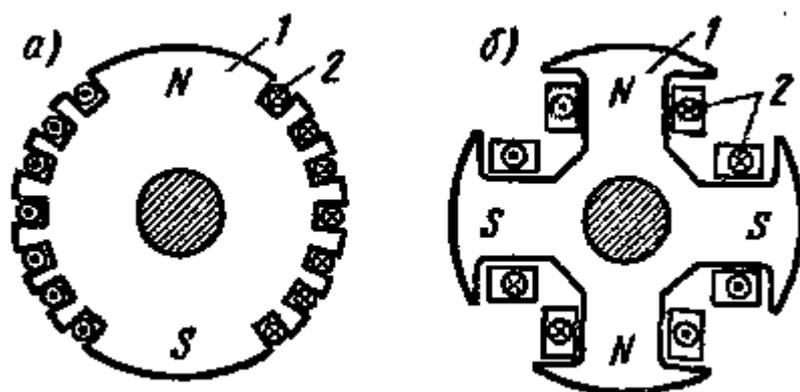


Рисунок 5.3 – Роторы синхронных неявнополюсной и явнополюсной машин:  
1 – сердечник ротора; 2 – обмотка возбуждения

Конструкция ротора. В синхронных машинах применяют две различные конструкции ротора: неявнополюсную – с неявновыраженными полюсами (рисунок 5.3, а) и явнополюсную – с явновыраженными полюсами (рисунок 5.3, б).

Двух- и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, изготовляют, как правило, с неявнополюсным ротором. Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотку возбуждения в такой машине размещают в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной поковки, и укрепляют немагнитными клиньями. Лобовые части обмотки, на которые воздействуют значительные центробежные силы, крепят с помощью стальных массивных бандажей. Для получения приблизительно синусоидального распределения магнитной индукции обмотку возбуждения укладывают в пазы, занимающие  $2/3$  полюсного деления.

Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя полюсами и более. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и укрепляют с помощью полюсных наконечников. Ротор, сердечники полюсов и полюсные наконечники изготовляют из листовой стали.

В синхронной машине (рисунок 5.4) сердечник статора собирают из изолированных листов электротехнической стали и на нем располагают трехфазную обмотку якоря. На роторе размещают обмотку возбуждения. В явнополюсных машинах полюсным наконечникам обычно придают такой

профиль, чтобы воздушный зазор между полюсным наконечником и статором был минимальным под серединой полюса и максимальным у его краев, благодаря чему кривая распределения индукции в воздушном зазоре приближается к синусоиде.

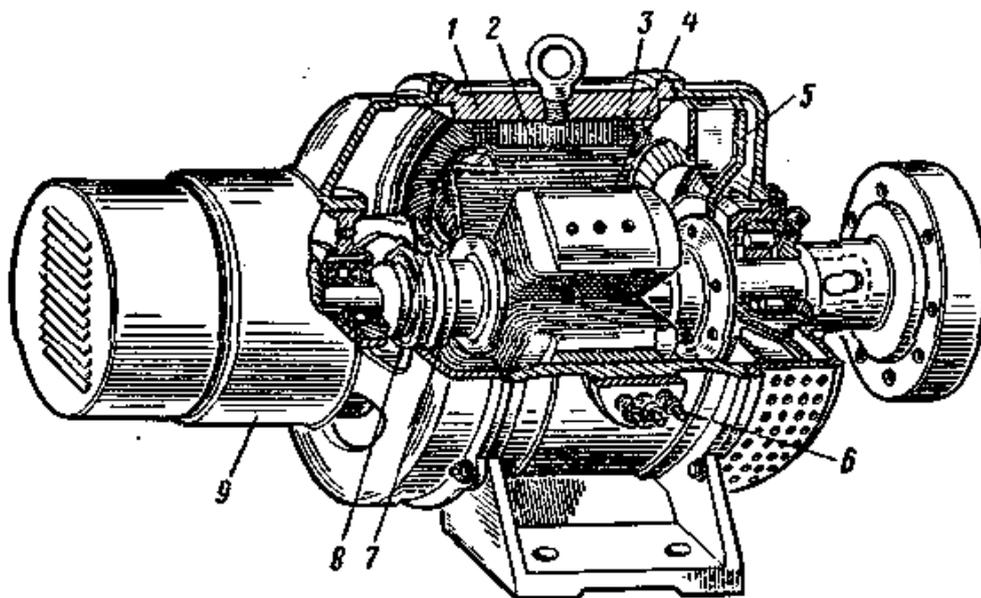


Рисунок 5.4 – Устройство явнополюсной машины: 1 – корпус; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – ротор; 5 – вентилятор; 6 – выводы обмоток; 7 – контактные кольца; 8 – щетки; 9 – возбудитель

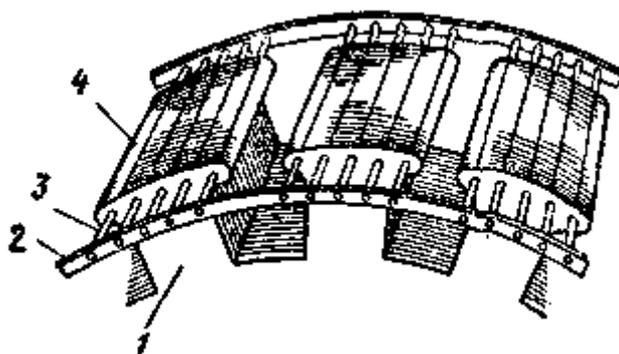


Рисунок 5.5 – Устройство пусковой обмотки в синхронных двигателях: 1 – полюсы ротора; 2 – короткозамыкающие кольца; 3 – стержни «беличьей клетки»; 4 – полюсные наконечники

В полюсных наконечниках синхронных двигателей с явно-полюсным ротором размещают стержни *пусковой обмотки* (рисунок 5.5), выполненной из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением (латуни). Такую же обмотку (типа «беличья клетка»), состоящую из медных стержней,

применяют и в синхронных генераторах; ее называют *успокоительной* или *демпферной обмоткой*, т. к. она обеспечивает быстрое затухание колебаний ротора, возникающих в переходных режимах работы синхронной машины. Если синхронная машина выполнена с массивными полюсами, то при пуске и переходных режимах в них возникают вихревые токи, действие которых эквивалентно действию тока в короткозамкнутой обмотке.

#### **5.4 Питание обмотки возбуждения синхронной машины**

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения различают системы независимого возбуждения и самовозбуждения. При независимом возбуждении в качестве источника для питания обмотки возбуждения служит генератор постоянного тока (возбудитель), установленный на валу ротора синхронной машины (рисунок 5.6, а), либо отдельный вспомогательный генератор, приводимый во вращение синхронным или асинхронным двигателем. При самовозбуждении обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через управляемый или неуправляемый выпрямитель – обычно полупроводниковый (рисунок 5.6, б). Мощность, необходимая для возбуждения, сравнительно невелика и составляет 0,3 – 3% от мощности синхронной машины.

В мощных генераторах кроме возбудителя обычно применяют подвозбудитель – небольшой генератор постоянного тока, служащий для возбуждения основного возбудителя. Основным возбудителем в этом случае может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем. Питание обмотки возбуждения через полупроводниковый выпрямитель, собранный на диодах или на тиристорах, широко применяют как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах (тиристорная система возбуждения). Регулирование тока возбуждения  $I_v$  осуществляется автоматически специальными регуляторами возбуждения, однако в машинах небольшой мощности применяется регулировка и вручную реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения. При необходимости форсирования возбуждения генератора повышают напряжение возбудителя и увеличивают выходное напряжение выпрямителя.

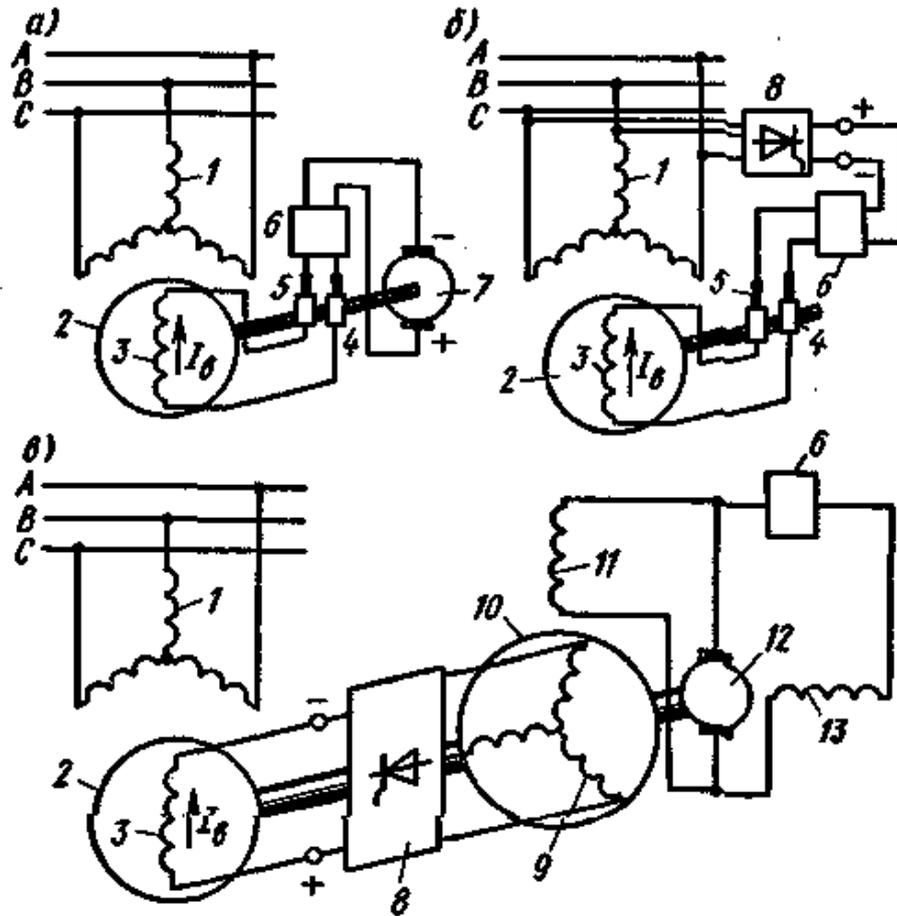


Рисунок 5.6 – Схемы возбуждения синхронной машины:

1 – обмотка якоря; 2 – ротор генератора; 3 – обмотка возбуждения; 4 – кольца; 5 – щетки; 6 – регулятор напряжения; 7 – возбудитель; 8 – выпрямитель; 9 – обмотка якоря возбудителя; 10 – ротор возбудителя; 11 – обмотка возбуждения возбудителя; 12 – подвозбудитель; 13 – обмотка возбуждения подвозбудителя

В мощных генераторах кроме возбудителя обычно применяют подвозбудитель – небольшой генератор постоянного тока, служащий для возбуждения основного возбудителя. Основным возбудителем в этом случае может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем. Питание обмотки возбуждения через полупроводниковый выпрямитель, собранный на диодах или на тиристорах, широко применяют как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах (тиристорная система возбуждения). Регулирование тока возбуждения  $I_v$  осуществляется автоматически специальными регуляторами возбуждения, однако в машинах небольшой мощности

применяется регулировка и ручную реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения. При необходимости форсирования возбуждения генератора повышают напряжение возбудителя и увеличивают выходное напряжение выпрямителя.

В современных синхронных генераторах применяют так называемую бесщеточную систему возбуждения (рисунок 5.6, в). При этом в качестве возбудителя используют синхронный генератор, у которого обмотка якоря расположена на роторе, а выпрямитель укреплен непосредственно на валу. Обмотка возбуждения возбудителя получает питание от подвозбудителя, снабженного регулятором напряжения. При таком способе возбуждения в цепи питания обмотки возбуждения генератора отсутствуют скользящие контакты, что существенно повышает надежность системы возбуждения.

## **5.5 Особенности конструкции синхронных машин большой мощности**

В синхронных машинах большой мощности отдельные части испытывают очень большие механические и электромагнитные нагрузки; по интенсивности нагрузок они превосходят все другие электрические машины. Поэтому в них выделяется большое количество теплоты, что требует применения весьма интенсивного охлаждения.

Стремление получить максимальную мощность в заданных габаритах или минимальные габариты при заданной мощности, характерное для проектирования всех электрических машин, в синхронных машинах привело к появлению своеобразных конструкций, сильно отличающихся друг от друга и определяемых в основном типом первичного двигателя.

По конструкции крупные синхронные машины подразделяют на турбогенераторы, гидрогенераторы, дизель-генераторы, синхронные компенсаторы и синхронные двигатели.

**Турбогенераторы.** Эти машины, приводимые во вращение быстроходными паровыми или газовыми турбинами, выполняют неявнополюсными. Турбогенераторы, предназначенные для установки на тепловых электростанциях обычного типа, работают, как правило, при максимально возможной частоте вращения 3000 об/мин (имеют два полюса), что позволяет существенно уменьшить габариты и массу машины, а также

паровой турбины. На атомных электростанциях реакторы вырабатывают пар с относительно низкими температурой и давлением. Поэтому для них более экономичными являются турбины и турбогенераторы с частотой вращения 1500 об/мин (они имеют четыре полюса). Однако из-за этого значительно увеличивается диаметр ротора турбогенератора (при одинаковой мощности приблизительно в  $\sqrt{2}$  раза).

Турбогенераторы выполняют с горизонтальным расположением вала ротора (рисунок 5.7). При мощности до 30 МВт они имеют поверхностное или косвенное (посредством обдува) воздушное охлаждение, а при больших мощностях – косвенное водородное. В турбогенераторах мощностью более 60 МВт применяют непосредственное внутреннее охлаждение проводов обмоток водородом, дистиллированной водой и трансформаторным маслом.

В турбогенераторах с косвенным водородным охлаждением Давление водорода составляет  $0,05 \cdot 10^5$  Па, при этом исключается проникновение воздуха внутрь корпуса через неплотности и масляные уплотнения концов вала. Смесь водорода с воздухом взрывоопасна при содержании водорода в смеси от 7 до 70%, поэтому содержание водорода в корпусе поддерживается на уровне примерно 97%. Несмотря на это, корпус машины с водородным охлаждением обычно рассчитывают так, чтобы давление, развивающееся при возможном взрыве водорода, не повредило машину.

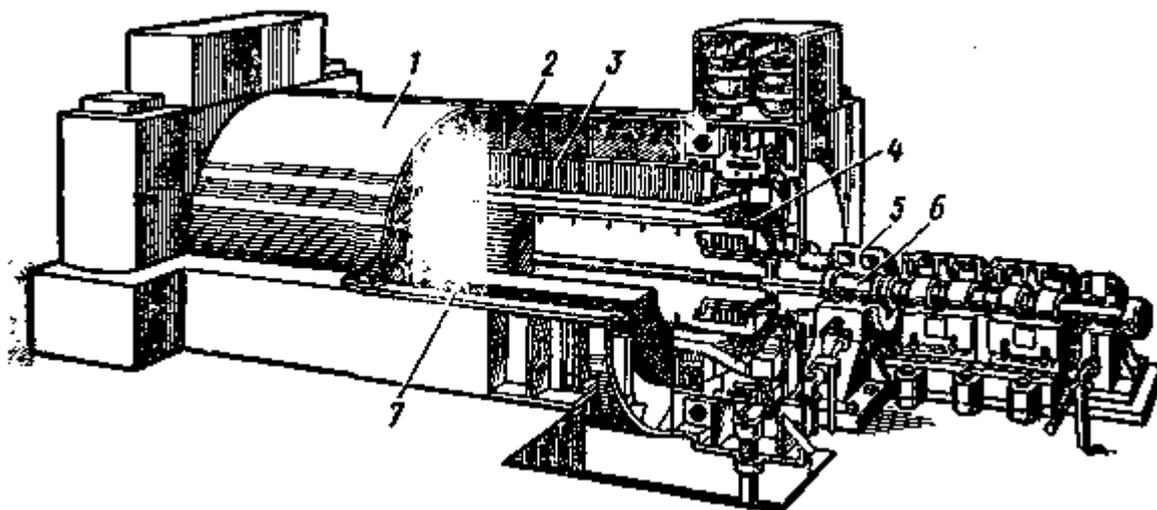


Рисунок 5.7 – Общий вид турбогенератора ТВВ-1200-2: 1 – корпус; 2 – камеры для сбора и распределения охлаждающего газа; 3 – статор; 4 – обмотка статора; 5 – подшипник; 6 – вал; 7 – ротор

## 5.6 Контрольные вопросы

1. Область применения, основные характеристики и принцип действия синхронных электродвигателей?
2. Где используются синхронные генераторы и от каких факторов зависит их конструкция?
3. Что такое синхронная микромашина, классификация синхронных микромашин, основные характеристики, область применения?
4. История создания синхронных машин, авторы внесшие наибольший вклад в изобретение этих электромашин?
5. Основные технические характеристики современных синхронных генераторов?
6. Принцип действия синхронной машины, её электромагнитная схема и схема включения?
7. Как определяется частота ЭДС, которая индуцируется в обмотке статора синхронной машины при ее работе?
8. Как соотносятся между собой частота вращения ротора  $n_2$  и скорость вращения магнитного поля синхронной машины  $n_1$ : 1)  $n_2 > n_1$ ; 2)  $n_2 = n_1$ ; 3)  $n_2 < n_1$  ?
9. Какая обмотка в синхронных машинах называется обмоткой якоря, а какая обмотка называется индуктором?
10. Как устроена синхронная машина с обращенной конструктивной схемой?
11. От чего зависит скорость вращения магнитного поля синхронной машины?
12. В чем принципиально отличаются асинхронные и синхронные машины. Особенности работы синхронных машин?
13. Возможные конструктивные схемы синхронных машин. Особенности применения синхронных машин с различными конструктивными схемами?
14. Конструкции ротора неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин. Области применения синхронных машин с различными конструкциями роторов?

15. Почему воздушный зазор между полюсным наконечником и статором явнополусной синхронной машины выполняется неодинаковым по длине полюса?

16. Устройство пусковой обмотки с синхронных машинах?

17. Как и от какого источника электрической энергии получают питание обмотки возбуждения синхронных машин?

18. Особенности конструкций современных синхронных турбогенераторов большой мощности?

## 6. Специальные электрические машины

### 6.1 Волновые электродвигатели

В электроприводах специального назначения находят применение так называемые волновые передачи (волновые редукторы). Они характеризуются значительным передаточным отношением (до 100 на одну ступень), небольшой массой и габаритом, высокой точностью, надежностью и долговечностью в работе.

Волновые двигатели сочетают свойства волновой передачи (волновых редукторов) и электрических машин. Это достигается конструктивным объединением волновой передачи и электрической машины.

Достоинства волнового двигателя:

1) низкая угловая скорость вала; 2) высокое быстродействие.

Масса и габариты электропривода при использовании волнового двигателя оказываются меньше, чем у привода, выполненного по обычной схеме: двигатель – редуктор.

Принцип действия волнового двигателя показан на рисунке 6.1.

Главной особенностью волнового двигателя заключается в конструкции ротора 1, который представляет собой гибкий цилиндр, способный деформироваться в радиальном направлении. На внешней поверхности ротора крепится гибкий зубчатый венец 2. На статоре двигателя 3 крепится жесткий зубчатый венец 4. (Статор двигателя по своей конструкции не отличается от статора обычного электродвигателя переменного тока). Венцы ротора и статора образуют обычную волновую передачу.

При подключении обмотки статора к сети трехфазного переменного тока появляется вращающееся магнитное поле с синусоидальным распределением магнитной индукции  $B_\delta$  в зазоре. На ферромагнитный ротор начнет действовать сила магнитного притяжения  $F_{м.п.}$ , которая пропорциональна квадрату магнитной индукции (штриховая линия).

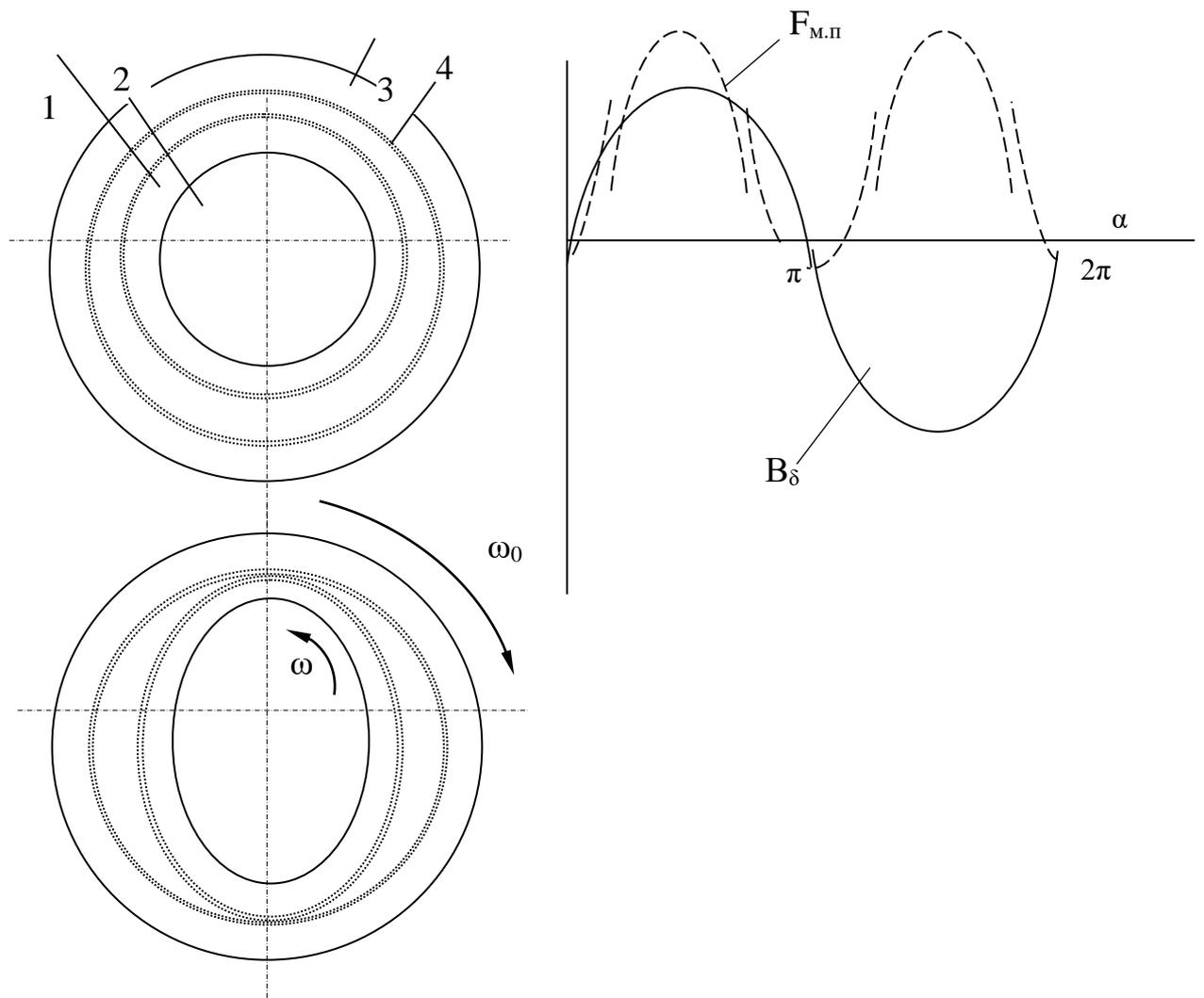


Рисунок 6.1 – Принцип действия волнового двигателя:

1 – ротор; 2 – гибкий зубчатый венец; 3 – статор двигателя; 4 – жесткий зубчатый венец;  $B_{\delta}$  – магнитная индукция;  $F_{m.п}$  – сила магнитного притяжения;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения магнитного поля (рад/с);  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора волнового двигателя (рад/с)

В результате действия силы  $F_{m.п}$  ротор деформируется и его зубчатый венец входит в зацепление с зубчатым венцом статора в двух диаметрально противоположных точках окружности статора. При вращении поля статора синхронно вращается и волна деформации ротора, в результате чего зубчатый венец ротора обкатывает зубчатый венец статора.

Так как венцы статора и ротора изготавливаются с разным числом зубьев  $z_c$  и  $z_p$ , то при обкатывании ротора его вал совершает ещё и медленное вращение вокруг своей оси, которое и является главным выходным движением

волнового двигателя. Скорость этого движения определяется по следующей формуле (6.1):

$$\omega = \frac{\omega_0 \cdot (z_c - z_p)}{z_p}, \quad (6.1)$$

Уменьшая разность между числами зубцов статора и ротора, можно получить низкие угловые скорости вала волнового двигателя.

Пример:  $z_c = 54$ ;  $z_p = 51$ ;  $\omega_0 = 314$  1/с.

$$\omega = \frac{\omega_0 \cdot (z_c - z_p)}{z_p} = \frac{314 \cdot (54 - 51)}{51} = 18,47 \text{ 1/с.}$$

По своим характеристикам рассмотренный волновой двигатель является реактивным синхронным двигателем (волновой двигатель может быть и индукторного типа). Действительно, ось деформации гибкого ротора вращается синхронно с осью магнитного поля, а скорость двигателя постоянна и находится в фиксированном отношении (формула (6.1)) со скоростью вращения магнитного поля  $\omega_0$ . При нагружении двигателя внешним моментом сопротивления происходит изменение взаимного положения осей поля статора и деформаций ротора и двигатель начинает развивать синхронизирующий момент, как обычный реактивный синхронный двигатель (СД). Этот момент уравнивает приложенный момент нагрузки, и вал двигателя продолжает вращаться со скоростью  $\omega$  при наличии некоторого пространственного сдвига между осями ротора и поля статора.

Вращающееся магнитное поле двигателя выполняет по существу роль электромагнитного генератора механических волн деформации, необходимого для работы обычной волновой передачи.

Широкое применение волновых двигателей ограничивается сложностью конструкции и технологии изготовления эластичного ротора. Из-за сравнительно невысоких энергетических показателей нецелесообразно изготовление и применение волновых двигателей на средние и большие мощности.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что называются зубцами волнового электродвигателя?
2. Устройство, принцип действия и основные технические характеристики волновых электродвигателей?

3. Достоинства и недостатки волновых электродвигателей?
4. Какое напряжение подается на вход волновых электродвигателей?
5. Как рассчитывается скорость вращения волновых электродвигателей и от чего она зависит?
6. Что такое сила магнитного притяжения  $F_{м.п}$  и от чего она зависит?

## 6.2 Электродвигатели с катящимся ротором

Принцип действия двигателя с катящимся ротором (ДКР) показан на рисунке 6.2.

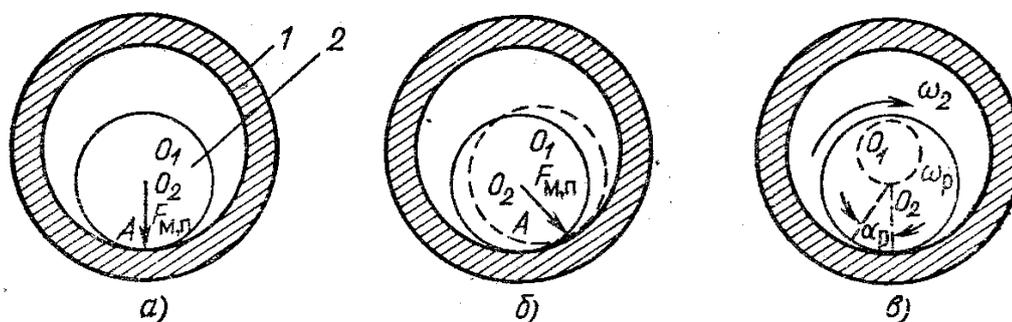


Рисунок 6.2 – К принципу действия двигателя с катящимся ротором

На рисунке 6.2 внешнее заштрихованное кольцо 1 представляет собой статор ДКР, выполняемый по аналогии со статором машины переменного тока. Внутри статора располагается гладкий ферромагнитный ротор 2, ось которого  $O_2$  не совпадает с осью статора  $O_1$ . Это несовпадение осей статора и ротора – эксцентриситет – является важным отличительным признаком ДКР на котором основывается принцип его действия.

Предположим, что в воздушном зазоре создано вращающееся магнитное поле, имеющее резко выраженный максимум магнитной индукции, что обычно достигается за счет подмагничивания ДКР постоянным магнитным потоком. Если в рассматриваемый момент времени (рисунок 6.2, а) этот максимум совпадает с точкой А, то ферромагнитный ротор под действием силы магнитного притяжения  $F_{м.п}$  займет положение, показанное на рисунке 1, а. Это положение ротора будет равновесным, т. к. направление силы  $F_{м.п}$  проходит через точку А касания статора и ротора.

Рассмотрим теперь другой момент времени, когда вращающееся магнитное поле повернулось против часовой стрелки на некоторый угол. Сила магнитного притяжения, совпадающая по направлению с максимумом индукции магнитного поля, также изменит свое направление и займет положение, показанное на рисунке 6.2, б. Поскольку направление силы  $F_{м.п}$  уже не проходит через точку касания статора и ротора, на последний (ротор) начнет действовать вращательный момент относительно точки А. Под действием этого момента ротор начнет перекачиваться по поверхности статора, стремясь вновь занять равновесное положение.

При непрерывном вращении магнитного поля ротор будет непрерывно перекачиваться по поверхности статора вслед за максимумом индукции этого поля. При таком обкатывании ось ротора  $O_2$  будет вращаться вокруг оси статора  $O_1$  со скоростью вращения магнитного поля, а сам ротор будет вращаться вокруг собственной оси в противоположную сторону со скоростью, во много раз меньше скорости вращения магнитного поля.

Из рисунка 6.2, в видно, что за полный оборот магнитного поля ротор из-за разности длин окружности качения статора  $L_c$  и ротора  $L_p$  повернется в противоположном направлении на угол  $\alpha_p$ , который как центральный угол может быть рассчитан по формуле (6.2):

$$\alpha_p = \frac{2\pi \cdot (L_c - L_p)}{L_p} = \frac{2\pi \cdot (D_c - D_p)}{D_p}, \quad (6.2)$$

где  $D_c$ ,  $D_p$  – диаметры статора и ротора.

Переходя в формуле (6.2) от углов к скоростям, получаем выражение (6.3).

$$\omega_p = \frac{\omega_0 \cdot (D_c - D_p)}{D_p}, \quad (6.3)$$

где  $\omega_p$  – угловая скорость вала электродвигателя с катящимся ротором, рад/с.

Выполняя ротор с диаметром близким к диаметру статора, можно получить весьма малые отношения  $\frac{D_c - D_p}{D_p}$  и тем самым малые скорости электродвигателя с катящимся ротором (ДКР). Коэффициент редукции

скорости, определяемый обратным соотношением  $\frac{D_p}{D_c - D_p}$ , для ДКР может достигать 1500, что является наиболее ценным свойством ДКР.

Кроме того, ДКР обладает высоким быстродействием – время его разбега и реверса составляет доли секунды. При торможении ДКР отключением переменного напряжения статора он за счет постоянного подмагничивания развивает тормозной момент, вследствие чего время и путь его торможения малы, а ротор фиксируется силой магнитного притяжения в конечном положении.

Достоинствами ДКР являются также большой пусковой момент и относительно небольшой пусковой ток, а также отсутствие в большинстве конструкций скользящих электрических контактов и высокоскоростных подшипников. Сравнительно высокими являются и энергетические показатели работы ДКР, которые улучшаются по мере роста их мощности.

Вместе с тем ДКР имеют и заметные недостатки. К ним в первую очередь относятся следующие недостатки:

- 1) сложность конструкции самого ДКР;
- 2) необходимость применения специальных механических устройств для передачи несоосного вращения ротора, к ним относится, например, передача Кардана;
- 3) работа ДКР сопровождается шумом и вибрациями, возникающими за счет действия центробежных сил вращения ротора.

Для примера рассмотрим конструкцию индукторного синхронного ДКР, показанную на рисунке 6.3.

В корпусе 1 сердечник статора 2 с обмоткой 3 и постоянные магниты 4. Обмотка статора 3 создает симметричное вращающееся магнитное поле  $\Phi_c$ , а постоянные магниты 4 – радиально направленное и неподвижное в пространстве магнитное поле  $\Phi_n$ . В результате сложения этих полей образуется вращающееся магнитное поле с резко выраженным максимумом магнитной индукции, которое перемещается вдоль окружности статора (вращается) со скоростью  $\omega_0$ .

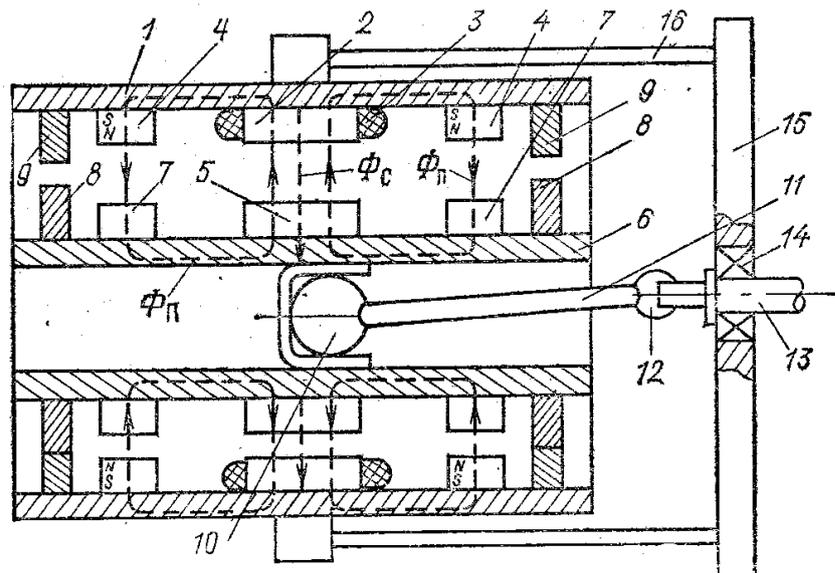


Рисунок 6.3 – Конструктивная схема индукторного синхронного ДКР

Сердечник 5 ротора набирается из листов электротехнической стали и не имеет обмоток. Он монтируется на полый ферромагнитной втулке 6, которая служит одновременно магнитопроводом для потока  $\Phi_{п}$  постоянного подмагничивания. На этой же втулке крепятся и кольцевые сердечники 7, являющиеся частью магнитопровода  $\Phi_{п}$ .

Особенностью конструкции рассматриваемого ДКР заключается в наличии на роторе специальных катков 8, которые при вращении ротора обкатываются по специальным направляющим статора 9. Их наружный диаметр несколько больше диаметра ротора, что устраняет его непосредственное соприкосновение со статором и тем самым их износ (статора и ротора).

Внутри полый втулки 6 располагается механизм передачи несоосного вращения ротора – карданная передача.

Эта передача включает в себя карданный шарнир 10, который с помощью карданного вала 11 соединяется с другим карданным шарниром 12. Выходной вал 13 двигателя вращается в подшипнике 14, размещенном во фланце 15. Этот фланец в совокупности с упругими стержнями 16 образует так называемую эластичную подвеску, которая позволяет снизить вибрацию приводимого в движение исполнительного органа.

На основе рассмотренной конструкции могут быть реализованы также ДКР с электромагнитным возбуждением и с зубчатыми поверхностями качения.

В первом случае постоянные магниты 4 заменяются электромагнитами, обмотка возбуждения которых включается на напряжение постоянного тока. Для реализации зубчатого зацепления статора и ротора гладкие обкатываемые поверхности заменяются зубчатой передачей.

Двигатели с катящимся ротором в настоящее время нашли применение в электроприводах дозаторов, часовых механизмов, манипуляторов, станков, электродов дуговых электрических печей, системах телеметрического управления.

Двигатели с катящимся ротором (ДКР) изготавливаются на мощности от нескольких ватт до нескольких киловатт.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое эксцентриситет в конструкции двигателя с катящимся ротором (ДКР)?
2. За счет чего в ДКР создается вращающееся магнитное поле, имеющее резко выраженный максимум магнитной индукции?
3. От чего будет зависеть скорость вращения магнитного поля ДКР?
4. С какой скоростью ось ротора  $O_2$  будет вращаться вокруг оси статора  $O_1$ ?
5. От чего зависит скорость вращения ДКР и как она рассчитывается?
6. Рассчитать скорость ДКР при следующих исходных данных:  $D_c = 130$  мм;  $D_p = 120$  мм; при различных синхронных скоростях (скоростях вращения магнитного поля)?
7. Что такое коэффициент редукции скорости и как он рассчитывается?
8. Назвать основные преимущества и недостатки ДКР?
9. Перечислить основные элементы статора индукторного синхронного ДКР?
10. Перечислить основные элементы ротора индукторного синхронного ДКР?
11. Какие элементы ДКР создают вращающееся магнитное поле?
12. Какие элементы ДКР создают неподвижное магнитное поле?
13. Роль катков (позиция № 8, рисунок 2) в конструкции ДКР?
14. Для чего служит карданная передача в конструкции ДКР и как она устроена?

15. Что такое эластичная подвеска в конструкции ДКР, роль эластичной подвески?

16. Возможные разновидности конструкций ДКР?

17. Перечислить области применения ДКР и их технические данные?

### 6.3 Линейные электродвигатели

Рабочие органы многих рабочих машин совершают поступательное (или возвратно-поступательное) движение. К таким рабочим машинам относятся следующие:

- 1) подъёмно-транспортные.
- 2) механизмы подачи станков.
- 3) кузнечные прессы и молоты и т. д.

При использовании для привода этих машин электродвигателей вращательного движения требуется сложная механическая передача (например, кривошипно-шатунный, передача винт-гайка). Такие передачи ненадежны, имеют низкий КПД.

На рисунке 6.4 показано, как обычный асинхронный двигатель преобразуется в линейный.

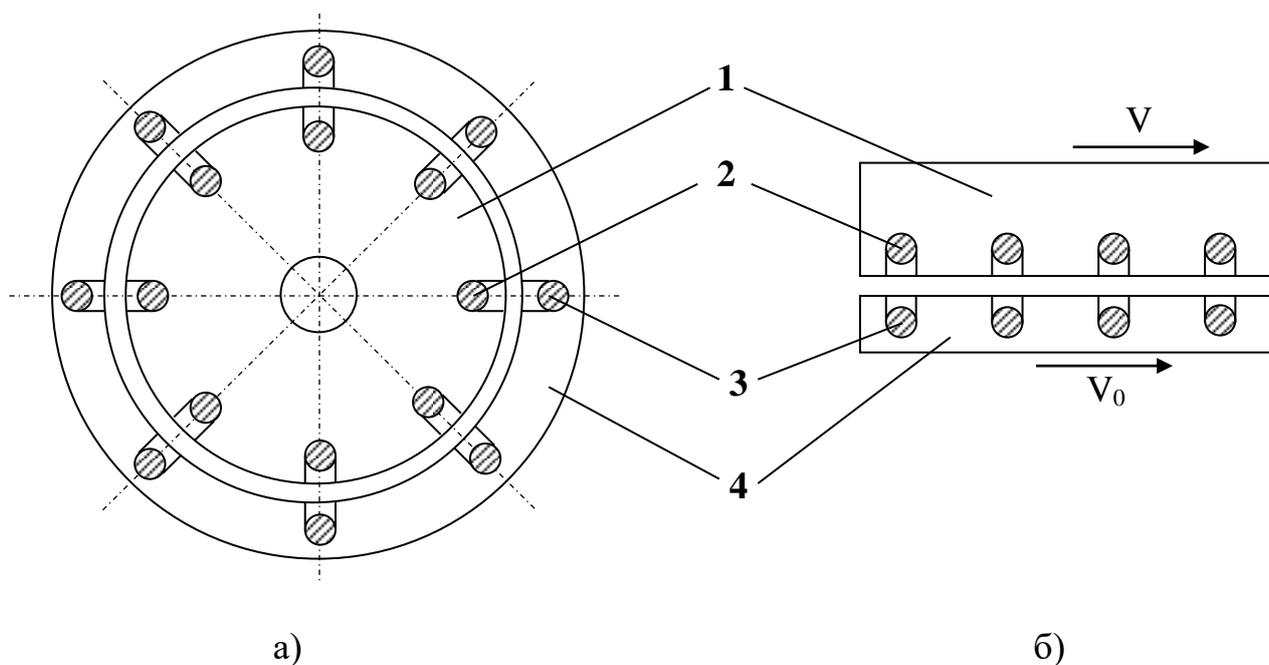


Рисунок 6.4 – Конструктивная схема обычного асинхронного двигателя (а) и линейного (б): 1 – ротор; 2 – обмотка ротора; 3 – обмотка статора; 4 – статор.

Применение линейных электродвигателей, движущая часть которых совершает поступательное линейное движение, позволяет упростить или полностью исключить механическую передачу. За счет этого повышается экономичность и надежность электропривода и рабочей машины.

Кроме того, при использовании линейных электродвигателей можно решить следующие проблемы:

- создать высокоскоростной электротранспорт с простейшей кинематической схемой;
- создать установку для перекачки жидких металлов.

Линейные электродвигатели по принципу действия делятся на следующие типы:

- 1) асинхронные;
- 2) синхронные;
- 3) постоянного тока.

### **Линейные асинхронные двигатели (ЛАД)**

Они получили наибольшее распространение из всех линейных электродвигателей. Чтобы создать такой двигатель нужно мысленно «разрезать» статор 4 и ротор 1 с обмотками 3 и 2 вдоль вертикальной оси и развернуть их в плоскость. Образовавшаяся плоская конструкция представляет собой ЛАД. Развернутый ротор ЛАД (поз. 1) называется вторичным элементом.

Если обмотки статора подключить к сети переменного тока, образуется магнитное поле, ось которого будет перемещаться вдоль воздушного зазора со скоростью, определяемой по формуле (6.4). Образуется бегущее магнитное поле:

$$V_0 = 2 \cdot \tau \cdot f, \quad (\text{м/с}), \quad (6.4)$$

где  $\tau$  – полюсное деление, м;

$f$  – частота питающего напряжения, Гц.

Полюсное деление может быть найдено по формуле (6.5):

$$\tau = \frac{L_{\text{ст}}}{2 \cdot p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ст}}}{2 \cdot p}, \quad (\text{м}), \quad (6.5)$$

где  $L_{\text{ст}}$  – длина внутренней поверхности статора, м;

$R_{\text{ст}}$  – радиус внутренней поверхности статора, м;

$p$  – число пар полюсов двигателя.

Магнитное поле, перемещающееся вдоль зазора, пересекает проводники обмотки 2 вторичного элемента 1 и индуцирует в них ЭДС, под действием которой по обмотке 2 начинают протекать токи. Взаимодействие токов обмотки вторичного элемента с бегущим магнитным полем приводит к появлению силы. Эта сила действует на вторичный элемент в направлении перемещения магнитного поля. Вторичный элемент под действием этой силы начнет перемещаться со скоростью  $V$  в сторону перемещения магнитного поля. Скорость движения вторичного элемента меньше скорости магнитного поля на величину скольжения (как и в обычном асинхронном двигателе):

$$s = \frac{V_0 - V}{V_0}, \quad (6.6)$$

На рисунке 6.4 показана схема ЛАД с односторонним статором и вторичным элементом одного с ним размера. В зависимости от назначения ЛАД его вторичный элемент может быть длиннее статора или короче его.

Если вторичный элемент длиннее статора, то такой ЛАД называется двигателем с коротким статором. Если вторичный элемент короче статора, то такой ЛАД называется двигателем с коротким вторичным элементом.

Вторичный элемент не всегда снабжается обмоткой. Это является большим достоинством подобных устройств. Так в качестве вторичного элемента может использоваться лист, полоса, рельс выполненные из стали, меди или алюминия.

ЛАД, со вторичным элементом, не имеющим обмотки может быть по конструкции:

- 1) односторонним (рисунок 6.5, а);
- 2) двухсторонним (рисунок 6.5, б).

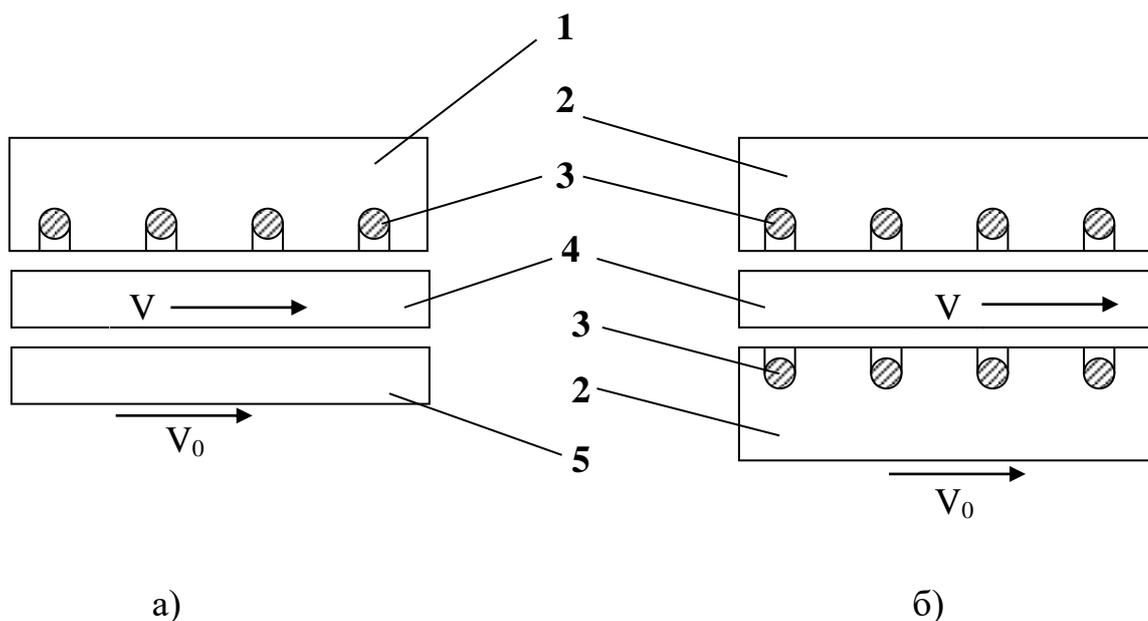


Рисунок 6.5 – Конструктивная схема одностороннего (а) и двухстороннего (б) ЛАД со вторичным элементом без обмотки:  
 1 – односторонний статор; 2 – двухсторонний статор; 3 – обмотка статора; 4 – вторичный элемент; 5 – ферромагнитный сердечник

Линейный двигатель со вторичным со вторичным элементом в виде полосы аналогичен обычному асинхронному двигателю с массивным ферромагнитным сердечником.

Обмотки статора ЛАД имеют те же самые соединения, что и обычные АД, и подключаются к сети трехфазного переменного тока.

Линейные двигатели могут работать в двух режимах: в прямом и обратном. В прямом режиме движется вторичный элемент (ротор), а статор – неподвижен. В обратном режиме движется статор, а вторичный элемент (ротор) – неподвижен.

Такие ЛАД называются двигателями с подвижным статором. Подобные двигатели применяются, в основном, на электрическом транспорте.

На рисунке 6.6 показан ЛАД, установленный на рельсовом транспортном средстве.

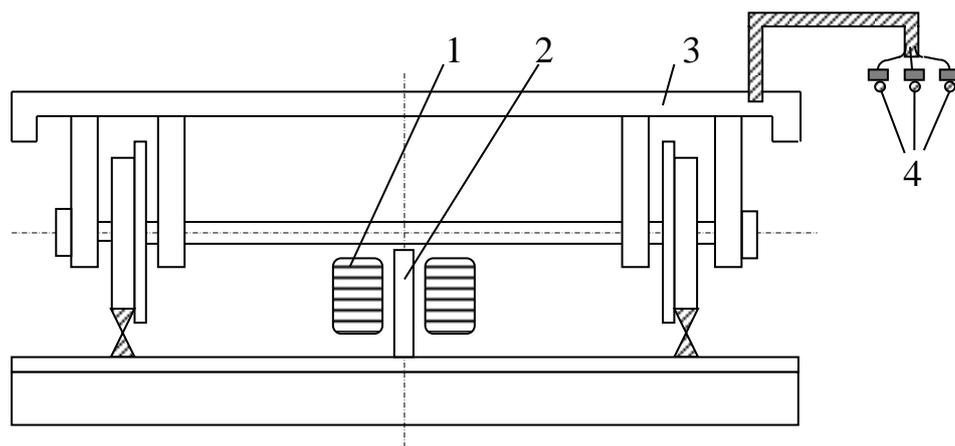


Рисунок 6.6 – Транспортное средство с ЛАД, работающим в обратном режиме: 1 – двухсторонний статор; 2 – металлическая полоса; 3 – тележка; 4 – троллеи (трехфазный подвод электроэнергии)

Двигатель с двухсторонним статором 1 крепится на тележке 3 подвижного состава. Вторичным элементом является укрепленная между рельсами металлическая полоса 2. Напряжение на движущийся статор двигателя подается с помощью скользящих контактов (троллеев). Линейные двигатели, где вторичным элементом служит рельс или другой элемент конструкции, используется для монорельсовых дорог и механизмов передвижения кранов.

На рисунке 6.7 показан ЛАД, предназначенный для механизмов транспортировки грузов.

Металлическая лента конвейера проходит внутри статоров 5 ЛАД, являясь его вторичным элементом. При использовании ЛАД устраняется проскальзывание ленты и появляется возможность увеличить скорость её движения. Кинематика электропривода предельно упрощается.

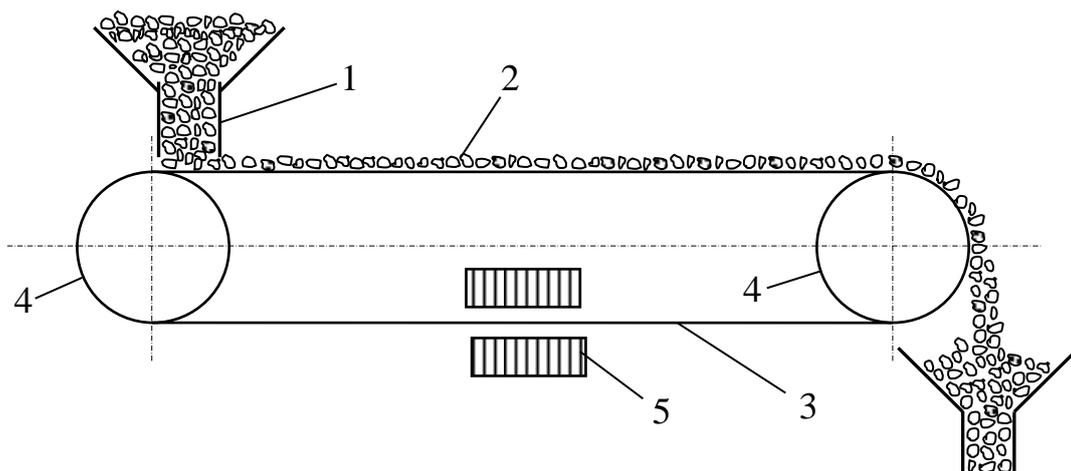


Рисунок 6.7 – Механизм транспортировки грузов с ЛАД, работающим в прямом режиме: 1 – бункер; 2 – сыпучий материал; 3 – металлическая лента; 4 – барабаны; 5 – двухсторонний статор

Линейные электродвигатели нашли применение для привода следующих механизмов:

- 1) сваебивочных молотов;
- 2) прессов;
- 3) ткацких станков;
- 4) вязальных машин;
- 5) слитковозов;
- б) толкателей.

В настоящее время ЛАД разработаны на мощности от нескольких ватт до нескольких сотен киловатт и скорости движения до 100 – 150 км/ч.

Недостатком ЛАД является то, что трудно обеспечить небольшой зазор между статором и вторичным элементом, особенно при работе электротранспорта. При большом зазоре ЛАД имеет низкий коэффициент мощности  $\cos \varphi$  и его применение оказывается экономически невыгодным.

### **Линейные двигатели постоянного тока (ЛДПТ)**

Линейные двигатели постоянного тока обычно применяются для обеспечения небольших перемещений, когда требуются значительные перестановочные усилия и высокая точность движения. ЛДПТ, как и двигатели вращательного движения, позволяют легко производить регулирования

скорости перемещения исполнительных органов (рабочих машин). Чаще всего ЛДПТ применяются в приводах подач различных станков.

### **Линейные синхронные двигатели (ЛСД)**

ЛСД находят наибольшее применение при создании высокоскоростного электротранспорта. Причина заключается в том, что большой зазор, характерный для электротранспорта, мало влияет на коэффициент мощности  $\cos \varphi$  ЛСД, т. к. синхронный электродвигатель может работать с любым  $\cos \varphi$  (положительным, отрицательным и равным единице).

Применение ЛСД в электрическом электротранспорте обычно сочетается с использованием магнитной подвески вагонов, сверхпроводящих магнитов и обмоток возбуждения. Мощность ЛСД в электротранспорте достигает нескольких тысяч кВт, скорость движения электротранспорта достигает 400 – 500 км/ч.

## **6.4 Шаговые электродвигатели**

Исполнительные органы ряда рабочих машин должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце перемещения. В электроприводах таких машин применяются шаговые двигатели (ШД) различных типов. Привод с использованием шаговых двигателей называется **дискретным электроприводом**.

Дискретный привод хорошо сочетается с цифровыми управляющими машинами и программами устройствами, которые всё шире применяются в последнее время. Так дискретный привод широко используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), для роботов и манипуляторов. Пример простейшей схемы двухфазного ШД показан на рисунке 6.8.

Шаговые двигатели ШД (импульсные) представляют собой синхронные двигатели небольшой мощности, у которых питание фаз обмотки статора осуществляется путем подачи импульсов напряжения от какого-то устройства (например, электронного коммутатора). Под воздействием каждого такого импульса ротор двигателя совершает определенное угловое перемещение, называемое шагом. В отличие от обычного синхронного двигателя магнитное поле в статоре не вращается непрерывно, а дискретно – шагами. Схема

управления преобразует одноканальную последовательность управляющих импульсов в многофазную систему напряжений, прикладываемую к обмоткам (фазам) ШД.

Шаговый двигатель имеет на статоре две пары явно выраженных полюсов, на которых находятся обмотки возбуждения (управления). Обмотка 1-1 с выводами 1Н-1К и обмотка 2-2 с выводами 2Н-2К. Каждая из обмоток состоит из двух частей, находящихся на противоположных полюсах ШД.

Питание обмоток ШД осуществляется импульсным напряжением прямоугольной формы. Ротор шагового двигателя в рассматриваемой схеме представляет собой двухполюсный постоянный магнит.

В начальный момент времени напряжение подается на обмотку 1-1, вертикально расположенные полюса намагничиваются и ротор занимает вертикальное положение. Положение ротора будет устойчивым, поскольку при отклонении от него на ротор будет действовать вращающий момент (он называется **синхронизирующим**), который стремится вернуть ротор в положение равновесия. Этот момент определяется по формуле (6.7):

$$M = M_{\max} \cdot \sin \alpha, \quad (6.7)$$

где  $\alpha$  – угол между осями магнитных полей статора и ротора;

$M_{\max}$  – максимальный момент, Н·м.

Во второй момент времени с помощью системы управления напряжение снимается с обмотки 1-1 и подается на обмотку 2-2. Образуется магнитное поле статора с горизонтальными полюсами. То есть магнитное поле статора дискретно совершило поворот на  $1/4$  окружности статора. При этом между осями статора и ротора появится угол рассогласования  $\alpha=90^\circ$  и на ротор будет действовать (согласно формуле 1) максимальный вращающий момент  $M=M_{\max}$ . Ротор займет горизонтальное положение (пунктирная линия, рисунок 6.8).

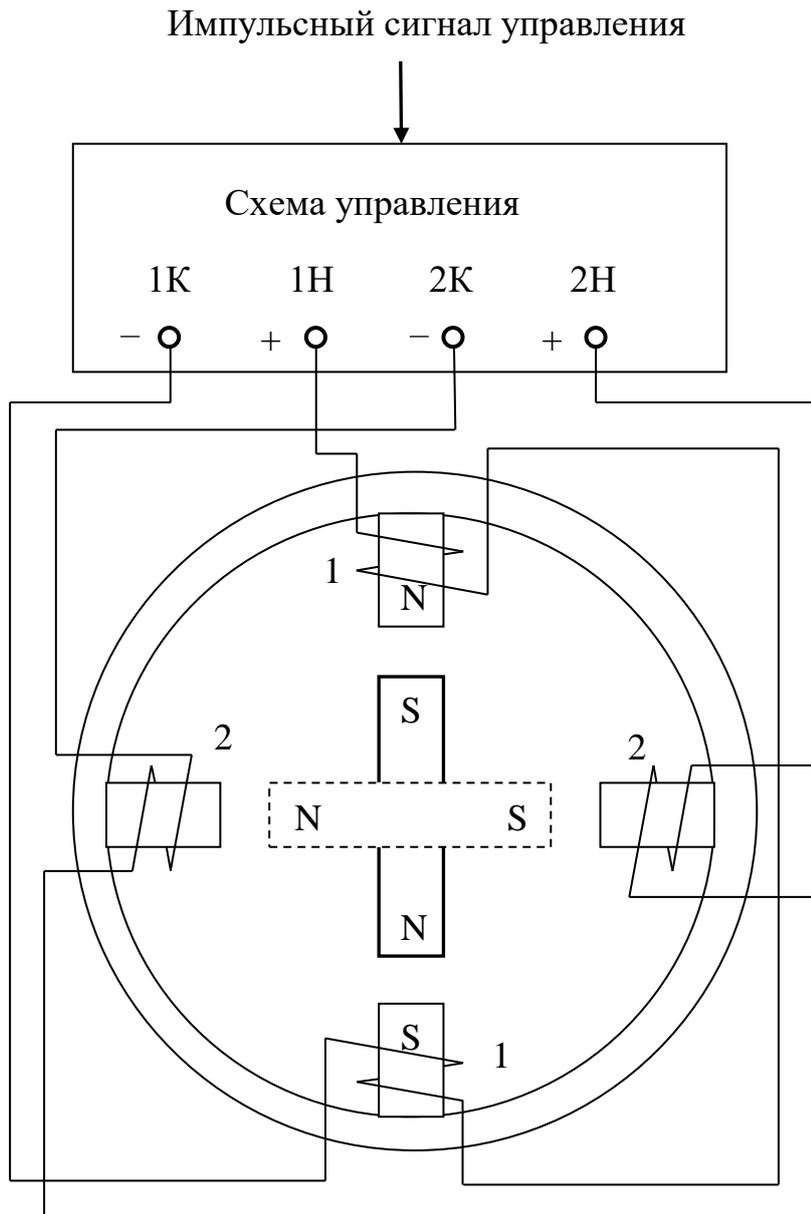


Рисунок 6.8 – Схема двухфазного шагового двигателя с активным ротором (симметричная): 1-1 – первая обмотка возбуждения; 2-2 – вторая обмотка возбуждения

Если отключить обмотку 2-2 и вновь подать питание на обмотку 1-1, но с противоположной, по сравнению с первым случаем, полярностью напряжения. Ротор повернется ещё на  $1/4$  окружности и т. д.

Кроме рассмотренного способа коммутации обмоток двигателя, которое обеспечивает шаговое перемещение обмоток ротора на  $90^\circ$ , существует другой способ, позволяющий при той же конструкции ШД уменьшить размер шагов в 2 раза (рисунок 6.9).

При таком способе коммутации питание подается сразу на 2 обмотки. При этом образуются две системы полюсов. Ось результирующего магнитного поля будет располагаться между полюсами с одинаковой полярностью, как показано на рисунке 6.9, т. е. шаг составит  $45^\circ$ .

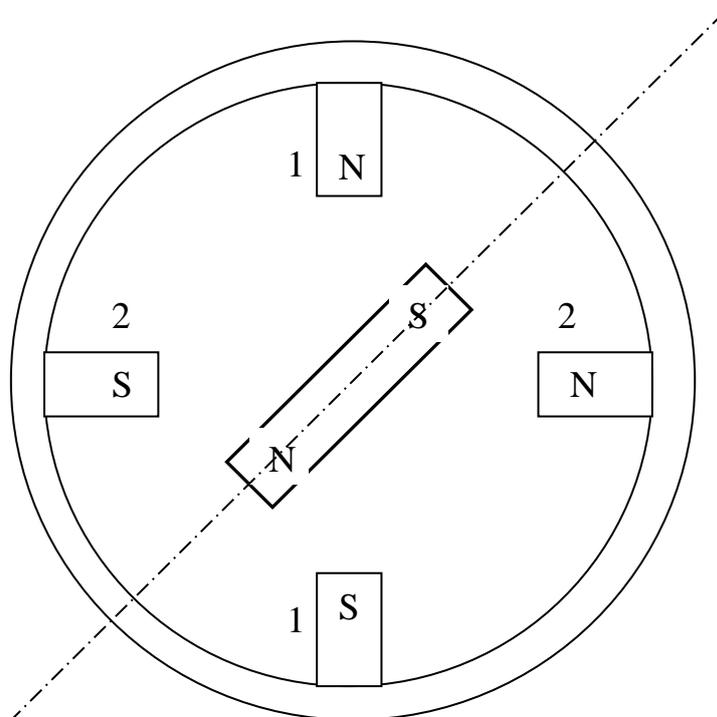


Рисунок 6.9 – Схема двухфазного шагового двигателя с активным ротором, обеспечивающий шаг  $45^\circ$  (несимметричная):

1-1 – первая обмотка возбуждения; 2-2 – вторая обмотка возбуждения

Схема коммутации, при которой подключаются поочередно одна или две обмотки называется **несимметричной**. Первая рассмотренная схема называется **симметричной**.

Угловое перемещение ШД в общем случае определяется по формуле (6.8):

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{p \cdot n}, \quad (6.8)$$

где  $p$  – число пар полюсов ротора ШД;

$n$  – число переключений (тактов) в цикле.

Это число ( $n$ ) равно числу фаз ШД при симметричной и удвоенному числу фаз при несимметричной коммутации.

Шаговое перемещение ротора осуществляется с помощью последовательности управляющих импульсов. При этом каждому импульсу соответствуют одно переключение обмоток ШД (один такт коммутации) и один шаг ротора:

- 1) суммарный угол поворота ШД пропорционален числу импульсов;
- 2) скорость ШД пропорциональна частоте импульсов.

Шаговый двигатель может легко изменять направление своего вращения (реверсироваться). Для реверса ШД необходимо изменить полярность одной из обмоток.

Основной режим работы шагового привода – динамический. ШД рассчитаны на вхождение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение.

На рисунке 6.10 показан пример переходных процессов в шаговом электроприводе при обработке им серии импульсов управления.

Здесь  $\varphi$  – полный угол поворота вала ШД;

$\alpha$  – единичный угол поворота вала ШД (единичный шаг).

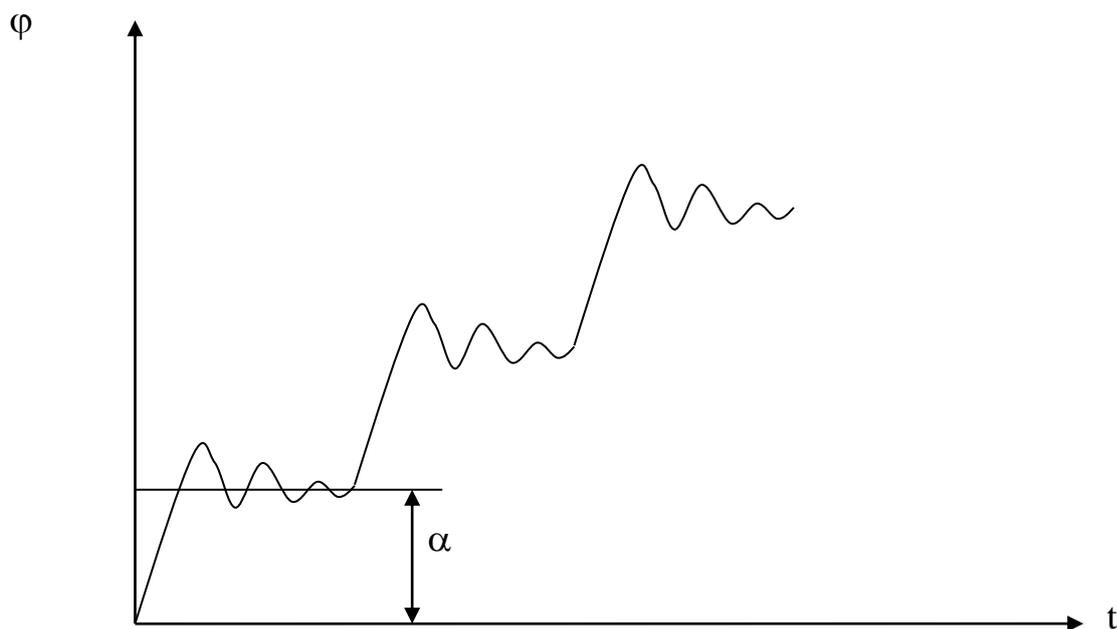


Рисунок 6.10 – Вид переходного процесса в электроприводе с ШД

При резких изменениях частоты следования импульсов управления и при большой нагрузке на валу ротор ШД может не успевать обрабатывать полностью все импульсы, поступающие на вход шагового двигателя. Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск

ШД из неподвижного состояния, без выпадения из синхронизма (пропуска шагов), называется **частотой приемистости**.

Чем выше электромагнитная и механическая инерция ШД и больше момент его нагрузки, тем меньше **частота приемистости**.

Современные ШД в зависимости от числа фаз и устройства магнитной системы бывают:

- 1) однофазными;
- 2) двухфазными;
- 3) трехфазными.

В зависимости от конструкции ротора ШД бывают:

- 1) с активным ротором;
- 2) с пассивным ротором.

Активный ротор у ШД выполняется из постоянных магнитов или снабжаются обмоткой возбуждения, как у обычных СД.

Лучшими характеристиками обладают ШД с ротором из постоянных магнитов (как на рисунке 6.8). Преимущества этих ШД:

- 1) высокая экономичность;
- 2) надежность в работе;
- 3) технологичность изготовления;
- 4) небольшие габариты и масса.

Шаговые двигатели с ротором из постоянных магнитов называются **магнитоэлектрическими шаговыми двигателями** (см. рисунок 6.8). Обычно ШД с активным ротором имеют крупный шаг ротора ( $\alpha$ ) – от  $90^\circ$  до  $15^\circ$  в связи с трудностями изготовления активного ротора с малыми полюсными делениями. Для уменьшения шага в таких шаговых двигателях применяют следующие меры:

- 1) увеличивают число фаз и тактов коммутации;
- 2) используют двухстаторную или двухроторную конструкцию.

Основные характеристики современных шаговых двигателей с активным ротором:

- 1) максимальная скорость ШД с активным ротором составляет 208 – 314 рад/с;
- 2) частота приемистости от 70 до 500 Гц;
- 3) номинальные вращающие моменты от  $10 \cdot 10^{-5}$  до  $10 \cdot 10^{-3}$  Н·м.

Промышленность выпускает несколько серий шаговых магнитоэлектрических двигателей:

- 1) четырехфазные, серия ШДА;
- 2) двухфазные и четырехфазные, серии ШД и ДШ-А;
- 3) четырехфазные, серия ШДА-3 и другие.

### **Шаговые двигатели с пассивным ротором**

Они используются для небольших единичных перемещений и для больших частот приемистости. ШД с пассивным ротором делятся на два типа:

- 1) реактивные;
- 2) индукторные.

Работа таких ШД основана на взаимодействии магнитного поля и ферромагнитного тела. Статор и ротор реактивного ШД имеют явно выраженные полюсы, называемые обычно **зубцами**. На зубцах статора размещаются обмотки возбуждения, питаемые от электронного коммутатора. Ротор ШД выполнен из ферромагнитного материала и не имеют обмотки возбуждения, поэтому он и называется пассивным.

Отличительная особенность реактивного ШД заключается в неравенстве числа зубцов статора  $z_c$  и ротора  $z_p$ , причем обычно  $z_p > z_c$ . Вследствие такой конструкции при каждом переключении обмоток статора ротор совершает поворот (шаг)  $\alpha$ , равный разности полюсных делений статора  $\tau_c$  и ротора  $\tau_p$ , а именно (формула 10):

$$\alpha = \tau_c - \tau_p = \frac{360^\circ}{z_c} - \frac{360^\circ}{z_p} = \frac{360^\circ \cdot (z_p - z_c)}{(z_p \cdot z_c)}. \quad (6.10)$$

Уменьшив разность чисел зубцов  $z_p$  и  $z_c$  можно снизить шаг ротора. Практически эту разность выбирают четной, что улучшает использование ШД. Для уменьшения шага полюсы статора выполняют с несколькими зубцами.

### **Пример:**

Число зубцов статора реактивного ШД с пассивным ротором:  $z_c = 18$ ; числа зубцов ротора  $z_p = 20$ ; определить (шаг)  $\alpha$  шагового двигателя. Решение: шаг  $\alpha$  определяется по формуле (3).

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot (z_p - z_c)}{(z_p \cdot z_c)} = \frac{360^\circ \cdot (20 - 18)}{(20 \cdot 18)} = 2^\circ.$$

Преимущества реактивных ШД с пассивным ротором:

- 1) простота и технологичность конструкции;
- 2) малые размеры шагов и скорости ротора.

Основной недостаток реактивных ШД с пассивным ротором: Незначительная мощность и синхронизирующий момент. Этот недостаток отсутствует в индукторных ШД, в которых для увеличения синхронизирующего момента ротор подмагничивается со стороны статора с помощью постоянных магнитов или дополнительной обмотки возбуждения.

Промышленностью выпускается несколько серий ШД с пассивным ротором (серии Ш, ШДР, ШД, РШД), имеющих следующие технические данные:

- 1) шаг ( $\alpha$ ): от  $1,5^\circ$  до  $9^\circ$ ;
- 2) вращающие моменты: от  $2,5 \cdot 10^{-6}$  до  $10 \cdot 10^{-3}$  Н·м;
- 3) частота приемистости: от 250 до 1200 Гц.

На базе цилиндрических линейных ШД созданы двухкоординатные линейно-поворотные ШД, суммирующие на своем валу два независимых движения – вращательное и поступательное. Линейно-поворотные ШД типов ДШЛ-8 и ДШЛ-9 имеют следующие технические данные:

- 1) шаг поворота ( $\alpha$ ): от  $1,0^\circ$ ;
- 2) шаг поступательного перемещения от 0,011 до  $10 \cdot 10^{-3}$  м (от 11 до 1,25 мм);
- 3) полные перемещения до  $50 \cdot 10^{-3}$  м (до 50 мм);
- 4) моменты до 0,16 Н·м;
- 5) усилия до 36 Н.

В настоящее время разрабатываются многокоординатные ШД, осуществляющие перемещение исполнительных органов по всем трем координатам пространства. Подобные двигатели могут быть использованы в приводах манипуляторов, роботов и автоматических линиях станков.

## 6.5 Контрольные вопросы

1. Перечислить преимущества и недостатки линейных электродвигателей и области их применения?
2. Классификация линейных электродвигателей по принципу действия?
3. Принцип действия линейного асинхронного двигателя (ЛАД)?
4. Что понимается под вторичным элементом ЛАД.
5. Что понимается под «бегущим магнитным полем» ЛАД и от чего зависит скорость движения этого поля?
6. Как определяется полюсное деление ЛАД?
7. Как определяется скольжение ЛАД?
8. Чем отличается ЛАД с коротким статором от ЛАД с коротким вторичным элементом?
9. Как классифицируются ЛАД со вторичным элементом, не имеющим обмотки, и как они устроены?
10. Режимы работы линейных электродвигателей (прямой и обратный режимы)?
11. Устройство, принцип действия и области применения линейных электродвигателей постоянного тока (ЛДПТ)?
12. Устройство, принцип действия и области применения линейных синхронных двигателей (ЛСД)?
13. Какой электропривод называется дискретным электроприводом. Где используется дискретный электропривод?
14. Что понимается под «шагом» шагового электродвигателя. От чего зависит шаг такого электродвигателя и как он рассчитывается?
15. Как устроен шаговый электродвигатель. Какие существуют конструкции шаговых электродвигателей?
16. Устройство и принцип действия двухфазного шагового электродвигателя?
17. Какое напряжение подается на вход шагового электродвигателя?
18. Что понимается под синхронизирующим моментом шагового электродвигателя. Как он определяется?
19. Что понимается под симметричной и несимметричной схемами коммутации шаговых электродвигателей?

20. Как определяется угловое перемещение шагового электродвигателя и от каких параметров оно зависит?
21. Как производится реверсирование шагового электродвигателя?
22. Что называется частотой приемистости шагового электродвигателя и от чего она зависит?
23. Чем отличаются по конструкции и по своим свойствам шаговые электродвигатели с активным и пассивным ротором?
24. Как устроен магнитоэлектрический шаговый двигатель. Принцип действия этого двигателя?
25. Какие меры применяются для уменьшения шагов шаговых электродвигателей?
26. Привести основные технические характеристики и марки шаговых электродвигателей?
27. Что называются зубцами шагового электродвигателя?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кацман М.М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. образования / М.М. Кацман. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа; М.: Academia, 2001. – 463 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для электротехн. и энерг. спец. вузов / Токарев Б.Ф. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
3. Сергеевков Б.Н. и др. Электрические машины: Трансформаторы: учебное пособие / Б.Н. Сергеевков, В.М. Киселев, Н.А. Акимова; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для втузов / И.П. Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.
5. Электротехнический справочник: В 4-х томах. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства. // Под общей ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. редактор И.Н. Орлов). – 10-е изд., стер. – М.: МЭИ. – 2007. – 517 с.
6. Данку А. Электрические машины: сб. задач и упражнений / А. Данку, А. Фаркаш, Л. Надь; пер. с венгер. Т.З. Патроша; под ред. В.Я. Беспалова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
7. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 1. Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
8. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 2. Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.