

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Н. Е. Шевчик**

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
высших учебных заведений Республики Беларусь  
по образованию в области сельского хозяйства  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 1-74 06 05-01  
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика),  
1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов  
и производств (сельское хозяйство)*

**В двух частях**

**Часть 1**

Минск  
БГАТУ  
2011

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я7  
Ш37

Рецензенты:  
кафедра «Электроснабжение» БНТУ;  
начальник электротехнического отдела РУП  
«Научно-исследовательский и проектно-технологический институт  
хлебопродуктов» *В. И. Потаннев*

**Шевчик, Н. Е.**

Ш37 Электрические машины : учеб.-методич. пособие: В 2 ч. Ч. 1 /  
Н. Е. Шевчик. – Минск : БГАТУ, 2011. – 188 с.  
ISBN 978-985-519-435-5.

Учебно-методическое пособие содержит общие сведения об электрических машинах постоянного и переменного тока. В нем рассмотрены вопросы теории, изучены принцип действия, характеристики, режимы работы и области применения таких машин, даны рекомендации по подготовке к итоговому контролю знаний изучаемых разделов дисциплины.

Издание предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов вузов, учащихся колледжей, рекомендовано специалистам в области электрификации сельского хозяйства.

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я7

ISBN 978-985-519-435-5

© БГАТУ, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ.....	9
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН .....	9
1.2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ .....	10
1.3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КУРСЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ».....	11
1.4. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН .....	13
1.5. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ УСЛОВИЯМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН .....	14
2. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	16
2.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	16
2.2. ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	20
2.2.1. Назначение и устройство обмотки якоря.....	20
2.2.2. Основы расчета и принципы построения простых петлевых обмоток .....	21
2.2.3. Основы расчета и принципы построения простых волновых обмоток.....	24
2.2.4. Сложные обмотки и уравнивательные соединения.....	27
2.2.5. Электродвижущая сила (ЭДС) обмотки якоря машины постоянного тока.....	29
2.2.6. Электромагнитный момент, развиваемый якорем машины постоянного тока.....	31
2.2.7. Способы возбуждения машин постоянного тока.....	32

2.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	34
2.3.1. Магнитная цепь машины постоянного тока.....	34
2.3.2. Основы расчета магнитной цепи.....	35
2.3.3. Магнитная характеристика, коэффициент насыщения .....	36
2.3.4. Реакция якоря при установленных на геометрическую нейтраль щетках... ..	37
2.3.5. Реакция якоря при смещенных с геометрической нейтрали щетках.....	40
2.3.6. Влияние реакции якоря на работу машины и ее устранение .....	41
2.4. КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	43
2.4.1. Причины искрения под щеткой, оценка степеней искрения.....	43
2.4.2. Прямолинейная, замедленная и ускоренная коммутация .....	45
2.4.3. Способы улучшения коммутации .....	50
2.5. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	54
2.5.1. Параметры и характеристики генераторов.....	54
2.5.2. Уравнения равновесия ЭДС и моментов генератора постоянного тока .....	55
2.5.3. Генератор независимого возбуждения .....	56
2.5.4. Генератор параллельного возбуждения.....	59
2.5.5. Генератор смешанного возбуждения.....	63
2.6. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	65
2.6.1. Уравнения равновесия ЭДС и моментов двигателя .....	65
2.6.2. Потери и КПД двигателя постоянного тока .....	65
2.6.3. Характеристики двигателей постоянного тока .....	67
2.6.4. Характеристики двигателей параллельного возбуждения .....	68
2.6.5. Характеристики двигателей последовательного возбуждения .....	71
2.6.6. Характеристики двигателя смешанного возбуждения.....	74
2.6.7. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока .....	75

2.6.8. Пуск двигателей постоянного тока .....	82
2.6.9. Устойчивость работы двигателей постоянного тока .....	83
2.6.10. Режимы работы машин постоянного тока .....	85
2.6.11. Торможение двигателей постоянного тока .....	86
2.6.12. Универсальные коллекторные двигатели .....	89
2.6.13. Современные серии машин постоянного тока .....	92
2.7. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	94
2.7.1. Тахогенераторы .....	94
2.7.2. Сварочные генераторы .....	94
2.7.3. Электромашинные усилители .....	96
2.7.4. Вентильные двигатели .....	98
2.7.5. Двигатели с гладким якорем .....	99
2.7.6. Двигатели с печатными обмотками якоря .....	100
2.7.7. Исполнительные двигатели постоянного тока .....	102
3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	104
3.1. ПОЛУЧЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ .....	104
3.2. МАГНИТОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ СТАТОРА .....	106
3.2.1. Магнитодвижущая сила катушки .....	106
3.2.2. Магнитодвижущая сила катушки с укороченным шагом .....	109
3.2.3. Магнитодвижущая сила распределенной обмотки .....	111
3.2.4. Магнитодвижущая сила обмотки при скосе пазов .....	113
3.2.5. Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки .....	114
3.3. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ .....	116
3.4. ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	118
3.4.1. Способы выполнения обмоток .....	118

3.4.2. Классификация и выбор типа обмоток .....	119
3.4.3. Принципы построения трехфазных статорных обмоток .....	121
4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ .....	128
4.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН .....	128
4.2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СИНХРОННЫХ МАШИН .....	130
4.3. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН .....	133
4.4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ .....	134
4.5. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ .....	136
4.6. УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА .....	138
4.6.1. Уравнение напряжений синхронного генератора .....	138
4.6.2. Векторные диаграммы синхронного генератора .....	140
4.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ .....	143
4.7.1. Характеристики синхронного генератора .....	143
4.7.2. Определение параметров синхронного генератора .....	148
4.8. ПОТЕРИ И КПД СИНХРОННЫХ МАШИН .....	151
4.9. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ .....	153
4.9.1. Необходимость и условия включения синхронных генераторов на параллельную работу .....	153
4.9.2. Способы включения синхронных генераторов на параллельную работу .....	153
4.9.3. Мощность синхронного генератора, подключенного к сети .....	155
4.9.4. Угловая характеристика и синхронизирующая способность синхронного генератора .....	158

4.9.5. Регулирование реактивной мощности, отдаваемой в сеть синхронным генератором.....	159
4.9.6. Переходной процесс в синхронном генераторе при внезапном коротком замыкании .....	161
4.10. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ.....	164
4.10.1. Основные сведения и принцип работы синхронного двигателя .....	164
4.10.2. Пуск синхронных двигателей .....	166
4.10.3. Работа синхронного двигателя при изменении тока возбуждения.....	167
4.10.4. Синхронный компенсатор.....	168
4.10.5. Рабочие характеристики синхронного двигателя .....	169
4.10.6. Преимущества и недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным .....	171
4.11. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	172
4.11.1. Реактивные двигатели .....	172
4.11.2. Гистерезисные двигатели .....	173
4.11.3. Шаговые двигатели.....	175
4.11.4. Синхронные машины с постоянными магнитами.....	176
4.11.5. Индукторные синхронные машины .....	178
ЛИТЕРАТУРА.....	180
СТРУКТУРА ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ .....	181

## ВВЕДЕНИЕ

---

Дисциплина «Электрические машины» базируется на курсах «Физика», «Высшая математика», «Теоретические основы электротехники», «Электрические измерения». В свою очередь, она является базой для изучения всех специальных дисциплин: «Автоматизированный электропривод», «Электроснабжение», «Эксплуатация и ремонт электрооборудования» и пр.

Цель изучения дисциплины «Электрические машины» – подготовка специалистов, способных решать задачи, связанные с использованием электрических машин.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать устройство, принцип действия, характеристики, режимы работы и области применения электрических машин, а также должны уметь подключать и испытывать, рассчитывать и измерять параметры, строить необходимые характеристики электрических машин.

Составными частями дисциплины являются следующие разделы: «Машины постоянного тока», «Асинхронные машины», «Синхронные машины», «Трансформаторы».

В 1 части учебного пособия рассмотрены вопросы первых двух разделов.

Приведены вопросы итогового контроля и комментарии по структуре ответа на них.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

## 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

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

Машина, преобразующая электрическую энергию одних параметров в электрическую энергию с другими параметрами, называется преобразователем. Трансформатор также является преобразователем. Однако физические процессы, происходящие в трансформаторах и электромашинных преобразователях, практически такие же, как и в электрических машинах. Поэтому они изучаются в курсе электрических машин.

Ни в одном из современных учебников нет достаточно полной классификации электрических машин, потому что наличие множества видов электрических машин делает полную классификацию громоздкой. Поэтому в данном пособии предлагается следующая классификация:



Кроме того, электрические машины классифицируются:

- по роду тока,
- назначению,
- мощности,
- напряжению.

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

2. По назначению их подразделяют:

- на генераторы (преобразуют механическую энергию в электрическую);
- двигатели (преобразуют электрическую энергию в механическую);
- преобразователи (преобразуют переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяют напряжение, частоту переменного тока, число фаз, преобразуют активную мощность в реактивную и т. д.).

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

3. По мощности:

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

Как видно, четких границ по мощности в указанной классификации нет.

4. По напряжению:

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

Данная классификация частичная, она будет уточнена в последующих разделах.

## 1.2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Первым опытом, положившим начало созданию электрических машин, можно считать опыт М. Фарадея (1821 г.). Он наблюдал перемещение проводника с током в непосредственной близости магнита, то есть возможность механического движения при помощи электрического тока и магнитного поля, что лежит в принципе действия современных электрических двигателей.

В основу принципа действия электрических генераторов положено явление наведения электродвижущей силы (ЭДС) в проводнике, пересекающим магнитное поле, то есть явление электромагнитной индук-

ции. Только в 1831 году М. Фарадей смог сформулировать закон электромагнитной индукции для частного случая, для проводника:

$$e = Blv,$$

где  $e$  – ЭДС, В;  
 $B$  – индукция, Тл;  
 $l$  – длина проводника, м;  
 $v$  – скорость движения проводника, м/с.

Эта формула в дальнейшем будет использована для вывода ЭДС машины постоянного тока.

Позднее Д.К. Максвелл сформулировал наиболее общий закон электромагнитной индукции:

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

где  $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  
 $t$  – время, с.

Первая модель электрического генератора была сконструирована в 1832 г. братьями Пикси.

В 1834 году Б.С. Якоби сконструировал первый электрический двигатель. Мощность его была 15 Вт, вес – более 500 кг.

Переменный ток был впервые использован в 1860 г. П.Н. Яблочковым, который уже в 1876 г. сконструировал трансформатор.

Система трехфазного тока была создана в 1880 г. М.О. Доливо-Добровольским. Используя эту систему, итальянец Феррарис в 1885 г. впервые получил вращающееся магнитное поле. В 1889 году М.О. Доливо-Добровольский изобрел трехфазный двигатель, для питания которого им были созданы трехфазные трансформатор и генератор.

Дальнейшее развитие шло по пути совершенствования электрических машин, с использованием достижений науки, развития технологий, новых материалов. Успехи можно оценить, сравнив массы современного электрического двигателя мощностью 15 Вт и первого двигателя.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КУРСЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

В принципе действия любой электрической машины лежит закон электромагнитной индукции, который использует две стороны работы магнитного поля:

1) получение электродвижущей силы (ЭДС) в проводнике, движущемся в магнитном поле (принцип действия генератора);

2) получение электромагнитной силы, действующей на проводник с током в магнитном поле (принцип действия электродвигателя).

Таким образом, для работы электрической машины необходимо соблюдение трех условий:

– наличие магнитного потока, который создается постоянным магнитом или током;

– наличие среды, проводящей электрический ток (проводник, рамка из проводникового материала, обмотка якоря и т. д.);

– относительное изменение магнитного потока и проводящей среды (генератор) или наличие в проводящей среде электрического тока (двигатель).

В схематичной форме принцип работы электрических машин будет выглядеть следующим образом (рис. 1.1).

где  $I_b$  – ток возбуждения, то есть ток, который создает магнитный поток, А;



Рис. 1.1. Принцип действия электрической машины (схема)

$\Phi$  – магнитный поток, Вб;

$E$  – электродвижущая сила, В;

ПД – приводной двигатель;

$n$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$I$  – рабочий ток, который идет по проводящей среде, А;

$M$  – момент, Н·м.

На схеме показано получение магнитного потока от тока. При создании магнитного потока постоянными магнитами, в схеме ток возбуждения будет отсутствовать.

Таким образом, закон электромагнитной индукции для электрических машин является основным. При изучении теории электрических машин будут использованы и другие законы: Ома, Кирхгофа и др.

#### 1.4. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

У каждой электрической машины имеется табличка, выбитая на металлической пластине и прикрепленная к корпусу. На этой табличке указаны паспортные данные, которые различаются по типу машин. Но некоторые основные положения одинаковы для всех машин: каждая машина должна работать в номинальном режиме.

*Номинальный режим* – это такой режим, для работы в котором машина предназначена заводом-изготовителем. Его рассчитывают так, чтобы мощность машины в нем была максимальной, но температура обмоток не превышала допустимую. Основным параметром, влияющим на степень загрузки машины, является температура ее обмоток, если точнее – изоляции, потому что температура, при которой изоляция выходит из строя (95–180 °С), зависит от класса нагревостойкости изоляции), значительно меньше температуры плавления электротехнической стали – 1540 °С, или меди – 1083 °С.

Параметры, характеризующие номинальный режим, называются номинальными. Номинальная мощность – это полезно используемая мощность.

Некоторые технологические процессы требуют периодической работы. Для электрических машин, обслуживающих такие процессы, целесообразно брать мощность несколько меньшую, чем для машин, работающих непрерывно. Поэтому паспортная табличка обычно информирует о режиме работы электрической машины. Надпись на табличке варьируется от S1 до S8.

*S1 – продолжительный режим.* Машина работает длительное время с постоянной нагрузкой, и нагрев обмоток достигает установившейся температуры, характеризующейся тем, что количество тепла, получаемого машиной в виде потерь энергии, равно количеству тепла, теряемого машиной в результате охлаждения (рис. 1.2а).

*S2 – кратковременный режим.* Машина включается на короткое время, нагрев не успевает достигнуть установившейся температуры и отключается на длительное время, достаточное, чтобы машина охладилась до температуры окружающей среды (рис. 1.2б).

*S3, S4, S5 – повторно-кратковременные режимы.* Нагрев не успевает достигнуть установившейся температуры, но и не охлаждается до температуры окружающей среды. S4 – с частыми пусками, S5 – с электрическим торможением (рис. 1.2в).

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

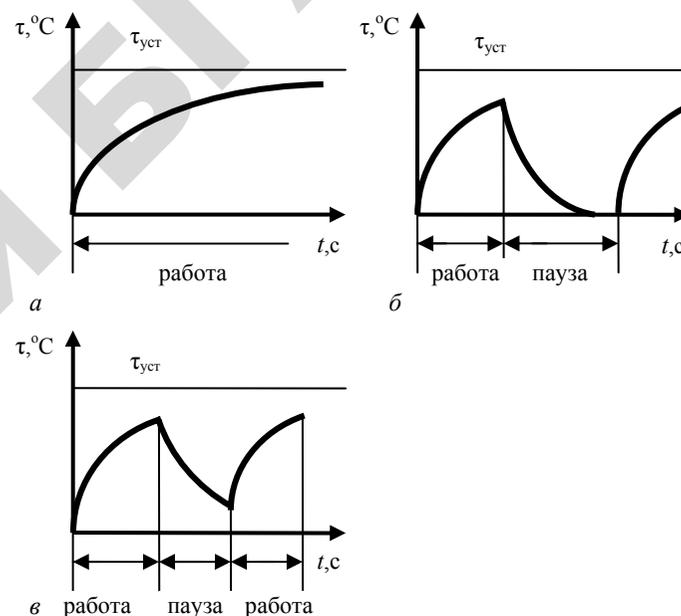


Рис. 1.2. Режимы работы электрических машин:  
а – длительный; б – кратковременный; в – повторно-кратковременный

#### 1.5. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ УСЛОВИЯМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конструктивные формы электрических машин зависят от ожидаемых условий работы и способа охлаждения. Различают: откры-

тые – со свободным доступом воздуха внутрь машины, защищенные – охлаждающий воздух идет через решетки и жалюзи, закрытые и герметичные – без доступа воздуха внутрь машины.

Степень защиты от окружающей среды на паспортной табличке обозначается следующим образом:

$IP(0-6)(0-8)$ ,

где латинские буквы  $IP$  означают *International Protection* (Protection (англ.) – защита);

первая цифра – степень защиты от посторонних предметов: (0 – нет защиты, свободный доступ внутрь машины; 1, 2, 3 и 4 – защита от предметов с размерами соответственно больше 52,5; 12,5; 2,5 и 1 мм; 5 и 6 – защита от пыли);

вторая цифра – степень защиты от влаги: (0 – нет защиты; 1 – защита от дождя сверху; 2, 3 – защита от дождя, падающего под углом соответственно 15 и 60 градусов; 4 – защита от брызг; 5 – защита от струй со всех сторон; 6, 7, 8 – защита от волн или при погружении в воду).

### Контрольные вопросы:

1. Что такое электрическая машина? Дать определение генератору, двигателю, преобразователю.
2. По каким признакам классифицируются электрические машины?
3. Почему трансформаторы изучают в курсе электрических машин?
4. Какой закон лежит в основе принципа работы электрического двигателя?
5. Какой закон лежит в основе принципа работы электрического генератора?
6. Какой элемент электрической машины является менее надежным? Почему?
7. Какой режим работы машины является номинальным (оптимальным)? Чем он определяется?
8. Что означают символы  $S1-S8$  на паспортной табличке электрической машины?
9. Назовите существующие конструктивные формы исполнения электрических машин по способу защиты от окружающей среды и поясните их маркировку?

## 2. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Возьмем два магнитных полюса, разместим их, как показано на рис. 2.1.

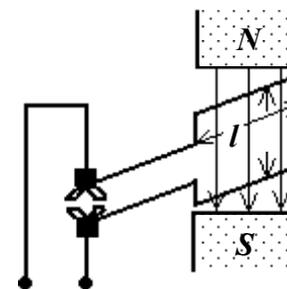


Рис. 2.1. Рамка в магнитном поле

Между ними равномерное магнитное поле с индукцией  $B$ , Тл. Поместим между полюсами рамку из проводникового материала шириной  $D$ , м, длиной  $l$ , м, концы которой припаяны к полукольцам. Электрический контакт внешней сети с полукольцами осуществляется щетками. Получили простейшую машину постоянного тока. Причем она, как и любая другая электрическая машина, может работать как генератором, так и двигателем. Для использования в качестве генератора необходимо вращать рамку. Проводники рамки будут пересекать линии магнитного поля, и, по закону электромагнитной индукции, в них будет наводиться ЭДС  $e$ , В:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.1)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, проходящий через рамку, Вб;  
 $t$  – время, с.

Эта ЭДС может сниматься с полуколец щетками. Направление ЭДС можно определить по правилу правой руки. За один оборот в рамке будет создаваться переменная ЭДС, и если бы вместо полуколец концы рамки были бы припаяны к кольцам, получился бы генератор переменного напряжения. Для выпрямления ЭДС в простейшем случае служат полукольца, а в реальной машине – коллектор.

Для того, чтобы машина работала в качестве двигателя, необходимо к рамке подвести напряжение. Напряжение вызывает ток  $I$ , А. Этот ток будет взаимодействовать с магнитным потоком и, по закону электромагнитной индукции, на него будет действовать сила  $f$ , Н:

$$f = BIl. \quad (2.2)$$

Эта сила создаст вращающий момент. Направление вращения, то есть вектор приложения силы  $f$ , определится по правилу левой руки, и если бы вместо полуколец концы рамки были бы припаяны к кольцам, при переходе рамки с одного полюса на другой создавался бы встречный вращающий момент, и рамка бы не вращалась.

Согласно правилу левой руки, чтобы изменить направление силы, необходимо изменить или направление тока в рамке, или направление магнитного потока. Направление магнитного потока не изменяется, а меняется направление тока в рамке с помощью полуколец, а в реальной машине – с помощью коллектора.

Устройство машины постоянного тока показано на рис. 2.2. В общем случае машина постоянного тока имеет неподвижную часть – корпус  $б$  и подвижную – якорь  $з$ .

К корпусу крепятся полюсы  $4$ , подшипниковые щиты  $7$  и лапы для крепления машины к фундаменту. Для машин большой мощности устанавливаются отдельно стоящие подшипниковые щиты.

Корпус машины постоянного тока является частью магнитопровода, то есть по нему идет магнитный поток, поэтому он называется еще и станиной. Поскольку магнитный поток постоянный, станина изготавливается не из пластин электротехнической стали, а из цельнометаллической трубы.

Сердечники полюсов выполняются из пластин электротехнической стали, изолированных между собой, так как при вращении якоря в наконечниках полюсов возникает пульсация магнитного потока, и появляются дополнительные потери на вихревые токи и перемагничивание. Полюсы делятся на главные и дополнительные. Главные полюсы предназначены для создания основного маг-

нитного потока. Для этого на полюс устанавливается катушка из обмоточного провода, называемая обмоткой возбуждения.

Дополнительные полюсы предназначены для улучшения коммутации (см. п. 2.4.3). Якорь машины постоянного тока состоит из вала, сердечника с обмоткой  $9$ , коллектора  $1$  и вентилятора  $8$ . Сердечник якоря, также как и сердечник полюсов, набирают из пластин электротехнической стали и напрессовывают на вал.

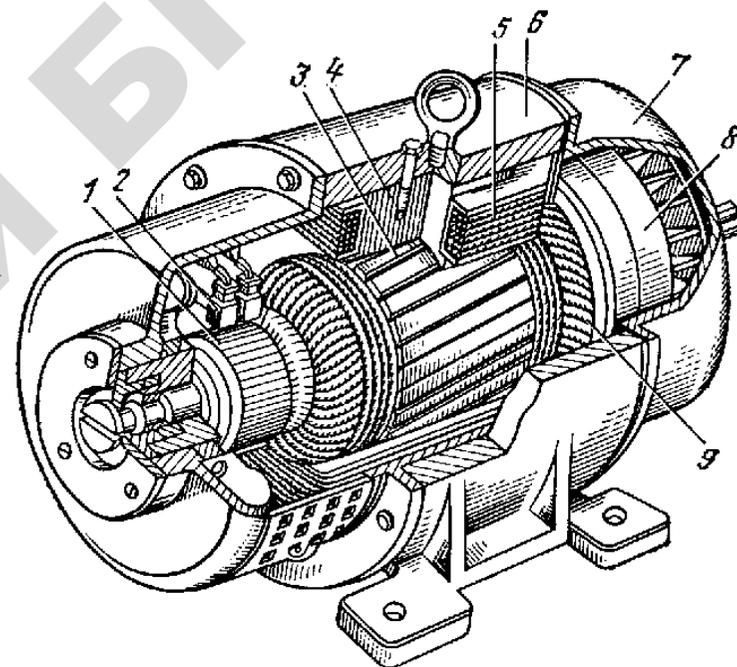


Рис. 2.2. Машина постоянного тока:

1 – коллектор, 2 – щетки, 3 – якорь, 4 – полюс, 5 – обмотка возбуждения, 6 – корпус, 7 – подшипниковые щиты, 8 – вентилятор, 9 – обмотка якоря

В сердечнике якоря выштампованы пазы, в которых укладывается обмотка якоря (выполнение обмотки – см. п. 2.3). Она изготавливается из обмоточного провода. Концы секции обмоток электрически соединены с коллекторными пластинами.

Место припайки обмоток к коллектору называют «петушком». Коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди, изолированных между собой

и валом (рис. 2.3). В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных их типа: со стальными конусными шайбами (крепление пластины осуществляется корпусными шайбами с изоляционными миканитовыми прокладками) и на пластмассе (крепление пластины с помощью пластмассы).

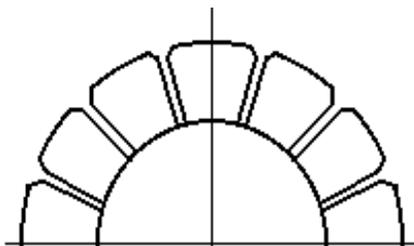


Рис. 2.3. Устройство коллектора

Электрический контакт коллектора с внешней цепью осуществляется щетками, располагаемыми в щеткодержателях на поворотной траверсе. Щетки изготавливаются из материалов на основе графита. Плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором осуществляется при помощи пружин, прижимающих щетки к коллектору. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки, а недостаточный – искрение на коллекторе.

Вал машины устанавливается в подшипниках.

Для охлаждения используется система вентиляции. В машинах малой и средней мощности обычно используют вентилятор, который крепится на валу машины и закрывается кожухом из металла.

Выводы обмоток идут в клеммную коробку, которая закреплена на станине. Для подъема машины используется рым-болт, вкрученный в верхнюю часть станины.

### Контрольные вопросы:

1. Каково назначение коллектора в генераторе и двигателе?
2. Почему станину машины постоянного тока делают из обычной, а полюсы и ротор – из пластин электротехнической стали?
3. Каково назначение главных полюсов в машине постоянного тока?
4. Почему щетки крепят на поворотной траверсе?

## 2.2. ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.2.1. Назначение и устройство обмотки якоря

Назначение обмотки якоря следующее:

- при работе машины генератором в обмотке создается ЭДС, снимаемая с коллектора щетками;
- при работе двигателем через обмотку проходит ток, который, взаимодействуя с основным магнитным потоком, создает вращающий момент.

Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных в пазах якоря и присоединенных к коллектору.

В настоящее время широко применяются обмотки якоря барабанного типа, в которых проводники обмотки укладываются двумя слоями в пазы, расположенные на наружной поверхности якоря.

Простейший элемент обмотки – виток. Ряд последовательно соединенных витков, лежащих в двух пазах и имеющих общую пазовую изоляцию, называется секцией. Секция имеет две активные стороны (лежащие в пазах якоря и принимающие участие в создании ЭДС или вращающего момента) и две лобовые части, которые соединяют активные стороны между собой или коллектором. Если одна активная сторона секции находится под одним полюсом, то вторая должна быть под противоположным, чтобы ЭДС, создаваемая сторонами, или усилия, прилагаемые к ним, были максимальными.

Последовательность соединения секций между собой и с коллекторными пластинами задается типом обмотки и обмоточными шагами:

$Y_1$  – первый частичный шаг. Это расстояние между активными сторонами одной секции.

$Y_2$  – второй частичный шаг. Это расстояние между второй активной стороной одной секции и первой активной стороной следующей секции при принятом направлении обхода обмотки.

$Y$  – результирующий шаг. Это расстояние между одноименными соседними секциями.

$Y_k$  – шаг по коллектору. Это расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединены соседние секции, следующие по схеме обмоток.

Расчет обмоточных шагов ( $Y$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_k$ ) зависит от типа обмотки. Обмотки бывают петлевые и волновые. Иногда встречается сочета-

ние петлевой (параллельные) и волновой (последовательные) обмоток одновременно. Также они бывают простые и сложные, с уравнительными соединениями и без них (см. п. 2.2.4).

### 2.2.2. Основы расчета и принципы построения простых петлевых обмоток

При построении обмоток якорь условно разрезают вдоль вала и разворачивают на плоскости. Коллекторные пластины и пазы нумеруют.

В простой петлевой обмотке каждая секция присоединена к двум рядом лежащим коллекторным пластинам. При укладке секций за один обход якоря укладывают все секции обмотки. В результате конец последней секции должен присоединяться к началу первой, то есть обмотка замыкается.

Первый частичный шаг (рис. 2.4.)  $Y_1$  (измеряется в пазах) определяется по формуле:

$$Y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon, \quad (2.3)$$

где  $Z$  – число элементарных пазов якоря;  
 $p$  – число пар полюсов;  
 $\varepsilon$  – число, дополняющее до целого.

$Y_1$  выбирают таким образом, чтобы ЭДС секций имели максимальное значение.

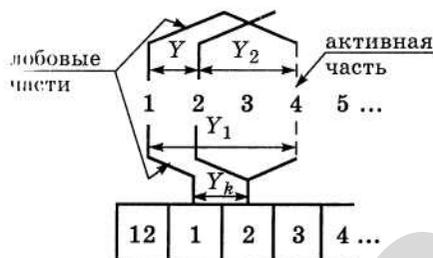


Рис. 2.4. Обмоточные шаги простой петлевой обмотки

Результующий шаг и шаг по коллектору равны между собой, и в простой петлевой обмотке равны единице:

$$Y = Y_k = 1. \quad (2.4)$$

Второй частичный шаг:

$$Y_2 = Y_1 - Y. \quad (2.5)$$

Рассмотрим принципы выполнения простых якорных обмоток на примере: число пазов якоря  $Z = 12$ , число пар полюсов  $p = 2$ . Требуется начертить схему простой петлевой якорной обмотки.

Присвоим номера пазам якоря и пластинам коллектора (рис. 2.5а). При этом число пазов якоря в простых обмотках всегда равно числу коллекторных пластин. При построении схемы обмотка может начинаться с любой коллекторной пластины. Начнем с первой и зайдем в первый паз. При дальнейшем построении обмотки возникают вопросы.

1. В каком пазу будет лежать вторая активная сторона секции?

Для этого необходимо определить значение первичного шага обмотки:

$$Y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{12}{4} = 3.$$

Следовательно, вторая сторона секции будет в четвертом пазу ( $1 + 3 = 4$ ) (рис. 2.5б). Вторая сторона показана штриховой линией, потому что она расположена в нижнем слое паза.

2. К какой коллекторной пластине будет присоединен конец первой секции?

Для этого необходимо знать значение шага по коллектору. Для простых петлевых обмоток

$$Y_k = Y = \pm 1,$$

где знаки «+» и «-» указывают направление хода обмотки: правоходовая или левоходовая.

Следовательно, конец первой секции нужно присоединить ко второй коллекторной пластине ( $1 + 1 = 2$ ) (рис. 2.5в).

3. В каком пазу будет лежать начало второй секции?

Начало второй секции будет лежать через результирующий шаг, который в простой петлевой обмотке равен  $Y = 1$ , во втором пазу (рис. 2.5г).

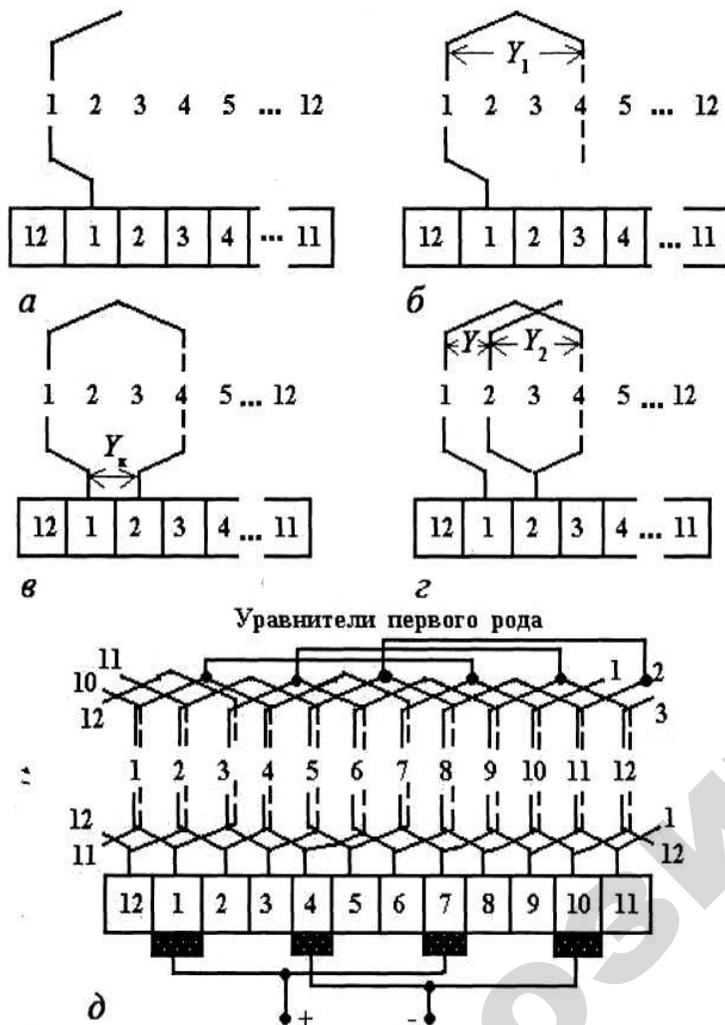


Рис. 2.5. Построение простой петлевой обмотки:  
а, б, в, г – этапы построения обмотки;  $Z = 12$ ,  $P = 2$

Аналогично соединяются остальные секции. Обмотка будет выполнена правильно, если она замкнется. В нашем случае мы начали на первой коллекторной пластине, поэтому на нее мы должны в конце вернуться (рис. 2.5в).

4. Сколько необходимо щеток, и на каких коллекторных пластинах они будут установлены?

Количество щеток простой петлевой обмотки равно количеству полюсов:

$$n_{щ} = 2p = 4.$$

По коллектору они располагаются равномерно. Ширина щетки для упрощения построения принята равной ширине коллекторной пластины. В реальных машинах ширина ее больше.

Теоретически щетки должны быть соединены через коллектор с секциями, стороны которых в данный момент находятся под серединами полюсов, чтобы момент вращения или ЭДС были максимальные. Это место называется геометрической нейтралью. Практически щетки устанавливаются на физическую нейтраль, которая из-за реакции якоря сдвинута по коллектору относительно геометрической на некоторое расстояние. Поэтому важно расположить щетки друг относительно друга. Окончательное расположение щеток на коллекторе (установка щеток на нейтраль) производится специальными методами, поэтому для упрощения изложения материала позиция щеток относительно полюсов на рис. 2.5 не указана.

Таким образом, схема обмотки нарисована, щетки установлены (рис. 2.5д).

Часть обмотки, заключенная между соседними щетками, называется параллельной ветвью. Число параллельных ветвей равно количеству щеток и, следовательно, количеству главных полюсов машины  $a = p$ .

Очевидно, что ЭДС обмотки якоря определяется значением ЭДС одной параллельной ветви, а значение тока во внешней сети – равно сумме токов параллельных ветвей.

Обычно петлевые обмотки выполняют для машин с относительно большим значением тока якоря и меньшим напряжением.

### 2.2.3. Основы расчета и принципы построения простых волновых обмоток

В простой волновой обмотке соседние секции находятся под разными парами полюсов. При укладке секций за один обход по якорю выполняется столько секций, сколько полюсов имеет маши-

на, при этом конец последней по обходу секции присоединяют к пластине, расположенной рядом с исходной.

Результирующий шаг простой волновой обмотки (рис. 2.6) равен

$$Y = \frac{Z \pm \varepsilon}{p} \quad (2.6)$$

Первый частичный шаг

$$Y_1 = \frac{Y}{2p} \pm \varepsilon \quad (2.7)$$

Второй частичный шаг

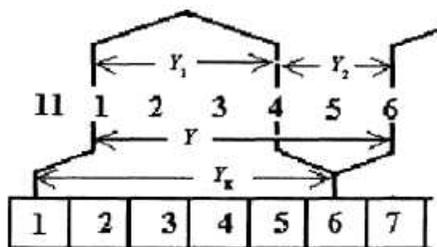


Рис. 2.6. Обмоточные шаги простой волновой обмотки

$$Y_2 = Y - Y_1 \quad (2.8)$$

*Пример.*

Число пазов якоря  $Z = 11$ , число пар полюсов  $p = 2$ . Требуется выполнить схему простой волновой обмотки.

Также как и в предыдущем примере, начнем с первого паза (рис. 2.7а).

Обратим внимание, что рис. 2.7а не совсем похож на рис. 2.5а из-за особенностей выполнения обмоток. Как уже известно, вторая сторона секции будет лежать через первый частичный шаг обмотки. Для того чтобы его рассчитать, необходимо знать результирующий шаг. Результирующий шаг волновой обмотки равен

$$Y = \frac{11-1}{2} = 5.$$

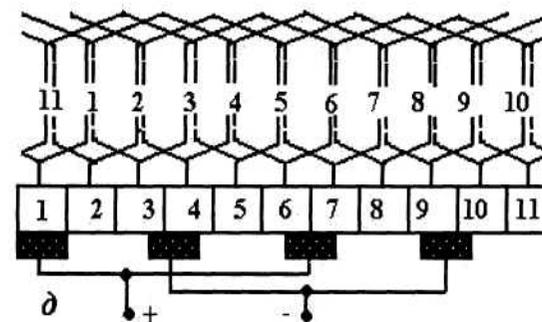
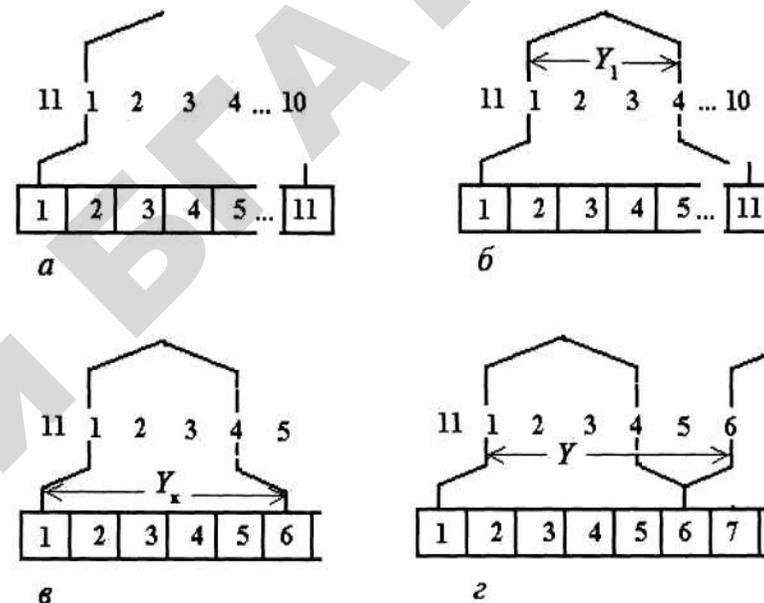


Рис. 2.7. Построение простой волновой обмотки:  $Z = 11, p = 2$ ; а, б, в, г, д – этапы построения обмотки

Шаг укорачиваем, то есть в формулу подставляем значение  $\varepsilon = -1$ .

Тогда первый частичный шаг

$$Y_1 = \frac{Y}{2p} \pm \varepsilon = \frac{11}{4} + 0,25 = 3.$$

Второй частичный шаг

$$Y_2 = Y - Y_1 = 5 - 3 = 2.$$

Вторую сторону первой секции, согласно первому частичному шагу, заводим в 4-й паз (рис. 2.7б).

$$Y = \frac{Z \pm 1}{p} = \frac{11 - 1}{2} = 5.$$

Зная, что шаг по коллектору равен результирующему  $Y_k = Y = 5$ , конец первой секции присоединим к 6-й коллекторной пластине (рис. 2.7в). Начало второй секции определим по результирующему шагу  $Y = 5$ , следовательно, с 6-го паза. Аналогично выполняются и другие секции. Как уже сказано выше, обмотка должна быть замкнутой (рис. 2.7г).

Количество щеток в волновой обмотке не связано с количеством полюсов, а определяется конструктивными особенностями машины. В нашем примере возьмем 4 щетки. Они по коллектору также располагаются симметрично, то есть должны быть друг от друга на расстоянии  $Z/p = 11/4 = 2,75$  коллекторных пластин (рис. 2.7д).

Обычно волновые обмотки выполняются для машин с относительно большим значением напряжения и меньшим – тока.

#### 2.2.4. Сложные обмотки и уравнительные соединения

В машинах большой мощности, где по обмоткам протекают значительные токи, секция имеет большое поперечное сечение. Поэтому сечение паза якоря также получается большим. Это приводит к увеличению размеров машины.

Чтобы уменьшить ток, протекающий по одной секции, применяют сложные обмотки. Они представляют собой некоторое количество  $m$  простых обмоток, уложенных на якоре и соединенных параллельно. Число параллельных ветвей в сложных обмотках увеличено в  $m$  раз. Чтобы простые обмотки соединить параллельно, минимальная ширина щетки должна равняться  $m$  коллекторным пластинкам.

При проектировании обмоток стремятся получить их симметричными. *Обмотка симметрична, если ее параллельные ветви имеют одинаковое*

*электрическое сопротивление и в них индуцируются одинаковые ЭДС при любом положении якоря относительно полюсов.*

Условия симметрии обмоток можно сформулировать следующим образом:

- каждая параллельная ветвь должна иметь одинаковое количество секций и витков;
- секции каждой параллельной ветви должны занимать на якоре одинаковое количество пазов;
- каждая параллельная ветвь должна занимать одинаковое положение относительно системы главных полюсов.

Если эти условия не выполняются, ЭДС параллельных ветвей будет неодинакова. Более того, даже если вышеуказанные условия соблюдаются, ЭДС параллельных ветвей петлевой обмотки могут оказаться неодинаковыми из-за магнитной несимметрии, причина которой – дефекты при изготовлении машины: наличие раковин в отливке станины, некачественная сборка полюсов, неправильная центровка якоря и т. п., из-за чего воздушный зазор под полюсами неодинаков.

Неравенство ЭДС параллельных ветвей приведет к появлению уравнительных токов, протекающих по обмоткам и щеткам. Как известно, наиболее слабым элементом электрической машины является скользящий контакт. Уравнительные токи еще более вызывают ухудшение его работы: одни щетки будут перегружены, вторые – недогружены. Поэтому уравнительные токи направляют не через щетки, а через уравнительные соединения (уравнители).

Для выравнивания нагрузок щеток петлевой обмотки при магнитной несимметрии используют уравнительные соединения (уравнители) первого рода: электрическое соединение точек обмоток якоря с равными потенциалами. Полное число уравнителей первого рода  $N_{ур}$ , которое можно установить в машине, равно

$$N_{ур} = \frac{S}{p}, \quad (2.9)$$

где  $S$  – количество секций обмотки.

Таким образом, для обмотки, приведенной на рис. 2.5д, можно установить шесть уравнителей. Но в целях экономии меди и упрощения конструкции машины обычно выполняют неполное число уравнителей, поэтому на рис. 2.5д показаны только три уравнителя. Полное число уравнителей первого рода применяют в машинах большой мощности.

В волновых обмотках секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами, вследствие чего ЭДС параллельных ветвей даже при магнитной несимметрии одинаковы. Это означает, что уравнителей первого рода в волновых обмотках нет.

В сложных обмотках простые обмотки соединены между собой параллельно щетками, и если ЭДС простых обмоток неодинаковы, также появляются уравнивающие токи.

Для того чтобы получить равномерное распределение тока по простым обмоткам, в сложных обмотках применяют уравнивающие соединения (уравниватели) второго рода, которые электрически соединяют между собой простые обмотки в точках одинакового потенциала.

Таким образом, в простых петлевых обмотках используются уравниватели первого рода, которые устраняют последствия магнитной несимметрии. В сложных обмотках, как в волновых, так и в петлевых, используют уравниватели второго рода.

При выборе типа обмотки для машин небольшой мощности отдают предпочтение волновой обмотке, так как она не требует уравнивателей. В мощных машинах при токе, превышающем 250–300 А, используют петлевые обмотки.

Также для уменьшения числа уравнивателей в мощных машинах применяются комбинированные обмотки, представляющие собой сочетание петлевой и волновой обмоток.

### 2.2.5. Электродвижущая сила (ЭДС) обмотки якоря машины постоянного тока

По закону электромагнитной индукции, при вращении якоря в магнитном поле полюсов в проводниках обмотки якоря будет наводиться ЭДС. Если активная часть проводника  $l$ , м, а линейная скорость его вращения  $v$ , м/с, то ЭДС проводника  $e_{пр}$ , В будет равна

$$e_{пр} = B_l v, \quad (2.10)$$

где  $B_l$  – индукция в точке, где лежит проводник, Тл.

Распределение индукции магнитного поля под полюсом при холостом ходе машины показано на рис. 2.8.

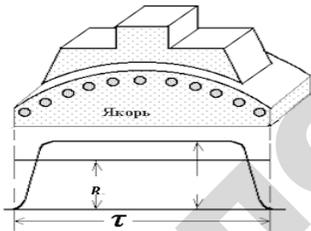


Рис. 2.8. Распределение магнитной индукции под полюсом машины постоянного тока

Расчет проведем по среднему значению магнитной индукции под полюсом. Для этого заменим график распределения  $B_l$  под полюсом на прямоугольник. Основание прямоугольника равно полюсному делению  $\tau$ , м. *Полюсным делением в машине постоянного тока называется часть окружности якоря, приходящаяся на один полюс:*

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (2.11)$$

где  $D$  – диаметр якоря, м.

Высота прямоугольника  $B_{ср}$  и есть среднее значение магнитной индукции под полюсом. При этом площади прямоугольника и фигуры ограниченной графиком  $B_l$  одинаковы.

ЭДС машины постоянного тока будет равна сумме ЭДС проводников одной параллельной ветви:

$$E = N_a e_{пр}, \quad (2.12)$$

где  $E$  – ЭДС машины постоянного тока, В;

$N_a$  – количество проводников одной параллельной ветви,

$$N_a = \frac{N}{2a},$$

где  $N$  – количество всех проводников в машине, шт.

Тогда

$$E = \frac{N}{2a} B_{ср} l v, \quad (2.13)$$

где  $E$  – ЭДС машины постоянного тока, В.

Выразим линейную скорость проводника через частоту вращения якоря:

$$v = \frac{\pi D n}{60}, \quad (2.14)$$

где  $n$  – частота вращения якоря, мин<sup>-1</sup>.

Из формулы (2.11) найдем  $D$ , м:

$$D = \frac{2p\tau}{\pi}. \quad (2.15)$$

Подставив выражения (2.14) и (2.15) в полученный результат (2.13), получим

$$E = \frac{NpB_{cp}\tau n}{60a}. \quad (2.16)$$

Выражение

$$\frac{Np}{60a} = C_e$$

зависит от конструктивного исполнения и называется постоянной машины при расчете ЭДС:

$$B_{cp}\tau l = \Phi, \quad (2.17)$$

где  $\Phi$  – основной магнитный поток, Вб.

Тогда ЭДС машины постоянного тока равна:

$$E = C_e \Phi n. \quad (2.18)$$

### 2.2.6. Электромагнитный момент, развиваемый якорем машины постоянного тока

По закону электромагнитной индукции, на проводник с током в магнитном поле будет действовать сила  $f_{пр}$ , Н:

$$f_{пр} = B I_{пр} l, \quad (2.19)$$

где  $I_{пр}$  – ток проводника, А.

$$I_{пр} = \frac{I_{я}}{2a}, \quad (2.20)$$

где  $I_{я}$  – ток якоря машины, А.

Сила, действующая на якорь, равна сумме всех сил, действующих на каждый проводник:

$$F = N f_{пр}. \quad (2.21)$$

Как известно, момент равен произведению силы  $F$  на плечо  $\frac{D}{2}$ :

$$M = F \frac{D}{2}. \quad (2.22)$$

Подставив в выражение (2.22) формулы (2.15, 2.19, 2.20, 2.21), получим

$$M = \frac{pN}{2\pi a} B_{cp} l \tau I_{я}.$$

Приняв постоянную  $C_m$  машины при расчете момента

$$C_m = \frac{pN}{2\pi a} \quad (2.23)$$

и учтя формулу (2.17), получим окончательное выражение для момента действующего на якорь машины постоянного тока, Н·м:

$$M = C_m \Phi I_{я}. \quad (2.24)$$

### 2.2.7. Способы возбуждения машин постоянного тока

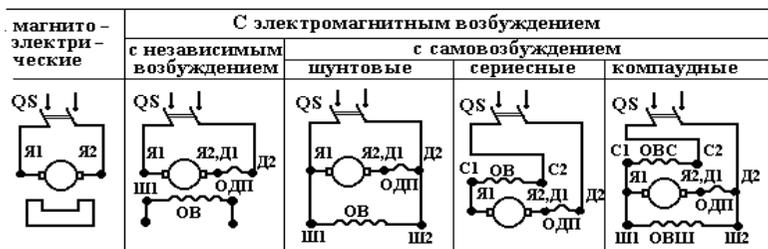
Возбудить машину – означает навести в ней основной магнитный поток. Системы возбуждения, которые создают его, зависят от конструкции и назначения машины постоянного тока. Их классификация и схемы приведены на рис. 2.9, показаны буквенно-цифровые обозначения обмоток, обозначения приведены согласно ГОСТ 183-74.

При независимом возбуждении основной магнитный поток создается постоянными магнитами или обмоткой возбуждения, питаемой от независимого источника.

Для промышленных целей в основном применяют машины постоянного тока с самовозбуждением. Для таких машин не требуется дополнительного источника питания. В машинах постоянного тока со смешанным возбуждением параллельная и последовательная обмотки могут быть включены согласно (МДС этих обмоток совпадают) и встречно (МДС обмоток направлены противоположно друг другу).

Обмотки параллельного возбуждения имеют большое количество витков, намотанных проводом малого сечения. Поэтому их омическое сопротивление большое и по ним протекает небольшой ток.

В результате мощность обмоток параллельного возбуждения составляет 1–5 % номинальной мощности машины.



Наименование обмотки	Обозначение		Примечание
	буквенно-цифровое	графическое	
1. Обмотка якоря	Я1-Я2 (ГОСТ183-74) А1-А2 (СТСЭВ3170-81)	 (ГОСТ 2.72268)	М- двигатель Г- генератор
2. Независимая обмотка возбуждения	Ш1-Ш2 (ГОСТ183-74) F1-F2 (СТСЭВ3170-81)		
3. Параллельная обмотка возбуждения	Ш1-Ш2 (ГОСТ183-74) E1-E2 (СТСЭВ3170-81)		
4. Последовательная обмотка возбуждения	Д1-Д2 (ГОСТ183-74) D1-D2 (СТСЭВ3170-81)		
5. Компенсационная обмотка	К1-К2 (ГОСТ183-74) C1-C2 (СТСЭВ3170-81)		
6. Обмотка дополнительных полюсов	Д1-Д2 (ГОСТ183-74) B1-B2 (СТСЭВ3170-81)		

Рис. 2.9. Классификация, схемы возбуждения и обозначение элементов машин постоянного тока

По обмоткам последовательного возбуждения проходит ток якоря. Поэтому они имеют относительно малое количество витков, выполненных проводом большого сечения.

### Контрольные вопросы:

1. Каково назначение обмотки якоря в генераторе и двигателе?
2. Чем руководствуются при выборе типа обмотки якоря?
3. Какими параметрами характеризуется обмотка якоря?
4. Что такое магнитная несимметрия и каковы ее последствия?
5. Каковы достоинства сложной обмотки?
6. В каких обмотках якоря применяют уравниватели первого и второго рода?
7. Как влияет положение щеток на электродвижущую силу машины?
8. От чего зависит количество параллельных ветвей простой петлевой и простой волновой обмоток якоря?
9. В каких случаях применяются петлевая и волновая обмотки?
10. Что называется полюсным делением?
11. Чем отличается постоянная машины при расчете ЭДС от постоянной при расчете момента?
12. Какой параметр является общим в формулах ЭДС и момента машины постоянного тока? Почему?
13. Что означает термин «возбуждение машины»?
14. Какие способы возбуждения применяют в машинах постоянного тока?

## 2.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.3.1. Магнитная цепь машины постоянного тока

Магнитная система двухполюсной машины в режиме холостого хода показана на рис. 2.10.

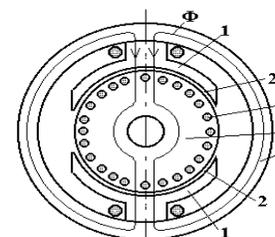


Рис. 2.10. Магнитное поле машины постоянного тока в режиме холостого хода

Из рисунка видно, что магнитный поток проходит через полюсы 1, воздушный зазор 2, зубцовую зону ротора 3, спинку ротора 4 и станину 5. Магнитный поток всегда замкнут.

### 2.3.2. Основы расчета магнитной цепи

При проектировании стремятся сконструировать машину с максимальной мощностью. Мощность зависит от значения магнитного потока, который, в свою очередь, создается магнитодвижущей силой (МДС). МДС необходима для того, чтобы заставить магнитный поток идти по магнитопроводу, подобно тому как ЭДС заставляет течь электрический ток по проводнику. Размерность МДС – амперы. Чтобы создать МДС в 100 ампер, можно намотать на магнитопровод 100 витков и пропустить ток равный 1 А или взять один виток с током 100 А.

При расчете магнитных цепей сначала задаются оптимальным значением магнитного потока  $\Phi$ , Вб, а потом определяют ток обмотки возбуждения  $I_b$ , А и количество витков  $W$ .

Алгоритм решения задачи:

$$\Phi \xrightarrow{1} B \xrightarrow{2} H \xrightarrow{3} F \xrightarrow{4} I_b W, \quad (2.25)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  
 $H$  – напряженность магнитного поля;  
 $F$  – магнитодвижущая сила, А;  
 $W$  – количество витков обмотки возбуждения, шт.

Как следует из п. 2.3.1, магнитная цепь машины разбивается на 5 участков. Магнитную индукцию на участках  $B_i$  (п. 1, схема (2.25)) можно определить по формуле:

$$B_i = \frac{\Phi}{\Pi_i}, \quad (2.26)$$

где  $\Pi_i$  – площадь сечения участков, м<sup>2</sup>.

Зная магнитную индукцию, определим напряженность магнитного поля  $H_i$  (п. 2, схема 2.25). Для воздушного зазора  $H_\sigma$ :

$$H_\sigma = \frac{B_\sigma}{\mu_0}, \quad (2.27)$$

где  $H_\sigma$  – индукция в воздушном зазоре, Тл;  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная, равна  $4\pi \cdot 10^{-7}$ , Г/м.

Напряженность магнитного поля остальных участков определим по таблицам или кривым намагничивания для соответствующих марок стали и индукции.

Магнитодвижущую силу участков  $F_i$  (п. 3, схема 2.25) определим по формуле:

$$F_i = H_i l_i, \quad (2.28)$$

где  $l_i$  – длина участка, по которому проходит магнитный поток, м.

МДС, необходимая для создания требуемого магнитного потока, будет равна сумме МДС участков. По закону полного тока, найдем ток возбуждения  $I_b$  и количество витков обмотки возбуждения  $W$ :

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = I_b W, \quad (2.29)$$

где  $n$  – количество участков магнитной цепи машины, шт.

### 2.3.3. Магнитная характеристика, коэффициент насыщения

Магнитный поток зависит от тока возбуждения. *Зависимость магнитного потока от тока возбуждения называется магнитной характеристикой, или кривой намагничивания машины* (рис. 2.11). Ее можно разделить на два участка.

На первом участке зависимость прямолинейна. Это означает, что вся МДС машины тратится только на преодоление воздушного зазора, магнитное сопротивление которого постоянно.

Другие участки, выполненные из ферромагнитного материала, сопротивления магнитному потоку практически не оказывают. С ростом тока возбуждения и, следовательно, магнитного потока сталь насыщается и начинает оказывать сопротивление магнитному потоку. Поэтому характеристика теряет свою линейность.

Обычно ток возбуждения принимают такой, чтобы рабочая точка  $A$  находилась в месте перегиба характеристики. Это означает, что магнитная система практически всех электрических машин насыщена.

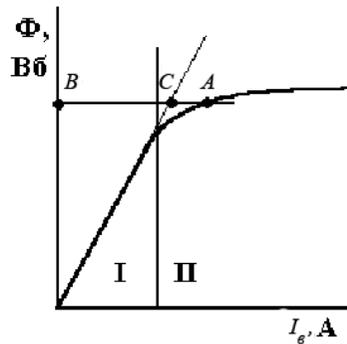


Рис. 2.11. Магнитная характеристика машины постоянного тока

Степень насыщения характеризуется коэффициентом насыщения. Коэффициент насыщения  $K_\mu$  – это отношение МДС машины  $F$  к МДС воздушного зазора  $F_\delta$ :

$$K_\mu = \frac{F}{F_\delta}. \quad (2.30)$$

Так как МДС пропорциональна току возбуждения (2.29), то коэффициент насыщения можно выразить как отношение токов возбуждения, то есть отношение отрезков  $AB$  к  $BC$ :

$$K_\mu = \frac{AB}{BC}. \quad (2.31)$$

Коэффициент насыщения характеризует степень использования магнитной системы машины. Для машины постоянного тока он равен  $K_\mu = 1,2 - 1,8$ .

#### 2.3.4. Реакция якоря при установленных на геометрическую нейтраль щетках

При нагрузке машины в обмотках якоря появляется ток, который создает магнитный поток якоря. *Воздействие магнитно-*

*го потока якоря на основной магнитный поток называется реакцией якоря.*

Геометрической нейтралью называется место на коллекторе, к которому присоединены секции, стороны которых находятся под серединами полюсов. Теоретически под серединой полюса значение индукции магнитного поля должно быть максимально, и щетки генератора на геометрической нейтрали должны снимать наибольшее напряжение, а в двигателе якорь должен развивать наибольший момент.

На рис. 2.12 показаны магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре для следующих режимов:

1. Режим холостого хода (рис. 2.12а). В этом режиме в машине наведен только основной магнитный поток, который направлен по продольной оси машины и распределен по полюсу равномерно. Форма кривой индукции в воздушном зазоре трапецеидальная.

2. Если напряжение подать только на обмотку якоря, получим магнитный поток, создаваемый якорем (реакция якоря в чистом виде) (рис. 2.12б). Как видно из рисунка, магнитный поток направлен поперек основного магнитного потока. Индукция в воздушном зазоре имеет седлообразную форму.

3. Режим нагрузки (рис. 2.12в). Магнитный поток создается как обмотками возбуждения, так и якорем: основной магнитный поток, направленный по продольной оси, искажается поперечным потоком якоря. Поэтому магнитный поток по полюсу распределен неравномерно: магнитная индукция под одним краем полюса значительно выше, чем под другим, максимальное значение магнитной индукции сдвинуто с середины полюса и физическая нейтраль смещена относительно геометрической на угол  $\alpha$ .

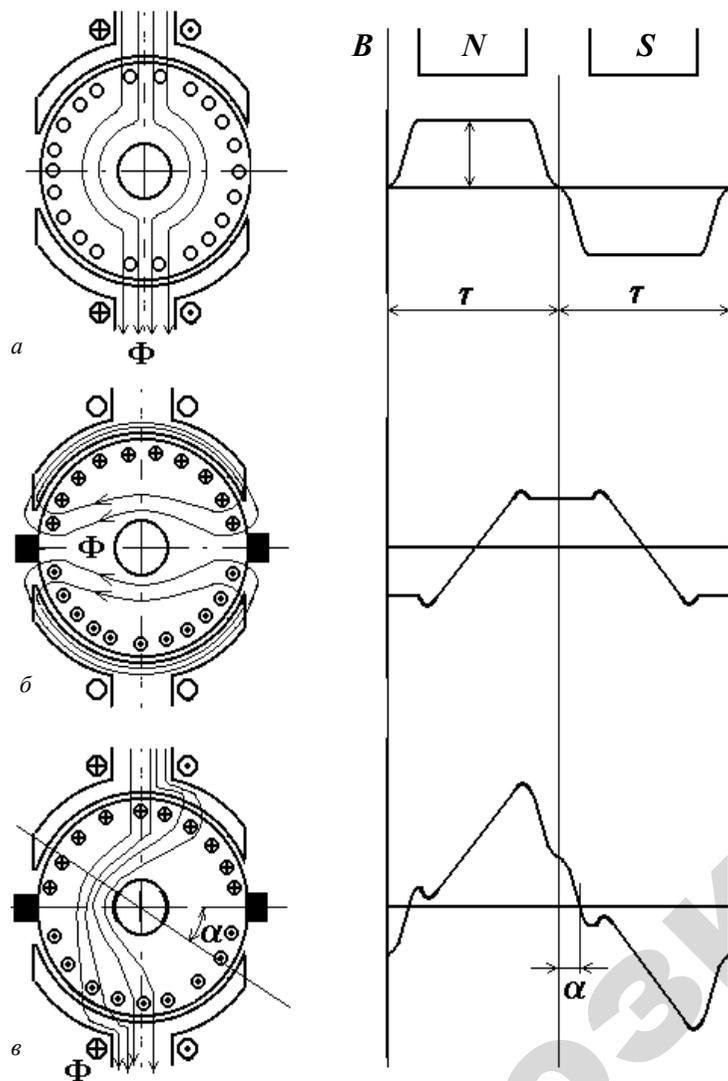


Рис. 2.12. Магнитное поле машины и распределение индукции в воздушном зазоре: *a* – режим холостого хода; *б* – поток, создаваемый только якорем; *в* – реальный режим работы машины под нагрузкой

### 2.3.5. Реакция якоря при смещенных с геометрической нейтрали щетках

Физическая нейтраль при нагрузке машины может быть смещена относительно геометрической. Это означает, что наибольшее напряжения генератора, или наибольший момент двигателя, будет, если щетки установлены не на геометрической нейтрали, а в другом месте, называемом физической нейтралью. Поэтому в машинах постоянного тока щетки установлены на физической нейтрали. Обычно правильная установка щеток на нейтраль производится экспериментально: метод наибольшего напряжения генератора, индукционный метод и т. д.

Если щетки смещены с геометрической нейтрали, якорь можно разделить на четыре зоны (рис. 2.13).

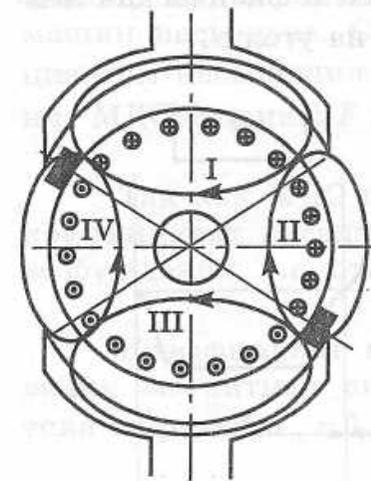


Рис. 2.13. Реакция якоря машины постоянного тока при сдвиге щеток с геометрической нейтрали

Реакция якоря во II и IV зонах будет противоположна или совпадает с основным магнитным потоком.

I и III зоны будут создавать поперечную реакцию якоря.

### 2.3.6. Влияние реакции якоря на работу машины и ее устранение

Реакция якоря вызывает искажение результирующего магнитного поля машины, что приводит к следующим изменениям:

1. Повышается напряжение между соседними коллекторными пластинами, когда стороны секции, соединенные с указанными пластинами, проходят под краем полюса с большей индукцией (рис. 2.12в). При перегрузках машины это напряжение может превысить критическое значение, что вызывает искрообразование между пластинами и может быть причиной кругового огня на коллекторе.

2. У машины с насыщенным магнитопроводом магнитный поток уменьшается, так как увеличение магнитной индукции у одного из краев полюса будет меньше, чем снижение его у другого. В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генераторов понижается ЭДС, у двигателей – вращающий момент.

Для устранения нежелательного влияния реакции якоря при проектировании машины принимают следующие меры:

- используют компенсационную обмотку;
- увеличивают воздушный зазор под главными полюсами;
- используют специальные материалы для изготовления машины;
- устанавливают добавочные полюса.

Компенсационную обмотку укладывают продольно в пазы полюсных наконечников (рис. 2.14) и включают последовательно с обмоткой якоря.

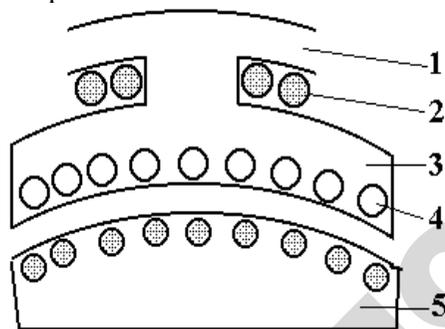


Рис. 2.14. Компенсационная обмотка:  
1 – станина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – полюс;  
4 – пазы для компенсационной обмотки; 5 – якорь

Количество витков компенсационной обмотки подбирают такое, чтобы созданный ими поток был равен потоку реакции якоря. При встречном включении потоки реакции якоря и компенсационной обмотки будут компенсировать друг друга, и распределение магнитной индукции в зазоре главных полюсов остается практически неизменным. Компенсационная обмотка в машинах серии 2П применяется для средней и большой мощности, в серии 4П используется, начиная с машин малой мощности.

Увеличение зазора под главными полюсами только ослабляет поток реакции якоря, потому что воздух имеет большое сопротивление для магнитного потока. Но это также ослабляет и основной магнитный поток, поэтому в таких машинах требуется большая МДС обмоток главных полюсов, что ведет к увеличению размеров полюсных катушек, полюсов и размеров машины в целом. Применяется только для машин малой мощности.

Поперечная реакция якоря уменьшается также при изготовлении сердечников главных полюсов из листовой холоднокатаной стали. Магнитное сопротивление такой стали в продольном (направлении проката) и поперечном направлениях неодинаково. Поэтому главные полюса выполняют так, чтобы основной магнитный поток проходил в продольном направлении, а поток реакции якоря – в поперечном.

Добавочные полюса применяются, главным образом, для улучшения коммутации (см. п. 2.4.3). Так как их обмотки включаются последовательно с обмоткой якоря и потоки их противоположны, добавочные полюса также уменьшают реакцию якоря.

#### Контрольные вопросы:

1. Какие участки содержит магнитная цепь машины постоянно-го тока?
2. Для чего выполняется расчет магнитной цепи машины?
3. С чем связан перегиб характеристики намагничивания?
4. Как определить коэффициент магнитного насыщения?
5. Какова форма кривой магнитной индукции под полюсом при холостом ходе?
6. В чем сущность реакции якоря машины постоянного тока?
7. Что называется геометрической нейтралью?
8. Почему реакция якоря, действующая по поперечной оси, вызывает уменьшение магнитного потока машины?
9. С какой целью компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря?

10. Почему с увеличением воздушного зазора ослабляется размагничивающее влияние реакции якоря?

11. Как изменяется реакция якоря при смещении щеток с геометрической нейтрали?

## 2.4. КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.4.1. Причины искрения под щеткой, оценка степеней искрения

С точки зрения надежности, наиболее слабым элементом в машинах постоянного тока является скользящий контакт щеток по коллектору. За время перехода щеток с одной коллекторной пластины на другую секция, заключенная между ними, замыкается накоротко щеткой, и направление тока в ней меняется на противоположное. Этот процесс называется коммутацией. При коммутации между щетками и коллектором может наблюдаться искрение. Сильное искрение приводит к повреждению поверхности коллектора и щеток.

Причины искрения щеток на коллекторе разделяют на механические, потенциальные и электромагнитные.

Механические причины приводят к неполному прилеганию щеток к коллектору. Они связаны с некачественным изготовлением коллектора и щеточного узла: неровная или загрязненная поверхность коллектора, его эллиптичность, биение, слабое давление щеток на коллектор и т. д.

Потенциальные причины искрения связаны с напряжением между коллекторными пластинами. Если по каким-либо причинам (см. п. 2.3.6.) оно превышает допустимое значение, появляются искры между смежными пластинами. При работе машины щетки стираются, а угольная пыль от них заполняет изоляционные промежутки между пластинами коллектора. При искрении по потенциальным причинам угольная пыль сгорает. В машинах малой мощности с малыми токами указанный процесс протекает относительно безвредно.

При большом токе происходит оплавление смежных пластин, что отрицательно сказывается и на щетках: они быстро изнашиваются.

В машинах большой мощности искры могут перейти в электрическую дугу, которая перекрывает большую часть коллектора (круговой огонь на коллекторе). Возникновение кругового огня сопровождается сильным звуковым и световым эффектами (в крупных машинах это похоже на взрыв). При этом машина выходит из строя.

Электромагнитные причины связаны с протеканием электромагнитных процессов в коммутлируемых секциях. Эти причины являются основными (более подробно см. п. 2.4.2).

Как правило, искрение щеток – это результат совместного действия многих причин. Качество коммутации оценивается степенью искрения под сбегающим краем щетки, из-под которого выходят пластины коллектора при его вращении.

Степени искрения и их характеристики приведены в таблице (согласно ГОСТ 183-74).

Таблица

Характеристики степеней искрения

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 <sup>1/4</sup>	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
1 <sup>1/2</sup>	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление следов нагара на щетках, а также следов почернения на коллекторе, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление следов нагара на щетках, а также следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
3	Значительное искрение под всем краем щетки с крупными вылетающими искрами. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимые протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

## 2.4.2. Прямолинейная, замедленная и ускоренная коммутация

При вращении якоря секции обмотки переходят из одной параллельной ветви в другую, и ток в них меняется на противоположный. Изменение направления тока в секции происходит за время  $T_k$ , называемого периодом коммутации:

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k}, \quad (2.32)$$

где  $b_{щ}$  – ширина щетки, м;  
 $v_k$  – окружная скорость коллектора, м/с.

Период коммутации – это время, в течение которого соединенные с секцией коллекторные пластины соприкасаются со щеткой и, следовательно, секция замкнута накоротко. В современных машинах  $T_k = 0,001 - 0,0001$  с, то есть период коммутации очень мал.

Характер протекания коммутационного процесса подчиняется закону изменения тока в коммутируемой секции от времени. На процесс коммутации оказывает влияние целый ряд факторов, часть которых сложно учесть аналитически. Поэтому для определения закона изменения тока в коммутируемой секции от времени примем следующие допущения:

- ширина щетки равна ширине коллекторной пластины;
- удельное переходное сопротивление контакта «щетка–коллектор» постоянно и не зависит от плотности тока в щетке;
- электрическое сопротивление коммутируемой секции по сравнению с переходным сопротивлением контакта щеток мало, и им можно пренебречь.

Процесс коммутации показан на рис. 2.15.

В начальный момент коммутации при  $t = 0$  щетка касается только пластины 1, и ток в коммутируемой секции равен току параллельной ветви  $i_a$  (рис. 2.15а). Коллектор продолжает вращаться, а щетки неподвижны, поэтому пластина 2 начинает набегать на щетку, щетка замыкает пластины 1 и 2. В результате коммутируемая секция оказывается замкнутой накоротко щеткой.

На рис. 2.15б показан момент  $t = 0,5T_k$ , когда щетка одинаково перекрывает обе пластины. В конце коммутации при  $t = T_k$  щетка полностью закрывает пластину 2, контакт с пластиной 1 потерян, и ток в коммутирующей секции равен  $i_a$ , то есть по значению такой же, как в начале коммутации, а по направлению противоположен.

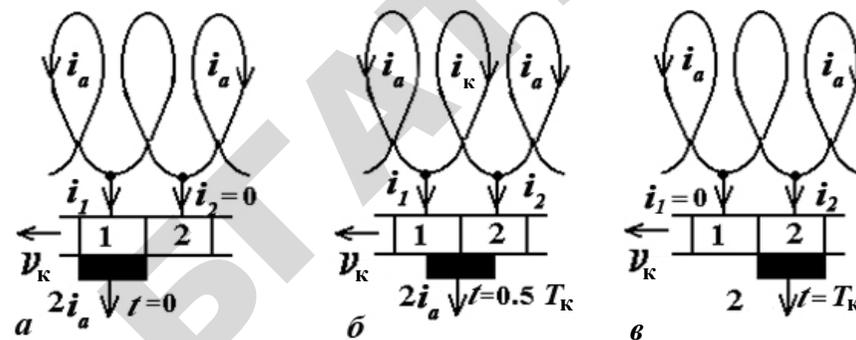


Рис 2.15. Переход коммутирующей секции из одной параллельной ветви в другую:

а, б, в – положения щетки относительно пластин коллектора

При выводе уравнения закона изменения тока в коммутируемой секции от времени предположим, что сумма ЭДС, наводимых в коммутируемой секции, равна нулю. В этом случае для коммутируемой секции (рис. 2.15б), в соответствии с законами Кирхгофа, можно записать:

$$\begin{cases} i_1 r_1 - i_2 r_2 = 0; \\ i_1 = i_a + i_k; \\ i_2 = i_a - i_k, \end{cases} \quad (2.33)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  – токи, проходящие через пластины 1 и 2, А;  
 $r_1$  и  $r_2$  – переходные сопротивления между щеткой и сбегающей 1 и набегающей 2 пластинами, Ом;  
 $i_k$  – ток в коммутируемой секции, А.

Решая систему уравнений (2.33) относительно тока в коммутируемой секции  $i_k$ , получим следующее выражение:

$$\frac{i_a - i_k}{i_a + i_k} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.34)$$

Переходные сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  обратно пропорциональны площадям контактирующей поверхности пластины со щеткой:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{S_2}{S_1}, \quad (2.35)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади пластин 1 и 2, закрытых щеткой,  $\text{м}^2$ .

Площади пластин, закрытых щеткой, зависят от времени, прошедшего с начала коммутации. При вращении коллектора (рис. 2.15) щетка сходит с первой коллекторной пластины и надвигается на вторую. В момент времени  $t$  щетка закроет площадь второй коллекторной пластины, равную  $S_2 = b_{щ} v_k t$ , и откроет такую же площадь на первой. Учитывая, что за время  $T_k$  щетка полностью закроет вторую и откроет первую коллекторные пластины, в момент времени  $t$  площадь первой коллекторной пластины, закрытой щеткой, будет равна  $S_1 = b_{щ} v_k T_k - b_{щ} v_k t = b_{щ} v_k (T_k - t)$ :

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{b_{щ} v_k t}{b_{щ} v_k (T_k - t)} = \frac{t}{T_k - t}. \quad (2.36)$$

Принимая во внимание уравнения (2.34–2.36), можно записать:

$$\frac{i_a - i_k}{i_a + i_k} = \frac{t}{T_k - t}. \quad (2.37)$$

Сделав преобразования, получим зависимость изменения тока в коммутируемой секции от времени:

$$i_k = i_a \frac{T_k - 2t}{T_k}. \quad (2.38)$$

Это уравнение является линейным (рис. 2.16а). Коммутация, при которой ток в коммутирующей секции изменяется линейно, называется прямолинейной коммутацией.

Для оценки коммутации важно знать плотности тока под набегающим и сбегающим краями щетки. Плотность тока под набегающим краем щетки  $j_2$   $\text{А}/\text{м}^2$  будет равна:

$$j_2 = \frac{i_2}{b_{щ} v_k t} = \frac{1}{b_{щ} v_k} \frac{i_2}{t}. \quad (2.39)$$

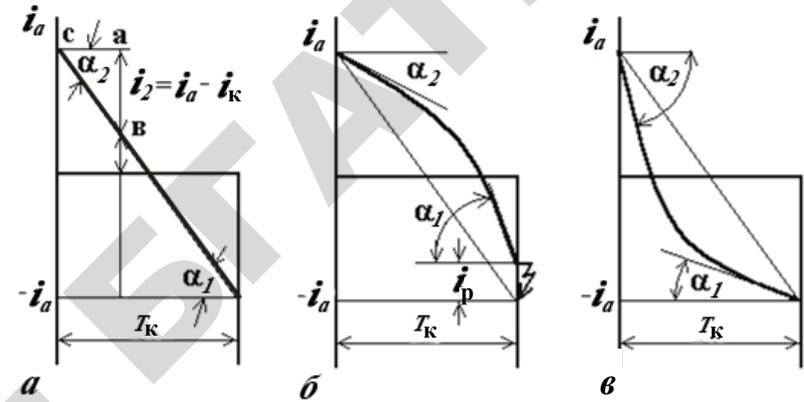


Рис. 2.16. Кривые изменения тока в коммутируемой секции: а – прямолинейная; б – замедленная; в – ускоренная

Так как  $1/b_{щ} v_k = \text{const}$ ,  $i_2 = ab$ , а  $t = ac$  из треугольника  $abc$  на рис. 2.16а, можем сказать, что плотность тока  $j_2$  пропорциональна тангенсу угла  $\alpha$  между линией, выражающей зависимость значения коммутируемого тока от времени, и осью абсцисс:

$$\text{tg } \alpha_2 = \frac{ab}{ac} = \frac{i_2}{t} = j_2. \quad (2.40)$$

Соответственно, плотность тока под сбегающим краем щетки

$$j_2 = \text{tg } \alpha_1. \quad (2.41)$$

Плотности тока под сбегающим и набегающим краями щетки равны (рис. 2.16а), и к моменту времени, когда щетка теряет контакт со сбегающей пластиной, ток через эту пластину уменьшается до нуля.

Таким образом, при прямолинейной коммутации искрения на коллекторе нет, потому что пластина коллектора выходит из-под щетки без разрыва тока. Поэтому прямолинейная коммутация называется идеальной.

При выводе уравнения прямолинейной коммутации было принято, что сумма ЭДС, наводимых в коммутируемой секции, равна нулю. Но в реальном случае в коммутируемой секции наводятся следующие ЭДС:

– ЭДС самоиндукции  $e_c$ , В;

$$e_c = L \frac{di_k}{dt}, \quad (2.42)$$

где  $L$  – индуктивность секции, Гн;

– ЭДС взаимоиндукции  $e_{вз}$ , В, если активные стороны одновременно коммутируемых секций окажутся в одном пазу:

$$e_{вз} = L_{вз} \frac{di}{dt}, \quad (2.43)$$

где  $L_{вз}$  – взаимная индуктивность одновременно коммутируемых секций, Гн;

– ЭДС внешнего поля  $e_{вн}$ , В, которое создается в зоне коммутации реакцией якоря:

$$e_{вн} = 2B_k l W_c v, \quad (2.44)$$

где  $B_k$  – магнитная индукция в зоне коммутации, Тл;

$l$  – длина активных частей секции, м;

$W_c$  – число витков в секции, шт.;

$v$  – линейная скорость секции, м/с.

Следовательно, в коммутируемой секции при работе машины создается результирующая реактивная ЭДС  $\sum e_p$ , равная

$$\sum e_p = e_c \pm e_{вз} \pm e_{вн}, \quad (2.45)$$

которая создает ток добавочной коммутации  $i_d$ :

$$i_d = \frac{\sum e_p}{r_1 + r_2} = \frac{\sum e_p}{r_{щ}}, \quad (2.46)$$

где  $r_{щ} = r_1 + r_2$  – сопротивление щеток, Ом.

Ток добавочной коммутации направлен против изменения коммутационного тока и замедляет его, поэтому коммутация носит название замедленной (рис. 2.16б). При такой коммутации плотность тока под набегающим краем щетки ( $\text{tg } \alpha_2$ ) будет меньше, чем под сбегающим ( $\text{tg } \alpha_1$ ).

Часто ток коммутации не успевает достигнуть нулевого значения в момент схода щетки с коллекторной пластины, и при размыкании происходит разрыв тока  $i_p$  (рис. 2.16б). Этот ток замыкается через воздух в виде искры. Чем больше ток разрыва, тем сильнее искрение у сбегающего края щетки.

Чтобы избавиться от добавочного тока коммутации, в машине между главными полюсами устанавливают добавочные полюсы, назначение которых – компенсировать результирующую реактивную ЭДС в коммутируемой секции.

Если компенсация полная, имеет место прямолинейная коммутация. Если ЭДС, создаваемая добавочными полюсами, больше результирующей реактивной ЭДС, в коммутируемой секции протекает ток, вызванный ЭДС добавочных полюсов. Но направлен он согласно изменению коммутируемого тока, то есть ускоряет его изменение. Поэтому такая коммутация носит название ускоренной (рис. 2.16г). При ускоренной коммутации плотность тока под набегающим краем щетки ( $\text{tg } \alpha_2$ ) больше, чем под сбегающим ( $\text{tg } \alpha_1$ ). При сильно ускоренной коммутации также возможно появление тока разрыва под набегающим краем щетки. Поэтому сильно ускоренная коммутация недопустима. Однако некоторое ускорение коммутации, при котором ток в коммутируемой секции достигает значения, близкого к току параллельной ветви до завершения коммутационного процесса, является благоприятным.

### 2.4.3. Способы улучшения коммутации

Основной причиной неудовлетворительной коммутации является наличие добавочного тока коммутации. Из анализа формулы (2.46) следует, что улучшить коммутацию можно уменьшением реактивной результирующей ЭДС  $\sum e_p$  или увеличением сопротивления щеток  $r_{щ}$ .

Чрезмерное увеличение сопротивления щеток ведет к дополнительным потерям в щеточном контакте и, следовательно, к уменьшению КПД машины. Поэтому выбор щеток должен быть обоснован. В электрических машинах применяют электрографитовые щетки, полученные путем нагревания заготовок из угля и кокса до температуры 2000–2500 °С. Одним из критериев выбора щеток является падение напряжения на них  $\Delta U_{щ}$ , которое пропорционально сопротивлению. При выборе руководствуются следующими правилами:

– для быстроходных машин применяют мягкие щетки с  $\Delta U_{щ} = 1,5 - 2,0$ ;

– для машин с затрудненной коммутацией используют твердые щетки с  $\Delta U_{щ} = 2,4 - 3,5$ ;

– для контактных колец применяют металлографитные щетки с  $\Delta U_{щ} = 0,1 - 0,5$ .

Из формулы (2.45) видно, что реактивная ЭДС состоит из ЭДС самоиндукции, взаимоиндукции и ЭДС внешнего поля.

ЭДС самоиндукции (2.42)  $e_c$  можно снизить:

– уменьшением числа витков в секции, что ведет к снижению индуктивности секции  $L_c$ . Однако уменьшение числа витков в секции ведет к увеличению количества самих секций, для чего необходимо увеличить количество пазов якоря, что не всегда экономически целесообразно;

– использованием более широких открытых пазов якоря. В этом случае уменьшаются потоки рассеяния, но появляются проблемы с креплением обмоток;

– созданием специального коммутирующего поля в зоне коммутации. Такое поле может создаваться добавочными полюсами или сдвигом щеток с геометрической нейтрали.

ЭДС взаимоиндукции  $e_{вз}$  (2.43) снижается размещением активных сторон одновременно коммутируемых секций в разных пазах. Для этого:

– уменьшают ширину щеток. Чем уже щетка, тем меньшее число секций одновременно коммутируется. Однако слишком узкие щетки имеют низкую механическую прочность и малую контактную поверхность. Кроме того, уменьшение ширины щеток снижает период коммутации и увеличивает скорость изменения тока в коммутируемой секции. Поэтому целесообразно использовать щетки шириной 2–3 коллекторных деления.

– укорачивают шаг обмотки. В этом случае активные стороны одновременно коммутируемых секций окажутся в разных пазах.

– создают специальное коммутирующее поле в зоне коммутации, как и для снижения  $e_c$ .

Уменьшить ЭДС внешнего поля (2.43)  $e_{вн}$  можно посредством уменьшения:

- числа витков в секции  $W_c$ , как и для снижения  $e_c$ ;
- длины якоря  $l$  за счет увеличения диаметра;
- частоты вращения, чтобы снизить окружную скорость якоря;
- и создания специального коммутирующего поля в зоне коммутации, как и для снижения  $e_c$  и  $e_{вн}$ .

Коммутация – сложный процесс, зависящий от множества причин, поэтому там, где это целесообразно, используют все способы ее улучшения. Однако создание специального коммутирующего поля в зоне коммутации является главным способом ее улучшения. Им можно полно-

стью устранить реактивную ЭДС  $\sum e_p$ . Для этого необходимы добавочные полюса или сдвиг щеток с геометрической нейтрали.

Добавочные полюса (рис. 2.17) располагаются между основными по линиям геометрических нейтралей.

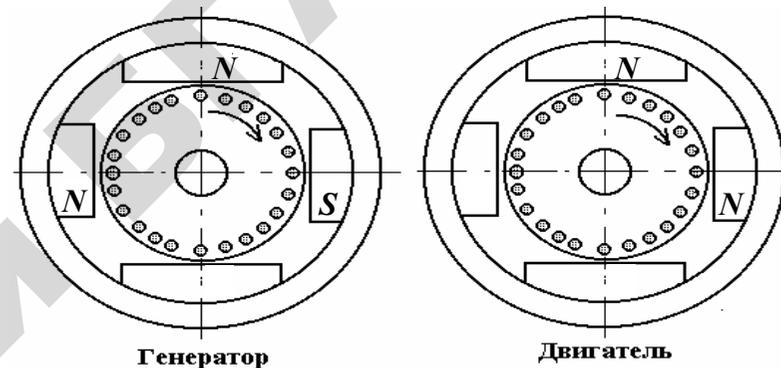


Рис. 2.17. Полярность добавочных полюсов при работе машины в генераторном и двигательном режимах

При создании специального коммутирующего поля добавочные полюса также компенсируют реакцию якоря в зоне коммутации. Поэтому обмотка добавочных полюсов подключается последовательно обмотке якоря. Число витков обмотки добавочного полюса принимают несколько больше, чем необходимо для полной компенсации реактивной ЭДС, чтобы коммутация была ускоренной.

Сердечники добавочных полюсов выполнены массивными из стальной поковки или собраны из отдельных листов электротехнической стали. Они работают в ненасыщенном режиме. Число добавочных полюсов обычно равно числу главных полюсов, у машин небольшой мощности их число может быть уменьшено в 2 раза. Воздушный зазор под добавочными полюсами увеличен, по сравнению с зазором под главными полюсами, с целью уменьшения насыщения.

Полярность каждого из добавочных полюсов выбирается так, чтобы наводимая его полем ЭДС была направлена встречно реактивной ЭДС (рис. 2.17).

Теория коммутации базируется на ряде допущений, поэтому окончательная настройка коммутации производится экспериментально. Необходимо отметить, что добавочные полюса рассчитаны для работы в номинальных режимах. При перегрузке машины из-за насыщения добавочных полюсов компенсация результирующей реактивной ЭДС не полная, коммутация становится замедленной и возможно искрение на коллекторе.

Установка добавочных полюсов в настоящее время является лучшим способом улучшения коммутации, поэтому он используется во всех машинах мощностью свыше 1 кВт.

В машинах мощностью до 1 кВт коммутирующее поле в зоне коммутации создается смещением щеток с геометрической нейтрали.

Если щетки установлены на геометрической нейтрали ( $n-n'$ ) (рис. 2.18), то результирующая ЭДС в коммутируемой секции равна сумме ЭДС  $e_c$ ,  $e_{вз}$  и  $e_{вн}$  (2.45).

Если же щетки расположены на физической нейтрали ( $m-m'$ ),  $e_{вн}$ , вызванная реакцией якоря, равна нулю, и добавочный ток коммутации вызывается только ЭДС само- и взаимоиндукции  $e_c$  и  $e_{вз}$ . Если щетки сдвинуть еще дальше за физическую нейтраль ( $k-k'$ ), в зоне коммутации будет поле  $B_k$ , которое наведет ЭДС, компенсирующее ЭДС само- и взаимоиндукции.

Для получения компенсации щетки необходимо сдвигать в направлении вращения якоря у генератора или против вращения якоря у двигателя. Угол сдвига щеток устанавливается экспериментально.

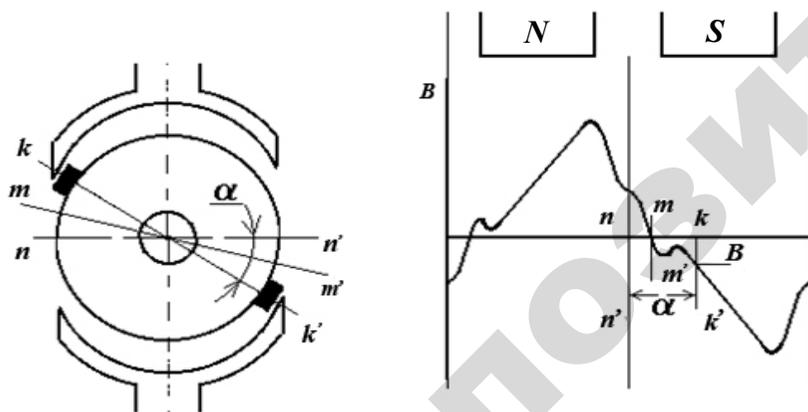


Рис. 2.18. Коммутирующее поле при сдвиге щеток

Недостатками указанного способа являются:

- неполная компенсация реактивной ЭДС при изменении нагрузки, потому что коммутирующее поле изменяется не пропорционально мощности. Для полной компенсации при изменении нагрузки пришлось бы сдвигать щетки;
- невозможность использования у реверсируемых машин, так как при изменении направления вращения меняется направление смещения физической нейтрали.

### Контрольные вопросы:

1. Какие причины могут вызвать искрение на коллекторе?
2. Какие степени искрения предусмотрены стандартом?
3. Почему прямолинейная коммутация не сопровождается искрением?
4. Какие причины, вызывающие искрение, возникают при замедленной коммутации?
5. Объясните назначение и устройство добавочных полюсов.
6. Могут ли возникнуть искры под набегающим краем щетки? Почему?
7. Каковы причины, способные вызвать круговой огонь по коллектору?

## 2.5. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.5.1. Параметры и характеристики генераторов

Работа любого генератора постоянного тока характеризуется следующими параметрами:

- частота вращения  $n$ , мин<sup>-1</sup>;
- напряжение генератора  $U_T$ , В;
- ток нагрузки или ток якоря  $I_{я}$ , А;
- ток возбуждения  $I_B$ , А.

Все четыре параметра генератора взаимосвязаны, и исследовать их одновременно сложно. Поэтому обычно исследуют зависимость между двумя параметрами, предполагая, что оставшиеся два остаются постоянными. Такая зависимость называется характеристикой генератора.

Поскольку частота вращения зависит не от самого генератора, а от приводного двигателя, для всех характеристик она постоянна,  $n = \text{const}$ .

Чтобы исследовать генератор постоянного тока, достаточно снять следующие пять характеристик:

1. Характеристика холостого хода – зависимость напряжения генератора от тока возбуждения, если ток якоря равен нулю:  $U_r = f(I_b), I_a = 0, n = \text{const}$ .

2. Внешняя характеристика – зависимость напряжения генератора от тока якоря, при неизменном токе возбуждения:  $U_r = f(I_a), I_b = \text{const}, n = \text{const}$ .

3. Регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянном напряжении генератора:  $I_b = f(I_a), U_r = \text{const}, n = \text{const}$ .

4. Нагрузочная характеристика – зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при постоянном токе якоря, не равном нулю:  $U_r = f(I_b), I_a \neq 0, I_a = \text{const}, n = \text{const}$ .

5. Характеристика короткого замыкания – зависимость тока нагрузки от тока возбуждения, если сопротивление нагрузки генератора равно нулю:  $I_b = f(I_a), R_n = 0, n = \text{const}$ .

### 2.5.2. Уравнения равновесия ЭДС и моментов генератора постоянного тока

Уравнение равновесия ЭДС генератора можно вывести исходя из схемы замещения цепи якоря (рис. 2.19) по второму закону Кирхгофа:

$$U_r = E - I_a r_a. \quad (2.47)$$

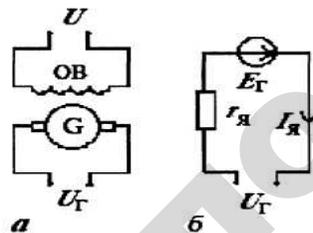


Рис. 2.19. Генератор с независимым возбуждением: а – схема принципиальная; б – схема замещения цепи якоря

Уравнение равновесия моментов генератора имеет следующий вид:

$$M_{пр} - M_r = M_{дин} = j \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.48)$$

где  $M_{пр}$  – момент приводного двигателя, Н·м;

$M_r$  – момент генератора (направлен против вращения), Н·м;

$M_{дин}$  – динамический момент, Н·м;

$j$  – момент инерции якорей генератора, приводного двигателя и соединительной муфты.

### 2.5.3. Генератор независимого возбуждения

Схема генератора с независимым возбуждением приведена на рис 2.19а. Обмотка возбуждения подключена к независимому источнику напряжения, что объясняет название генератора.

Схема экспериментального снятия характеристик приведена на рис. 2.20.

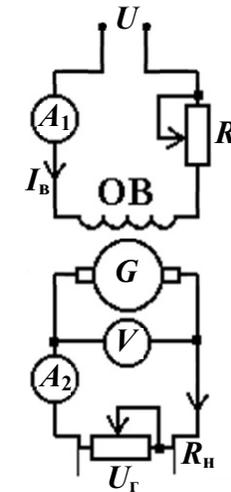


Рис. 2.20. Схема экспериментального снятия характеристик генератора с независимым возбуждением

Реостат  $R_1$  нужен для изменения тока возбуждения,  $R_n$  – для изменения тока нагрузки. Амперметрами  $A_1$  измеряется ток возбуждения,  $A_2$  – ток нагрузки. Вольтметром  $V$  измеряется напряжение генератора.

Характеристика холостого хода (рис. 2.21) полностью повторяет магнитную характеристику машины постоянного тока (см. рис. 2.11). В режиме холостого хода напряжение пропорционально магнитному потоку:

$$U_r = E = C_e \Phi n. \quad (2.49)$$

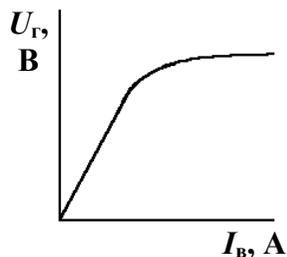


Рис. 2.21. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Из формулы (2.47)  $U_r = E$ , потому что  $I_a = 0$ . Так как  $n = \text{const}$ , а  $C_e$  – постоянная величина, поэтому напряжение генератора в режиме холостого хода  $U_r$  пропорционально магнитному потоку  $\Phi$ .

Также как и у магнитной характеристики, перегиб характеристики холостого хода связан с насыщением магнитной системы.

Для построения внешней характеристики (рис. 2.22) используем уравнение ЭДС генератора (2.47). Если бы  $E = \text{const}$ , характеристика представляла бы собой прямую линию: на напряжение влияло бы только падение напряжения на якоре  $I_a r_a$ . Но так как ЭДС зависит от магнитного потока (2.18), на который воздействует реакция якоря, характеристика теряет свою линейность.

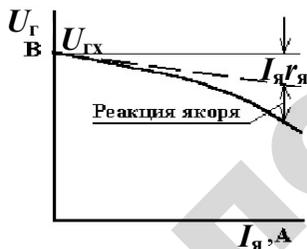


Рис. 2.22. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

Регулировочная характеристика (рис. 2.23) показывает, как следует регулировать ток возбуждения, чтобы напряжение осталось постоянным.

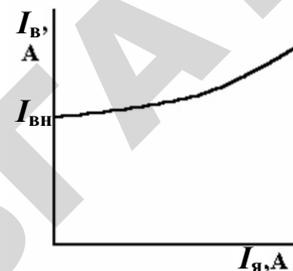


Рис. 2.23. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Чтобы выяснить характер кривой, необходимо рассматривать ее совместно с внешней характеристикой: с ростом нагрузки  $I_a$  напряжение  $U_r$  уменьшается.

Чтобы поддерживать напряжение постоянным, нужно увеличивать ЭДС  $E \uparrow = C_e \Phi \uparrow n$ . Магнитный поток зависит от тока обмотки возбуждения  $I_f$ : чем больше  $I_f$ , тем выше  $\Phi$ . Таким образом, изменяя ток возбуждения, регулируем напряжение.

Нагрузочная характеристика (рис. 2.24) практически повторяет характеристику холостого хода, но идет ниже ее за счет падения напряжения на якоре  $I_a r_a$ , а также реакции якоря. Характеристика имеет прямолинейный (ненасыщенный) и криволинейный (насыщенный) участки.

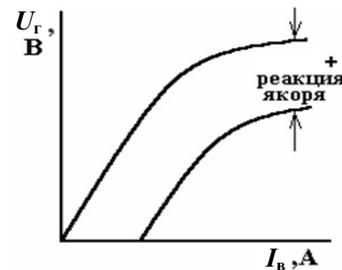


Рис. 2.24. Нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Характеристика короткого замыкания показана на рис. 2.25.  
Ток якоря, согласно закону Ома, равен

$$I_{я} = \frac{U_{г}}{r_{я}}. \quad (2.50)$$

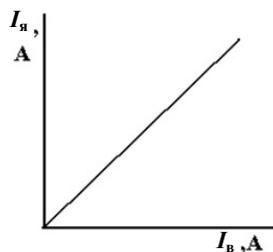


Рис. 2.25. Характеристика короткого замыкания генератора

Зависимость напряжения от тока возбуждения показана на рис. 2.24. В опыте короткого замыкания напряжение мало, потому что  $R_{н} = 0$ , а ток якоря не превышает номинальный ток генератора. Поэтому опыт короткого замыкания производится на прямолинейном участке нагрузочной характеристики, и, следовательно, характеристика короткого замыкания также прямолинейна.

Основной недостаток генератора с независимым возбуждением – потребность в независимом источнике напряжения.

#### 2.5.4. Генератор параллельного возбуждения

Схема для экспериментального снятия характеристик генератора параллельного возбуждения приведена на рис. 2.26. Назначение приборов и реостатов такое же, как и для генератора с независимым возбуждением.

Как видно из рисунка, обмотка возбуждения получает питание от якоря самого генератора, то есть имеет место самовозбуждение генератора.

Для самовозбуждения генератора необходимы три условия:

- 1) наличие остаточного магнитного потока;
- 2) совпадение по направлению потока обмотки возбуждения с остаточным магнитным потоком;

3) сопротивление цепи, по которой замыкается ток возбуждения (якорь – обмотка возбуждения) должно иметь определенное значение.

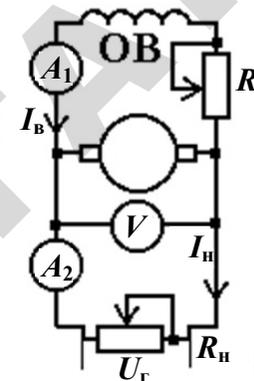


Рис. 2.26. Схема экспериментального снятия характеристик генератора с параллельным возбуждением

Процесс самовозбуждения генератора показан на рис. 2.27.

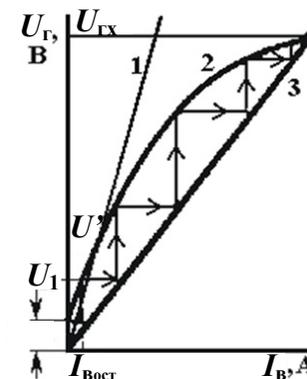


Рис. 2.27. Процесс самовозбуждения генератора: зависимость тока возбуждения от приложенного к обмотке возбуждения напряжения:  
1 – с повышенным сопротивлением цепи; 2 – характеристика холостого хода;  
3 – с нормальным сопротивлением цепи

При вращении якоря генератора остаточный магнитный поток вызывает остаточное напряжение  $U_{ост}$ . В свою очередь  $U_{ост}$ , приложенное к обмотке возбуждения, вызывает ток возбуждения  $I_{в.ост}$ , который наводит магнитный поток.

Если магнитный поток, наведенный током возбуждения, совпадает с остаточным, потоки суммируются и вызывают в обмотке якоря напряжение  $U_1$ , которое будет больше  $U_{ост}$ . Большее напряжение вызовет больший ток возбуждения и, следовательно, еще большие ток и напряжение.

Происходит лавинообразный процесс, в результате которого напряжение генератора повысится до напряжения холостого хода  $U_{гх}$ , определяемого точкой пересечения характеристики холостого хода  $I$  и линии 2, выражающей зависимость тока возбуждения от приложенного к обмотке возбуждения напряжения.

Наклон линии 2 на графике зависит от сопротивления цепи «якорь–обмотка возбуждения»  $r_{я-в}$ :

$$I_{я} = \frac{U_{г}}{r_{я-в}}. \quad (2.51)$$

При большом сопротивлении  $r_{я-в}$  зависимость будет ближе к оси ординат (линия 3), и генератор не возбуждётся. Если точнее, генератор возбуждётся до напряжения  $U'$ , которое мало.

**Характеристики генератора.** Характеристика холостого хода генератора показана на рис. 2.27. Ее отличие от аналогичной характеристики генератора с независимым возбуждением только в обязательном наличии остаточного напряжения, то есть она должна начинаться не с нуля. В остальном они одинаковы: имеют прямолинейный участок и область насыщения (криволинейный участок).

Нагрузочная характеристика также аналогична характеристике генератора с независимым возбуждением (рис. 2.28).



Рис. 2.28. Нагрузочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

Она пойдет ниже, потому что на нее влияет также снижение напряжения генератора, от которого зависит ток возбуждения. Характеристики генератора с независимым возбуждением, приведенные для сравнения, показаны штриховой линией (рис. 2.28; 2.29; 2.31).

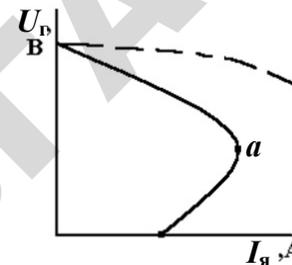


Рис. 2.29. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением показана на рис. 2.29. На этом же рисунке показана внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением. Характер кривых объясняется тем, что у генератора с параллельным возбуждением на напряжение влияют три фактора:

- 1) падение напряжения на якоре  $I_{я}r_{я}$ ;
- 2) реакция якоря;
- 3) уменьшение тока возбуждения при снижении напряжения,

а у генератора с независимым возбуждением на напряжение влияют только два первых фактора.

Если нагрузка генератора увеличится до критической (рис. 2.29, точка  $a$ ), происходит лавинообразное снижение напряжения до нуля. Предположим, генератор работал с номинальной нагрузкой, что соответствует нагрузочной характеристике, приведенной на рис. 2.30 (кривая  $I$ ), при номинальном напряжении  $U_{н}$ .

Потом нагрузка увеличилась, и нагрузочная характеристика пошла ниже (кривая  $I'$ ). Напряжение генератора уменьшилось до  $U'$ . Это вызвало снижение тока возбуждения до  $I_{в}'$ . Произошел лавинообразный процесс, обратный процессу самовозбуждения, который показан на рис. 2.27, и напряжение упало до нуля (рис. 2.29, точка  $в$ ).

Так как внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением идет ниже, чем у генератора с независимым возбуждением, регулировочная характеристика пойдет выше (рис. 2.31).

Характеристики короткого замыкания у генератора параллельного возбуждения нет, потому что генератор не возбудится при замкнутой накоротко обмотке якоря.

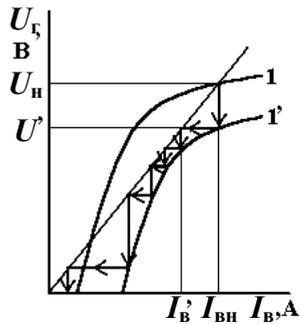


Рис. 2.30. Процесс лавинообразного снижения напряжения генератора при увеличении нагрузки

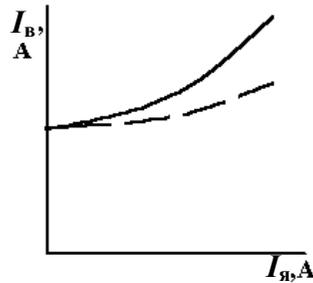


Рис. 2.31. Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

Генераторы параллельного возбуждения находят широкое применение, так как не требуют дополнительного источника постоянного напряжения для возбуждения.

### 2.5.5. Генератор смешанного возбуждения

Схема генератора для экспериментального снятия характеристик приведена на рис. 2.32.

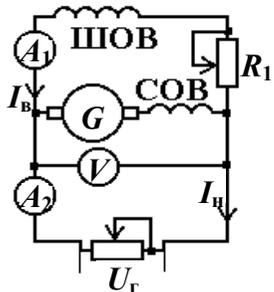


Рис. 2.32. Схема экспериментального снятия характеристик генератора со смешанным возбуждением



Рис. 2.33. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением

Обмотка параллельного возбуждения ШОВ (шунтовая обмотка возбуждения) создает основной магнитный поток, последовательно-го СОВ (серийная обмотка возбуждения) – создает дополнительный поток, который зависит от нагрузки.

Внешняя характеристика генератора показана на рис. 2.33. Последовательная обмотка СОВ обычно включается согласно параллельной, чтобы их потоки совпадали. В этом случае магнитный поток последовательной обмотки компенсирует поток реакции якоря, обеспечивая жесткую внешнюю характеристику. Для сравнения на рис. 2.33 штриховой линией приведена внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

При встречном включении обмоток напряжение генератора резко уменьшается, так как поток последовательной обмотки направлен против основного магнитного потока. Встречное включение обмоток можно использовать в специальных генераторах (сварочных), где используется мягкая внешняя характеристика.

Характеристика холостого хода такая же, как и генератора с параллельным возбуждением. Характеристики короткого замыкания нет. Нагрузочная и регулировочная характеристики при согласном включении обмоток идут соответственно выше и ниже, чем у генератора с параллельным возбуждением, что связано с компенсацией реакции якоря обмоткой последовательного возбуждения.

### Контрольные вопросы:

1. Какие параметры и характеристики имеются у генераторов постоянного тока?
2. Почему у генератора параллельного возбуждения изменение напряжения при изменении нагрузки больше, чем у генератора независимого возбуждения?
3. Каковы условия самовозбуждения генератора постоянного тока?
4. Почему у генераторов параллельного и смешанного возбуждения нет характеристики короткого замыкания?
5. При каком включении обмоток возбуждения генератора смешанного возбуждения напряжение на зажимах потребителя сохраняется практически неизменным?

## 2.6. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.6.1. Уравнения равновесия ЭДС и моментов двигателя

Уравнение равновесия ЭДС двигателя имеет следующий вид:

$$U = E + I_a r_a, \quad (2.52)$$

где  $U$  – напряжение сети, к которой подключен двигатель, В;

$E_d$  – ЭДС якоря двигателя, В.

Уравнение моментов двигателя

$$M_d - M_c = M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.53)$$

где  $M_d$  – момент двигателя, Н·м;

$M_c$  – момент сопротивления рабочей машины, Н·м.

### 2.6.2. Потери и КПД двигателя постоянного тока

Чтобы построить энергетическую диаграмму двигателя постоянного тока (рис. 2.34), необходимо знать его физические процессы.

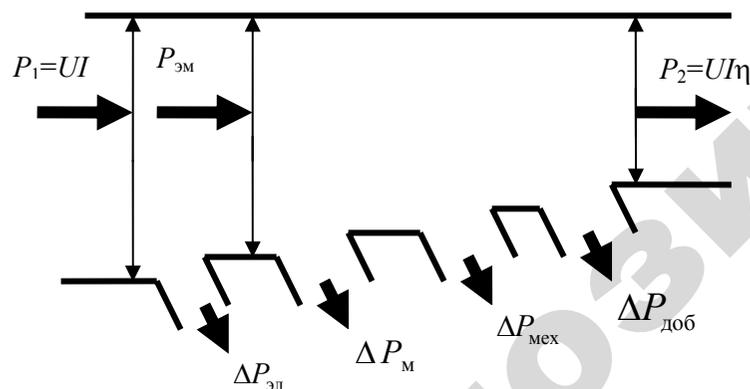


Рис. 2.34. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

Двигатель получает из сети электрическую мощность  $P_1$ . При подаче напряжения на двигатель, обмотки якоря и возбуждения

оказываются под напряжением, и по ним начинает протекать электрический ток. Следовательно, в обмотках, а также и в щетках имеют место электрические потери  $\Delta P_{эл}$ :

$$\Delta P_{эл} = I_a^2 r_{ш} + I_a^2 r_{я} + I_a^2 r_c + K \Delta U_{щ} I_a, \quad (2.54)$$

где  $r_{ш}, r_{я}, r_c$  – сопротивления соответственно обмоток параллельного возбуждения, якорной и последовательного возбуждения, Ом;

$\Delta U_{щ}$  – падение напряжения на щетке, В;

$I_a$  – ток параллельной ветви, который идет по щетке, А;

$K$  – количество щеток.

Электрические потери зависят от нагрузки машины, поэтому эти потери называются переменными.

Электрический ток, протекая по обмоткам возбуждения, наводит магнитный поток, который, в свою очередь, будет проходить по магнитным цепям машины и создавать в них магнитные потери  $\Delta P_m$ . Они состоят из двух составляющих: потери на вихревые токи и перемагничивание. Перемагничиванию в машине постоянного тока подвергается только якорь, поэтому магнитные потери происходят в якоре. Они зависят от значения магнитной индукции, марки и толщины листов стали, из которой набран сердечник якоря, и частоты перемагничивания  $f$ , Гц, равной:

$$f = \frac{Pn}{60}, \quad (2.55)$$

где  $P$  – количество пар полюсов;

$n$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>.

При взаимодействии магнитного поля с током якоря, последний начинает вращаться. Следовательно, имеют место механические потери  $\Delta P_{мех}$ . Они обусловлены трением в подшипниках, щеток о коллектор и вентилятора о воздух.

Кроме вышеперечисленных, в машине есть еще и добавочные потери  $\Delta P_{доб}$ , которые трудно рассчитать. Они складываются из потерь: в уравнивательных соединениях, в стали – из-за неравномерной магнитной индукции под полюсом (см. рис. 2.12), от пульсации магнитного потока в полюсных наконечниках и т. д. В расчетах значение добавочных потерь принимают равным 1 % от полезной мощности для генераторов или подводимой мощности для двигателей в машинах без компенсационной обмотки и 0,5 % в машинах с компенсационной обмоткой.

Если электрические потери называют переменными, то механические и магнитные, не зависящие от нагрузки, называют постоянными.

Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение полезной мощности  $P_2$  к подводимой  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.56)$$

Учитывая, что

$$P_1 = P_2 + \Delta P_m + \Delta P_{эл} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}, \quad (2.57)$$

можно записать:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_m + \Delta P_{эл} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}}{P_1}. \quad (2.58)$$

КПД зависит от мощности машины и от ее нагрузки. Для машин мощностью от 1 до 100 кВт номинальный КПД равен 0,75–0,90.

Зависимость КПД от нагрузки приведена на рис. 2.35. Очевидно, что максимальный КПД имеет место при нагрузке 70–80 % от номинальной.

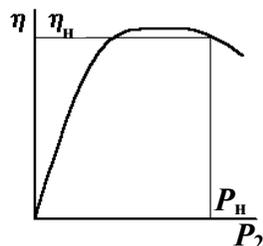


Рис. 2.35. Зависимость КПД от нагрузки

### 2.6.3. Характеристики двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока имеют следующие характеристики:

1) моментная – зависимость момента на валу двигателя от тока якоря  $M = f(I_я)$ , при постоянном напряжении сети  $U = \text{const}$ ;

2) скоростная (электромеханическая) – зависимость частоты вращения якоря двигателя от тока якоря  $n = f(I_я)$ , при  $U = \text{const}$ ;

3) механическая – зависимость частоты вращения якоря от момента на валу двигателя,  $n = f(M)$ , при  $U = \text{const}$ ;

4) рабочие – это зависимости момента на валу  $M$ , частоты вращения якоря  $n$ , тока якоря  $I_я$ , подводимой мощности  $P_1$ , и КПД  $\eta$  от полезной мощности двигателя  $P_2$  ( $M, n, I_я, P_1, \eta = f(P_2)$ ), при  $U = \text{const}$ .

Все характеристики, построенные без дополнительных сопротивлений в цепях двигателя, называются естественными, а остальные – искусственными.

### 2.6.4. Характеристики двигателей параллельного возбуждения

Схема двигателя параллельного возбуждения приведена на рис. 2.36. Из нее видно, что если напряжение сети постоянное, ток возбуждения двигателя также постояен, следовательно, если пренебречь реакцией якоря, постоянным является и основной магнитный поток.

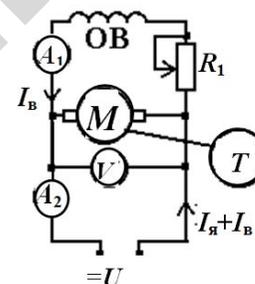


Рис. 2.36. Схема двигателя параллельного возбуждения

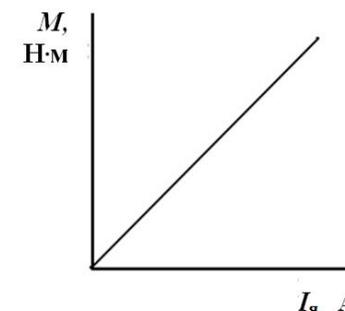


Рис. 2.37. Моментная характеристика двигателя параллельного возбуждения

Момент на валу двигателя (2.24)  $M = C_m \Phi I_я$ . Так как магнитный поток постоянный, не зависит от нагрузки, то зависимость момента от тока якоря линейная, и моментная характеристика выражается прямой линией (рис. 2.37).

Для вывода уравнения скоростной характеристики воспользуемся формулой равновесия ЭДС двигателя (2.52)  $U = E_d + I_я r_я$ .

Как известно из (2.18), ЭДС машины постоянного тока  $E = C_e \Phi n$ .

Подставив выражение ЭДС в формулу равновесия напряжений и выразив частоту вращения ( $n$ ), получим следующее уравнение для скоростной характеристики:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_e \Phi} = n_x - \frac{I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_e \Phi}. \quad (2.59)$$

Скоростная характеристика приведена на рис. 2.38. На ней  $n_x$  означает частоту вращения в режиме холостого хода: если  $I_{\text{я}} = 0$  (холостой ход), то

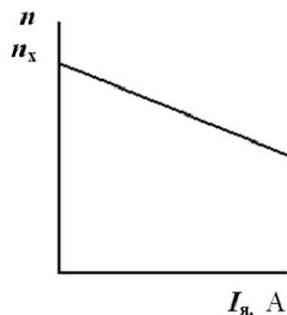


Рис. 2.38. Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения

$$n_x = \frac{U}{C_e \Phi}. \quad (2.60)$$

Из анализа формул (2.59) и (2.60) следует, что при обрыве цепи обмотки возбуждения, когда ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток равны нулю, частота вращения (теоретически) резко увеличивается до бесконечности. Это может привести к аварии.

Следует также обратить внимание, что скоростная характеристика двигателя с параллельным возбуждением жесткая: при значительном изменении тока якоря частота вращения меняется незначительно. Для вывода уравнения механической характеристики выразим из формулы момента (2.24) величину тока якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_m \Phi} \quad (2.61)$$

и подставим его в уравнение (2.59). Получим выражение для механической характеристики двигателя:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M r_{\text{я}}}{C_e C_m \Phi}. \quad (2.62)$$

Так же как и скоростная характеристика, она линейна (рис. 2.39). Рабочие характеристики показаны на рис. 2.40.

Характеристика  $\eta = f(P_2)$  приведена на рис. 2.35.

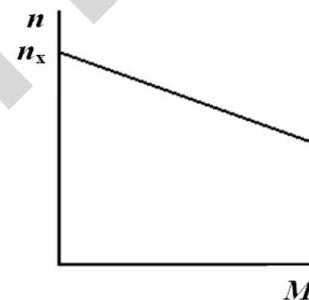


Рис. 2.39. Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения

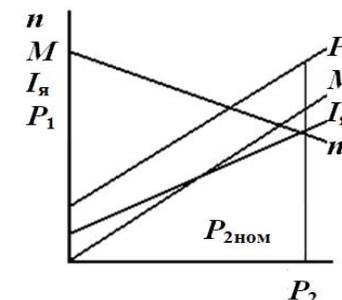


Рис. 2.40. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

При  $P_2 = 0$ , КПД также равен нулю. При изменении нагрузки от  $0,25 P_n$  до  $1,25 P_n$  КПД меняется незначительно.

Характеристика  $I_{\text{я}} = f(P_2)$ . Мощность на валу равна  $P_2 = U I_{\text{я}} \eta$ . Поэтому ток якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{P_2}{U \eta}. \quad (2.63)$$

При  $P_2 = 0$  получим математическую неопределенность  $\frac{0}{0}$ . Она равна току холостого хода  $I_x$ . При изменении  $P_2$  от  $0,25 P_n$  до  $1,25 P_n$  КПД практически не изменяется, и при построении характери-

стик можно допустить, что  $\eta = \text{const}$ . Тогда при  $U = \text{const}$  характеристика  $I_{\text{я}} = f(P_2)$  близка к линейной.

Характеристика  $n = f(P_2)$ . Если выражение (2.63) подставим в формулу (2.59), получим:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{P_2 r_{\text{я}}}{\eta U C_e \Phi}. \quad (2.64)$$

Из уравнения видно, что рабочая характеристика  $n = f(P_2)$  аналогична скоростной и механическим характеристикам.

Характеристика  $M = f(P_2)$  объясняется следующей формулой:

$$M = 9550 \frac{P_2}{n}. \quad (2.65)$$

Так как с ростом  $P_2$  частота вращения  $n$  уменьшается, а  $P_2$  прямо пропорционально  $I_{\text{я}}$ , характеристика  $M = f(P_2)$  будет иметь больший наклон, чем зависимость  $I_{\text{я}} = f(P_2)$ , и начнется с нуля.

Характеристика  $P_1 = f(P_2)$ . Подведенная мощность к двигателю больше мощности на валу на величину потерь  $\Delta P$ :

$$P_1 = P_2 + \Delta P. \quad (2.66)$$

Общеизвестно, что электрические потери зависят от квадрата нагрузки, поэтому характеристика  $P_1 = f(P_2)$  теряет свою линейность, но незначительно.

### 2.6.5. Характеристики двигателей последовательного возбуждения

Схема двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 2.41. Характерная особенность указанного двигателя в том, что ток возбуждения является током нагрузки, и магнитный поток практически пропорционален току якоря.

$$\Phi = k I_{\text{я}}, \quad (2.67)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Подставив выражение (2.67) в формулу момента двигателя (2.24), получим аналитическое выражение моментной характеристики:

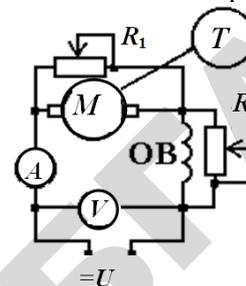


Рис. 2.41. Схема двигателя последовательного возбуждения

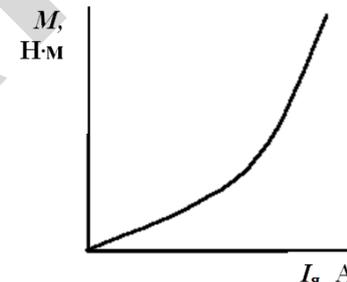


Рис. 2.42. Моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения

$$M = C_m k I_{\text{я}}^2. \quad (2.68)$$

Из выражения видно, что моментная характеристика является параболой (рис. 2.42). Чтобы получить формулу скоростной характеристики, подставим выражение (2.67) в уравнение (2.59). Получим:

$$n = \frac{U}{C_e k I_{\text{я}}} - \frac{r_{\text{я}}}{C_e k}. \quad (2.69)$$

Скоростная характеристика является гиперболой (рис. 2.43). Из выражения (2.69) видно, что если ток якоря равен нулю  $I_{\text{я}} = 0$ , частота вращения равна бесконечности. Это означает, что двигатель последовательного возбуждения нельзя запускать в режиме холостого хода.

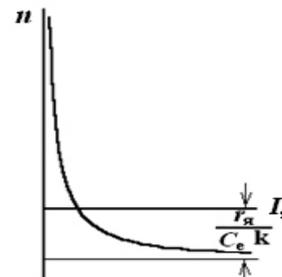


Рис. 2.43. Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения

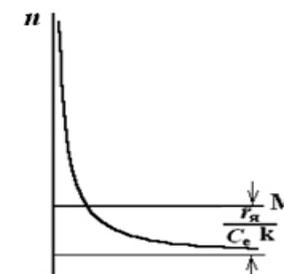


Рис. 2.44. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Для вывода аналитического выражения механической характеристики, величину тока выразим из формулы (2.68):

$$I_{я} = \sqrt{\frac{M}{C_m k}}. \quad (2.70)$$

Подставим полученное выражение в уравнение (2.69):

$$n = \frac{U}{C_e k \sqrt{M/C_m k}} - \frac{r_{я}}{C_e k} = \frac{U}{C_e k} \sqrt{\frac{C_m}{Mk}} - \frac{r_{я}}{C_e k}. \quad (2.71)$$

Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением – также гипербола (рис. 2.44). Следует обратить внимание, что скоростная и механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением мягкие: при изменении нагрузки в значительной мере меняется частота вращения.

Рабочие характеристики двигателя показаны на рис. 2.45.

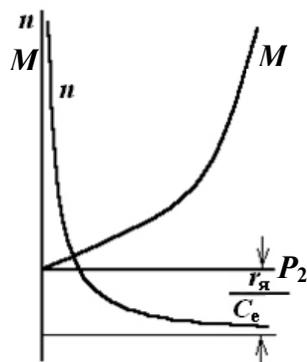


Рис. 2.45. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

Характеристика  $\eta = f(P_2)$ . Если выражение (2.63) подставить в (2.69), получим следующее выражение:

$$n = \frac{U^2 \eta}{C_e k P_2} - \frac{r_{я}}{C_e k}. \quad (2.72)$$

Из формулы (2.72) видно, что характер кривой аналогичен скоростной характеристике.

Характеристика  $M = f(P_2)$ . Аналитическое выражение этой характеристики получится путем подстановки выражения (2.63) в формулу (2.24):

$$M = C_m k \frac{P_2^2}{\eta^2 U^2}. \quad (2.73)$$

Из формулы (2.73) видно, что характеристика представляет собой параболу. Характеристики  $I_{я}$ ,  $P_1$ ,  $\eta = f(P_2)$  подобны аналогичным характеристикам двигателя с параллельным возбуждением.

### 2.6.6. Характеристики двигателя смешанного возбуждения

Схема двигателя смешанного возбуждения приведена на рис. 2.46.

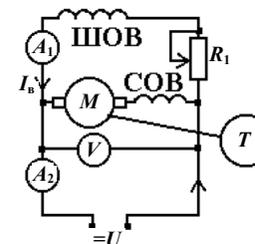


Рис. 2.46. Схема двигателя смешанного возбуждения

Так как в нем имеются обмотки: параллельная (шунтовая – ШОВ) и последовательная (серийная – СОВ), то его характеристики занимают промежуточное положение между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения (рис. 2.47).

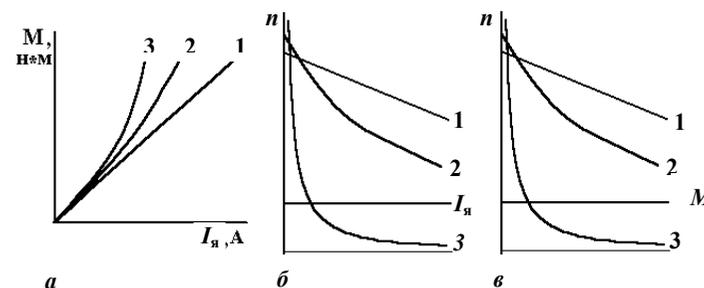


Рис. 2.47. Характеристики двигателя со смешанным возбуждением: а – моментная; б – скоростная; в – механическая; 1 – параллельное, 2 – последовательное, 3 – смешанное возбуждение

Аналитические выражения, соответствующие указанным характеристикам:

– для моментной:

$$M = C_m(\Phi_1 \pm \Phi_2)I_a, \quad (2.74)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – магнитные потоки соответственно параллельной и последовательной обмоток, Вб. Знак плюс соответствует согласному включению обмоток, их потоки совпадают;

– для скоростной:

$$n = \frac{U - I_a r_a}{C_e(\Phi_1 + \Phi_2)}; \quad (2.75)$$

– для механической:

$$n = \frac{U - M r_m}{C_m C_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)^2}. \quad (2.76)$$

Рабочие характеристики:  $n = f(P_2)$  – аналогична скоростной,  $M = f(P_2)$  – моментной,  $I_a, P_1, \eta = f(P_2)$  – одинаковы для всех двигателей.

### 2.6.7. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Для двигателя параллельного возбуждения частота вращения (2.59) равна:  $n = \frac{U - I_a r_a}{C_e \Phi}$ .

Из анализа формулы можно сделать вывод, что на частоту вращения влияют следующие параметры:

- напряжение  $U$ ;
- сопротивление якоря  $r_a$ ;
- магнитный поток  $\Phi$ .

Изменение напряжения необходимо осуществлять только в цепи якоря. Ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток должны оставаться постоянными.

Скоростные характеристики при изменении напряжения показаны на рис. 2.48.

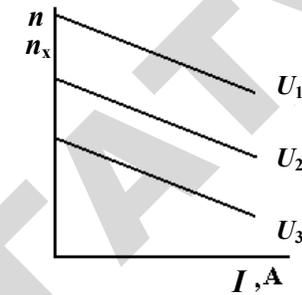


Рис. 2.48. Скоростные характеристики при изменении напряжения в цепи якоря  $U_1 > U_2 > U_3$

Как видно, характеристики параллельны и смещены относительно друг друга только по высоте. Диапазон регулирования ограничен «сверху» условиями коммутации, «снизу» – нагревом двигателя, так как при снижении напряжения нужно увеличивать ток якоря, чтобы мощность не снижалась. При этом  $n_{max} / n_{min} \leq 20$ .

Для регулирования указанным способом необходим источник регулируемого напряжения. В качестве такого источника можно использовать:

- регулируемый автотрансформатор со скользящими контактами (рис. 2.49). Эту схему можно использовать для управления двигателями малой и средней мощности;

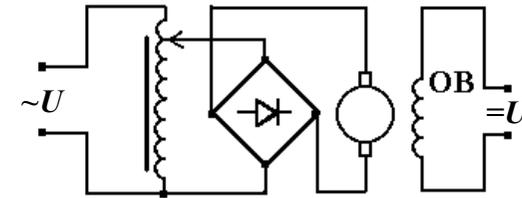


Рис. 2.49. Включение двигателя через регулируемый автотрансформатор

- генератор с независимым возбуждением (рис. 2.50). Двигатель  $M$  получает питание от генератора  $G$ , который приводится во вращение приводным двигателем  $M$ . Напряжение регулируется реостатом в цепи обмотки генератора  $R$ ;

– тиристорный регулятор напряжения (рис. 2.51), который преобразует переменное напряжение сети в регулируемое выпрямленное;

– широтно-импульсный преобразователь (ШИП, рис. 2.52). В этом случае напряжение на якорь подается в виде импульсов

(рис. 2.52б), и среднее значение напряжения на якоре  $U_{cp}$ , которое определяет частоту вращения двигателя, равно:

$$U_{cp} = \frac{U t_n}{T}, \quad (2.77)$$

где  $U$  – напряжение одного импульса, В;  
 $t_n$  – время импульса, с;  
 $T$  – период импульса, с.

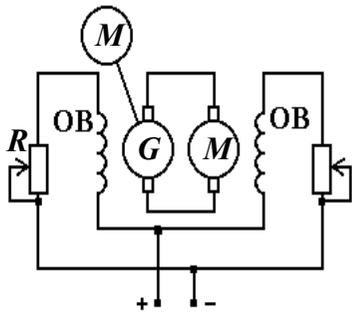


Рис. 2.50. Регулирование «генератор–двигатель»

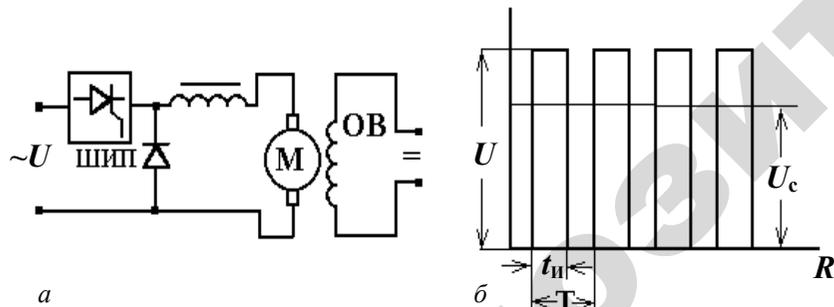


Рис. 2.51. Система с тиристорным регулятором напряжения:  
 а – схема; б – форма кривой напряжения

При изменении времени импульса меняется среднее напряжение и, следовательно, частота вращения.

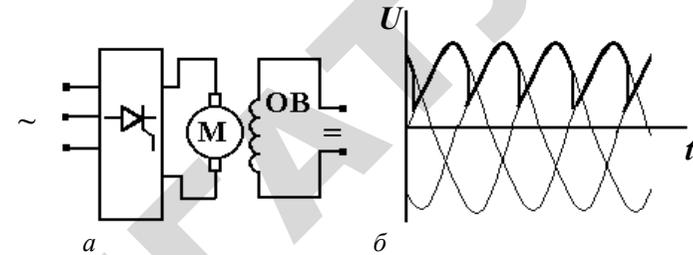


Рис. 2.52. Импульсное регулирование частоты вращения:  
 а – схема; б – импульсы напряжения, подаваемого на якорь

Из рис. 2.51б и 2.52б видно, что при использовании тиристорного регулятора и широтно-импульсного преобразователя на якорь подается пульсирующее напряжение, которое вызывает пульсирующий ток якоря. Пульсирующий ток увеличивает потери и нагрев двигателя, а также ухудшает коммутацию, что является недостатком указанных способов регулирования.

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления якорной цепи. Частота вращения, при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря, равна:

$$n = \frac{U - I_a(r_a + r_d)}{C_e \Phi} = n_x - \frac{I_a(r_a + r_d)}{C_e \Phi}. \quad (2.78)$$

Из формулы (2.78) видно, что частота вращения холостого хода не изменяется, а изменяется только наклон скоростной характеристики (рис. 2.53б: 1 – естественная, 2 – с дополнительным сопротивлением в цепи якоря).

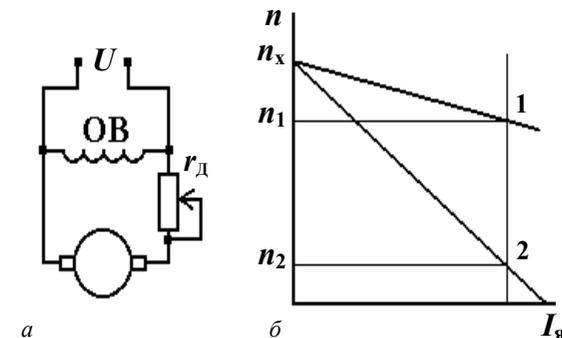


Рис. 2.53. Регулирование частоты вращения изменением сопротивления якорной цепи:  
 а – схема; б – скоростные характеристики

Без дополнительного сопротивления в цепи якоря частота вращения была  $n_1$ , мин<sup>-1</sup>. С введением дополнительного сопротивления она стала  $n_2$ , мин<sup>-1</sup>. Регулирование возможно только в сторону уменьшения частоты вращения. Диапазон регулирования  $n_{\max}/n_{\min} \leq 4$ . Он ограничен сверху естественной характеристикой, снизу – устойчивостью работы двигателя.

При большом дополнительном сопротивлении в цепи якоря скоростная характеристика становится настолько мягкой, что небольшие колебания нагрузки могут вызвать остановку двигателя.

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока. Схема регулирования приведена на рис. 2.54а. При изменении сопротивления реостата в цепи обмотки возбуждения будет меняться ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток.

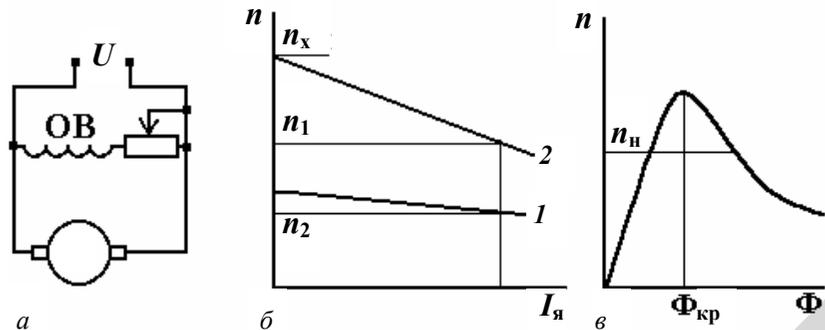


Рис. 2.54. Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока: а – схема, б – скоростные характеристики, в – зависимость частоты вращения от магнитного потока

При изменении магнитного потока будет меняться частота вращения. На рис. 2.54б приведены скоростные характеристики: 1 – естественная, 2 – при уменьшении магнитного потока. Как видно из рис. 2.53б, а также формул (2.59) и (2.60), меняется как частота вращения холостого хода, так и наклон характеристики.

При увеличении магнитного потока частота вращения уменьшается (рис. 2.54в). Значение наибольшего магнитного потока ограничено насыщением стали машины. А так как практически все электрические машины насыщены (см. п. 2.4.3), существенно увеличить магнитный поток невозможно. Поэтому регулирование осуществляется в сторону увеличения частоты вращения. Магнитный поток

при этом уменьшают. С уменьшением магнитного потока снижается момент двигателя  $M = C_m \Phi I_a$ . Когда момент двигателя станет равным моменту сопротивления рабочей машины (на рис. 2.54в это соответствует  $\Phi_{кр}$ ), дальнейшее уменьшение магнитного потока приведет к снижению частоты вращения. При изменении магнитного потока от  $\Phi_{кр}$  до нуля работа двигателя неустойчива.

Таким образом, диапазон регулирования,  $n_{\max}/n_{\min} = 3-4$ , ограничен «снизу» насыщением стали; «сверху» – неустойчивой работой двигателя.

Для двигателя последовательного возбуждения частота вращения определяется по формуле (2.69):

$$n = \frac{U}{C_e k I_a} - \frac{r_a}{C_e k}, \quad (2.79)$$

где  $k = \Phi / I_a$ .

Схема регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения и скоростные характеристики приведены на рис. 2.55.

При включении дополнительного сопротивления  $r_d$  (PR<sub>1</sub>) в цепь якоря, если ток не меняется (задается нагрузкой), частота вращения равна:

$$n = \frac{U}{C_e k I_a} - \frac{r_a + r_d}{C_e k}. \quad (2.80)$$

Из формулы следует, что скоростные характеристики смещаются на величину  $\frac{r_d}{C_e k}$ , где  $r_d$  – дополнительное сопротивление в цепи якоря

(рис. 2.55б). Точно так же поведут себя характеристики, если изменить питающее напряжение.

Напряжение можно регулировать всеми способами, описанными выше. Там, где имеются несколько двигателей, работающих в одинаковом режиме (электровозы), изменять напряжение можно включением двигателей параллельно или последовательно.

При шунтировании якоря сопротивлением  $R_2$ , по обмотке якоря пойдет меньший ток, чем по обмотке возбуждения, потому что часть тока замкнется по шунтирующему якорь сопротивлению.

Это означает, что вторая составляющая формулы (2.69) уменьшится и кривая 2 пойдет ниже кривой 1 (рис. 2.55в).

При шунтировании обмотки возбуждения сопротивлением  $R_3$  коэффициент  $k$  (2.79) уменьшится, обе составляющие формулы (2.69) увеличатся и кривая 1 пойдет ниже кривой 2 (рис. 2.55г).

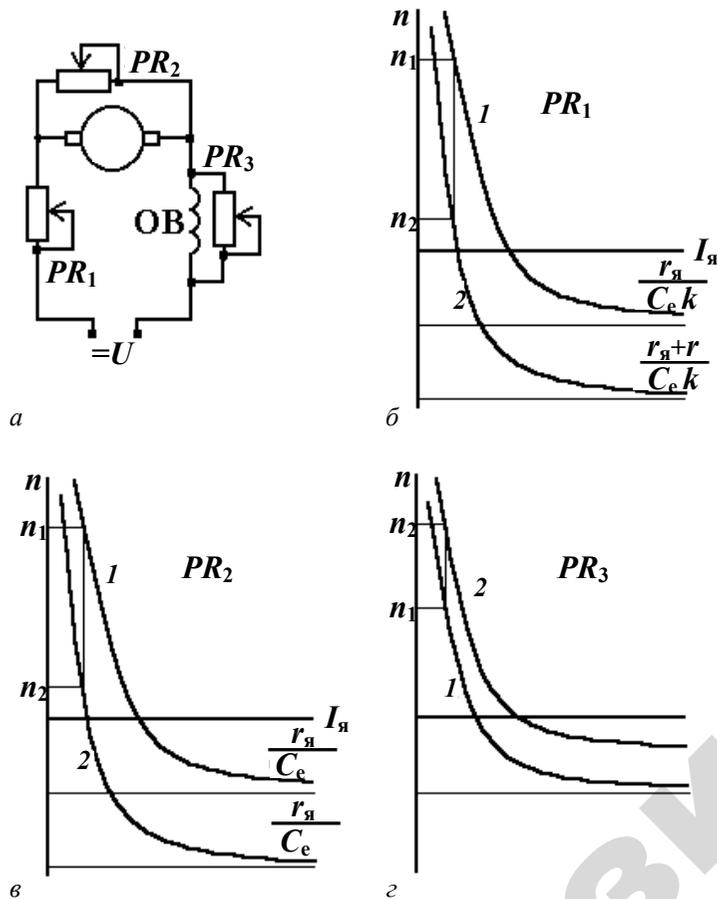


Рис. 2.55. Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения:

а – схема; б – скоростные характеристики при включении в цепь якоря дополнительного сопротивления; в – скоростные характеристики при шунтировании якоря сопротивлением; г – скоростные характеристики при шунтировании

## 2.6.8. Пуск двигателей постоянного тока

Из уравнения равновесия ЭДС двигателя (2.52), ток якоря равен:

$$I_{я} = \frac{U - E}{r_{я}}. \quad (2.81)$$

В момент пуска частота вращения и, следовательно, ЭДС двигателя  $E_d = C_e \Phi n$  будут равны нулю. Сопротивление якоря обычно мало, и при пуске ток якоря мощных двигателей  $I_{я} = U/r_{я}$  превышает номинальный ток в 10–20 раз. Большой пусковой ток:

- вызывает значительные динамические усилия в двигателе, что может привести к его разрушению;
- ухудшает условия коммутации, возможен круговой огонь по коллектору;
- вызывает значительное падение напряжения в линии, что отрицательно влияет на работу других электропотребителей.

Прямой пуск возможен только для двигателей малой мощности до 1 кВт. В остальных случаях нужно применять специальные способы пуска двигателей:

- реостатный пуск;
- пуск при пониженном напряжении.

Схема пуска двигателя с помощью пусковых реостатов приведена на рис. 2.56а.

Скоростные характеристики двигателя при всех положениях переключателя пускового реостата приведены на рис. 2.56б.

Двигатель начинает разгон, когда переключатель находится в положении 1, то есть в цепь двигателя включены все секции пускового реостата. На рис. 2.56б это соответствует прямой 1. Как видно, наклон характеристики наибольший. Суммарное сопротивление пускового реостата  $r_{п}$  определяется по следующей формуле:

$$r_{п} = \frac{U}{I_{я\text{доп}}} - r_{я}, \quad (2.82)$$

где  $I_{я\text{доп}}$  – допустимый ток якоря, А. Обычно он превышает номинальный не более, чем в 2–3 раза.

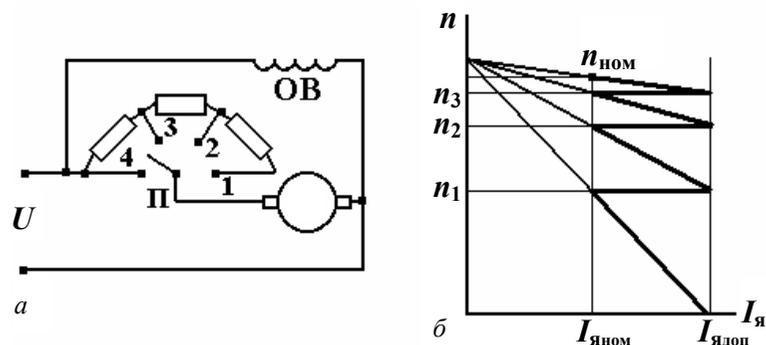


Рис. 2.56. Реостатный пуск двигателя постоянного тока:  
а – схема; б – скоростные характеристики

Когда частота вращения достигнет значения  $n_1$ , переключатель переводится в положение 2, что соответствует меньшему наклону скоростной характеристики (прямая 2). Двигатель разгоняется до частоты вращения  $n_2$ , и снова происходит перевод переключателя в положение 3. Положению переключателя 4 соответствует естественная характеристика (прямая 4), а частота вращения – номинальной. Недостаток указанного способа – большие потери в пусковом реостате.

Поэтому в двигателях большой мощности применяют пуск при пониженном напряжении. Для этого необходим регулятор напряжения. В качестве регулятора напряжения используются: регулируемые автотрансформаторы с выпрямительным блоком, генераторы постоянного тока, тиристорные регуляторы, широтно-импульсные преобразователи, переключение с последовательного соединения двигателей на параллельное (см. п. 2.6.7). При снижении напряжения скоростные характеристики смещаются вниз (см. рис. 2.48), и пусковой ток уменьшается.

### 2.6.9. Устойчивость работы двигателей постоянного тока

Устойчивость работы – это способность двигателя самостоятельно, без внешнего регулирующего воздействия, перейти в новый режим при изменении нагрузки.

Предположим, двигатель работает в установившемся режиме, характеризуемом уравнением (2.53):

$$M_d - M_c = M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Момент сопротивления рабочей машины по какой-то причине увеличился  $M_c \uparrow$ . Дальнейшее изменения, произошедшие в двигателе, покажем на схеме:

$$M_c \uparrow \xrightarrow{1} M_{дин} \downarrow \xrightarrow{2} n \downarrow \xrightarrow{3} E \downarrow \xrightarrow{4} I_я \uparrow \xrightarrow{5} M_d \uparrow.$$

Пояснения к схеме:

1. Увеличение момента сопротивления рабочей машины приводит к уменьшению динамического момента:

$$M_{дин} \downarrow = M_d - M_c \uparrow. \quad (2.83)$$

2. Уменьшение динамического момента связано с уменьшением частоты вращения:

$$M_{дин} \downarrow = J \frac{d\omega \downarrow}{dt} \Rightarrow n \downarrow,$$

где  $\omega = \pi n / 60$ .

3. Уменьшение частоты вращения приводит к снижению ЭДС двигателя:

$$E \downarrow = C_e \Phi n \downarrow.$$

4. Снижение ЭДС двигателя ведет к увеличению тока якоря:

$$I_я \uparrow = \frac{U - E \downarrow}{r_я}.$$

5. Увеличение тока якоря приведет к увеличению момента двигателя:

$$M_d \uparrow = C_m \Phi I_я \uparrow.$$

Из вышеизложенного видно, что увеличение момента сопротивления привело к снижению частоты вращения и к повышению момента двигателя, то есть двигатель работает устойчиво.

Таким образом, по механической характеристике можно судить об устойчивости работы двигателя: если с ростом момента сопро-

тивления механическая характеристика идет вниз (частота вращения уменьшается), двигатель работает устойчиво. Из анализа механических характеристик (см. рис. 2.39, 2.44, 2.47) можно сделать вывод, что двигатели постоянного тока работают устойчиво на всех участках механических характеристик.

### 2.6.10. Режимы работы машин постоянного тока

На рис. 2.57 показаны скоростные характеристики двигателей постоянного тока, и, по возможности, продолжим их за оси координат.

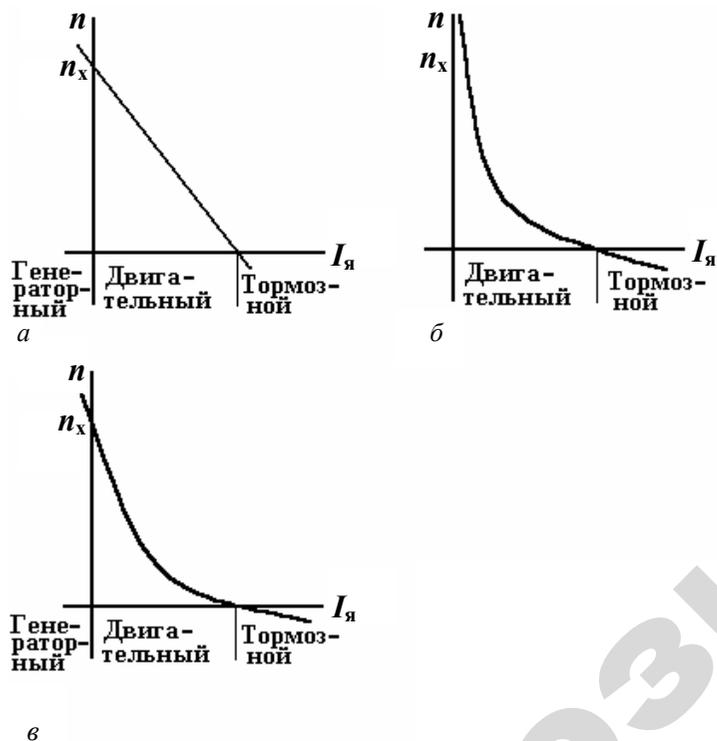


Рис. 2.57. Режимы работы машин постоянного тока с возбуждением:  
а – параллельным, б – последовательным, в – смешанным

Если направление момента рабочей машины совпадает с направлением вращения двигателя, а частота вращения будет выше, чем у двигателя, якорь двигателя начнет вращаться с частотой

большой, чем на холостом ходу. ЭДС машины при этом станет больше напряжения сети, и электрический ток будет не потребляться машиной, а отдаваться в сеть, то есть машина будет работать в режиме генератора. Если момент рабочей машины направлен против момента вращения двигателя и меньше его, это означает, что двигатель вращает рабочую машину. ЭДС меньше напряжения сети, и электрический ток будет потребляться рабочей машиной, то есть машина работает в двигательном режиме.

Если при работе в двигательном режиме момент вращения рабочей машины станет больше момента двигателя, якорь начнет вращаться в обратную сторону. Рабочая машина начнет вращать двигатель, и двигатель будет тормозом для нее (крановый двигатель) во время опускания груза. Такой режим будет называться тормозным. ЭДС машины в этом случае будет не уравнивать напряжение, а суммироваться с ним, увеличивая ток якоря:

$$I_{я} = \frac{U + E}{r_{я}}. \quad (2.84)$$

Из рис. 2.57б видно, что у двигателя последовательного возбуждения генераторного режима нет. Теоретически можно создать генератор последовательного возбуждения, но работа его будет неустойчива.

### 2.6.11. Торможение двигателей постоянного тока

Для того чтобы замедлить или остановить рабочую машину, наряду с механическими, применяют электрические способы торможения. Их преимущество в том, что торможение осуществляется электромагнитным полем, без износа тормозных колодок. Различают следующие виды электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

*Рекуперативное* – это такое торможение, при котором машина работает генератором с отдачей энергии в сеть, что соответствует генераторному режиму (рис. 2.57).

Такое торможение наиболее экономично, но не всегда осуществимо в реальных условиях, так как частота вращения должна быть выше, чем в режиме холостого хода. Это осуществимо:

- если транспортное средство оснащено коробкой передач, переключением на низшую передачу;

– в отдельных операциях рабочей машины, обусловленных технологией рабочего процесса, таких как движение транспортного средства под уклон, работа подъемного устройства при спуске груза и т. п.;

– при переходе двигателя на искусственную характеристику, которая сдвигается вниз изменением напряжения или магнитного потока. Из рис. 2.58 видно, что при указанном способе рекуперативного торможения частота вращения уменьшится только до  $n_{x2}$ . Чтобы совсем остановить двигатель, требуется постоянное увеличение магнитного потока либо уменьшение напряжения.

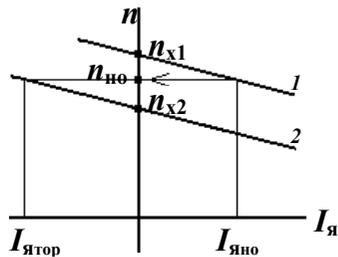


Рис. 2.58. Торможение при переходе на искусственную характеристику

*Динамическое* – это генераторное торможение, при котором кинетическая энергия рабочей машины и самого двигателя гасится на специальном сопротивлении. Схема и скоростная характеристика приведены на рис. 2.59.

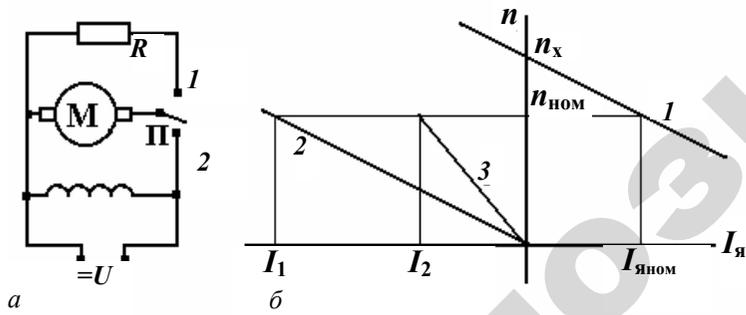


Рис. 2.59. Динамическое торможение: а – схема; б – скоростные характеристики (1 – естественная; 2 – тормозная при  $R = 0$ ; 3 – тормозная при  $R > 0$ )

При переключателе П в положении 1 машина работает двигателем с частотой вращения якоря  $n_{ном}$  и током якоря  $I_{яном}$  на естественной характеристике 1. Если необходимо затормозить, переключатель П переводят в положение 2. Якорь двигателя продолжает вращаться, обмотка возбуждения от сети не отключена и наводит магнитный поток, следовательно, машина начинает работать генератором. Если сопротивление  $R$  равно нулю (клеммы якоря замкнуты), ток якоря в первый момент в несколько раз больше номинального и равен  $I_1$ , что соответствует тормозной характеристике 2 (характеристики 1 и 2 параллельны). Если сопротивление  $R$  отлично от нуля, наклон скоростной характеристики увеличивается (тормозная характеристика 3) и ток торможения уменьшается до  $I_2$ . По мере остановки двигателя они равны нулю.

*Торможение противовключением.* Схема включения приведена на рис. 2.60а.

При переводе переключателя П с положения 1 в положение 2, ток якоря изменится на противоположный. Согласно правилу левой руки, момент также изменится на противоположный, то есть будет тормозить якорь.

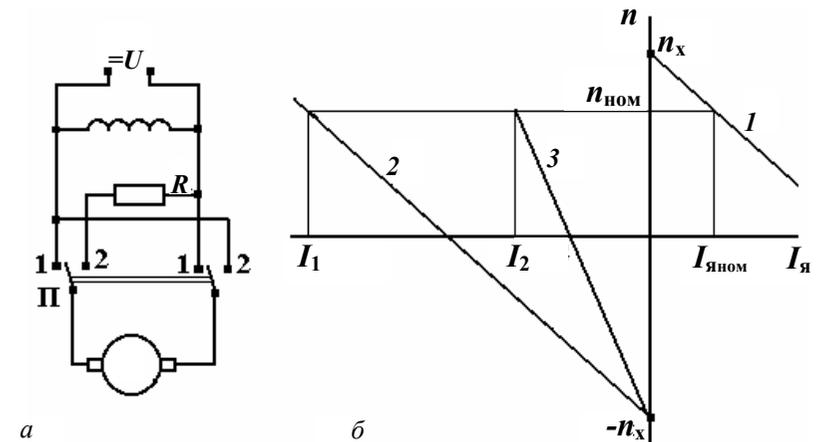


Рис. 2.60. Торможение противовключением: а – схема; б – скоростные характеристики (1 – естественная; 2 – тормозная при  $R = 0$ ; 3 – тормозная при  $R > 0$ )

При ограничивающем сопротивлении  $R$ , равном нулю, ток якоря в первый момент торможения  $I_1$  будет приблизительно в два раза больше, чем ток при динамическом торможении, потому, что при динамическом торможении естественная тормозная характеристика 2 идет к нулю, а при торможении противовключением – к отрицательному значению холостого хода двигателя. При  $R \neq 0$  ток торможения будет  $I_2$ .

Тормозной момент по мере торможения будет уменьшаться пропорционально току. Однако при  $n = 0$  он не будет равен нулю, и если двигатель не отключить, то он раскрутит якорь двигателя в обратную сторону.

### 2.6.12. Универсальные коллекторные двигатели

Если любой двигатель постоянного тока включить на переменное напряжение, он будет работать. В самом деле, в двигателе меняется направление тока в якоре и почти одновременно – направление магнитного потока. Поэтому, согласно правилу левой руки, направление вращающего момента остается прежним. На этом принципе и основана работа универсального коллекторного двигателя. Универсальный коллекторный двигатель дороже двигателя постоянного тока и имеет худшие рабочие характеристики.

Если сравнить его с асинхронным двигателем, он также выше его по стоимости и менее надежен. Но универсальный коллекторный двигатель имеет ряд преимуществ:

1) как и асинхронный, может работать сети в переменного тока. Это важно, потому что все коммунально-бытовые потребители имеют только переменное напряжение;

2) частота вращения у асинхронного двигателя ограничена сверху –  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , при частоте 50 Гц. Универсальный коллекторный двигатель теоретически может развивать любую частоту вращения;

3) механическая характеристика у него значительно лучше (жестче), чем у асинхронного двигателя;

4) возможности регулирования частоты вращения лучше, чем у асинхронного.

Таким образом, универсальный коллекторный двигатель имеет все преимущества двигателя постоянного тока, но может работать на переменном. Этим и обусловлена область применения универ-

сальных коллекторных двигателей: для привода бытовых электроприборов, различного электроинструмента и т. п.

Необходимым условием работы двигателя постоянного тока на переменном является одновременное изменение направления тока якоря и магнитного потока. Наилучшим образом это происходит у двигателей последовательного возбуждения, потому что у них обмотка возбуждения обладает меньшим количеством витков и, следовательно, меньшей индуктивностью. Поэтому время запаздывания его магнитного потока по сравнению с током якоря будет меньше, чем у двигателя с параллельным возбуждением. Таким образом, универсальные коллекторные двигатели имеют последовательное возбуждение и отличаются от двигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюса делаются из пластин электротехнической стали, чтобы уменьшить потери в магнитопроводе, которые от переменного магнитного потока выше, чем от постоянного. При работе двигателя на переменном токе сопротивление обмотки выше из-за ее индуктивности, и чтобы частота вращения была такая, как при работе на постоянном токе, необходимо увеличить ток якоря, для чего в обмотке делают отпайки и переменное напряжение подают на меньшее количество витков. Мгновенное значение электромагнитного момента равно:

$$M = C_M \Phi i_a, \quad (2.85)$$

где  $i_a$  – мгновенное значение тока якоря, изменяющегося по синусоидальному закону,

$$i_a = I_{a_{\max}} \sin \omega t; \quad (2.86)$$

$\Phi$  – мгновенное значение магнитного потока:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin(\omega t - \gamma), \quad (2.87)$$

где  $\gamma$  – угол запаздывания между током якоря и магнитным потоком из-за индуктивности обмотки.

Учитывая формулы (2.86) и (2.87), получим:

$$M = C_M \Phi_{\max} \sin(\omega t - \gamma) I_{a_{\max}} \sin \omega t. \quad (2.88)$$

Сделав тригонометрические преобразования и перейдя от максимальных (амплитудных) значений к действующим, получим окончательное выражение момента:

$$M = \frac{\sqrt{2}}{2} C_M \Phi_{\max} I_a \cos \gamma - \frac{\sqrt{2}}{2} C_M \Phi_{\max} I_a \cos(2\omega t + \gamma). \quad (2.89)$$

Первая составляющая момента является постоянной, вторая – переменной (рис. 2.61б, линии 1 и 2).

Как видно из рис. 2.61б, результирующий момент универсального коллекторного двигателя является переменным, а иногда даже тормозным (кривая 3). Однако пульсации момента не нарушают работу двигателя, частота вращения якоря практически равномерна из-за сравнительно большого момента инерции.

Условия коммутации в универсальном коллекторном двигателе значительно хуже, чем в двигателе постоянного тока. Кроме результирующей реактивной ЭДС, в коммутируемой секции наводится еще и ЭДС от переменного магнитного поля, так называемая трансформаторная ЭДС  $E_{тр}$ :

$$E_{тр} = 4,44 f W_c \Phi_{\max}, \quad (2.90)$$

где  $f$  – частота тока, Гц.

Все способы улучшения коммутации, перечисленные в п. 2.6.3, ограничивают трансформаторную ЭДС, но полностью ее компенсировать невозможно. По этой причине универсальных коллекторных двигателей средней и большой мощности практически нет.

На рис. 2.61в приведены рабочие характеристики. Ток якоря при работе на переменном токе больше, чем на постоянном из-за наличия реактивной составляющей тока, а также из-за больших потерь в стали. По этим причинам КПД двигателя на переменном токе меньше. Мощность, подводимая к двигателю, больше на переменном токе по причинам, описанным выше. При работе на переменном токе частота вращения в большей степени зависит от нагрузки из-за наличия индуктивной составляющей обмоток:

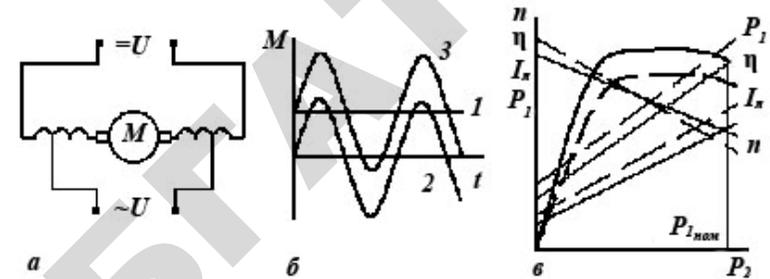


Рис. 2.61. Универсальный коллекторный двигатель:  
а – схема; б – моменты (1 – постоянный; 2 – переменный; 3 – суммарный);  
в – рабочие характеристики (сплошная линия – при работе на постоянном, штриховая – на переменном токе)

$$n = \frac{U - I_a \sqrt{r_a^2 + x_a^2}}{C_e \Phi}, \quad (2.91)$$

где  $x_a$  – индуктивное сопротивление цепи якоря, Ом.

### 2.6.13. Современные серии машин постоянного тока

В настоящее время в используются машины постоянного тока серии П, 2П и более новой – 4П.

Машины серии П классифицируются по наружному диаметру сердечника якоря. У них имеется 17 габаритов мощностью от 0,3 до 1300 кВт. Каждый габарит имеет две длины, частоту вращения можно регулировать от 200 до 4500 мин<sup>-1</sup>.

Машины серии 2П классифицируются по высоте оси горизонтального вала от 90 до 315 мм. Как и в серии П, каждый габарит имеет две длины: М (Middle) – средняя и L (Long) – длинная. Мощность от 0,37 до 200 кВт при номинальной частоте вращения от 500 до 3000 мин<sup>-1</sup>. Машины изготавливаются как с параллельным, так и смешанным возбуждением. Исполнение защитное с самовентиляцией (Н), с независимой вентиляцией (Ф), закрытое обдуваемое (О), естественное охлаждение (Б). Климатическое исполнение – У, категория – 4, режим работы – S1.

Пример условного обозначения двигателя серии 2П: 2ПБ 112L У4 – двигатель с естественным охлаждением, высота оси горизонтального вала – 112 мм второй длины, климатическое исполнение – У4.

Серия 4П отличается от серии 2П тем, что магнитопровод статора выполнен из пластин электротехнической стали и все машины снабжены компенсационной обмоткой.

Ряд машин выполнен с неявно выраженными полюсами. Обмотка в этом случае уложена в пазы статора как в асинхронном двигателе.

### Контрольные вопросы:

1. Какие потери мощности имеет двигатель постоянного тока? От чего они зависят?
2. Какие параметры и характеристики имеются у двигателей постоянного тока?
3. В чем различие скоростных характеристик двигателей с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением?
4. Сравните двигатели параллельного и последовательного возбуждения по их регулировочным свойствам.
5. Какие способы ограничения пускового тока применяются в двигателях постоянного тока?
6. При каких условиях в двигателе постоянного тока возникнет режим рекуперативного торможения?
7. Сравните способы торможения двигателей постоянного тока с точки зрения их экономичности.

## 2.7. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 2.7.1. Тахогенераторы

Назначение тахогенератора – измерение частоты вращения. Тахогенератор представляет собой генератор, нагрузкой которого служит вольтметр. Шкала вольтметра проградуирована в единицах частоты вращения. Напряжение тахометра можно определить по формуле (2.47):  $U_r = E - I_r r_a$ . Если сопротивление вольтметра считать равным бесконечности, то напряжение тахогенератора будет равно его ЭДС и, согласно формуле (2.18),  $E = C_e \Phi n$ , при  $\Phi = \text{const}$ , пропорционально частоте вращения (рис. 2.62, линия 1). Чтобы магнитный поток  $\Phi$  был постоянным, используют либо независимое возбуждение, либо возбуждение от постоянных магнитов.

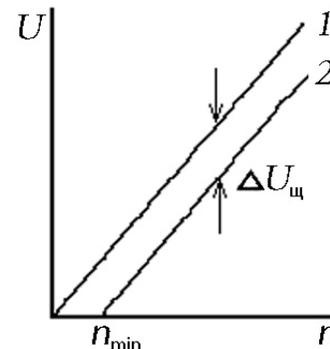


Рис. 2.62. Выходная характеристика тахогенератора постоянного тока

Тахогенератор имеет погрешности, связанные с тем, что сопротивление вольтметра не равно бесконечности, и по якорю будет протекать ток, который создаст поток реакции якоря и падение напряжения на щетках  $\Delta U_{щ}$ . Поэтому реальная выходная характеристика тахогенератора расположится ниже (рис. 2.62, линия 2). От нуля до  $n_{\min}$  частоту вращения тахогенератора измерить невозможно.

### 2.7.2. Сварочные генераторы

Вольт-амперная характеристика сварочной дуги приведена на рис. 2.63а.

Для зажигания дуги требуется напряжение порядка 60–80 В, рабочее напряжение для устойчивого горения – 20–30 В. Значение тока зависит от толщины электрода и равно 150–600 А. Таким образом, описана внешняя характеристика сварочного генератора. Им может быть генератор со смешанным возбуждением со встречным включением последовательной обмотки (см. рис. 2.33). Однако работа генератора с самовозбуждением при больших нагрузках неустойчива, так как напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения, уменьшается при увеличении нагрузки (см. п. 2.5.4).

Если на обмотку параллельного возбуждения такого генератора подать независимое напряжение, работа его будет устойчивой. Источником независимого напряжения может быть любой дополнительный генератор. Но это увеличивает стоимость установки.

Для стабилизации напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения, используется оригинальный метод: полюса делятся на две части (рис. 2.63б) – узкие ( $N_2$  и  $S_2$ ) и широкие ( $N_1$  и  $S_1$ ).

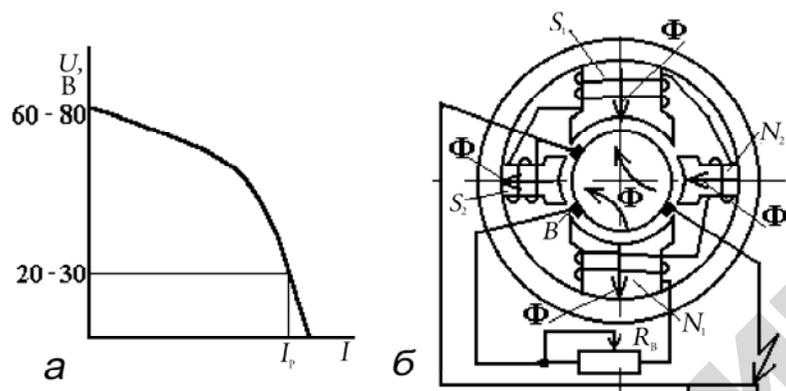


Рис. 2.63. Сварочный генератор:  
а – вольт-амперная характеристика дуги; б – схема генератора с расщепленными полюсами

Щетки на якоре расположены таким образом, чтобы поток реакции якоря уменьшал магнитный поток, создаваемый широкими полюсами, и увеличивал поток узких полюсов, поэтому узкие полюса всегда насыщены, и магнитный поток, проходящий по ним, практически всегда постоянный. Щетка В «снимает» напряжение с секций, которые в данный момент находятся под узкими полюсами с постоянным магнитным потоком. Поэтому напряжение, «снимаемое»

указанной щеткой, всегда стабильно и используется для питания обмотки возбуждения.

Магнитный поток широких полюсов не насыщен и, с ростом нагрузки, уменьшается за счет реакции якоря, обеспечивая нужную характеристику.

Ток сварки регулируется реостатом в цепи обмотки возбуждения  $R_B$ .

### 2.7.3. Электромашинные усилители

Электромашинный усилитель (ЭМУ) – это генератор постоянно-го тока, назначение которого – усиливать входной сигнал. В качестве входного сигнала может быть ток или напряжение, подаваемые на обмотку управления. ЭМУ характеризуется коэффициентами усиления по току  $K_i$ , напряжению  $K_U$  и по мощности  $K_p$ .

$$K_i = \frac{I}{I_y}; \quad K_U = \frac{U}{U_y}; \quad K_p = \frac{P}{P_y}, \quad (2.92)$$

где  $I$ ,  $U$ ,  $P$  – выходные параметры ЭМУ;

$I_y$ ,  $U_y$ ,  $P_y$  – входные параметры или сигналы управления.

Обычный генератор с независимым возбуждением является простейшим ЭМУ. Подавая на обмотку возбуждения малый ток до 1 А, можно получить на якоре порядка 100 А. В качестве ЭМУ генератор с независимым возбуждением не используется из-за малого коэффициента усиления. Для увеличения коэффициента усиления используют специальные схемы. Наиболее распространены следующие: двухобмоточный генератор, ЭМУ с поперечным магнитным полем и квадратичная схема.

Схема двухобмоточного генератора приведена на рис. 2.64а. Сопротивление шунтовой обмотки возбуждения (ШОВ) незначительно превышает критическое. При вращении генератора ШОВ наводит магнитный поток, который недостаточен для самовозбуждения. При появлении в обмотке управления (ОУ) незначительного тока  $I_y$  возникнет магнитный поток, который будет достаточен, чтобы возбудить машину, и подача сигнала на ОУ сделает возможным получение значительной мощности на выходе. Схема ЭМУ с поперечным магнитным полем показана на рис. 2.64б. На якоре – две пары щеток. Одна из пар замкнута накоротко. При

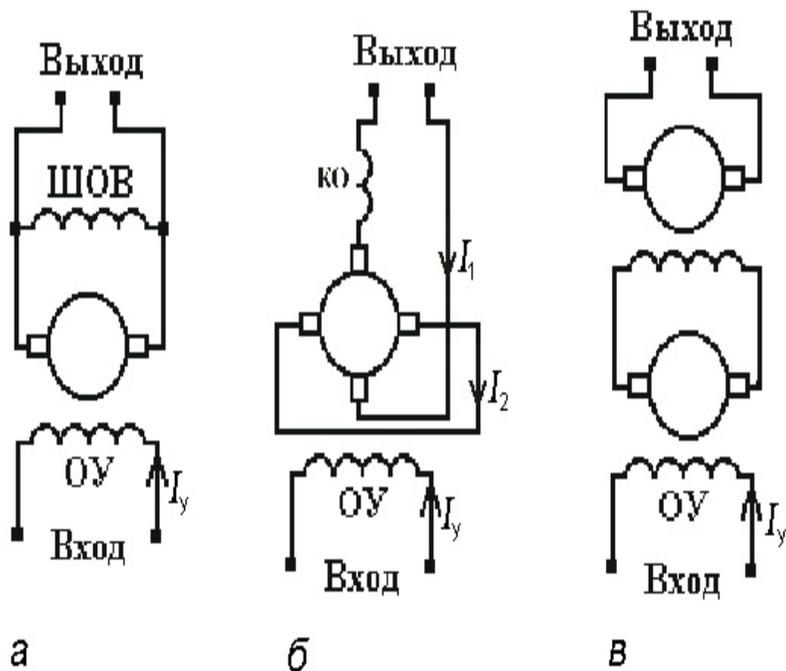


Рис. 2.64. Электромашинный усилитель:

а – двухобмоточный генератор; б – с поперечным магнитным полем; в – квадратичная схема

появлении в обмотке управления тока  $I_y$ , созданный им магнитный поток, наведет ЭДС в обмотке якоря, которая снимается закороченными щетками. В этом случае малая ЭДС вызовет большой ток  $I_1$ . Указанный ток, проходя по обмотке якоря, создаст поток реакции якоря, который в свою очередь наведет ЭДС, снимаемую другой парой щеток. Это и будет напряжение на выходе. Компенсационная обмотка (КО) нужна для компенсации реакции якоря от тока нагрузки  $I_2$ . В противном случае он «заглушит» сигнал с ОУ, так как поток реакции якоря от тока нагрузки и поток, созданный ОУ, направлены встречно. Таким образом, название ЭМУ объясняет то, что рабочим является поток реакции якоря, направленный поперечно (ЭМУ с поперечным магнитным полем).

В квадратичной схеме на выход одного ЭМУ подключен вход другого ЭМУ (рис. 2.64в). Коэффициент усиления квадратичной схемы равен произведению коэффициентов усиления каждого из ЭМУ.

#### 2.7.4. Вентильные двигатели

Вентильный двигатель – это обращенный двигатель постоянного тока, у которого щетки и коллектор заменены полупроводниковым коммутатором. У обращенного двигателя (рис. 2.65а) обмотка якоря и коллектор размещены на неподвижном статоре, а полюса – на роторе. Щетки жестко связаны с валом, скользят по коллектору и изменяют направление тока в секциях так, чтобы вращающемуся полюсу определенной полярности соответствовал ток одного и того же направления.

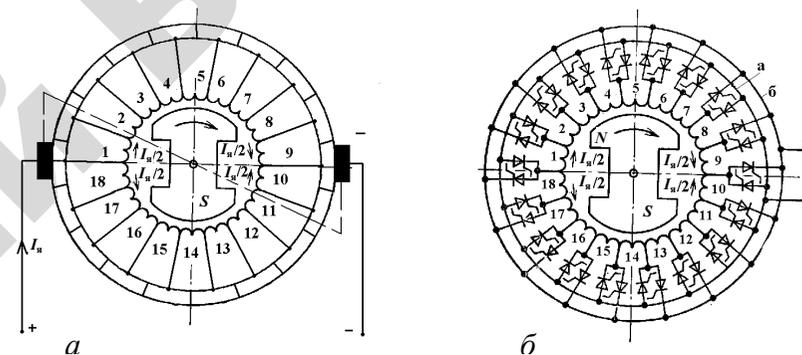


Рис. 2.65. Двигатели постоянного тока:

а – обращенный; б – вентильный

Полупроводниковый коммутатор представляет собой ряд управляемых вентилях (рис. 2.65б), назначение которых такое же, как и у щеток коллекторного двигателя: менять направление тока в секциях в соответствии с положением полюсов в пространстве. В момент, показанный на рис. 2.65, секции 1–9 принадлежат северному полюсу, а секции 10–18 – южному. Поэтому должны быть открыты только вентили 1а и 9б. Направление тока в секциях такое же, как и у обращенного двигателя (сравните: рис. 2.65, а и б). В следующий момент времени ротор повернется, и северному полюсу будут принадлежать секции 2–10, южному – 11–18 и 1. Теперь должны быть открыты вентили 2а и 10б, а остальные закрыты. Для поочередного включения вентилях в зависимости от положения ротора в двигателе предусмотрены датчики. Они могут использовать различные чувствительные элементы: магнитные, электрические, световые и пр. Регулировать частоту вращения у вентильного двигателя удобно изменением напряжения, для чего можно

использовать уже имеющиеся вентили в полупроводниковом коммутаторе (рис. 2.66).

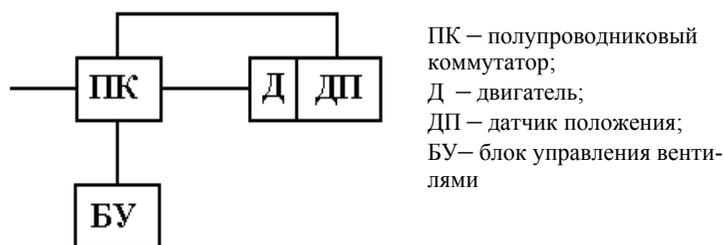


Рис. 2.66. Функциональная схема вентильного двигателя с регулированием напряжения:

Обмотка возбуждения получает питание через контактные кольца, расположенные на валу. Это подвижные щеточные контакты, но так как нет коммутируемых секций и, следовательно, нет проблем, связанных ними (см. п. 2.4), а также ток во много раз меньше тока на коллекторе, щетки на контактных кольцах работают значительно надежнее, чем на коллекторе.

Характеристики вентильных двигателей практически такие же, как и у коллекторных двигателей.

### 2.7.5. Двигатели с гладким якорем

У такого двигателя обмотка якоря укладывается не в пазы якоря, а на его поверхности (рис. 2.67). Пазы и, следовательно, зубцы отсутствуют. Якорную обмотку равномерно закрепляют на поверхности бандажом и эпоксидным компаундом.

Основные преимущества двигателя с гладким якорем по сравнению с обычным:

- улучшается коммутация, потому что из-за отсутствия зубцов суммарная реактивная ЭДС будет в 2–4 раза меньше;
- уменьшается реакция якоря из-за наличия большого немагнитного промежутка, который равен сумме радиального размера обмотки (рис. 2.67) и воздушного зазора.

Недостатком является увеличение числа витков обмотки возбуждения в 2–3 раза: для «проталкивания» магнитного потока через немагнитный промежуток, требуется большая МДС. КПД такого

двигателя практически одинаков с обычным: потерь в зубцах нет, но возрастают добавочные потери в обмотке якоря вследствие того, что они будут находиться в сильном магнитном поле.

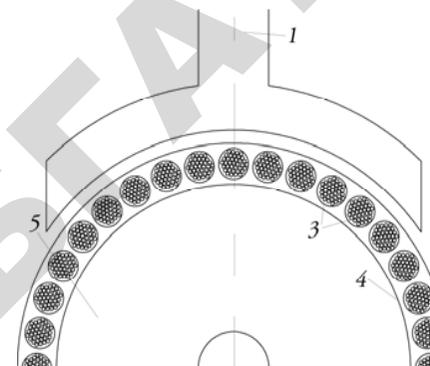


Рис. 2.67. Поперечный разрез двигателя с гладким якорем:  
 1 – полюс; 2 – бандаж; 3 – обмотка якоря; 4 – изоляция якоря; 5 – сердечник якоря

### 2.7.6. Двигатели с печатными обмотками якоря

По конструктивному исполнению двигатели с печатными обмотками якоря делятся на двигатели с цилиндрическим ротором и дисковым якорем. Цилиндрический якорь с печатной обмоткой (рис. 2.68) изготавливается из изоляционного материала, на обе поверхности которого электрохимическим путем наносят обмотку 4, соединенную с коллектором 5.

При работе машины магнитный поток, так же как у двигателя с гладким якорем, пронизывает обмотку и идет в сердечник якоря. Только у двигателя с гладким якорем он подвижный – жестко связан с валом, а у двигателя с печатной цилиндрической обмоткой сердечник якоря 3 неподвижный, отделен от вала 1 подшипниками 2. Вращается только цилиндр из изоляционного материала с нанесенной на него обмоткой.

Дисковый якорь представляет собой диск из изоляционного материала с нанесенной на обе стороны обмоткой (рис. 2.69). Этот диск располагается на валу машины и вращается между полюсами, создающими магнитный поток в осевом направлении. В машине нет коллектора, и щетки скользят по поверхности диска, соприкаса-

ясь непосредственно с полюсами. Для возбуждения у таких двигателей часто применяют постоянные магниты.

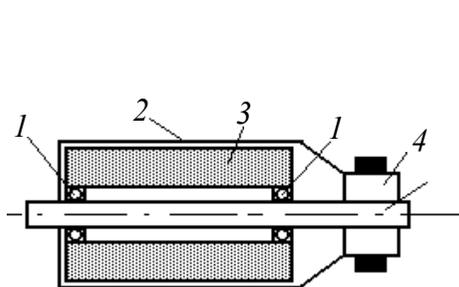


Рис. 2.68. Разрез цилиндрического якоря с печатной обмоткой:

1 – подшипники, 2 – печатная обмотка, 3 – сердечник якоря, 4 – коллектор, 5 – вал

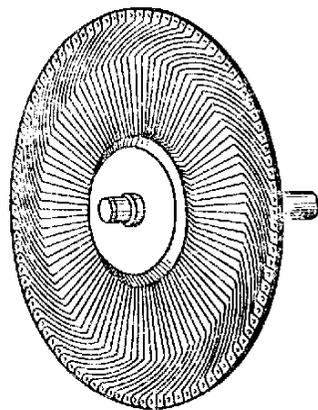


Рис. 2.69. Дискový якорь с печатной обмоткой

Преимущество двигателей с печатными обмотками:

- высокое быстродействие вследствие малого момента инерции;
- хорошие условия коммутации из-за малой индуктивности секций;
- лучшее охлаждение проводников якоря по сравнению с проводниками, уложенными в пазы, что дает возможность повысить плотность тока в якоре и, следовательно, снизить массу и габаритные размеры двигателей;

- уменьшается реакция якоря из-за отсутствия магнитопроводящих элементов на якоре, вследствие чего поток реакции якоря вынужден замыкаться по воздуху;

- меньшие потери в магнитопроводе.

Недостатки указанных двигателей:

- увеличено количество витков в обмотке возбуждения из-за большого воздушного зазора;

- увеличены потери в обмотках якоря (большая плотность тока) и возбуждения (большее количество витков);

- меньший срок службы из-за износа проводников от трения щеток.

Двигатели с цилиндрическим якорем имеют мощность от нескольких сотен ватт до нескольких киловатт. Двигатели с дисковым якорем – от десятков до сотен ватт.

### 2.7.7. Исполнительные двигатели постоянного тока

Исполнительными называются управляемые двигатели небольшой мощности, в которых осуществляется преобразование электрического сигнала в механическое перемещение. Для них характерны частые пуски, реверсы, изменение частоты вращения, и поэтому предъявляются следующие требования:

- отсутствие самохода, чтобы не было вращения при снятии сигнала управления;
- широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- линейность характеристик;
- большой пусковой момент;
- малая мощность управления;
- быстродействие.

Двигатели с независимым возбуждением лучше всего отвечают указанным требованиям. Различают двигатели с якорным и полюсным управлением.

При якорном управлении управляющий сигнал подается на обмотку якоря, в то время как обмотка возбуждения постоянно подключена к сети. От напряжения управления, подаваемого на обмотку якоря, зависят вращающий момент, частота и направление вращения двигателя. Достоинства двигателей с якорным управлением:

- отсутствие самохода, высокая линейность механических и регулировочных характеристик, что обеспечивает быстрый разгон двигателя;

- ток проходит через щетки только когда есть управляющий сигнал, предотвращая подгар коллектора при неподвижном якоре.

Недостатком является сравнительно большая мощность управления.

При полюсном управлении управляющий сигнал подается на обмотку возбуждения, а обмотка якоря все время под напряжением. Его достоинство – малый сигнал управления. К недостаткам относятся наличие самохода из-за остаточного магнитного потока и то, что через щетки все время проходит ток.

Двигатель с якорным управлением используется чаще, чем с полюсным. Для увеличения быстродействия используют двигатели с печатными обмотками якоря.

#### Контрольные вопросы:

1. Почему возбуждение тахогенератора предпочтительнее от постоянных магнитов?

2. Чем достигается постоянное напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения, у генератора с расщепленными полюсами?

3. Каково назначение датчика положения ротора в вентильном двигателе?

4. В чем достоинство двигателей с печатными обмотками?

5. Объясните принцип якорного и полюсного способов управления исполнительными двигателями.

6. Каковы достоинства и недостатки малоинерционного двигателя постоянного тока?

### 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

---

В основу принципа действия электрической машины переменного тока заложено использование вращающегося магнитного поля.

Любая машина переменного тока имеет неподвижную часть – статор и подвижную – ротор. Если частоты вращения ротора и магнитного поля жестко связаны, такая машина называется синхронной; если нет – асинхронной.

Ряд вопросов являются общими как для асинхронных, так и для синхронных машин. Они и будут рассмотрены в данном разделе.

#### 3.1. ПОЛУЧЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В электрических машинах переменного тока вращающееся магнитное поле создается в основном трехфазной или двухфазной системами токов. Для получения указанного поля при трехфазной системе должны выполняться два условия:

1. Обмотки фаз должны быть сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов (число электрических градусов в машине зависит от числа пар полюсов: на одну пару полюсов приходится 360 электрических градусов). Это означает, что должны быть одинаковы углы между векторами магнитных потоков, создаваемых катушками обмоток.

2. Токи в фазах должны быть сдвинуты во времени друг от друга на  $\frac{1}{3}$  периода. При частоте 50 Гц это равно  $\frac{1}{150}$  с.

Процесс получения вращающегося магнитного поля показан на рис. 3.1.

В пазах статора двухполюсной трехфазной машины переменного тока (рис.3.1а) уложены три катушки, которые создают магнитные потоки, направленные под углом 120° друг к другу (направление маг-

нитного потока определяется по правилу буравчика). Мгновенные значения фазных токов приведены на рис.3.1б.

Векторная диаграмма магнитных потоков, создаваемых указанными токами для момента времени  $t_1$ , показана на рис.3.1в. Как видно из рис. 3.1б, в момент времени  $t_1$  наибольший ток протекает в фазе  $B$  и имеет отрицательное значение.

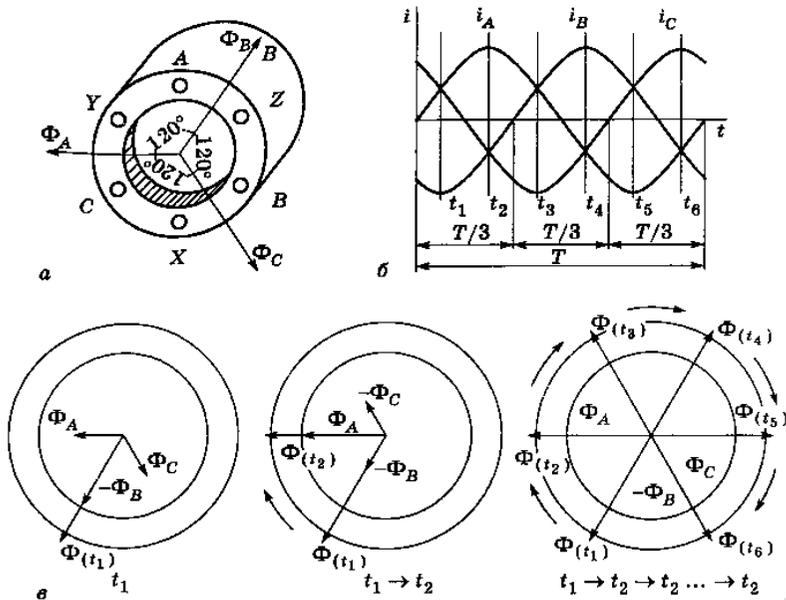


Рис. 3.1. Получение вращающегося магнитного поля от трехфазной системы: а – схематичное расположение обмоток в статоре; б – мгновенные значения фазных токов; в – векторные диаграммы магнитных потоков в различные моменты времени

Поэтому вектор магнитного потока фазы  $B$   $\Phi_B$  также наибольший и направлен в противоположную сторону. Токи фаз  $A$  и  $C$  положительные. Они создают потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_C$ . Сумма трех векторов потоков и даст результирующий вектор  $\Phi_{(t_1)}$ . Для момента времени  $t_2$  результирующий вектор повернется на угол  $60^\circ$  по часовой стрелке и за период  $T$  – на  $360^\circ$ . Таким образом, вращающееся магнитное поле от трехфазной системы получено.

Чтобы получить вращающееся магнитное поле в двухфазной системе, необходимо выполнить два условия:

1. Обмотки фаз должны быть сдвинуты в пространстве на  $90$  электрических градусов.

2. Токи в фазах должны быть сдвинуты друг от друга на  $\frac{1}{3}$  периода.

риода.

В моменты времени, указанные на рис. 3.2б, ток в одной из фаз максимальный, во второй – равен нулю. Поэтому магнитный поток совпадает с осью фазы и за период повернется на  $360^\circ$ , так же как и при трехфазной системе.

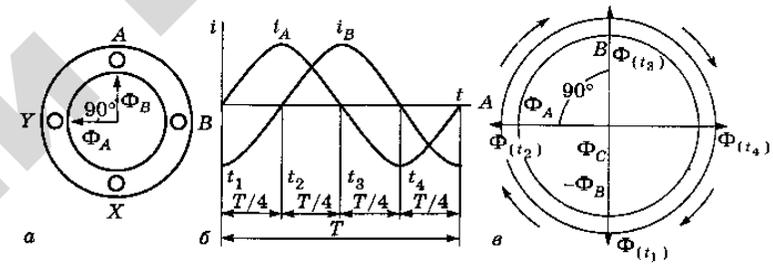


Рис. 3.2. Получение вращающегося магнитного поля от двухфазной системы: а – схематичное расположение обмоток в статоре; б – мгновенные значения фазных токов; в – векторные диаграммы магнитных потоков в различные моменты времени

### Контрольный вопрос

1. Какие условия получения вращающегося магнитного поля в расточке статора от трехфазной и двухфазной систем?

## 3.2. МАГНИТОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ СТАТОРА

### 3.2.1. Магнитодвижущая сила катушки

Магнитодвижущая сила катушки (МДС)  $f_k$  будет равна произведению значения тока на количество витков катушки:

$$f_k = i_k W_k, \quad (3.1)$$

где  $i_k$  – мгновенное значение тока катушки, А;  
 $W_k$  – число витков катушки.

При анализе МДС сделаем следующие допущения:

- воздушный зазор машины постоянный;
- магнитная проницаемость стали равна бесконечности по сравнению с воздухом;
- ток катушки синусоидален

$$i_k = I_{k_{\max}} \sin \omega t, \quad (3.2)$$

где  $I_{k_{\max}}$  – амплитуда тока катушки, А;

На рис. 3.3а показано распределение магнитных силовых линий в реальной машине. На рис. 3.3б – статор «развернут» в плоскость, показано направление магнитных силовых линий через воздушный зазор между статором и ротором, а также зависимость значения МДС от угла  $\alpha$ , то есть распределение МДС по расточке статора. В силу принятых ранее допущений, магнитные силовые линии будут пересекать воздушный зазор перпендикулярно, и распределение МДС по расточке статора будет иметь прямоугольную форму.

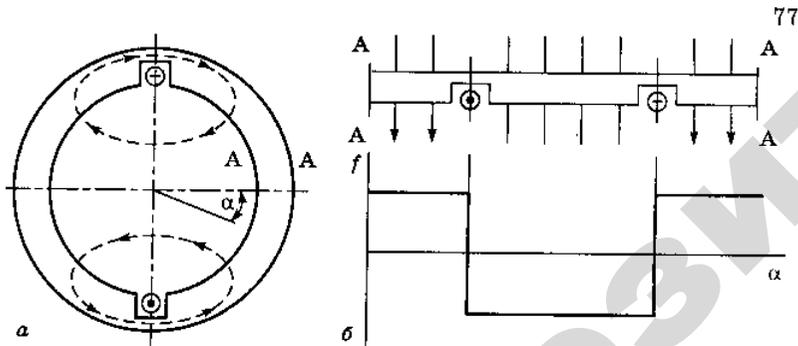


Рис. 3.3. Магнитодвижущая сила катушки:

а – магнитный поток в реальной машине; б – магнитные силовые линии при статоре, «развернутом» в плоскость, и распределение МДС по расточке статора

Любую несинусоидальную кривую можно разложить в ряд Фурье, то есть представить прямоугольную МДС в виде суммы синусоидальных кривых.

$$f = \frac{4}{\pi} F_k \left( \cos \alpha - \frac{1}{3} \cos 3\alpha + \frac{1}{5} \cos 5\alpha - \dots \pm \frac{1}{\nu} \cos \nu \alpha \right), \quad (3.3)$$

где  $F_k$  – действующее значение МДС катушки, А;

$\alpha$  – пространственный угол (рис. 3.3а), град;

$\nu$  – порядковый номер гармоники.

Из формулы (3.3) можно сделать вывод, что МДС катушки содержит нечетные гармоники с амплитудами обратно пропорциональными номеру гармоники и зависящими от пространственного угла  $\alpha$ . Поэтому они называются пространственными.

$$F_{k\nu} = \frac{F_{k1}}{\nu}, \quad (3.4)$$

где  $F_{k1}$  – амплитуда первой гармоники, А.

$$F_{k1} = \frac{4}{\pi} F_k = \frac{4\sqrt{2}}{2\pi} I_k W_k = 0,9 I_k W_k, \quad (3.5)$$

где  $I_k$  – действующее значение тока катушки, А.

Таким образом, мгновенная МДС любой гармоники будет зависеть от места на статоре, определяемого углом  $\alpha$ , и от времени, потому что ток катушки, создающий МДС, синусоидален (см. формулу (3.2)).

$$f_{k\nu} = \pm F_{k\nu} \cos \nu \alpha \cdot \sin \omega t. \quad (3.6)$$

С увеличением номера гармоники растет ее пространственная периодичность – число полюсов, создаваемых пространственными гармониками, увеличивается.

$$2P_\nu = 2P\nu, \quad (3.7)$$

где  $2P$  – количество полюсов в машине.

Пространственные гармоники создают в машине свои магнитные поля, амплитуда которых и частота вращения обратно пропорциональны номеру гармоники. Это приводит к появлению дополнительных моментов, отрицательно сказывающихся на работе машины.

Поэтому высшие пространственные гармоники стремятся подавить, оставив первую, основную гармонику, которая совершает полезную работу. Для этого используют распределение катушки на секции, укорочение шага обмотки и скос пазов статора и ротора.

### 3.2.2. Магнитодвижущая сила катушки с укороченным шагом

На рис.3.3 стороны катушки расположены по диаметру, поэтому такой шаг называется диаметральным или полным. На рис. 3.4а шаг укорочен на  $\alpha$ . Поэтому МДС катушки с укороченным шагом будет равна не арифметической сумме МДС сторон секций (как в катушке с полным шагом), а геометрической сумме (рис. 3.4б).

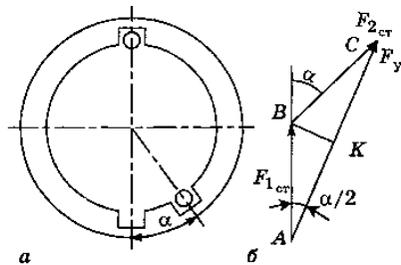


Рис. 3.4. МДС катушки с укороченным шагом: а – разрез статора; б – векторная диаграмма МДС

Из рисунка видно, что МДС катушки с укороченным шагом будет всегда меньше, чем с диаметральным. В расчетах это учитывается коэффициентом укорочения  $K_y$ :

$$K_y = \frac{F_y}{F_k}, \quad (2.8)$$

где  $F_y$  – МДС катушки с укороченным шагом, А;

$F_k$  – МДС катушки с диаметральным шагом, А.

МДС катушки с диаметральным шагом можно представить в виде арифметической суммы МДС сторон катушки.

$$F_k = F_{1cr} + F_{2cr}, \quad (3.9)$$

где  $F_{1cr}, F_{2cr}$  – МДС первой и второй сторон катушки, А.

МДС катушки с укороченным шагом определится из  $\triangle ABC$  на рис. 3.4б. Сторона  $AC$  является  $F_y$ , поэтому ее необходимо определить.

Опустим перпендикуляр  $BK$  с вершины  $B$  на  $AC$ . Получим два одинаковых треугольника  $\triangle ABK$  и  $\triangle CBK$ . Очевидно, что

$F_y = AC = AK + KC$ . Определим угол  $\angle BAK$ :  $\alpha = 180^\circ - \angle ABC$ , в то же время сумма углов  $\angle BAK$  и  $\angle BCK$  равна также  $180^\circ - \angle ABC$  (сумма углов  $\triangle ABC$  равна  $180^\circ$ ). Следовательно,  $\angle BAK + \angle BCK = \alpha$  и  $\angle BAK = \alpha/2$ .

Таким образом:

$$AC = AK + KC = AB \cos \frac{\alpha}{2} + BC \cos \frac{\alpha}{2}$$

и МДС катушки с укороченным шагом:

$$F_y = F_{1cr} \cos \frac{\alpha}{2} + F_{2cr} \cos \frac{\alpha}{2} = (F_{1cr} + F_{2cr}) \cos \frac{\alpha}{2} = F_k \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (3.10)$$

Коэффициент укорочения

$$K_y = \frac{F_y}{F_k} = \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (3.11)$$

МДС катушки с укороченным шагом будет равна:

$$F_y = 0,9IWK_y,$$

Формула (3.11) справедлива для первой гармоники. Для высших гармоник

$$K_{y_v} = \cos \frac{v\alpha}{2}. \quad (3.12)$$

Укорачивая обмотку, можно подавить или ослабить высшие пространственные гармоники. Так, если укорочение произошло на  $25^\circ$ , то

$$K_{y_7} = \cos \frac{7 \cdot 25}{2} \approx 0,$$

то есть влияние 7-й гармоники ничтожно.

Кроме подавления высших пространственных гармоник, укорочение шага обмотки дает еще экономию проводникового материала за счет сокращения лобовых частей обмоток.

### 3.2.3. Магнитодвижущая сила распределенной обмотки

В предыдущем параграфе рассмотрена катушка, лежащая в одном пазу. Такая обмотка называется сосредоточенной. Недостатком такой обмотки является большая площадь паза, что требует увеличения размеров статора. Для решения этой проблемы катушку делят на  $q$  секций – рассредоточивают.

Рассредоточим катушку, приведенную на рис. 3.1а, на  $q = 3$  секции (рис. 3.5а) и назовем ее катушечной группой. На рис. 3.5б показан вектор МДС катушечной группы.

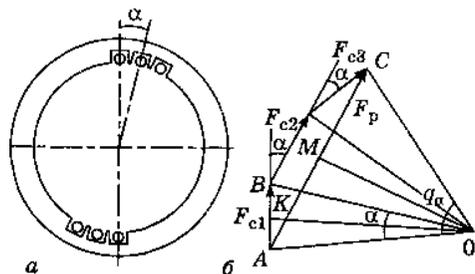


Рис. 3.5. МДС распределенной обмотки:  
а – разрез статора; б – векторная диаграмма МДС

Он равняется геометрической сумме МДС каждой секции. Векторы МДС секций сдвинуты друг относительно друга на пазовый угол  $\alpha$ , поэтому МДС распределенной обмотки будет меньше, чем сосредоточенной. В расчетах это учитывается коэффициентом распределения:

$$K_p = \frac{F_p}{F_k}, \quad (3.13)$$

где  $F_p$  – МДС распределенной катушки;

$F_k$  – МДС сосредоточенной катушки.

Очевидно, что МДС сосредоточенной катушки можно представить арифметической суммой МДС секций:

$$F_k = F_{c_1} + F_{c_2} + F_{c_3} \quad (3.14)$$

и в общем виде, если катушка рассредоточивается на  $q$  секций:

$$F_k = qF_c. \quad (3.15)$$

Значение МДС распределенной катушки будет определяться геометрической суммой МДС секций.

Для определения коэффициента распределения на рис.3.5б сделаем дополнительные построения: опишем вокруг векторов МДС окружность с центром  $O$ . С точки  $O$  опустим перпендикуляры  $OK$  на сторону  $AB$  и  $OM$  на сторону  $AC$ . Рассмотрим  $\triangle ABO$ . Угол  $\angle BOA$  равен  $\alpha$ . Тогда из  $\triangle OKA$  определим отрезок  $AK = AO \cdot \sin \alpha / 2$ . Отрезки  $AB$  – это МДС секции, а  $AO$  – радиус описанной окружности  $R$ . Поэтому:

$$AB = \frac{2AO \sin \alpha}{2} = \frac{2R \sin \alpha}{2} = F_c. \quad (3.16)$$

Из  $\triangle AOC$  путем аналогичных рассуждений вытекает, что

$$AC = 2AO \sin(q\alpha / 2) = 2R \sin(q\alpha / 2) = F_p. \quad (3.17)$$

Подставляя выражения (3.14 – 3.17) в (3.13), получим:

$$K_p = \frac{2R \sin(q\alpha / 2)}{2Rq \sin(\alpha / 2)} = \frac{\sin(q\alpha / 2)}{q \sin(\alpha / 2)}. \quad (3.18)$$

Таким образом, МДС рассредоточенной обмотки:

$$F_p = 0,91WK_p, \quad (3.19)$$

где  $I$  – ток обмотки, А;

$W$  – количество витков обмотки.

Формула (3.18) справедлива для первой гармоники. Для высших гармоник:

$$K_{p_v} = \frac{\sin(q\alpha v / 2)}{q \sin(\alpha v / 2)}. \quad (3.20)$$

Из формулы (3.20) видно, что, рассредоточивая катушку, можно подавить или ослабить высшие пространственные гармоники. Так, если  $q = 3$  и  $\alpha = 24$ , то

$$K_{p5} = \frac{\sin(3 \cdot 24 \cdot 5 / 2)}{3 \sin(24 \cdot 5 / 2)} = 0,$$

то есть 5-я гармоника уничтожена.

### 3.2.4. Магнитодвижущая сила обмотки при скосе пазов

Зубчатое строение статора и ротора также влияет на форму кривой МДС. Так как магнитный поток стремится идти по зубцам, то, естественно, под зубцом плотность магнитного потока выше, чем под пазом. В результате этого кривая распределения МДС приобретает пикообразный характер (рис. 3.6а), и в магнитном поле появляются гармоники, называемые зубцовыми. Порядок этих гармоник зависит от числа зубцов.

Зубцовые гармоники МДС являются причиной гармоник магнитного потока, которые наводят гармоники ЭДС, и, следовательно, токов. Высшие гармоники токов ухудшают характеристики машины.

Зубцовые гармоники можно полностью уничтожить, если выполнить скос пазов на одно зубцовое деление (рис. 3.6б). Тогда половина проводника будет под зубцом, половина – под пазом, и наводимая ЭДС в первой половине будет направлена против ЭДС второй половины, так как у зубцовых гармоник магнитное поле под зубцом и пазом имеет противоположную полярность.

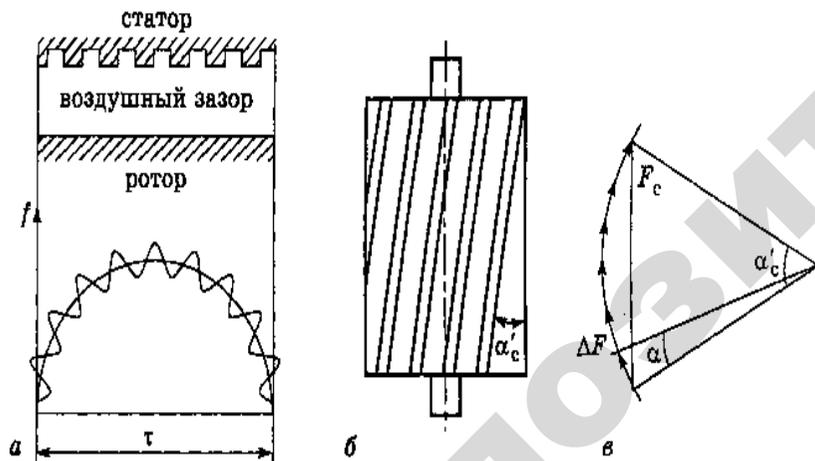


Рис. 3.6. Зубцовые гармоники МДС:

а – кривая МДС в воздушном зазоре; б – скос пазов; в – графическое построение к определению коэффициента скоса

Так как каждый участок проводника, лежащего в скошенном пазу, будет находиться в разных условиях, МДС участков будут сдвинуты по фазе и должны складываться геометрически. Вследствие этого МДС проводника в скошенном пазу будет меньше МДС проводника, лежащего в пазу без скоса.

Предположим, что скос пазов произведен на угол  $\alpha_c$  (рис. 3.6б). Разобьем проводник на бесконечно большое число участков (рис. 3.6в). Тогда геометрическая сумма МДС участков будет равна хорде окружности  $F_c$ , коэффициент скоса – отношению хорды  $F_c$  к длине дуги.

Сравним рис. 3.5б с рис. 3.6в. Они аналогичны за исключением того, что на первом составляющие  $F_p$  МДС секций  $F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}$  – конечные числа, а на втором составляющие МДС участков – бесконечно малые величины, и в их расчете синус угла заменяется просто углом. Тогда

$$K_c = \frac{2R \sin(\alpha'_c / 2)}{R\alpha} = \frac{\sin(\alpha'_c / 2)}{\alpha / 2}. \quad (3.21)$$

Таким образом, используя укорочение шага, распределение обмотки и скос пазов, можно значительно ослабить действие высших пространственных гармоник. При этом значение МДС учитывается обмоточным коэффициентом:

$$K_{об} = K_y K_p K_c. \quad (3.22)$$

МДС распределенной обмотки с укороченным шагом при скосе пазов будет равна:

$$F = 0,9 IW K_{об}. \quad (3.23)$$

### 3.2.5. Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки

В трехфазной обмотке фазные токи сдвинуты друг относительно друга по времени на  $1/3$  периода, а сами обмотки фаз – в расточке статора на  $120$  электрических градусов друг относительно друга (см. рис. 3.1). Каждая из обмоток создает пульсирующие МДС, которые, как и токи, сдвинуты друг относительно друга на  $1/3$  периода (рис. 3.7а).

Вектор результирующей МДС  $F_p$ , как и вектор магнитного потока (см. рис. 3.1б), будет вращаться относительно статора, так как векторы МДС  $F_p$  и магнитного потока  $\Phi$  совпадают по направлению. Действующее значение результирующей МДС определится из векторной диаграммы, приведенной на рис. 3.7б для момента времени  $t = t_1$ . Диаграмма на рис. 3.7б фактически повторяет векторную диаграмму магнитных потоков, приведенную на рис. 3.1.

Результирующая МДС трехфазной обмотки  $F_p$  (отрезок  $OB$  на рис. 3.7б) равен геометрической сумме трех векторов  $F_A$ ,  $F_B$  и  $F_C$ . В момент  $t = t_1$ , как видно из рис. 3.7а,  $F_B = \max$ ,  $F_A = F_C = 0,5 F_B$ .

Из рис.3.7б следует, что сумма векторов  $\dot{F}_A + \dot{F}_C$  равна отрезкам  $OD = OC$ , то есть  $\dot{F}_A + \dot{F}_C = 0,5 \dot{F}_B$ . Таким образом:

$$\dot{F}_p = \dot{F}_C + \dot{F}_A + \dot{F}_B = 1,5 \dot{F}_B.$$

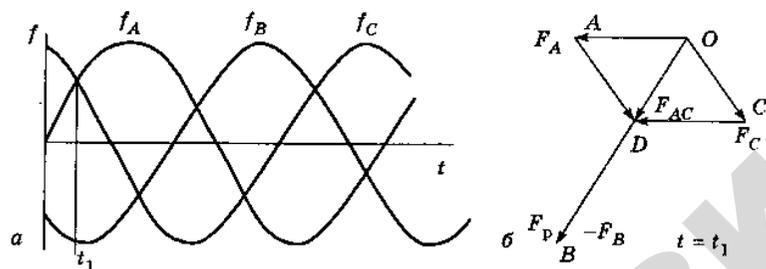


Рис. 3.7. Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки:  
а – осциллограммы фазных МДС; б – векторная диаграмма МДС

Перейдя к действительным значениям, получим

$$F_p = 1,5 \cdot 0,9 I W K_{об} = 1,35 I W K_{об}. \quad (3.24)$$

Следовательно, МДС трехфазной обмотки в полтора раза больше МДС однофазной.

### Контрольные вопросы:

1. Чем определяется форма графика магнитодвижущей силы обмотки машины переменного тока?
2. На какие гармонические составляющие можно разложить несинусоидальную кривую магнитодвижущей силы обмотки статора?
3. Каким образом можно ослабить зубцовые гармоники магнитодвижущей силы в обмотке статора?
4. Почему гармонические составляющие магнитодвижущей силы обмотки статора называют пространственными?
5. Какие методы подавления высших пространственных гармоник применяют в машинах переменного тока?

### 3.3. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ

При вращении магнитного поля относительно проводников обмотки в них индуцируется ЭДС с частотой

$$f = \frac{pn}{60},$$

где  $p$  – количество пар полюсов;

$n$  – частота вращения поля относительно статора,  $\text{мин}^{-1}$ .

ЭДС обмотки будет равняться сумме ЭДС всех проводников обмотки. Мгновенное значение ЭДС одного проводника

$$e_i = B_i l v, \quad (3.25)$$

где  $B_i$  – магнитная индукция в месте, где лежит  $i$ -й проводник, Тл;

$l$  – длина проводника, м;

$v$  – окружная скорость проводника, м/с;

$$v = \frac{\pi D n}{60}, \quad (3.26)$$

где  $D$  – диаметр расточки статора, м.

ЭДС синусоидальна, амплитуда ее равна:

$$E_{i_{max}} = B_{i_{max}} l v. \quad (3.27)$$

Действующее значение ЭДС:

$$E = \sqrt{2} B_{i_{\max}} \frac{lv}{2}. \quad (3.28)$$

Удобнее пользоваться средними значениями магнитной индукции  $B_{\text{cp}}$ . Для синусоиды:

$$B_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} B_{i_{\max}}. \quad (3.29)$$

Выразим через индукцию магнитный поток:

$$\Phi = B_{\text{cp}} \tau l \rightarrow B_{\text{cp}} = \frac{\Phi}{\tau l}, \quad (3.30)$$

где  $\tau$  – полюсное деление, м.

$$\tau = \frac{\pi D}{(2p)}. \quad (3.31)$$

Выразив из формулы (3.31) диаметр  $D = \tau p / \pi$ , подставив его в уравнение (3.26) и учтя выражение (3.24), получим выражение окружной скорости проводника через частоту ЭДС:

$$v = \frac{2\pi n \tau p}{60\pi} = \tau \frac{2np}{60} = 2\tau f. \quad (3.32)$$

Подставив выражение (3.30) в (3.29),

$$B_{i_{\max}} = \frac{\pi\Phi}{2\tau l}, \quad (3.33)$$

и (3.33), (3.32) – в (3.28), получим окончательное выражение действующего значения ЭДС проводника:

$$E = \frac{\sqrt{2}\pi\Phi f}{2} = 2,22\Phi f. \quad (3.34)$$

Учитывая, что виток имеет два проводника, ЭДС одного витка  $E_{\text{в}}$ :

$$E_{\text{в}} = 4,44\Phi f. \quad (3.35)$$

Так как ЭДС наводится магнитным потоком, который, в свою очередь, появляется в результате действия МДС, то форма кривой ЭДС будет несинусоидальная. Укорочение шага, распределение обмотки и скос пазов приближает форму ЭДС к синусоидальной, но при этом значение ЭДС снижается. Уменьшение ЭДС учитывается обмоточным коэффициентом (3.21). ЭДС обмотки фазы:

$$E_{\phi} = 4,44\Phi f W_{\phi} K_{\text{об}}, \quad (3.36)$$

где  $W_{\phi}$  – число витков в обмотке фазы.

### 3.4. ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 3.4.1. Способы выполнения обмоток

Машины переменного тока имеют обмотки статора и ротора. Обмотку ротора выполняют либо короткозамкнутой, либо по тем же принципам, что и обмотку статора.

Для укладки обмоток в статоре выштампованы пазы, которые могут иметь различную форму (рис. 3.8). Грушевидная и трапециевидная формы с полузакрытым пазом (рис. 3.8а, б) применяются в машинах мощностью до 100 кВт. Для изоляции обмотки от корпуса в паз закладывают выгнутый по форме короб  $1$  из изоляционного материала.

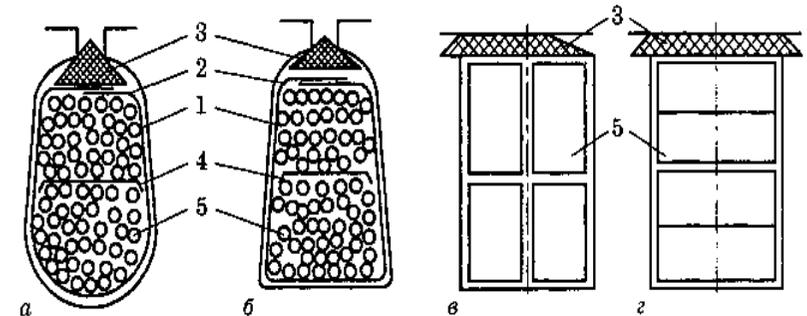


Рис. 3.8. Форма пазов статора:

а – грушевидная; б – трапециевидная; в – полуоткрытая; г – открытая;  
1 – пазовый короб; 2 – прокладка под клин; 3 – клин; 4 – межслойная прокладка; 5 – обмоточный провод

Пазовый короб должен плотно прилегать к стенкам пазы, не сминаться при укладке обмотки, быть стойким к надрыву, продавливанию, расслоению и достаточно скользким. Проводники поочередно опускают (всыпают) в паз через шлиц, поэтому такие обмотки еще называют всыпными. После укладки обмотки в пазы статора ее пропитывают специальными лаками.

Полуоткрытые и открытые пазы с прямоугольной формой пазы применяют в машинах мощностью более 100 кВт. Обмотку в них выполняют из жестких секций, которые наматывают из провода прямоугольного сечения на шаблонах, придают им окончательную форму со всеми характерными изгибами, затем изолируют, пропитывают, сушат и в готовом виде укладывают в пазы.

### 3.4.2. Классификация и выбор типа обмоток

Классификация обмоток приведена на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Классификация обмоток машин переменного тока

По частоте вращения магнитного поля статора обмотки делятся на однокоростные и многокоростные. Многокоростные используются для регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.

В зависимости от размещения катушечных групп и их лобовых частей, обмотки делятся на концентрические, петлевые и волновые.

У концентрических обмоток секции размещаются одна внутри другой, поэтому шаги секций, входящих в катушечную группу, неодинаковые.

Петлевые обмотки имеют одинаковые секции. Их наматывают на одинаковых шаблонах.

Волновые обмотки в машинах переменного тока практически не используются.

По числу сторон секций в пазу, обмотки делятся на однослойные и двухслойные. Все они могут выполняться как с диаметральной, так и укороченным шагом. Но обычно двухслойные обмотки выполняются преимущественно с укороченным, а однослойные – с диаметральной шагом.

Основные достоинства однослойной обмотки по сравнению с двухслойной:

- 1) отсутствие межслоевой изоляции, что повышает коэффициент заполнения пазы и, следовательно, мощность двигателя;
- 2) простота изготовления, укладывается только один слой;
- 3) большая возможность применения автоматизации при укладке обмоток.

Недостатками однослойной обмотки являются:

- 1) повышенный расход проводникового материала по сравнению с двухслойной;
- 2) сложность укорочения шага и, следовательно, компенсации высших гармоник магнитного потока (см. п. 3.2.2);
- 3) ограниченные возможности построения обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу;
- 4) более трудоемкое изготовление и монтаж катушек для крупных электродвигателей высокого напряжения.

Основные достоинства двухслойной обмотки по сравнению с однослойной следующие:

1. Возможность любого укорочения шага, что позволяет снизить расход обмоточного провода за счет уменьшения длины лобовой части секций и уменьшить высшие гармонические составляющие магнитного потока, то есть снизить потери в магнитопроводе двигателя.
2. Простота технологического процесса изготовления катушек (многие операции можно механизировать).
3. Возможность выполнения обмотки почти с любой дробностью числа пазов на полюс и фазу, что обеспечивает изготовление обмотки при ремонте асинхронных двигателей с изменением частоты вращения ротора. Кроме того, это является одним из способов приближения формы поля к синусоиду.
4. Возможность образования большего числа параллельных ветвей, чем у однослойной.

Принято считать недостатками:

1) меньший коэффициент заполнения пазы, вследствие наличия межслоевой изоляции;

2) некоторую сложность при укладке последних секций обмотки;

3) необходимость поднимать целый шаг обмотки при повреждении нижней стороны секции.

По способу выполнения обмотки разделяют на следующие типы:

– шаблонно-рассыпные (или всыпные), они же называются обмотками с мягкими секциями. У таких обмоток секции укладываются по одному проводнику через прорезь (шлиц) полузакрытого паза. Применяются для машин малой и средней мощности, напряжением до 500 В;

– протяжные, выполняются протяжкой провода через пазы. Используются для машин напряжением до 10 000 В при закрытых или полузакрытых пазах. Способ укладки обмотки трудоемок;

– с жесткими секциями. Готовые, изолированные секции укладываются в открытые пазы. Используются для машин средней и большой мощности напряжением 5000–10 000 В и более.

При выборе типа обмотки учитываются:

– минимальный расход обмоточного провода;

– номинальная мощность и напряжение;

– тип пазы;

– достоинства и недостатки обмотки;

– экономическая целесообразность.

### 3.4.3. Принципы построения трехфазных статорных обмоток

Асинхронный двигатель имеет три фазных обмотки.

В основе любой машины переменного тока лежит вращающееся магнитное поле. Поэтому фазные обмотки должны быть смещены в пространстве на 120 электрических градусов друг относительно друга, и токи, протекающие по этим обмоткам, должны отставать друг от друга на  $\frac{1}{3}$  периода.

Каждая фазная обмотка состоит из катушечных групп, соединенных соответствующим образом.

Под катушечной группой понимается ряд последовательно соединенных между собой секций, принадлежащих одной фазе и одной паре полюсов.

Секция является частью катушечной группы и представляет собой катушку из обмоточного провода, число витков которой определяется специальным расчетом, минимальное число равно одному витку. Каждый виток (следовательно, и секция) состоит из двух активных проводников (сторон), уложенных в пазы магнитопровода статора двигателя, и двух лобовых частей, соединяющих эти активные проводники.

*Полюсом в машине переменного тока принято называть часть рашочки статора, охватывающей рядом расположенные пазы, в которых проводники имеют одно и то же направление тока.*

Обмотка машины переменного тока характеризуется следующими обмоточными данными:

$Y$  – шаг обмотки;

$q$  – число пазов на полюс и фазу (равно числу секций в катушечной группе);

$\alpha$  – число электрических градусов, приходящихся на один паз;

$N$  – число катушечных групп;

$a$  – число параллельных ветвей.

*Шаг обмотки  $Y$  – это расстояние, выраженное в зубцах (или пазы), между активными сторонами одной и той же секции. Он определяется по формуле:*

$$Y = \frac{Z}{2p} \pm \xi, \quad (3.37)$$

где  $Y$  – расчетный шаг (равен полюсному делению, выраженному в зубцах);

$\xi$  – произвольное число меньше 1, доводящее расчетный шаг до целого числа.

Удобнее всего считать зубцы, потому что они лежат между пазами, но на практике принято шаг определять в пазах, поэтому при раскладке вторая сторона секции ложится в  $(Y + 1)$ -й паз.

Если между активными сторонами секции помещается полюс, такой шаг  $Y$  называется полным, или диаметральной, если же он меньше размера полюсного деления, его называют укороченным.

Число пазов на полюс и фазу  $q$  определяет число секций в катушечной группе и находится по формуле:

$$q = \frac{Z}{2pm}, \quad (3.38)$$

где  $m$  – число фаз.

Каждая катушка обмотки электрической машины участвует в создании двух полюсов, так как активные проводники одной ее стороны имеют одно направление тока, а другие – противоположное.

При  $q = 1$  в полюсе статора на одну фазу приходится только один паз, значит катушка этой фазы не может быть разделена на секции. Такая обмотка называется сосредоточенной.

При  $q > 1$ , обмотка называется рассредоточенной, при этом катушка каждой фазы должна быть разделена на секции, число которых равно  $q$ . Суммарное число витков этих секций равно числу витков сосредоточенной катушки.

При  $q = 2$  катушечная группа будет состоять из двух секций, при  $q = 3$  – из трех секций и т. д. Характерно, что  $q$  на число полюсов и места их расположения в расточке статора не влияет.

*Число катушечных групп.* Каждая фазная катушка электрической машины участвует в создании пары полюсов, следовательно, между числом катушечных групп и числом пар полюсов имеется жесткая связь, и в однослойной обмотке число катушечных групп:

$$N(1) = pm. \quad (3.39)$$

В двухслойных обмотках число катушечных групп увеличено в два раза по сравнению с однослойной обмоткой:

$$N(2) = 2pm. \quad (3.40)$$

*Число электрических градусов на один паз.* В расточке статора электрической машины одна пара полюсов составляет 360 электрических градусов, поэтому число электрических градусов в расточке статора можно определить, умножив 360 на число пар полюсов –  $360p$ .

Если магнитопровод имеет число пазов равное  $Z$ , то число электрических градусов, приходящихся на один паз, или угловой сдвиг, между рядом лежащими пазами, равен:

$$\alpha = \frac{360p}{Z}. \quad (3.41)$$

Параллельные ветви в обмотке асинхронного двигателя делаются для сокращения сечения обмоточного провода, создавая возможность лучшей загрузки магнитной системы машины.

Все катушечные группы одной фазы могут быть соединены последовательно, тогда число параллельных ветвей равно  $a = 1$  (рис. 3.10а).

При их параллельном подключении число параллельных ветвей, может равняться числу катушечных групп в одной фазе, например,  $a = 4$  (рис. 3.10б).

Катушечные группы фазы можно соединять и комбинированно (часть – последовательно и часть – параллельно), но при этом число катушечных групп в каждой параллельной ветви должно быть одинаковым:  $a = 2$  (рис. 3.10в).

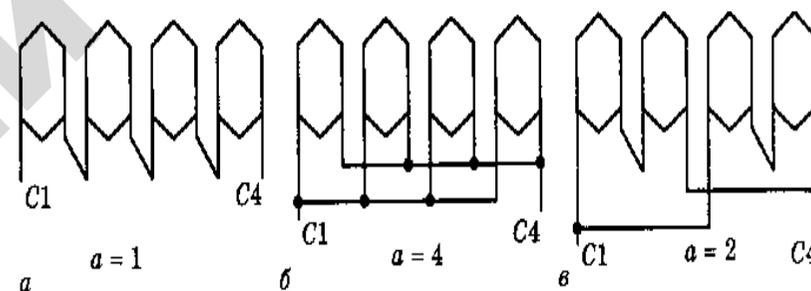


Рис. 3.10. Соединение катушечных групп фазной обмотки машины переменного тока:  
а — одна, б — четыре, в — две параллельные ветви

Рассмотрим выполнение статорной обмотки на примере петлевой однослойной обмотки с диаметральной шаг односкоростного асинхронного двигателя:  $Z = 24$ ,  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

При построении схемы обмотка первой фазы может начинаться с любого паз. Первую активную сторону секции помещаем в первый паз (рис. 3.11а).

Чтобы определить, в каком пазу будет лежать вторая активная сторона секции, рассчитаем шаг обмотки:

$$Y = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6,$$

где  $p = 60f / n = 60 \cdot 50 / 1500 = 2$  – количество пар полюсов.

Следовательно, вторую активную сторону секции помещаем через шесть зубцов после первого паза, в седьмой паз (рис. 3.11 б).

Определяем число пазов на полюс и фазу, чтобы знать количество секций в катушечной группе:

$$q = \frac{Z}{2pt} = \frac{24}{(2 \cdot 2 \cdot 3)} = 2.$$

Катушечная группа имеет две секции, тогда вторая секция занимает соответственно 2-й и 8-й пазы (рис. 3.11 в).

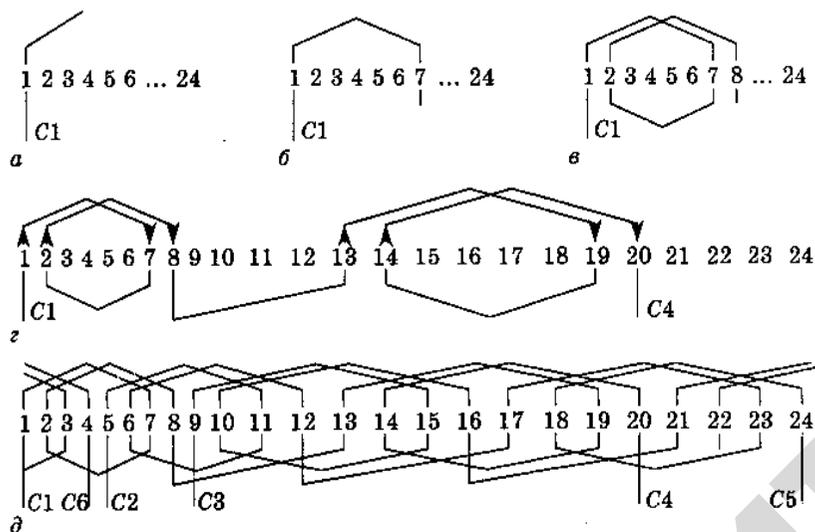


Рис. 3.11. Построение трехфазной статорной обмотки:

*a* – первая активная сторона первой секции, *б* – две активные стороны первой секции, *в* – катушечная группа, *з* – обмотка фазы, *д* – трехфазная обмотка

Число катушечных групп в однослойной обмотке определим по формуле (3.39):

$$N(1) = pt = 2 \cdot 3 = 6.$$

Следовательно, обмотка одной фазы имеет  $6/3 = 2$  катушечные группы. Первая катушечная группа участвует в создании первой

пары полюсов, вторая должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, то есть 360 электрических градусов.

Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах или зубцах равен  $360/\alpha = 360/30 = 12$  (пазов или зубцов), где  $\alpha = 360 \cdot 2/24 = 30$  – число электрических градусов на один паз, формула (3.41).

Значит, вторая катушечная группа фазы *A* начинается с 13-го паза (рис. 3.11 з).

Как соединить между собой уложенные катушечные группы?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо знать число параллельных ветвей *a*, которое определяется при расчете сечения обмоточного провода. В данном случае принимается одна параллельная ветвь  $a = 1$ .

Возникает вопрос: как соединить между собой уложенные катушечные группы? Для ответа необходимо показать направления токов в катушках с учетом чередования полюсов.

Если в машине четыре полюса, то по направлению тока их можно соединить только так: конец первой катушечной группы с началом второй (рис. 3.11 з).

Обмотки фаз *B* и *C* выполняются аналогично, но, согласно условиям получения вращающегося магнитного поля, они сдвинуты соответственно на 120 и 240 электрических градусов относительно обмотки фазы *A*, то есть в пазах это будет соответственно на  $120/30 = 4$  паза и  $240/30 = 8$  пазов.

Таким образом, обмотки фаз *B* и *C* начинаются соответственно в 5-м и 9-м пазах. Укладка их катушечных групп аналогична обмотке фазы *A*. В результате получаем обмотку асинхронной машины, приведенную на рис. 3.11 д.

В двухслойных обмотках катушечные группы одной и той же фазы сдвигаются не на 360 электрических градусов, а на 180 электрических градусов и соединяются между собой следующим образом: конец первой катушечной группы – с концом последующей, а начало – с началом (это требует направление токов). Во всем остальном расчеты и построения идентичны.

### Контрольные вопросы:

1. Каковы достоинства и недостатки двухслойных и однослойных обмоток статоров?
2. Что такое шаг обмотки?

3. Рассчитайте обмоточные данные трехфазной обмотки статора, если число полюсов  $2p = 4$ , а  $Z = 36$ .

4. Начертите развернутую схему по обмоточным данным предыдущего вопроса.

5. Какова зависимость частоты вращения магнитного поля обмотки статора от частоты тока и числа его полюсов?

## 4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 4.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

У синхронных машин частота вращения магнитного поля всегда равна (синхронна) частоте вращения ротора ( $n_1 = n_2$ ). Как и все электрические машины, синхронная машина имеет неподвижную часть – статор 1 (рис. 4.1) и подвижную – ротор 2.

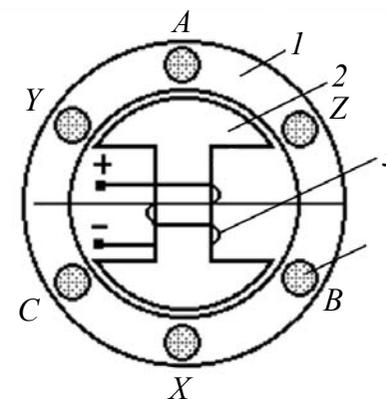
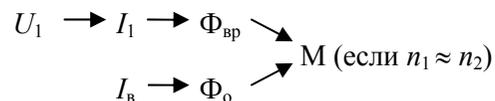


Рис. 4.1. Схематичный разрез синхронной машины:  
1 – статор; 2 – ротор; 3 – обмотка возбуждения; 4 – обмотка якоря (статора)

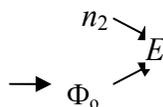
Обмотка статора 4 аналогична обмотке статора асинхронной машины (см. 3.4). В режиме генератора в ней наводится ЭДС, а в режиме двигателя она создает вращающееся магнитное поле статора. Ротор необходим для создания основного магнитного потока. У машин небольшой мощности для этого используются постоянные магниты. При большой мощности основной магнитный поток создается обмоткой возбуждения 3, которая через скользящие контакты подключается к источнику постоянного напряжения.

При работе двигателя на обмотку статора подается напряжение, и обмотка создает вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем ротора, создает вращающий момент. Так как взаимодействуют магнитные поля, они должны быть неподвижны друг относительно друга. Это означает, что ротор предварительно необходимо «раскрутить» до частоты вращения магнитного поля статора, чтобы поля «вошли в зацепление»:



В противном случае они будут проскакивать друг относительно друга, создавая незначительные знакопеременные моменты.

А при работе генератора ротор приводится во вращение и создаваемый им магнитный поток, пересекая витки обмотки якоря (статора), наводит в них ЭДС:



Частота этой ЭДС зависит от числа пар полюсов генератора  $p$  и частоты вращения ротора  $n_2$ :

$$f = \frac{pn_2}{60}.$$

Из формулы видно, что стабильность частоты ЭДС определяется частотой вращения ротора  $n_2$ , которая, в свою очередь, зависит от нагрузки, подключаемой к электрической сети генератора. Поэтому критерием загрузки энергосистемы (практически вся электроэнергия в Республике Беларусь вырабатывается синхронными генераторами) является частота тока в ней. При снижении частоты в максимумы нагрузки необходимо или снижать нагрузку (отключать некоторые предприятия), или включать дополнительные генераторы. В то же время при увеличении частоты необходимо либо подключать дополнительную нагрузку, либо отключать некоторые генераторы. Поэтому на некоторых гидроэлектростанциях

синхронная машина работает в часы максимума нагрузки генератором, а в часы минимума нагрузки – двигателем в качестве насоса, перекачивая воду наверх в водохранилище, создавая необходимый запас для последующей работы.

### Контрольные вопросы:

1. Какой принцип действия синхронного генератора?
2. Какой принцип действия синхронных двигателя?

## 4.2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СИНХРОННЫХ МАШИН

Конструктивное исполнение синхронной машины может быть различным в зависимости от ее назначения и мощности. Существует прямое и обратное исполнение синхронной машины. Прямое исполнение – это такое исполнение, при котором обмотка возбуждения расположена на роторе, а обмотка якоря – на статоре (см. рис. 4.1).

При обратном исполнении (рис. 4.2.) обмотка возбуждения 3 расположена на статоре 1, а обмотка якоря 4 – на роторе 2. В электромагнитном отношении оба исполнения одинаковы. Но в первом варианте через скользящие контакты передается мощность возбуждения, которая составляет 0,3–3,0 % номинальной мощности машины. Во втором варианте скользящие контакты должны быть рассчитаны на полную мощность машины, поэтому обратное исполнение применяется для машины небольшой мощности. В дальнейшем будем рассматривать только прямое исполнение машины.

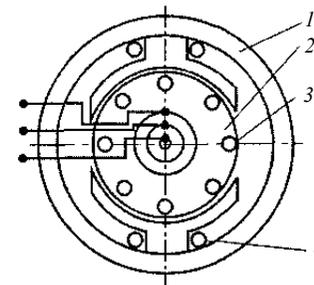


Рис. 4.2. Обратное исполнение синхронной машины:  
1 – статор; 2 – ротор; 3 – обмотка якоря (статора); 4 – обмотка возбуждения

Роторы синхронных машин могут иметь явнополюсную (рис. 4.3а) и неявнополюсную конструкцию (рис. 4.3б).

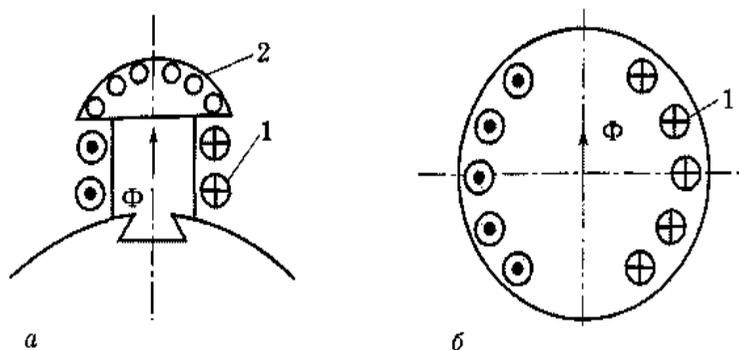


Рис. 4.3. Конструкция роторов синхронных машин:  
а – явнополюсная; б – неявнополюсная; обмотки:  
1 – возбуждения; 2 – демпферная

Явнополюсные роторы применяются в мощных машинах с малой частотой вращения (гидрогенераторы) и в быстроходных машинах малой мощности (синхронные двигатели, дизель-генераторы). Неявнополюсные генераторы используют там, где по условиям механической прочности ротор с явными полюсами применять нельзя, – в мощных быстроходных машинах (турбогенераторы). Полюсы такого ротора набирают из пластин электротехнической стали.

Кроме обмотки возбуждения 1, ротор может иметь демпферную обмотку 2 (рис. 4.3). Она расположена в наконечниках полюсов и по своей конструкции аналогична короткозамкнутой обмотке ротора в асинхронном двигателе. Демпферная обмотка играет роль успокоительной обмотки при колебаниях нагрузок как генератора, так и двигателя. Кроме того, в генераторе она ослабляет поле обратной последовательности, а в двигателях является пусковой обмоткой.

В качестве приводных двигателей для генераторов могут использоваться гидравлические и паровые турбины, а также дизельные двигатели. В соответствии с этим различают гидрогенераторы, турбогенераторы, дизель-генераторы, конструкции которых отличны друг от друга.

Гидрогенератор характеризуется малой частотой вращения (50–600 мин<sup>-1</sup>), поэтому ротор его выполняется явнополюсным с большим количеством полюсов. Обычно гидрогенератор имеет вертикальное расположение вала. Для сохранения стабильной частоты вращения ротора и, следовательно, частоты тока, вырабатываемого генератором, использу-

ются регуляторы напора и количества воды, вращающие гидротурбину. Кроме того, ротор гидрогенератора выполняется с большим моментом инерции, для чего он изготавливается с возможно большим диаметром и наименьшей длиной. При аварийном отключении нагрузки частота вращения ротора увеличивается в 2–3 раза. Поэтому механическая прочность различных деталей рассчитывается именно на такую частоту вращения, которая называется угонной. Крупные гидрогенераторы представляют собой машины индивидуального исполнения, так как все его параметры определяются напором и расходом воды. Гидрогенераторы меньшей мощности выпускаются серийно.

У паровой турбины и других механизмов, приводящих во вращение турбогенератор, технико-экономические показатели повышаются при возрастании их частоты вращения, поэтому частота вращения турбогенератора обычно 3000 мин<sup>-1</sup>. Поскольку на ротор турбогенератора действуют значительные центробежные силы, он выполняется неявнополюсным, длина его больше, чем у гидрогенератора, а диаметр меньше. Ротор изготавливается из цельного куска стали. На его поверхности профрезерованы пазы, в которых лежит обмотка. Примерно третья часть окружности ротора остается без пазов. Через нее проходит основной магнитный поток. Обмотку ротора крепят клиньями из немагнитных сплавов. Турбогенераторы выпускаются серийно.

Гидро- и турбогенераторы являются машинами значительной мощности, поэтому большое значение имеет снижение их габаритов. Увеличение мощности генератора не должно (по условиям механической прочности) повлечь за собой увеличение размера ротора. Поэтому дальнейшее увеличение мощности идет за счет повышения удельных нагрузок, что достигается совершенствованием системы охлаждения. В генераторах мощностью до 25 МВт применяется замкнутая система вентиляции, в которой в качестве теплоносителя используется воздух. При мощности от 25 мВт до 300 МВт воздух заменяется водородом (лучшая теплопроводность и меньшая плотность по сравнению с воздухом). В более мощных генераторах используется прямое охлаждение обмоток, которые изготавливаются из полых проводников, внутри которых циркулирует охлаждающая среда (водород, вода, трансформаторное масло).

Дизель-генераторы (также как и турбогенераторы) изготавливают с горизонтальным расположением вала. Но так как мощность их сравнительно небольшая, а частота вращения 600–1500 мин<sup>-1</sup>, их выполняют с явнополюсным ротором. В настоящее время дизель-генераторы в основном используются в качестве аварийных источников питания.

Синхронные двигатели, в отличие от асинхронных, могут работать с коэффициентом мощности равным единице и даже генерировать в сеть реактивную энергию (см. п. 4.10.3). По своей конструкции они мало отличаются от дизель-генераторов.

### 4.3. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Для создания магнитного поля в мощных синхронных машинах используется электромагнитное возбуждение. Основным требованием к нему является эффективное регулирование тока возбуждения, чтобы напряжение генератора оставалось постоянным, а у двигателя не было перегрузки. Различают независимое возбуждение и самовозбуждение. При независимом возбуждении обмотка возбуждения синхронных машин питается от генератора постоянного тока (возбудителя), установленного на валу ротора синхронной машины (рис. 4.4а). Регулирование тока возбуждения осуществляется реостатом  $R$ . Процесс регулирования осуществляется автоматически.

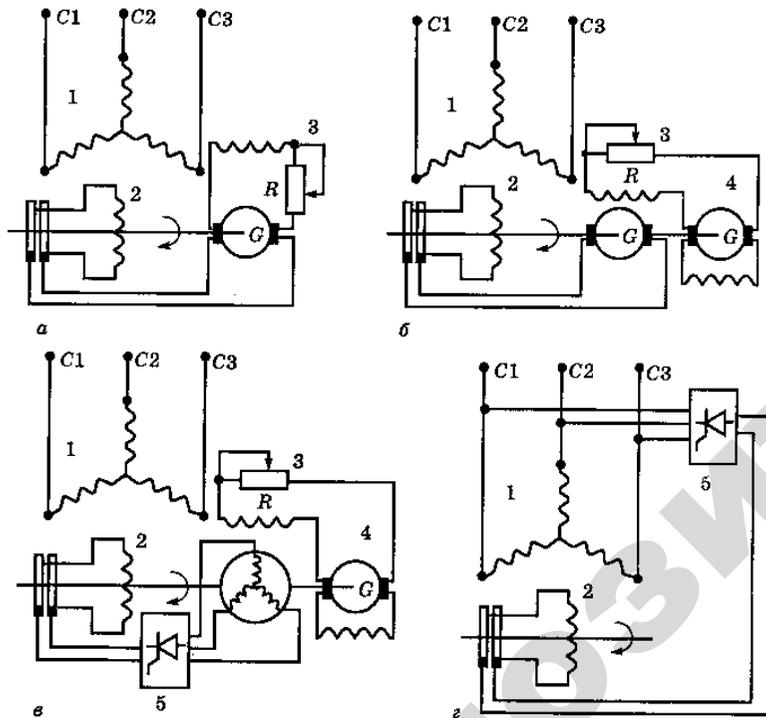


Рис. 4.4. Схемы возбуждения синхронной машины:  
1 – обмотка статора; 2 – обмотка возбуждения; 3 – возбудитель;  
4 – подвозбудитель; 5 – выпрямительный блок

Мощность, необходимая для возбуждения, сравнительно невелика и составляет 0,3–3,0 % от мощности синхронной машины. Но в крупных генераторах ток возбуждения составляет сотни, а то и тысячи ампер, и процесс самовозбуждения становится затруднительным. В этом случае обмотка возбуждения возбудителя синхронной машины питается от вспомогательного генератора, который называется подвозбудителем 4 (рис. 4.4б).

Чтобы исключить скользящий контакт, питающий обмотку возбуждения синхронной машины 2, в качестве возбудителя используют синхронный генератор обращенной конструкции 3 (рис. 4.4в). Выпрямительный блок 5 устанавливается на валу синхронной машины. Он может быть регулируемым, но тогда необходимы дополнительные скользящие контакты для сигналов управления.

При самовозбуждении (рис. 4.4г) обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через регулируемый выпрямительный блок. Обычно в качестве выпрямительного блока используют тиристорный регулятор напряжения.

#### Контрольные вопросы:

1. Каково назначение контактных колец и щеток в синхронном генераторе?
2. Чем создается основной магнитный поток в синхронных машинах?
3. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
4. Объясните назначение выпрямительного блока в системе самовозбуждения синхронного генератора.
5. Объясните устройство синхронного двигателя.

### 4.4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Основной магнитный поток в синхронной машине создается обмоткой возбуждения. Замыкаясь по магнитной цепи, он проходит ряд участков: воздушный зазор 1, зубцовую зону статора 2, спинку статора 3, зубцовую зону ротора 4, спинку ротора 5 (рис. 4.5).

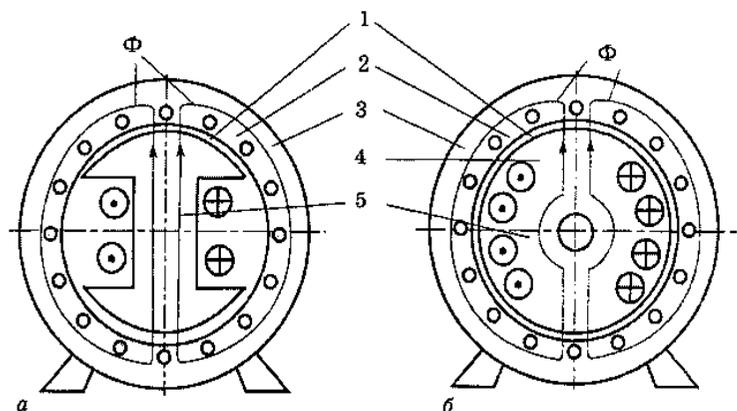


Рис. 4.5. Магнитная система синхронной машины с явнополюсным (а) и неявнополюсным ротором (б):  
1 – воздушный зазор, 2 – зубцовая зона статора, 3 – спинка статора, 4 – зубцовая зона ротора, 5 – спинка ротора

Расчет магнитной цепи аналогичен расчету цепи асинхронного двигателя.

Вырабатываемое генератором напряжение должно быть синусоидальным. Для этого в явнополюсной машине зазор между полюсом и статором выполняют неодинаковым (рис. 4.6). Под краями полюсов зазор выполняют почти в 2 раза большим, чем под серединой. На рис. 4.6. штриховой линией для сравнения показана кривая индукции при равномерном зазоре. Кроме того, как и в асинхронной машине, для улучшения формы кривой ЭДС используется укорочение шага обмотки якоря и рассредоточение ее по пазам.

### Контрольные вопросы:

1. Из каких участков состоит магнитная цепь явнополюсной синхронной машины?
2. Объясните устройство явно- и неявнополюсных роторов синхронных машин.

### 4.5. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

При нагрузке машины в обмотке статора появляется ток, который будет создавать свой магнитный поток. Он будет искажать, усиливать или ослаблять основной магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения.

*Воздействие потока, созданного обмоткой статора, на основной магнитный поток называется реакцией якоря.*

Действие реакции якоря зависит от характера нагрузки. Нагрузка может быть активной  $R$ , индуктивной  $L$ , емкостной  $C$  или смешанной  $R-L$  или  $R-C$ .

На рис. 4.7 показана реакция якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузках на примере однофазного двухполюсного синхронного генератора, обмотка которого имеет только одну секцию.

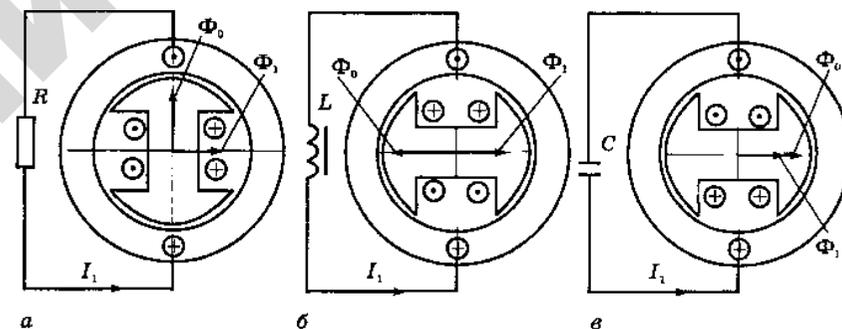


Рис. 4.7. Реакция якоря синхронного генератора при активной (а), индуктивной (б) и емкостной (в) нагрузках

При активной нагрузке (рис. 4.7а) ток в обмотке статора  $I_1$  совпадает по фазе с ее ЭДС  $E_0$ . Это означает, что максимальной ЭДС (когда стороны секции находятся посередине полюса, что соответствует вертикальному расположению ротора) будет соответствовать максимальный ток. Показав по правилу «буравчика» направление магнитных потоков обмоток возбуждения и статора, видим, что поток статора  $\Phi_1$  направлен перпендикулярно потоку возбуждения  $\Phi_0$ , то есть *имеет место поперечная реакция якоря*.

В синхронной машине поперечная реакция якоря приводит к тем же последствиям, что и в машине постоянного тока: искажается результирующее поле машины. Магнитное поле ослабляется под

набегающим краем полюса и усиливается под сбегающим краем полюса. Так как усиление поля ограничено насыщением стали, а ослабление не ограничено, результирующий магнитный поток машины уменьшается. Это ведет к уменьшению ЭДС машины.

При индуктивной нагрузке (рис. 4.7б) ток статора отстает от ЭДС по фазе на  $90^\circ$ . Поэтому, когда ток статора достигнет максимума, ротор успеет повернуться на  $90^\circ$ , и поток статора  $\Phi_1$  направлен вдоль оси полюса ротора противоположно основному потоку  $\Phi_0$ . Таким образом, поток статора при индуктивной нагрузке ослабляет поле машины и реакция якоря оказывает продольно-размагничивающее действие.

При емкостной нагрузке (рис. 4.7в) ток статора опережает ЭДС на  $90^\circ$  и ток будет максимальным тогда, когда ротор еще не довернется до вертикального положения на  $90^\circ$ , и потоки статора и обмотки возбуждения будут совпадать. При этом магнитное поле машины усиливается, реакция якоря – продольно-намагничивающая.

При смешанной нагрузке, к примеру, активно-индуктивной  $R-L$ , ротор успеет повернуться на некоторый угол  $\varphi_1$  прежде, чем ток статора  $I_1$  достигнет максимума (рис. 4.8). Из векторной диаграммы МДС видно, что вектор МДС реакции якоря отстает от ЭДС  $E_0$  на угол  $\varphi_1$ . Для анализа разложим МДС реакции якоря на составляющие по продольной и поперечной осям машины.

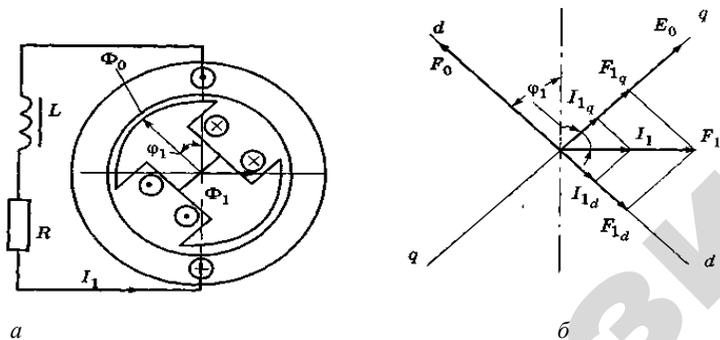


Рис. 4.8. Реакция якоря синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке:  
а – положение ротора, б – векторная диаграмма токов и МДС

$$F_{1d} = F_1 \sin \varphi_1; \quad F_{1q} = F_1 \cos \varphi_1; \quad (4.1)$$

Следует отметить, что магнитное сопротивление явнополюсной синхронной машины по продольной оси меньше, чем по попереч-

ной. Это объясняется тем, что по продольной оси воздушный зазор меньше, чем при поперечной. Поэтому при расчете магнитных потоков, применяют поправочные коэффициенты  $K_d$  и  $K_q$ , которые называются коэффициентами реакции якоря.

$$\Phi_{1d} = K_d \Phi_1 \sin \varphi_1, \quad \Phi_{1q} = K_q \Phi_1 \cos \varphi_1. \quad (4.2)$$

Коэффициенты реакции якоря зависят от значения воздушного зазора, отношения ширины полюсного наконечника к полюсному делению и могут принимать следующие значения:  $K_d = 0,15 \div 0,75$ . В неявнополюсной машине  $K_d = K_q = 1$ , потому что магнитное сопротивление по окружности одинаково.

Таким образом, при смешанной нагрузке в машине действует как продольная, так и поперечная реакции якоря. При активно-индуктивной нагрузке продольная составляющая ее направлена встречно, а при активно-емкостной – согласно основному магнитному потоку.

#### Контрольные вопросы:

1. В чем состоит явление реакции якоря?
2. Каково действие реакции якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузках синхронного генератора?

## 4.6. УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

### 4.6.1. Уравнение напряжений синхронного генератора

Напряжение синхронного генератора определяется результирующим магнитным потоком, который можно разложить на следующие составляющие:

1. Созданный обмоткой возбуждения основной магнитный поток  $\Phi_0$ , который наводит основную ЭДС машины  $E_0$ .
2. Поток реакции якоря по продольной оси  $\Phi_{1d}$ , который наводит ЭДС реакции якоря  $E_{1d}$ :



Порядок построения.

1. Откладываем вектор  $E_0$ .
2. Под углом  $\psi_1$  откладывается вектор тока  $I_1$ .
3. Так как нагрузка активно-индуктивная, продольная составляющая

реакции якоря  $E_{1d}$  направлена противоположно основной ЭДС  $E_0$ .

4. С конца вектора  $E_{1d}$  под углом  $90^\circ$  откладываем вектор поперечной составляющей реакции якоря. Он пойдет в сторону отставания от вектора тока  $I_1$ , так как созданный им магнитный поток поперечной реакции якоря по напряжению совпадает с ним.

5. ЭДС рассеяния  $E_{1s}$  будет перпендикулярна вектору тока  $I_1$  согласно формуле (4.5).

6. Падение напряжения на активном сопротивлении  $I_1 r_1$  всегда направлено встречно вектору тока.

Соединив начало вектора  $E_0$  с концом вектора  $I_1 r_1$ , получим вектор напряжения генератора.

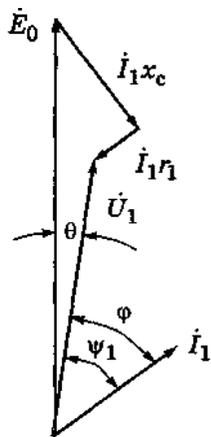


Рис. 4.10. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке

Для неявнополюсного генератора векторная диаграмма проще (рис. 4.10). Она строится по уравнению (4.10). Вектор  $I_1 x_1$  перпендикулярен вектору тока  $I_1$ .

Следует отметить, что векторные диаграммы на рис. 4.9 и 4.10 отражают качественную сторону явлений. В расчетах следует использовать диаграммы, в которых учтено насыщение машины. Одна из них названа диаграммой Потье. Она используется для определения параметров неявнополюсных синхронных машин.

К примеру, необходимо найти магнитодвижущую силу обмотки возбуждения, чтобы напряжение генератора при нагрузке  $I_1$  с  $\cos \varphi$  было равно  $U_1$ . Для построения необходимо знать магнитную характеристику или характеристику холостого хода машины (см. табл. 4.1) и параметры обмотки статора: индуктивное сопротивление  $x_1$  (см. п. 4.7.2), активное сопротивление обмоток, количество витков и обмоточный коэффициент.

Порядок построения (рис. 4.11):

1. Откладываем в масштабе векторы  $U_1$  и  $I_1$  под углом  $\varphi$  друг к другу.
2. Прибавив к вектору  $U_1$  падение напряжения на обмотке статора  $I_1 r_1$

и ЭДС рассеяния, получим ЭДС  $E'$ , которая наведена совместным действием потоков обмотки возбуждения  $\Phi_0$  и потоком реакции якоря  $\Phi_1$ :

$$\Phi_0 = \Phi' - \Phi_1, \quad (4.11)$$

где  $\Phi'$  – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения и реакцией якоря, Вб.

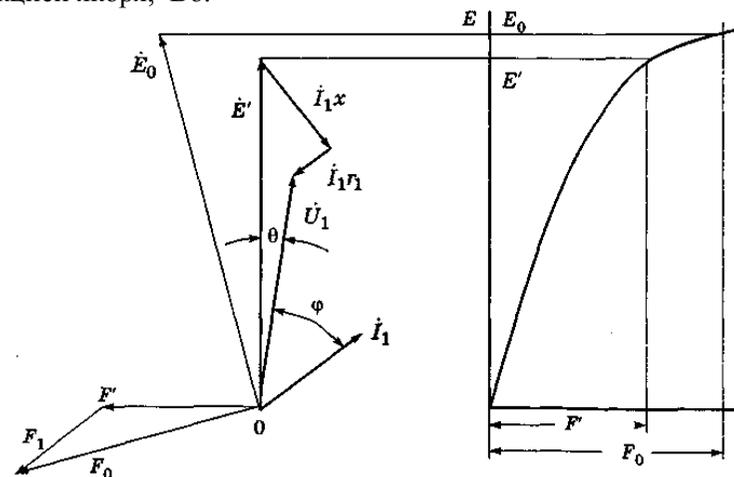


Рис. 4.11. Векторная диаграмма Потье синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке

Перейдя к магнитодвижущим силам, получим:

$$\vec{F}_o = \vec{F}' - \vec{F}_1, \quad (4.12)$$

где  $\vec{F}_o$  – МДС обмотки возбуждения, А;

$\vec{F}_1$  – МДС реакции якоря, А;

$\vec{F}'$  – результирующая МДС обмотки возбуждения и реакции якоря, А.

3. Отложив на оси ординат значение  $E'$ , получим на оси абсцисс значение МДС  $F'$ . Направление вектора  $F'$  – под углом  $90^\circ$  к вектору  $E'$ .

4. От конца вектора  $\vec{F}'$  отнимаем вектор МДС реакции якоря  $\vec{F}_1$ , направление которого совпадает с направлением вектора тока  $I_1$ .

5. Соединив точку  $O$  с концом вектора  $\vec{F}_1$ , получим вектор МДС обмотки возбуждения  $F_o$ .

6. Значение ЭДС  $E_o$  определится по характеристике, а направление – под углом  $90^\circ$  к вектору  $F_o$ .

### Контрольные вопросы:

1. Какие электродвижущие силы наводят в обмотке статора явноплюсного синхронного генератора магнитные потоки реакции якоря и потоки рассеяния и каким индуктивным сопротивлениям они эквивалентны?

2. Поясните принципы построения векторной диаграммы.

## 4.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ

### 4.7.1. Характеристики синхронного генератора

Как и генератор постоянного тока, синхронный генератор имеет пять характеристик: холостого хода, короткого замыкания, внешнюю, регулировочную и нагрузочную.

Характеристика холостого хода представляет зависимость напряжения генератора от тока возбуждения, при постоянной частоте вращения и токе нагрузки равным нулю  $U = f(I_B), n = \text{const}, I_1 = 0$ . Схема опыта приведена на рис. 4.12а, сама характеристика – на рис. 4.12б. Так как нагрузки нет ( $I_1 = 0$ ), следовательно, потоки реакции якоря и рассеяния наводиться не будут, и, согласно уравнению (4.6) и (4.10),  $U_1 = E_o$ .

Характеристика холостого хода синхронного генератора имеет прямолинейный и криволинейный участки, что связано с насыщением стали магнитной системы.

Характеристики холостого хода различных синхронных генераторов, построенные в относительных единицах, похожи друг на друга, поэтому введено понятие нормальной характеристики, приведенной в таблице.

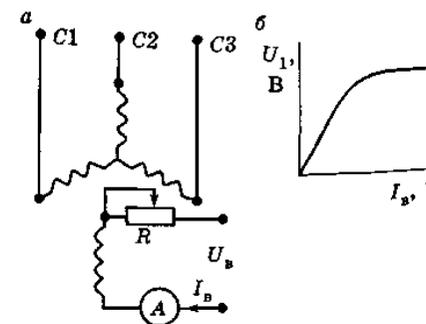


Рис. 4.12. Опыт холостого хода:  
а – схема опыта; б – характеристика холостого хода

Таблица

Нормальная характеристика синхронных генераторов							
Ток возбуждения, $I_B^*$	0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
ЭДС турбогенератора, $E_o^*$	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
ЭДС гидрогенератора, $E_o^*$	0,53	1	1,23	1,3	-	-	-

В таблице  $E_o^* = E_o / U_{1ном}$  – относительная ЭДС генератора;  
 $I_B^* = I_B / I_{Bном}$  – относительный ток возбуждения;  $I_{Bном}$  – ток возбуждения, при котором в режиме холостого хода напряжение генератора равно номинальному, А.

Из таблицы видно, что магнитная цепь турбогенераторов более насыщена, чем гидрогенераторов.

Характеристика короткого замыкания – это зависимость тока статора от тока возбуждения при замкнутых выводах обмотки статора и постоянной частоте вращения  $I_{1к} = f(I_B)$ , если  $n = const$  и  $Z_{нагр} = 0$ , где  $Z_{нагр}$  – сопротивление нагрузки, Ом.

Схема и характеристика опыта короткого замыкания приведены на рис. 4.13.

При коротком замыкании ток статора определяется по следующему выражению:

$$I_{1к} = \frac{E_o}{\sqrt{r_1^2 + x_c^2}} \quad (4.13)$$

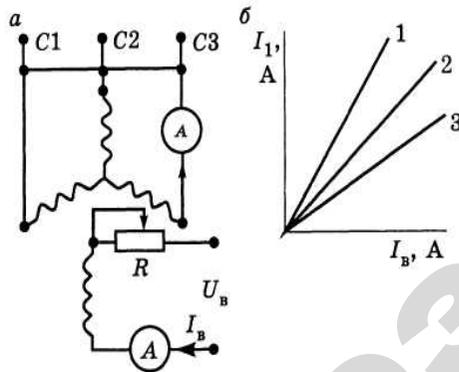


Рис. 4.13. Опыт короткого замыкания:  
 а – схема опыта; б – характеристика короткого замыкания

Это означает, что нагрузкой генератора является собственное сопротивление, поэтому машина будет работать на прямолинейном участке нагрузочной характеристики (см. рис. 4.16), и характеристика короткого замыкания будет прямолинейна.

Так как основной составляющей полного сопротивления генератора  $x_c$  является сопротивление реакции якоря  $x_a$ , характеристика трехфазного короткого замыкания (линия 3 на рис. 4.13б) идет ниже, чем однофазного и двухфазного (линии 1 и 2 на рис. 4.13б), потому что поток реакции якоря от трех фаз будет больше, чем от одной или двух фаз.

Характеристика короткого трехфазного замыкания, также как и характеристика холостого хода, строится в относительных единицах. Построенные вместе на одном графике, они дают возможность определить некоторые параметры синхронного генератора (более подробно см. п. 4.7.2).

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянном токе возбуждения  $U_1 = f(I_1)$ , если  $I_B = const$ ,  $n = const$  и  $\cos\phi_1 = const$ . Схема опыта и характеристики приведены на рис. 4.14.

На рис. 4.14б показаны внешние характеристики синхронного генератора для емкостной  $C$ , активной  $R$  и индуктивной  $L$  нагрузках.

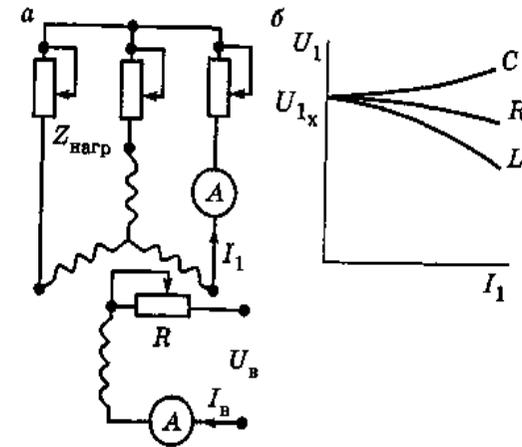


Рис. 4.14. Внешние характеристики синхронного генератора:  
 а – схема; б – характеристики

Характер кривых объясняется действием реакции якоря. При индуктивной нагрузке поток реакции якоря направлен встречно магнитному потоку обмотки возбуждения, поэтому с ростом нагрузки основная ЭДС и, следовательно, напряжение генератора будет уменьшаться.

При емкостной нагрузке поток реакции якоря усиливает основной магнитный поток, и напряжение увеличивается. При активной нагрузке поперечный поток реакции якоря искажает основной магнитный поток, тем самым ослабляя его. Поэтому с ростом нагрузки напряжение уменьшается, но не так сильно, как при индуктивной нагрузке.

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном напряжении  $I_b = f(I_1)$ , если  $U_1 = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  и  $\cos\varphi_1 = \text{const}$ .

Другими словами, регулировочная характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение осталось постоянным.

Схема опыта (такая же, как и для внешних характеристик) приведена на рис. 4.14а, регулировочные характеристики – на рис. 4.15.

Поведение кривых зависит от характера нагрузки и объясняется внешними характеристиками (см. рис. 4.14б). При индуктивной нагрузке, с ее ростом, внешняя характеристика идет вниз. Чтобы напряжение генератора осталось постоянным, ток возбуждения необходимо увеличить, поэтому регулировочная характеристика идет вверх. При емкостной нагрузке напряжение, наоборот, увеличивается, поэтому регулировочная характеристика идет вниз.

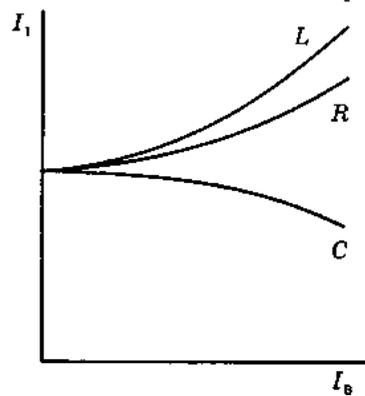


Рис. 4.15. Регулировочные характеристики синхронного генератора

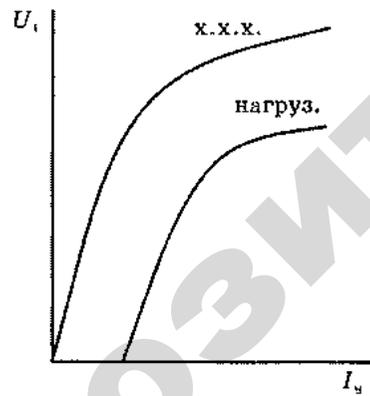


Рис. 4.16. Нагрузочная характеристика синхронного генератора

При активной нагрузке регулировочная характеристика также идет вверх.

Нагрузочной характеристикой называется зависимость тока генератора от тока возбуждения при постоянной нагрузке:  $U = f(I_b)$ , если  $I_1 \neq 0$  и  $I_1 \neq \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  и  $\cos\varphi_1 = \text{const}$ . Нагрузочная характеристика для активно-индуктивной нагрузки приведена на рис. 4.16. Она идет ниже характеристики холостого хода. Уменьшение напряжения происходит за счет реакции якоря, потоков рассеяния и падения напряжения в обмотке статора.

#### 4.7.2. Определение параметров синхронного генератора

С помощью характеристик можно определить полное сопротивление генератора  $x_c$ , индуктивное сопротивление обмотки статора  $x_1$ , сопротивление реакции якоря  $x_a$ , отношение короткого замыкания ОКЗ. Характеристики, построенные с векторной диаграммой, позволяют определить МДС реакции якоря и другие параметры.

Полное сопротивление синхронного генератора  $x_c$  определим из характеристик холостого хода и короткого замыкания, построенных в относительных единицах (рис. 4.17).

Выразим из формулы (4.13) полное синхронное сопротивление. При этом активным сопротивлением обмотки статора пренебрегаем:

$$x_c = \frac{E_o}{I_{1к}} \quad (4.14)$$

Перейдя к относительным единицам, получим отношение отрезков AC к BC (рис. 4.17).

$$x_c^* = \frac{E_o^*}{I_{1к}^*} = \frac{AC}{BC} \quad (4.15)$$

Получим полное сопротивление синхронного генератора в относительных единицах. В именованных единицах

$$x_c = x_c^* \left( \frac{U_H}{I_H} \right) \quad (4.16)$$

В явнополюсных машинах отношение указанных отрезков дает полное сопротивление синхронной машины по продольной оси.

Из рис. 4.17 можно определить также отношение короткого замыкания (ОКЗ), которое представляет собой отношение тока возбуждения, соответствующее номинальному напряжению при холостом ходе  $I_{\text{ВОНОМ}}^*$ , к току возбуждения в опыте короткого замыкания, соответствующему номинальному току  $I_{\text{ВКНОМ}}^*$ :

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_{\text{ВОНОМ}}^*}{I_{\text{ВКНОМ}}^*} = \frac{OC}{OD}. \quad (4.17)$$

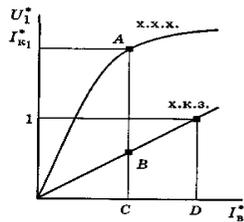


Рис. 4.17. Определение полного сопротивления синхронного генератора

По ОКЗ судят о свойствах синхронной машины. Малое значение ОКЗ получается при большом полном сопротивлении синхронной машины. Это означает, что воздушный зазор малый и не требуется большой МДС обмотки возбуждения для проведения магнитного потока. Поэтому машины с малым ОКЗ имеют меньшие габариты и, следовательно, дешевле, чем машины с большим ОКЗ. Но зато они имеют большие колебания напряжения при изменениях нагрузки и менее устойчивы при параллельной работе.

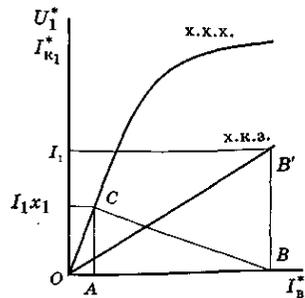


Рис. 4.18. Определение МДС реакции якоря

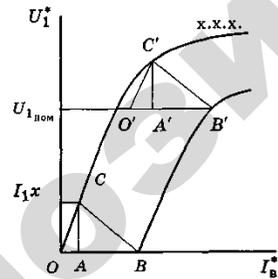


Рис. 4.19. Определение индуктивного сопротивления обмотки статора

Также, используя характеристики холостого хода и короткого замыкания, можно определить МДС реакции якоря (рис. 4.18) в масштабе тока возбуждения ( $F = I_{\text{в}}W$ ).

*Порядок определения МДС:*

1. На оси ординат откладываем ток  $I_1$ , для которого надо найти МДС реакции якоря.
2. Ординату тока  $I_1$  продолжим до пересечения с характеристикой короткого замыкания (точка  $B'$ ) и опустим перпендикуляр на ось абсцисс (точка  $B$ ). Полученный отрезок  $OB$  представляет собой ток возбуждения, необходимый для компенсации падения напряжения, вызванного реакцией якоря и потоком рассеяния:

$$OB = F_1 + F_{1\delta}, \quad (4.18)$$

где  $F_{1\delta}$  – МДС потоков рассеяния, А.

3. На оси ординат отложим ЭДС рассеяния, равную  $E_{1\delta} = I_1 x_1$ , и по характеристике холостого хода найдем ток возбуждения (МДС потоков рассеяния), необходимый для компенсации падения напряжения от потоков рассеяния (отрезок  $OA$ ).

4. Согласно формуле (4.18) МДС реакции якоря определяем как разность отрезков  $OB$  и  $OA$  – отрезок  $AB$ .

С помощью характеристик холостого хода и нагрузочной можно определить индуктивное сопротивление обмоток статора  $X_1$  (рис. 4.19).

*Порядок определения.*

1. Проводим ординату, равную номинальному напряжению генератора  $U_{1\text{ном}}$ , до пересечения с нагрузочной характеристикой (точка  $B'$ ).

2. С точки  $B'$  влево откладываем отрезок  $O'B'$ , равный  $OB$ . В точке  $B$  напряжение равно нулю, а ток  $I_1$  равен току нагрузки. Следовательно, можно сказать, что

$$O'B' = OB = F_1 + F_{1\delta}.$$

3. С точки  $O'$  проведем прямую, параллельную отрезку  $OC$ , до пересечения с характеристикой холостого хода (точка  $C'$ ).

4. Получим треугольник  $A'C'B'$ , равный треугольнику  $ACB$  и подобный треугольнику  $ACB$  на рис. 4.18. Следовательно, отрезок  $A'C' = I_1 x_1$  и

$$x_1 = \frac{A'C'}{I_1} . \quad (4.19)$$

Вследствие насыщения машины сопротивление, определенное по формуле (4.19), несколько больше действительного. Для явнополюсных машин его следует увеличить в 1,1–1,3 раза, а в неявнополюсных – в 1,05–1,5 раза.

#### Контрольные вопросы:

1. Почему характеристика короткого замыкания синхронной машины имеет вид прямой линии?
2. Почему внешняя характеристика синхронного генератора при активной и индуктивной нагрузках идет вниз, а при емкостной – вверх?
3. Почему регулировочную характеристику необходимо рассматривать вместе с внешней?
4. Почему при увеличении нагрузки, чтобы напряжение не изменялось, необходимо изменять ток возбуждения?

#### 4.8. ПОТЕРИ И КПД СИНХРОННЫХ МАШИН

Потери синхронного генератора иллюстрируются энергетической диаграммой, приведенной на рис. 4.20. Из диаграммы видно, что потери синхронного генератора состоят из следующих видов:

- 1) потери на возбуждение  $\Delta P_{\text{в}}$ , которые зависят от способа возбуждения. При возбуждении от генератора постоянного тока, сочлененного с валом машины, учитываются все потери генератора постоянного тока;
- 2) механические потери  $\Delta P_{\text{мех}}$ , (потери на трение в подшипниках и потери на вентиляцию), зависящие от частоты вращения;
- 3) магнитные потери  $\Delta P_{\text{м}}$  в основном имеющие место в сердечнике статора, который перемещается полем ротора;

4) электрические потери  $\Delta P_{\text{э}}$  (имеют место в обмотках статора):

$$\Delta P_{\text{э}} = m I_1^2 r_1 ; \quad (4.20)$$

5) добавочные потери  $\Delta P_{\text{доб}}$ , которые учитывают потери на пульсацию магнитного потока, потери, вызванные поверхностным эффектом и пр. Они равны 0,25–0,5 % полезной мощности генератора. Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} . \quad (4.21)$$

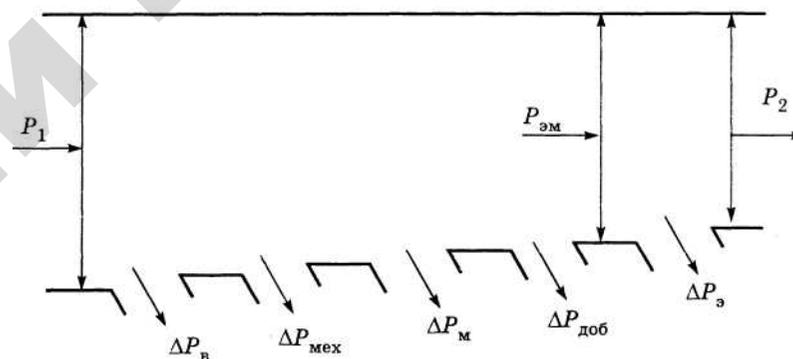


Рис. 4.20. Энергетическая диаграмма синхронного генератора

Он зависит от значения и характера нагрузки. Для машины мощностью до 100 кВт он равен 80–90 %, для более мощных – он выше, и в особо крупных достигает 99 %.

#### Контрольные вопросы:

1. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
2. Что включают в себя потери на возбуждение?

## 4.9. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

### 4.9.1. Необходимость и условия включения синхронных генераторов на параллельную работу

Параллельная работа синхронных генераторов повышает надежность энергосистемы, дает возможность регулировать нагрузку для обеспечения стабильной частоты тока.

Практически все электростанции РБ объединены в единую систему. Это значит, что все генераторы работают либо параллельно, либо в кольце. Поэтому мы будем исследовать параллельную работу одного генератора с сетью бесконечной мощности, то есть будем считать параметры сети, напряжение  $U_c$  и частоту тока  $f_c$  постоянными.

Для того, чтобы включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью, необходимо выполнение следующих условий:

- равенство напряжения сети и генератора;
- одинаковые частоты тока генератора и сети;
- одинаковый порядок чередования фаз.

Несоблюдение одного из выше указанных условий приводит к появлению уравнительных токов, что может создать аварийную ситуацию.

Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее всем указанным условиям, называют синхронизацией.

### 4.9.2. Способы включения синхронных генераторов на параллельную работу

Различают точную синхронизацию и самосинхронизацию. При точной синхронизации генератор приводят в состояние, отвечающее вышеуказанным условиям, для чего используют прибор, называемый синхроскопом. Устройство прибора очень простое: он представляет собой 3 лампы накаливания, которые могут включаться по двум схемам: на потухание и бегущий огонь. Схемы приведены на рис. 4.21.

При включении ламп по схеме (рис. 4.21а) в идеальном случае, когда все условия соблюдаются, лампы гореть не должны. Наиболее сложно при включении добиться равенства частот напряжений генератора и сети. Поэтому векторы напряжений сети будут вращаться с частотой  $\omega_c$ , а векторы напряжений генератора – с частотой  $\omega_1$ .

По мере совпадения векторов, лампы гаснут. В этот момент необходимо производить включение.

При настройке синхроскопа на бегущий огонь в момент включения на одной из ламп напряжение должно быть равно нулю. На векторной диаграмме (рис. 4.21б), указанная лампа включена в фазу А. Две другие лампы будут находиться под линейным напряжением и гореть одинаковым накалом. Если частота напряжения сети не равна частоте напряжения генератора, предположим, больше ее ( $f_c > f_1 \rightarrow \omega_c > \omega_1$ ), векторы напряжений генератора и сети начнут расходиться.

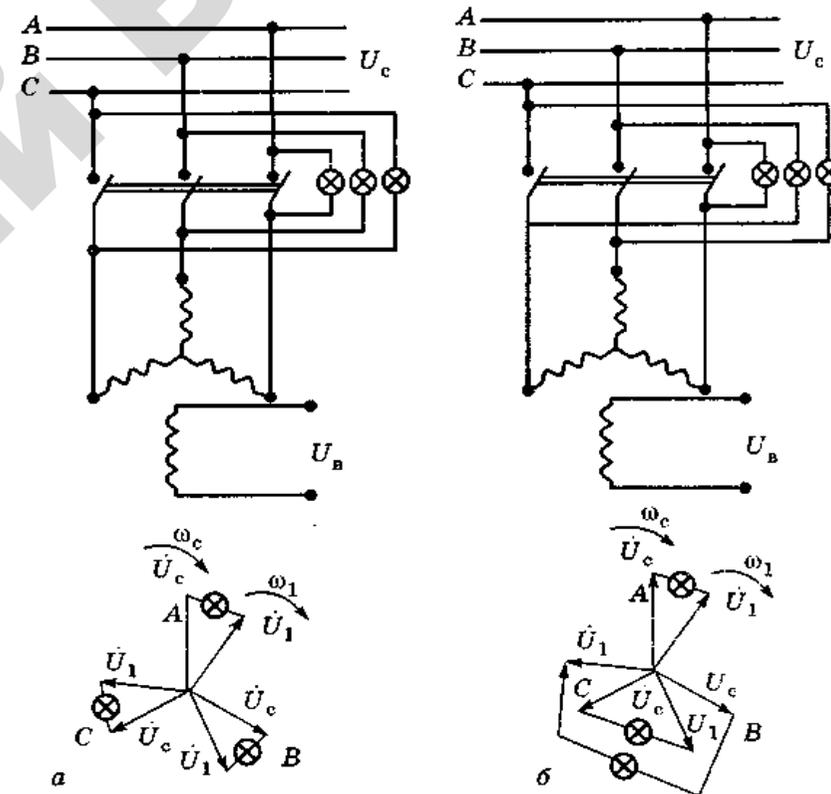


Рис. 4.21. Схемы включения ламп при точной синхронизации: а – на потухание; б – на бегущий огонь

Вектор напряжения сети  $U_c$  будет опережать вектор напряжения генератора  $U_1$ , лампа в фазе  $A$  будет загораться, лампа, включенная между фазами  $C$  сети и  $B$  генератора, – гаснуть и лампа между фазами  $B$  сети и  $C$  генератора – загораться ярче. После затухания лампы между фазами  $C$  сети и  $B$  генератора будет гаснуть третья лампа. Таким образом, темное пятно, наблюдаемое в лампах в момент потухания, будет поочередно обегать лампы, создавая зрительное впечатление вращательного света. Направление вращения света будет зависеть от того, какая частота больше – генератора или сети, что позволяет регулировать частоту вращения подключаемого генератора. В этом преимущество включения синхроскопа на бегающий огонь перед схемой на потухание.

На электростанциях, когда частота тока колеблется в широких пределах, а также при авариях точную синхронизацию осуществить сложно. В таких случаях может быть использован метод самосинхронизации. Он заключается в том, что ротор невозбужденного генератора раскручивают до частоты вращения, близкой к синхронной, затем генератор подключается к сети, включается обмотка возбуждения и генератор втягивается в синхронизм.

Ситуация, когда обмотка статора подключена к сети, а обмотка возбуждения не включена, является нежелательной: наблюдаются толчок тока, снижение напряжения в сети, возникают перенапряжения в обмотке ротора. Толчок тока имеет место, потому что напряжение генератора равно нулю, а активное сопротивление обмотки статора небольшое. Возникший при этом ток приводит к резкому (на 20–40 %) снижению напряжения в сети. Для того, чтобы избежать перенапряжений в обмотке ротора, ее замыкают на некоторое сопротивление. До подачи возбуждения на вал будут действовать: асинхронный момент при наличии демпферной обмотки (см. рис. 4.3), реактивный момент в явнополюсной машине (см. рис. 4.33). После включения обмотки возбуждения появляется дополнительно и синхронизирующий момент, и машина втягивается в синхронизм.

#### 4.9.3. Мощность синхронного генератора, подключенного к сети

Электромагнитная мощность синхронного генератора равна полезной мощности, отдаваемой в сеть, за вычетом электрических потерь в обмотках (рис. 4.20).

$$P_{эм} = P_2 - \Delta P_3 = mU_1 I_1 \cos \varphi - mI_1^2 r_1, \quad (4.22)$$

где  $m$  – количество фаз;

$\Psi$  – угол между током  $I_1$  и напряжением  $U_1$ , град;

$U_1$  – напряжение генератора, оно равно напряжению сети, В.

Допустим, что генератор работает на сеть бесконечной мощности. Это означает, что напряжение сети и ее частота постоянны, то есть  $U_c = \text{const}$  и  $f_c = \text{const}$ . Кроме того, будем считать, что сопротивление обмоток статора равно нулю. Тогда электромагнитная мощность будет равна полезной мощности:

$$P_{эм} = P_2 = mU_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (4.23)$$

и векторная диаграмма (рис. 4.9) примет упрощенный вид (рис. 4.22).

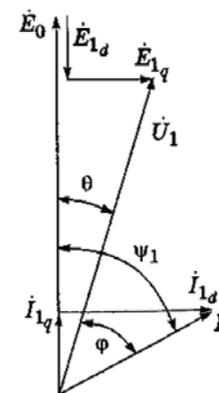


Рис. 4.22. Упрощенная векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

Из векторной диаграммы (рис. 4.22) видно, что

$$\varphi = \psi_1 - \theta. \quad (4.24)$$

Учитывая, что

$$\cos(\psi_1 - \theta) = \cos \psi_1 \cos \theta + \sin \psi_1 \sin \theta, \quad (4.25)$$

подставим тригонометрическую формулу (4.25) в выражение (4.20):

$$P_{эм} = mU_1 I_1 \cos \psi_1 \cos \theta + mU_1 I_1 \sin \psi_1 \sin \theta. \quad (4.26)$$

Из рис. 4.22 видно, что

$$I_1 \cos \Psi_1 = I_{1q}, \quad I_1 \sin \Psi_1 = I_{1d}, \quad (4.27)$$

В свою очередь:

$$I_{1q} = \frac{E_{1q}}{x_q}, \quad I_{1d} = \frac{E_{1d}}{x_d},$$

Рассмотрев прямоугольный треугольник на рис. 4.22, гипотенузой которого является вектор  $\dot{U}_1$ , а катетами –  $\dot{E}_{1q}$  и  $\dot{E}_o - \dot{E}_{1d}$ , выясним:

$$\dot{E}_{1q} = \dot{U}_1 \sin \theta; \quad \dot{E}_{1d} = \dot{E}_o - I_1 \cos \theta. \quad (4.28)$$

Подставляем уравнение (4.28) в (4.27) и полученное выражение в формулу (4.26):

$$P_{эм} = mU_1 \frac{U_1 \sin \theta}{x_q} \cos \theta + mU_1 \frac{E_o - U_1 \cos \theta}{x_d} \sin \theta. \quad (4.29)$$

Сделав преобразования и учтя, что

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta, \quad (4.30)$$

получим окончательное выражение электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = \frac{mE_o U_1}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (4.31)$$

Из уравнения (4.27) видно, что электромагнитная мощность явнополюсного синхронного генератора состоит из 2 частей: первая часть (основная) связана с возбуждением в машине и зависит от ЭДС  $E_o$ , вторая с возбуждением не связана, существует при отсутствии возбуждения и обусловлена наличием в явнополюсной машине магнитного момента из-за стремления ротора ориентироваться по оси магнитного поля (подобно магнитной стрелке). Вторая часть называется реактивной составляющей электромагнитной

мощности. В неявнополюсной машине из-за того, что  $x_q = x_d$ , реактивная составляющая электромагнитной мощности равна нулю.

#### 4.9.4. Угловая характеристика и синхронизирующая способность синхронного генератора

В формуле электромагнитной мощности (4.31) переменной величиной является угол  $\theta$ . Остальные величины  $x_q, x_d, m$  постоянны и определяются конструкцией машины;  $U_1$  равно напряжению сети, то есть практически постоянно, ЭДС  $E_o$  зависит от магнитного потока и частоты вращения генератора, следовательно, изменяется незначительно.

Таким образом, мощность генератора зависит от угла  $\theta$  между ЭДС  $E_o$  генератора и напряжением сети  $U_1$ . Поэтому этот угол называют нагрузочным углом генератора, и характеризует он положение ротора в пространстве. Если ось ротора совпадает с вектором вращающегося магнитного поля статора, угол  $\theta$  равен нулю. На рис. 4.23 показана зависимость электромагнитной мощности от нагрузочного угла  $P_{эм} = f(\theta)$ , которую называют нагрузочной характеристикой (кривая 3).

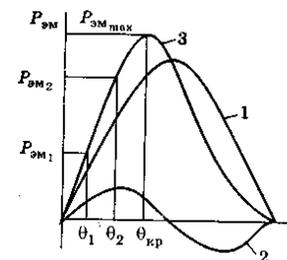


Рис. 4.23. Угловая характеристика синхронного генератора

На этом же рисунке показаны зависимости составляющих электромагнитной мощности: 1 – первая часть, изменяется пропорционально  $\sin \theta$ ; 2 – вторая часть, обусловленная магнитным моментом, изменяется пропорционально  $\sin 2\theta$ . При работе генератора в номинальном режиме приводной двигатель вращает ротор, и ось ротора опережает вектор вращающегося магнитного поля ста-

тора на угол  $\theta_1$ , что соответствует электромагнитной мощности  $P_{эм1}$ . При увеличении нагрузки нагрузочный угол увеличивается до значения  $\theta_2$ , что соответствует увеличению мощности генератора до  $P_{эм2}$ . При этом возникает момент, старающийся вернуть ротор в прежнее положение. В результате частота вращения генератора не изменяется, то есть генератор работает устойчиво. Но если нагрузка изменится так, что угол  $\theta$  будет больше критического  $\theta > \theta_{кр}$ , условие устойчивости нарушается, значит, дальнейшее увеличение угла будет соответствовать уменьшению мощности, частота вращения изменится и машина выйдет из синхронизма. Отношение

$$P_{\text{син}} = \frac{P_{эм2} - P_{эм1}}{\theta_2 - \theta_1} \quad (4.32)$$

называется синхронизирующей мощностью  $P_{\text{син}}$  генератора. Она характеризует синхронизирующую способность генератора – стремление ротора, выведенного из равновесия, вернуться назад.

#### 4.9.5. Регулирование реактивной мощности, отдаваемой в сеть синхронным генератором

Работа параллельно работающего синхронного генератора при изменении тока:

$$I_{\text{в}} \uparrow \xrightarrow{1} \Phi_0 \uparrow \xrightarrow{2} E_0 \uparrow \xrightarrow{3} U_1 \uparrow (U_1 > U_c) \xrightarrow{4} I_{\text{ур}} = \frac{U_1 - U_c}{x_c}. \quad (4.33)$$

Пояснение к схеме:

1. При увеличении тока обмотки возбуждения возрастает основной магнитный поток  $\Phi_0$ .
2. Рост  $\Phi_0$  приведет к увеличению ЭДС генератора  $E_0$ .
3. Согласно уравнениям (4.8) и (4.10), при увеличении  $E_0$  растет напряжение генератора  $U_1$  и оно становится больше напряжения сети  $U_c$ .
4. Возникает уравнивающий ток  $I_{\text{ур}}$ . Он будет реактивным (разность напряжений  $U_1 - U_c$  приложена к индуктивному сопротивлению  $x_c$ ) и течет от генератора в сеть, так как  $U_1 > U_c$ .

Это означает, что генератор генерирует реактивную мощность в сеть.

Если ток возбуждения уменьшится, то

$$I_{\text{в}} \downarrow \xrightarrow{1} \Phi_0 \downarrow \xrightarrow{2} E_0 \downarrow \xrightarrow{3} U_1 \downarrow (U_1 < U_c) \xrightarrow{4} I_{\text{ур}} = \frac{U_1 - U_c}{x_c}. \quad (4.34)$$

Уравнивающий ток будет направлен к генератору, то есть генератор будет потреблять реактивную мощность.

Зависимость тока статора  $I_1$  от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  называется V-образной характеристикой и при различной нагрузке генератора приведена на рис. 4.24.

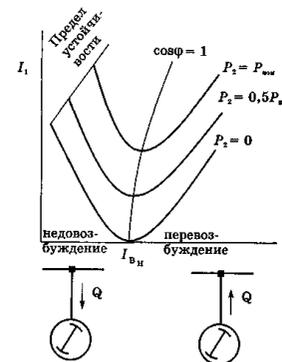


Рис. 4.24. V-образные характеристики синхронного генератора

При некотором токе возбуждения, называемом нормальным  $I_{\text{вн}}$ , ток статора минимальный. Коэффициент мощности в этом случае равен единице:  $\cos \varphi = 1$ .

При изменении тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  ток статора  $I_1$  увеличивается. Активная составляющая тока статора не изменяется в отличие от реактивной составляющей. При токе возбуждения больше  $I_{\text{вн}}$  (перевозбуждение) реактивный ток направлен от генератора к сети, то есть генератор посылает в сеть реактивную мощность. При токе возбуждения меньше  $I_{\text{вн}}$  (недовозбуждение) генератор потребляет из сети реактивную мощность.

При перевозбуждении реакция якоря – продольно намагничивающая, при недо возбуждении – продольно размагничивающая.

При увеличении нагрузки значение тока возбуждения  $I_{вн}$ , соответствующее  $\cos \varphi = 1$  (минимум тока якоря  $I_1$ ), увеличивается, потому что с ростом активной составляющей увеличиваются потери напряжения в генераторе.

С уменьшением тока возбуждения наступает такой момент, при котором магнитный поток оказывается настолько ослабленным, что нагрузочный угол  $\theta$  (рис. 4.24) превышает критическое значение, и генератор выпадает из синхронизма. На рис. 4.24 отмечен предел устойчивости работы синхронного генератора при недо возбуждении.

Наиболее выгодным для генератора является его работа с нормальным током возбуждения, то есть когда  $\cos \theta = 1$ . Но поскольку нагрузка энергосистемы имеет индуктивный характер (асинхронные двигатели, люминесцентные лампы и пр.), для уменьшения потерь энергии в линиях электропередачи (см. п. 4.10.4) генераторы работают в режиме перевозбуждения.

#### 4.9.6. Переходной процесс в синхронном генераторе при внезапном коротком замыкании

При внезапном коротком замыкании синхронного генератора появляется ударный ток. Рассмотрим этот процесс. При этом будем считать, что до короткого замыкания генератор работал в режиме холостого хода (ток в обмотке статора равен нулю). При коротком замыкании в обмотке статора появляется ток  $I_1$ , который создает свой поток  $\Phi_1$ , направленный встречно потоку обмотки возбуждения. Основной поток машины ослабляется, пересекая при этом успокоительную обмотку так, что в указанной обмотке наводится ЭДС. Так как обмотка замкнута, ЭДС приводит к появлению в ней тока. Ток, в свою очередь, наведет свой магнитный поток  $\Phi_y$ , направленный встречно основному потоку, еще более ослабляя его (рис. 4.25). Кроме того, в обмотке возбуждения будет также наводиться ЭДС, и ток, созданный этой ЭДС, будет направлен против тока возбуждения, уменьшая его.

В результате магнитный поток машины сильно ослабляется и сопротивление ее резко уменьшается:

$$x_c'' < x_c,$$

где  $x_c''$  – полное сопротивление синхронного генератора при внезапном коротком замыкании.

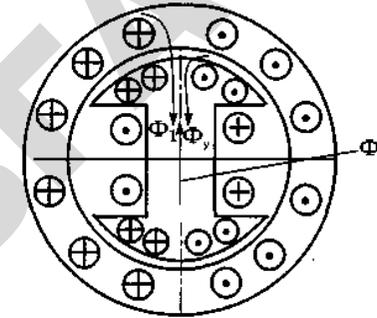


Рис. 4.25. Магнитные потоки синхронного генератора при внезапном коротком замыкании

Сопротивление в указанный момент времени называют сверхпереходным сопротивлением. Резкое уменьшение сопротивления приводит к резкому увеличению тока короткого замыкания, который называется ударным током короткого замыкания.

$$I_k'' = \frac{E_o}{x_c''}.$$

Через некоторое время ток в успокоительной обмотке уменьшается до нуля, магнитный поток и сопротивление генератора увеличатся, ток короткого замыкания станет равным

$$I_k' = \frac{E_o}{x_c'}.$$

где  $x_c'$  – переходное сопротивление короткого замыкания синхронного генератора,  $x_c' > x_c''$ .

Этот момент называется переходным.

Еще через некоторое время ток обмотки возбуждения восстановится до прежнего значения:

$$I_k = \frac{E_o}{x_c}.$$

Ток  $I_k$  называется установившимся током короткого замыкания.

Ударный ток  $I_k''$  создает опасность как для самого генератора, так и для элементов электрической сети, по которой он проходит. Он создает значительные электромагнитные силы, действующие на обмотку статора и ротор. Поэтому при расчете механической прочности генератора должен быть учтен ударный ток.

### Контрольные вопросы:

1. Для чего необходимо включение синхронных генераторов параллельно с сетью?
2. Каковы условия параллельного включения синхронных генераторов?
3. Какая составляющая формулы мощности синхронного генератора является основной?
4. Почему в неявнополюсной машине отсутствует реактивная составляющая мощности?
5. Что такое синхронизация генератора, включаемого на параллельную работу?
6. Почему с появлением тока нагрузки в цепи статора генератора приводной двигатель получает механическую нагрузку?
7. Что такое синхронизирующая способность синхронной машины и какими параметрами она оценивается?
8. Почему при внезапном коротком замыкании уменьшается индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси?
9. Чем опасно внезапное короткое замыкание для синхронного генератора?
10. Чем ограничивается область устойчивой работы синхронного двигателя?
11. Объясните процесс пуска синхронного двигателя.
12. Как регулируется коэффициент мощности синхронного двигателя?
13. Каково назначение синхронного компенсатора?

## 4.10. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 4.10.1. Основные сведения и принцип работы синхронного двигателя

Как известно, любая электрическая машина может работать как генератором, так и двигателем. Предположим, синхронный генератор работает на сеть большой мощности. При этом вектор магнитного потока обмотки возбуждения  $\Phi_o$  опережает вектор вращающегося магнитного поля статора  $\Phi_{вр}$  (тащит его за собой) (рис. 4.26а).

Уменьшаем приводной момент, нагрузочный угол уменьшается. Если пренебречь потерями, то при приводном моменте равном нулю нагрузочный угол также равен нулю (рис. 4.26б режим идеального холостого хода).

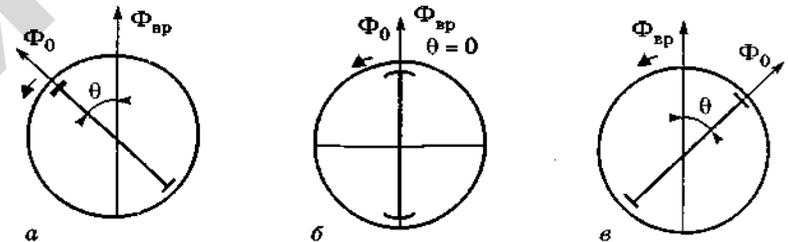


Рис. 4.26. Переход синхронной машины из режима генератора в режим двигателя: а – двигательный; б – идеального холостого хода; в – генераторный режимы

Если машину нагрузить, то ротор начнет отставать от вращающегося магнитного поля. Теперь вращающееся магнитное поле статора  $\Phi_{вр}$  «тащит» за собой поле обмотки возбуждения  $\Phi_o$ . Нагрузочный угол изменил свой знак. Машина начала работать в режиме двигателя, то есть потреблять из сети электрическую энергию и преобразовывать ее в механическую.

Электромагнитная мощность двигателя определяется по формуле (4.27), только значения нагрузочного угла в нем будут отрицательные. Угловую характеристику синхронного двигателя удобнее представить как зависимость момента  $M$  от угла  $\theta$ . Используя формулу (4.27), найдем момент

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{mE_o U_1}{\omega x_d} \sin \theta + \frac{mU_1}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (4.35)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ротора, рад/с.

Сама характеристика приведена на рис. 4.27. Также как механическая характеристика асинхронного двигателя, она имеет максимальное значение при  $\theta_{кр}$ . Участок устойчивой работы будет при изменении  $\theta$  от 0 до  $\theta_{кр}$ , потому что увеличение нагрузочного угла сопровождается увеличением момента. Если нагрузка двигателя превысит значение, при котором  $\theta > \theta_{кр}$ , синхронная частота двигателя нарушается и двигатель остановится. Отношение  $M_{max} / M_n = \lambda = 2 - 3$  называется перегрузочной способностью двигателя.

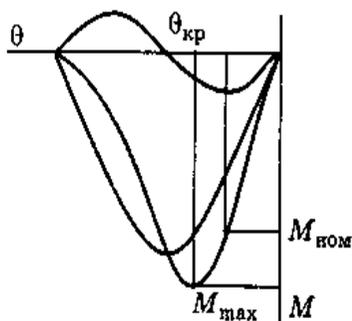


Рис. 4.27. Угловая характеристика синхронного двигателя

Синхронный двигатель может вращаться только с постоянной частотой вращения, поэтому он применяется для привода устройств, требующих стабильной частоты вращения.

По конструкции синхронные двигатели отличаются от синхронных генераторов воздушным зазором (у двигателей он меньше), шириной полюсного наконечника (у двигателей он составляет 90 % ширины полюсного деления, а у генераторов – только 70 %), сечением демпферной обмотки (у двигателей сечение обмотки больше, так как она используется для запуска). Поэтому промышленностью выпускаются серии генераторов и серии двигателей.

#### 4.10.2. Пуск синхронных двигателей

Синхронный двигатель невозможно запустить прямым включением, потому что ротор обладает инерцией, а вращающееся магнитное поле статора «раскручивается» мгновенно. Поля ротора и статора не могут войти в «зацепление» и проскакивают друг относительно друга. Поэтому для пуска используются: разгонный двигатель, регулируемый частотный преобразователь (частотный пуск) и короткозамкнутая обмотка (асинхронный пуск).

Разгонный двигатель раскручивает ротор синхронного двигателя до частоты вращения, близкой к синхронной. Обмотка статора разомкнута, а на обмотку возбуждения подано постоянное напряжение. Затем включается обмотка статора в сеть, и синхронный двигатель начинает работать. Разгонный двигатель выключают.

При частотном пуске регулируемым преобразователем плавно повышают частоту от нуля до номинальной. Частота вращения поля статора также плавно изменяется от нуля до синхронной. Ротор, следуя за полем статора, также плавно раскручивается. В процессе пуска магнитные поля ротора и статора все время в «зацеплении».

Асинхронный пуск аналогичен пуску асинхронного двигателя.

В полюсных наконечниках размещена пусковая обмотка (рис. 4.28), которая короткозамкнута так, как в асинхронном двигателе.

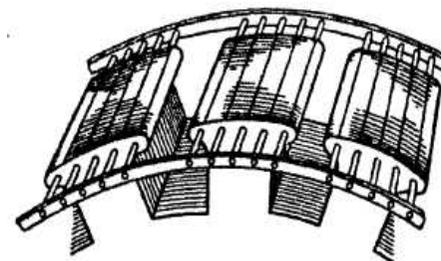


Рис. 4.28. Пусковая обмотка синхронного двигателя

При пуске на обмотку статора подают напряжение. Созданное статором вращающееся магнитное поле будет пересекать пусковую обмотку и наведет в ней ЭДС и ток. Момент, образованный взаимодействием тока и вращающегося магнитного поля, раскрутит ротор до частоты вращения, близкой к синхронной. При подаче напряжения на обмотку возбуждения ротор втягивается в синхронизм. При пуске обмотку возбуждения замыкают на какое-то сопротив-

ление во избежание опасных перенапряжений, которые возникают в обмотке при пересечении ее вращающимся полем статора.

Если мощность запускаемого двигателя соизмерима с мощностью трансформатора, питающего сеть, то применяют меры для снижения пускового тока.

#### 4.10.3. Работа синхронного двигателя при изменении тока возбуждения

Если в работающем синхронном двигателе увеличить или уменьшить ток возбуждения, появится дополнительный реактивный ток. В данных случаях в двигателе происходят такие же процессы, как и в генераторе (см. схемы: рис. 4.29 и 4.30).

V-образные характеристики двигателя отличаются от характеристик генератора тем, что в режиме холостого хода ток статора не равен нулю при  $I_B = I_{ВН}$  (рис. 4.29).

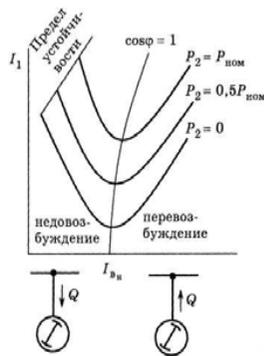


Рис. 4.29. V-образные характеристики синхронного двигателя

Как и генератор, при недовозбуждении двигатель потребляет реактивную энергию, а при перевозбуждении – отдает ее в сеть. Следовательно, синхронный двигатель может работать одновременно и в качестве двигателя и в качестве генератора реактивной мощности.

Это свойство синхронных двигателей используется, чтобы повысить коэффициент мощности, улучшить режим работы электрических сетей и снизить в них потери мощности.

Рассмотрим это на примере (рис. 4.30). Предположим, линия с сопротивлением  $R = 1 \text{ Ом}$  питает два двигателя с током 50 А каждый

и коэффициентом мощности  $\cos\varphi = 0,8$ . В первом случае – два двигателя асинхронных (рис. 4.30а), во втором – один синхронный, второй асинхронный (рис. 4.30б). Из расчета, приведенного на рис. 4.30, видно, что ток линии в первом случае больше на 20 %, а потери – на 36 %.

Таким образом, синхронные двигатели генерируют реактивную мощность, потребляемую асинхронным двигателем, и их целесообразно ставить рядом.

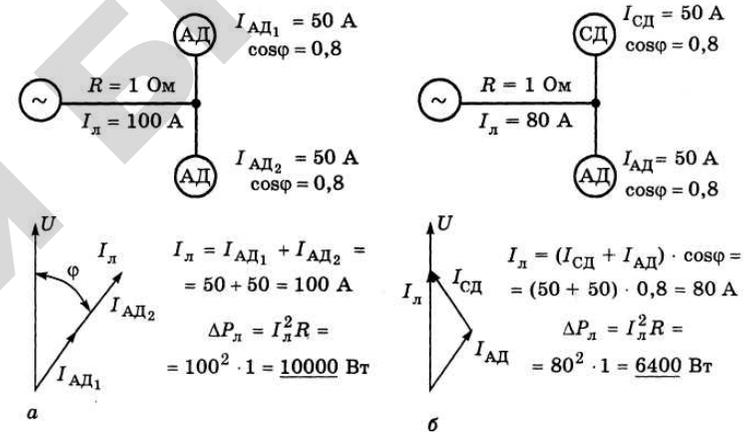


Рис. 4.30. К определению потерь мощности в линии электропередач: а – при работе двух асинхронных; б – при работе одного синхронного с перевозбуждением и одного асинхронного двигателей

#### 4.10.4. Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода, назначение которого – компенсировать реактивную мощность в линии электропередач. У него та же функция, что и у батареи конденсаторов, используемых в электрических сетях для улучшения  $\cos\varphi$ . Отличие в том, что батарея конденсаторов компенсирует лишь индуктивную составляющую реактивной мощности, а компенсатор может компенсировать как индуктивную, так и емкостную составляющие. Это зависит от значения тока возбуждения (см. рис. 4.29). При токе возбуждения больше нормального  $I_{ВН}$  он компенсирует индуктивную составляющую, то есть генерирует в сеть реактивную мощность.

Если же ток возбуждения меньше  $I_{вн}$ , он компенсирует емкостную составляющую – потребляет реактивную энергию.

На рис. 4.31 векторная диаграмма приведена для активно-индуктивной нагрузки, что имеет место практически во всех электрических сетях, поэтому вектор тока нагрузки  $I_{нагр}$  отстает от вектора напряжения сети  $U$  на угол  $\varphi$ .

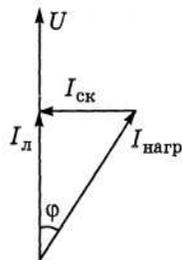


Рис. 4.31. Векторная диаграмма токов в линии при включении синхронного компенсатора

При включении синхронного компенсатора с перевозбуждением он начнет вырабатывать ток  $I_{ск}$ , вектор которого будет опережать напряжение  $U$  на, угол близкий к  $90^\circ$ . Если точно рассчитать ток возбуждения компенсатора, то ток в линии  $I_{л}$  будет совпадать по фазе с напряжением  $U$ , как это показано на рис. 4.32. Коэффициент мощности в этом случае равен единице,  $\cos\varphi = 1$ . Синхронные компенсаторы выпускаются промышленностью и имеют следующие конструктивные отличия от синхронного двигателя:

- не имеют выходного конца вала;
- вал не передает вращающий момент, поэтому он может быть механически непрочным;
- уменьшен воздушный зазор, поэтому уменьшены размеры обмотки возбуждения.

Синхронные компенсаторы – это электрические машины большой мощности от 10 до 100 тыс. кВт.

#### 4.10.5. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочие характеристики синхронного двигателя – это зависимости частоты вращения ротора  $n_2$ , потребляемой мощности  $P_1$ , полезного

момента  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , тока в обмотке статора  $I_1$  и КПД  $\eta$  от мощности на валу двигателя  $P_2$  при неизменных: напряжении сети  $U$ , частоте тока в сети  $f$  и токе возбуждения  $I_b$ ;  $n_2$ ,  $P_1$ ,  $M_2$ ,  $\cos\varphi$ ,  $I_1$ ,  $\eta = f(P_2)$ , если  $U = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $I_b = \text{const}$ .

Рабочие характеристики приведены на рис. 4.32. Частота вращения ротора  $n_2$  равна частоте вращения магнитного поля статора и представляет собой прямую линию параллельную оси ординат, потому что  $f = \text{const}$ .

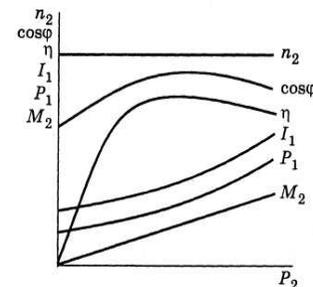


Рис. 4.32. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Момент на валу двигателя, равный  $M_2 = 9550 \frac{P_2}{n_2}$ , также прямая

линия, потому что  $n_2 = \text{const}$ .

Потребляемая мощность  $P_1$  зависит от потерь. Потери в стали постоянные, а потери в обмотках зависят от квадрата нагрузки. Поэтому зависимость  $P_1 = f(P_2)$ , имеет криволинейный характер.

Коэффициент мощности зависит от тока возбуждения. Если ток возбуждения настроить на номинальную нагрузку, то кривая примет вид, приведенный на рис. 4.32.

Ток в обмотке статора равен

$$I_1 = \frac{P_1}{mU\cos\varphi}. \quad (4.36)$$

Если  $\cos\varphi$  изменяется незначительно, то кривая  $I_1 = f(P_2)$  будет повторять кривую  $P_1 = f(P_2)$ .

КПД двигателя, также как потребляемая мощность, зависит от потерь. Где выпуклость кривой  $P_1 = f(P_2)$  направлена вниз, там же имеет место выпуклость кривой  $\eta = f(P_2)$ , направленная вверх.

#### 4.10.6. Преимущества и недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным

Преимуществами синхронного двигателя по сравнению с асинхронным являются:

1. Регулируемый коэффициент мощности. Синхронные двигатели могут работать с  $\cos \varphi = 1$  и могут компенсировать реактивную мощность, тем самым, разгружая электрическую сеть от реактивных токов и уменьшая потери мощности в ней.

2. Большая устойчивость к колебаниям напряжения, потому что электромагнитная мощность и, следовательно, момент пропорциональны питающему напряжению (4.35). У асинхронных же двигателей момент пропорционален квадрату напряжения. Там где асинхронный двигатель может остановиться из-за снижения напряжения в сети, синхронный двигатель будет продолжать работать.

3. Стабильная частота вращения ротора.

Недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным являются:

1. Наличие возбуждателя, что увеличивает стоимость машины.

2. Меньшая надежность работы из-за наличия щеточного контакта и более сложной конструкции.

3. Более сложный пуск.

Считается, что синхронные двигатели целесообразнее использовать при их мощности 200 кВт и более в установках, где не требуется частых пусков и регулирования частоты вращения (вентиляторы, компрессоры, дробилки и т. п.).

#### Контрольные вопросы:

1. Чем ограничивается область устойчивой работы синхронного двигателя?

2. Объясните процесс пуска синхронного двигателя.

3. Как регулируется коэффициент мощности синхронного двигателя?

4. Каково назначение синхронного компенсатора?

5. Каковы достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?

## 4.11. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 4.11.1. Реактивные двигатели

В основе работы реактивного двигателя лежит стремление явнополюсного ротора ориентироваться по оси магнитного поля (рис. 4.33).

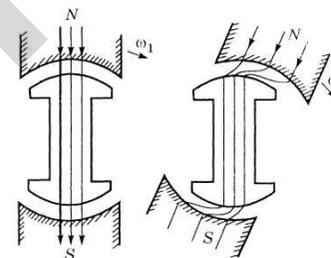


Рис. 4.33. Принцип возникновения момента в реактивном синхронном двигателе

Вращающееся магнитное поле статора представим в виде двух полюсов, которые вращаются с частотой  $\omega_1$ . Возникающий при этом момент выражен математически во второй части формулы (4.35):

$$M = \frac{mU_1}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

В реактивном синхронном двигателе не требуется обмотка возбуждения, а значит, не нужен возбуждатель. Момент двигателя будет тем больше, чем больше различие между сопротивлениями  $x_q$  и  $x_d$ . В обычных двигателях при отношении  $x_d / x_q = 1,5$  максимальное значение реактивного момента не превышает 25 % номинального. Поэтому для увеличения момента используют специальные конструкции роторов (рис. 4.34), у которых в стальном цилиндре делаются прорезы, залитые алюминием. Так как алюминий не проводит магнитный поток, в поперечном направлении магнитное сопротивление в 4–5 раз больше, чем в продольном. Это приводит

к увеличению момента. Алюминиевые прослойки замыкаются между собой и служат пусковой обмоткой.



Рис. 4.34. Разрез ротора четырехполюсного реактивного синхронного двигателя

Достоинства этих двигателей: простота конструкции, отсутствие возбуждателя и, следовательно, невысокая стоимость.

Реактивные двигатели нашли широкое применение в устройствах автоматики, звуко- и видеозаписи и в других установках, требующих постоянства частоты вращения.

#### 4.11.2. Гистерезисные двигатели

Статор гистерезисного двигателя такой же, как и обычного: создает вращающееся магнитное поле. Ротор (рис. 4.35) выполнен в виде кольца из магнитотвердого материала 1, насаженного на втулку 2, которая жестко соединена с валом 3.

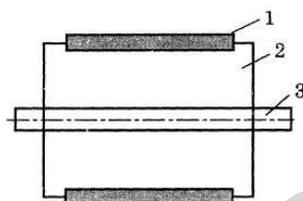


Рис. 4.35. Ротор гистерезисного двигателя:  
1 – кольцо из магнитотвердого материала; 2 – втулка; 3 – вал

Также как и при объяснении момента в реактивном двигателе, представим вращающееся магнитное поле в виде поворота двух полюсов с частотой  $n_1$  (рис. 4.36).

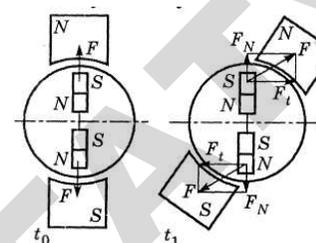


Рис. 4.36. Принцип возникновения момента в гистерезисном двигателе

Под воздействием внешнего поля ротор намагничивается: на стороне, обращенной к северному полюсу внешнего поля, возбуждается южный полюс ротора и, наоборот, на стороне, обращенной к южному полюсу внешнего поля, – северный полюс ротора. Возбуждение полюсов на роторе объясняется размещением частиц ферромагнитного материала, представляющих собой элементарные магниты, ориентированные по направлению магнитного поля. Между разноименными магнитами возникают силы притяжения  $F$ , которые при неподвижном поле (при  $t_0$ ) направлены перпендикулярно касательной окружности ротора и не создают вращающего момента. При повороте внешнего поля (момент времени  $t_1$ ) ротор не может мгновенно перемагнититься из-за магнитного запаздывания (гистерезиса), то есть поворот ферромагнитных частиц тормозится внутренними силами, которые у магнитотвердых материалов больше, чем у магнитомягких. В результате направление действия силы  $F$  смещается и возникает сила  $F_t$ , направленная по касательной окружности ротора, которая создает вращательный момент. Этот момент называется гистерезисным и не зависит от частоты вращения.

Так как магнитные материалы проводят электрический ток, в роторе возникают вихревые токи, которые, взаимодействуя с внешним полем, создают асинхронный момент  $M_a$  (тот же принцип, что и у асинхронного двигателя). В отличие от гистерезисного, асинхронный момент зависит от скольжения. Результирующий момент гистерезисного двигателя  $M$  равен сумме моментов асинхронного и гистерезисного:

$$M = M_r + M_a. \quad (4.36)$$

Механическая характеристика гистерезисного двигателя приведена на рис. 4.37, из которой видно, что гистерезисный двигатель может работать как в асинхронном, так и в синхронном режиме. Синхронный режим более экономичен, чем асинхронный, потому что асинхронный режим требует наличия вихревых токов, что связано с большими потерями в роторе.

Достоинства гистерезисных двигателей:

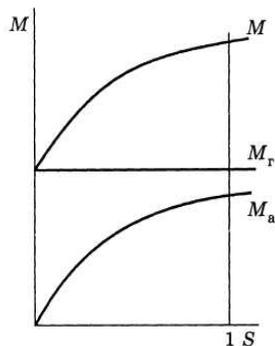


Рис. 4.37. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

1. Простота конструкции.
2. Бесшумность и надежность в работе.
3. Легкий пуск: сравнительно большой пусковой момент и малый пусковой ток ( $I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 1,3 - 1,4$ ).

4. Сравнительно высокий КПД.

Недостатки гистерезисных двигателей:

1. Низкий коэффициент мощности.
2. Качания при колебаниях нагрузки.
3. Высокая стоимость, диктуемая использованием дорогих магнитотвердых материалов.

#### 4.11.3. Шаговые двигатели

Шаговые двигатели служат для преобразования электрических импульсов напряжения в дискретные угловые или линейные перемещения — шаги. Наибольшее применение они получили в электроприводах с программным управлением.

Статор и ротор шагового двигателя выполняют явнополюсными. На статоре располагаются обмотки управления, которые поочеред-

но получают сигнал от коммутатора. Ротор может быть активным (с обмоткой возбуждения или постоянным магнитом) и пассивным (выполнен из магнитомягкого материала без обмотки возбуждения, как в реактивном двигателе).

Принцип работы рассмотрим на примере реактивного шагового двигателя (рис. 4.38).



Рис. 4.38. Схематичное пояснение принципа работы реактивного шагового двигателя

В момент времени  $t_1$  на обмотку статора подан сигнал, в результате которого магнитный поток, согласно правилу буравчика, создается парой полюсов, показанных на рис. Под воздействием реактивного момента ротор разворачивается по оси магнитного потока.

В момент времени  $t_2$  с коммутатора на обмотку статора приходит другой сигнал, в результате которого направление магнитного потока изменяется, и силы, действующие на ротор, разворачивают его в положение, указанное на рис.

В момент времени  $t_3$  сигнал снова изменяется, и ротор опять ориентируется по оси магнитного поля. У рассматриваемого двигателя ротор может за один оборот сделать 12 шагов. При увеличении количества полюсов ротора количество шагов увеличивается.

#### 4.11.4. Синхронные машины с постоянными магнитами

Магнитный поток у указанных машин создается постоянными магнитами. Так как в основном магниты располагаются на роторе, то в такой машине отсутствуют скользящие контакты. Синхронные машины с постоянными магнитами выпускаются небольшой мощностью и обладают следующими достоинствами:

- 1) простота изготовления и надежность;

- 2) высокий КПД (нет потерь мощности в обмотке возбуждения);
- 3) отсутствие возбудителя.

Недостатки синхронных машин с постоянными магнитами:

- 1) высокая стоимость (постоянные магниты дорогие);

2) сложное регулирование магнитного потока для генераторов, затрудняющее стабилизацию напряжения при изменениях нагрузки.

Широко распространены двигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском. Постоянные магниты могут иметь максимальное и радиальное расположение на роторе (рис. 4.39).

Аксиальное расположение применяют в двигателях мощностью до 100 Вт, с радиальным – до 500 Вт и более. При пуске таких двигателей магнитное поле ротора будет наводить ЭДС в обмотке статора, и по ней начинает течь ток.

При взаимодействии указанного тока и магнитного поля создается тормозной момент. На рис. 4.40 показана механическая характеристика двигателя с постоянными магнитами:  $M_{осн}$  – основ-

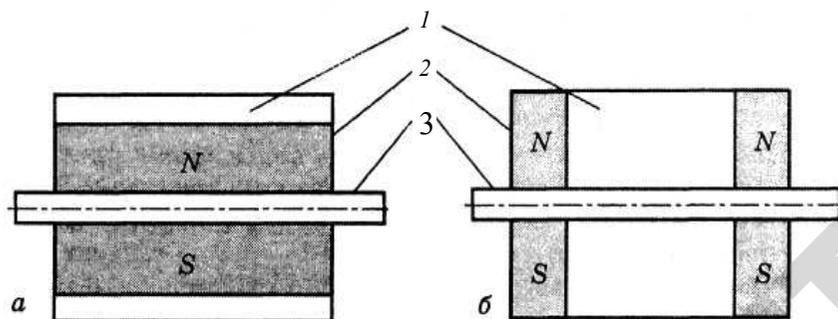


Рис. 4.39. Роторы двигателей с постоянными магнитами:

1 – пакет ротора с запрессованной в нем пусковой обмоткой; 2 – постоянные магниты; 3 – вал; а – радиальное расположение магнитов; б – аксиальное расположение магнитов

ной,  $M_T$  – тормозной,  $M_{рез}$  – результирующий моменты. При проектировании машины и выборе рабочего механизма необходимо учитывать действие тормозного момента.

Достоинства магнитоэлектрических двигателей: устойчивость работы в синхронном режиме и сравнительно высокие КПД и  $\cos\varphi$ . Недостаток: повышенная стоимость, из-за дороговизны постоянных магнитов.

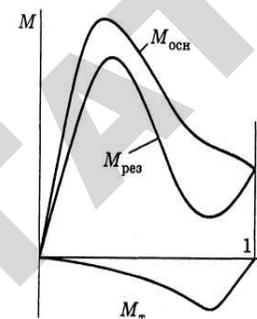


Рис. 4.40. Механическая характеристика двигателя с постоянными магнитами:  $M_{осн}$  – основной;  $M_{рез}$  – результирующий;  $M_T$  – тормозной моменты

Двигатели с постоянными магнитами используются в приборостроении, устройствах автоматики, где требуется постоянная частота вращения.

#### 4.11.5. Индукторные синхронные машины

Индукторные синхронные генераторы позволяют получить напряжение высокой частоты, сотен и даже тысяч герц. В индукторных генераторах магнитный поток не меняет своего знака, а только пульсирует. Происходит это из-за того, что статор и ротор имеют зубчатое строение (рис. 4.41). При вращении ротора, когда его зубцы и зубцы статора находятся друг против друга, сопротивление магнитному потоку наименьшее, магнитный поток  $\Phi_{max}$  максимальный (рис. 4.41б). В следующий момент времени ротор повернется, и его зубцы будут находиться против пазов статора, что будет соответствовать наименьшему значению магнитного потока  $\Phi_{min}$ . Эти изменения будут наводить ЭДС повышенной частоты в обмотке статора.

КПД такого генератора меньше, чем у обычных генераторов, из-за пульсаций магнитного потока, зато ротор не имеет обмотки возбуждения, которая расположена на статоре, что позволяет исключить скользящие контакты. Поэтому надежность такого генератора выше.

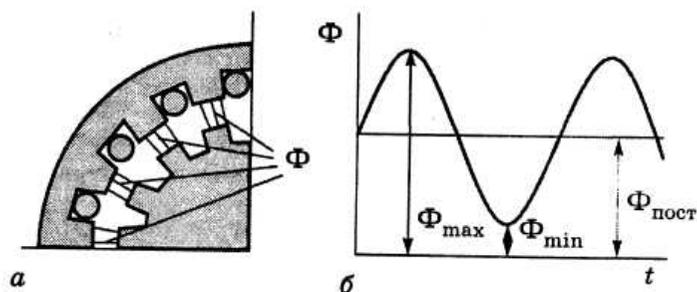


Рис. 4.41. Индукторный генератор:  
 а – разрез; б – график магнитного потока

Индукторная синхронная машина обратима, то есть может работать как двигатель. Индукторный синхронный двигатель позволяет получить малые частоты вращения, которые зависят от числа зубцов ротора.

#### Контрольные вопросы:

1. Объясните физическую сущность реактивного момента.
2. Объясните физическую сущность гистерезисного момента.
3. Объясните принцип работы реактивного шагового двигателя.
4. Каковы достоинства и недостатки синхронных машин с постоянными магнитами?
5. Для чего необходимы индукторные синхронные генераторы?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, Н. Н. Электрические машины и микромашины [Текст] / Н. Н. Александров. – М. : Колос, 1983. – 384 с.
2. Андрианов, В. Н. Электрические машины и аппараты [Текст] / В. Н. Андрианов. – М. : Колос, 1971. – 448 с.
3. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины [Текст] / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высшая школа, 1990. – 582 с.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины [Текст] / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
5. Кацман, М. М. Электрические машины [Текст] / М. М. Кацман. – М. : Академия, 2008. – 496 с.
6. Токарев, Б. Ф. Электрические машины [Текст] / Б.Ф.Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 657 с.
7. Подгайский, Г. Д. Электрические машины [Текст] : учеб. пособие / Г. Д. Подгайский, Н. Е. Шевчик. – Минск : Белорусская Энциклопедия им. Петруся Бровки, 2009. – 336 с.

## СТРУКТУРА ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ

1. Классификация, краткие сведения из истории развития электромашиностроения, номинальные данные и режимы работы, конструктивные формы электрических машин.

*Определения электрической машины и преобразователя; классификация по роду тока, назначению (генератор, двигатель, преобразователь, общего и специального назначения), мощности, напряжению; определение номинального (оптимального) режима, расшифровать обозначения на паспортной табличке S1–S8 и IP(XX).*

### **Машины постоянного тока**

2. Принцип действия и устройства и машин постоянного тока. Способы возбуждения машин постоянного тока.

*Пояснить закон электромагнитной индукции (рис.1.1). С помощью рис. 2.1 и формул (2.1) и (2.2) объяснить принцип действия генератора и двигателя постоянного тока. Охарактеризовать элементы конструкции: корпус, полюсы, обмотки возбуждения, подшипниковые щиты, магнитопровод, обмотка якоря, коллектор, щеточный механизм, вентилятор по схеме: название, назначение, место в машине, материал изготовления, особенности. Способы возбуждения (см. п. 2.2.7).*

3. Обмотки машин постоянного тока. Построить простую петлевую обмотку  $Z = 12, p = 2$ . Сложные обмотки и уравнительные соединения.

*Назначение обмотки возбуждения, месторасположение, устройство. Обмотка якоря: назначение, устройство, обмоточные шаги простых петлевой и волновой обмоток. Построить простую петлевую обмотку  $Z = 12, p = 2$ ; расчет обмоточных шагов и построение. Определение сложной обмотки, ее особенности. Магнитная несимметрия и уравнители первого рода (отсутствие несимметрии в волновой обмотке и ее причины): их назначение, устройство, количество. Уравнители второго рода в сложных обмотках.*

4. ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря машины постоянного тока. Уравнения равновесия ЭДС машины постоянного тока.

*Вывод формулы (2.18). Уравнения равновесия ЭДС машины постоянного тока (см. п.п. 2.5.2 и 2.7.1).*

5. Электромагнитный момент, развиваемый якорем машины постоянного тока. Уравнение моментов машины постоянного тока.

*Вывод формулы (2.24). Уравнение (2.83) моментов машины постоянного тока.*

6. Магнитная цепь машины постоянного тока. Основы расчета магнитной цепи, характеристика намагничивания, коэффициент насыщения.

*На разрезе машины показать, чем создается магнитный поток и по каким участкам он проходит. Схема расчета магнитной цепи, способ определения в схеме магнитного*

*потока, индукции, напряженности магнитного поля и МДС, необходимой для «проталкивания» магнитного потока через участки. Характеристика намагничивания: привести зависимость рис. 2.11, объяснить, почему сначала зависимость прямолинейна, а потом она теряет линейность. Расчет коэффициента насыщения, что он характеризует.*

7. Реакция якоря при установленных на геометрическую нейтраль щетках.

*На разрезе машины постоянного тока (рис.2.12) показать направления магнитных потоков, при этом помнить, чем создается магнитный поток и как он направлен (правило); разъяснить магнитную индукцию под полюсами.*

8. Реакция якоря при смещенных с геометрической нейтрали щетках. Влияние реакции якоря на работу машины и ее устранение.

*Реакция якоря при смещенных с геометрической нейтрали щетках показана на рис. 2.13; требуется пояснить, как изменится работа машины при увеличении или снижении основного магнитного потока, из-за реакции якоря, и отметить, к чему приведет поперечная реакция (вывод: см. п. 2.3.4.). Влияние реакции якоря на работу машины и ее устранение (см. п. 2.3.6).*

9. Причины искрения под щеткой в машинах постоянного тока. Оценка искрения (см. п. 2.4.1).

10. Прямолинейная и замедленная коммутация. Способы улучшения коммутации, ускоренная коммутация.

*Прямолинейная коммутация: определение коммутации, допущения при выводе формулы коммутации, вывод формулы, построение графика изменения тока в коммутируемой секции и его анализ (объяснить отсутствие искр). Замедленная коммутация: составляющие реактивной ЭДС в коммутируемой секции, причины их появления, добавочный ток коммутации, его влияние на изменение тока в коммутируемой секции, кривая замедленной коммутации, ее анализ (объяснить наличие искр). Способы улучшения коммутации: уравнение тока добавочной коммутации, его анализ с точки зрения уменьшения указанного тока, анализ составляющих реактивной ЭДС с целью их снижения, особо отметить создание специального коммутирующего поля в зоне коммутации (дополнительные полюсы, сдвиг щеток с нейтрали). Ускоренная коммутация: ее причина, кривая, условия появления искр при ускоренной коммутации (пояснить на кривой).*

11. Характеристики генератора независимого возбуждения.

*Схема генератора независимого возбуждения, его параметры. Характеристики: привести доказательства (формулы, логические построения и пр.) характера каждой зависимости.*

12. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения. Характеристики генератора параллельного возбуждения.

*Условия самовозбуждения, сам процесс самовозбуждения показать на графиках (рис. 2.27). Схема генератора, его параметры, характеристики: привести доказательства (формулы, логические построения и пр.) характера каждой зависимости.*

### 13. Характеристики генератора смешанного возбуждения.

*Схема генератора, его параметры. Назначение и особенности шунтовой и серийной обмоток. Характеристики: привести доказательства (формулы, логические построения и пр.) характера каждой зависимости.*

### 14. Потери и КПД двигателя постоянного тока.

*Энергетическая диаграмма. По каждому виду потерь: название, место в двигателе, формула расчета или причины их зависимости. Формула и пояснение КПД, зависимость КПД от нагрузки.*

### 15. Характеристики двигателя параллельного возбуждения. Область применения двигателей параллельного возбуждения.

*Схема двигателя, его параметры, характеристики: привести доказательства (формулы, логические построения и др.) характера каждой зависимости. Область применения двигателей (на основе его характеристик).*

### 16. Характеристики двигателя последовательного возбуждения. Область применения двигателей последовательного возбуждения.

*Схема двигателя, его параметры, характеристики: привести доказательства (формулы, логические построения и пр.) характера каждой зависимости. Область применения двигателей (на основе его характеристик).*

### 17. Характеристики двигателя смешанного возбуждения. Область применения двигателей смешанного возбуждения.

*Схема двигателя, его параметры, характеристики: привести доказательства (формулы, логические построения и пр.) характера каждой зависимости. Область применения двигателей (на основе его характеристик).*

### 18. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

*Формула частоты вращения двигателя. Вывод о параметрах регулирования. По каждому параметру: скоростные характеристики, диапазон регулирования и его границы, особенности способа.*

### 19. Пуск двигателей постоянного тока: прямое включение, от вспомогательного преобразователя и с помощью пускового реостата.

*Проблема пуска через уравнение равновесия ЭДС. Сложности при пуске мощного двигателя. Охарактеризовать прямой пуск, пуск с помощью пускового реостата и пуск при пониженном напряжении.*

### 20. Торможение двигателей постоянного тока: генераторное, динамическое, противовключением.

*Особенность электрического торможения; условия генераторного торможения, его достоинства, при каких условиях оно осуществимо; динамическое торможение: схема и скоростные характеристики; торможение противовключением: схема и скоростные характеристики.*

### 21. Универсальные коллекторные и вентильные двигатели, современные серии машин постоянного тока, тахогенераторы, сва-

рочные генераторы, машины с постоянными магнитами, исполнительные двигатели автоматических устройств.

*Пояснить, почему двигатель постоянного тока может работать на переменном токе. Схема универсального коллекторного двигателя: последовательное возбуждение. Преимущества и недостатки универсального коллекторного двигателя. Вентильные двигатели пояснить на примере обращенного двигателя (рис. 2.65). Современные серии машин постоянного тока: причины ввода серий, характеристика серий П, 2П и 4П. Тахогенераторы: назначение, устройство. Сварочные генераторы: вольтамперная характеристика сварочной дуги, генератор, наиболее ей соответствующий, генератор с расщепленными полюсами. Исполнительные двигатели автоматических устройств (см. п. 2.7.7).*

## Общие сведения о машинах переменного тока

### 22. Образование вращающегося магнитного поля при трехфазной системе.

*Четко сформулировать условия получения вращающегося магнитного поля от трехфазной системы. Знать особенность трехфазной системы и с помощью рис. 3.1 показать, что вектор магнитного потока за период  $T$  совершает поворот вокруг своей оси.*

### 23. МДС обмоток. МДС распределенной катушки с укороченным шагом при скосе пазов. Обмоточный коэффициент. МДС трехфазной обмотки.

*Показать, что магнитные силовые линии, созданные переменным током, протекающим в катушке, входят в сердечник статора перпендикулярно. Поэтому распределение магнитодвижущей силы в расточке статора прямоугольное, которое при разложении в ряд Фурье состоит из высших гармонических составляющих, отрицательно влияющих на работу машины. Пояснить физический смысл укорочения шага обмотки, зачем он нужен, вывод коэффициента укорочения, каким образом подавляются высшие гармоники при укорочении шага. Дать понятия сосредоточенной и рассредоточенной обмоток, вывод коэффициента распределения, каким образом подавляются высшие гармоники при распределении обмотки. Обмоточный коэффициент: формулы (3.22), (3.23). МДС трехфазной обмотки (см. п. 3.2.5).*

### 24. ЭДС обмоток (см. п. 3.3).

### 25. Рассчитать обмоточные данные и построить однослойную обмотку трехфазного асинхронного двигателя: $Z = 24$ , $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ .

*Дать структуру обмоток: виток – секция – катушечная группа – обмотка фазы. Типы обмоток, обмоточные данные и их расчет, построение обмотки по обмоточным данным.*

## Синхронные машины

26. Конструкция и принцип действия синхронных генератора и двигателя (см. п.п. 4.1 и 4.2).

27. Способы возбуждения синхронных машин (см. п. 4.3)

28. Реакция якоря трехфазного синхронного генератора при активной, индуктивной, емкостной и смешанной нагрузках.

Объясняются рис. 4.7 и 4.8. При этом объяснить, к чему приводит поперечная реакция якоря (аналогично с машиной постоянного тока: п. 2.3.4) и пояснить, почему отрицательно сказываются на работе машины продольно-размагничивающая и продольно-намагничивающая реакции.

29. Магнитные потоки и ЭДС синхронного генератора. Уравнение равновесия ЭДС, векторные диаграммы синхронного генератора.

При ответе результирующий магнитный поток синхронной машины разложить на составляющие, которые будут наводить свои ЭДС в обмотке статора. Просуммировав указанные ЭДС, получим уравнения равновесия. Для ответа лучше всего нарисовать векторную диаграмму (рис. 4.9).

30. Характеристики синхронного генератора.

Привести доказательства (формулы, логические построения и пр.) характера каждой зависимости.

31. Потери и КПД синхронного генератора.

Иллюстрировать энергетической диаграммой. По каждому виду потерь: название, место в генераторе, формула расчета или от чего они зависят. Формула и пояснение КПД, зависимость КПД от нагрузки (см. п. 2.6.2).

32. Параллельная работа синхронного генератора с сетью. Условия и способы включения.

Необходимость параллельной работы, условия включения, способы включения.

33. Электромагнитная мощность синхронной машины, угловая характеристика.

Вывести формулу (см. п. 4.9.3), проанализировать ее, нарисовать угловую характеристику и сделать ее анализ.

34. Регулирование реактивной мощностей синхронного генератора, V-образные характеристики.

Показать, что, при изменении тока возбуждения от нормального будет увеличиваться ток статора. Доказать, что он будет реактивным. Обязательно сделать вывод.

35. Внезапное короткое замыкание синхронного генератора.

Объяснить природу ударного тока при коротком замыкании.

36. Синхронный двигатель, преимущества и недостатки. Пуск синхронного двигателя.

Конструкция синхронного двигателя, его достоинства и недостатки по сравнению с асинхронным двигателем (см. п. 4.10.6). Проблема пуска синхронного двигателя, способы пуска.

37. V-образные характеристики синхронного двигателя. Синхронный компенсатор.

Показать, что синхронный двигатель может работать с коэффициентом мощности равным 1 и даже генерировать в сеть реактивную мощность. Используя рис. 4.30, пояснить, от чего снижаются потери в линии. Конструкция и назначения синхронного компенсатора.

38. Синхронные двигатели малой мощности: реактивный, тихоходный (редукторный), гистерезисный, шаговый (импульсный); синхронные генераторы для автомобилей и тракторов (см. п. 4.11).

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

**Шевчик** Николай Евгеньевич

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

В двух частях

Часть 1

Ответственный за выпуск *Н. Е. Шевчик*  
Редактор *Т. В. Каркоцкая*  
Компьютерная верстка *А. И. Стебуля*

Подписано в печать 28.10.2011 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 8,55. Тираж 320 экз. Заказ 70.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.  
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.  
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.