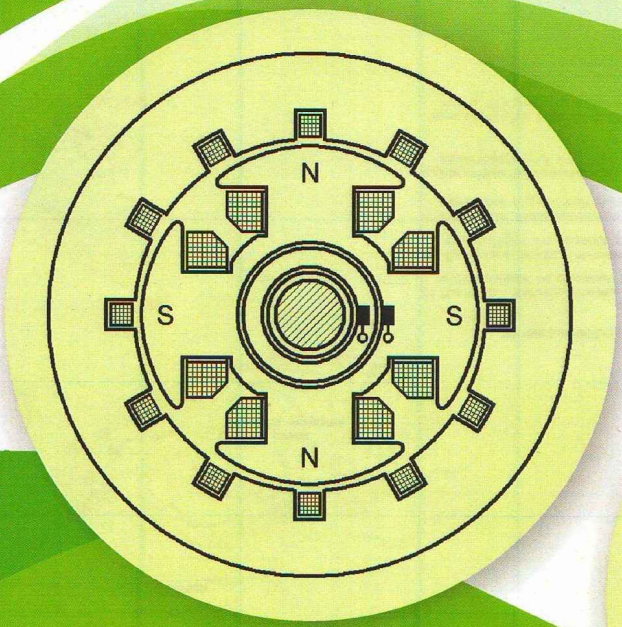
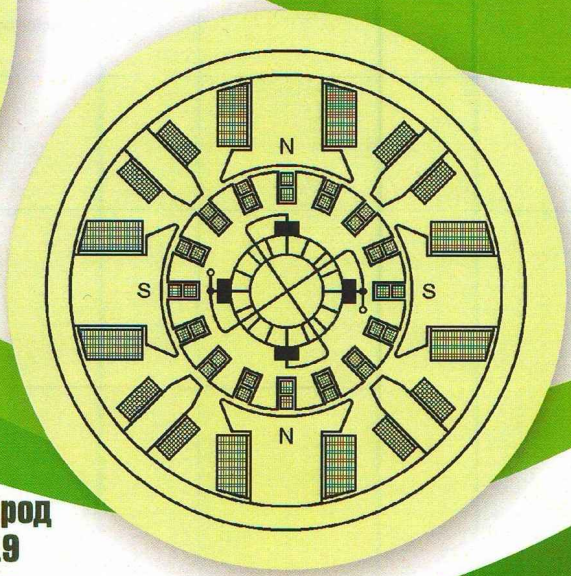
В. В. Сотников

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 2
Синхронные машины. Машины постоянного тока

Учебное пособие





Белгород
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова

В. В. Сотников

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ЧАСТЬ 2

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Утверждено ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов направления подготовки
13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника*

Белгород
2019

УДК 621.313
ББК 31.21
С67

Рецензенты:

Главный конструктор электрических машин
ОАО «Электроагрегат» *В. И. Корсунский*

Доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова *А. В. Сапрыка*

Сотников, В. В.
С67 Электрические машины: в 2 ч. Ч. 2. Синхронные машины. Машины постоянного тока: учебное пособие / В. В. Сотников. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. — 126 с.

ISBN 978-5-361-00728-8 (ч.2)
ISBN 978-5-361-00726-4

Во второй части учебного пособия приводятся основные сведения об устройстве, системах возбуждения и теории синхронных машин и машин постоянного тока. Рассматриваются физические процессы и количественные соотношения между величинами, основные характеристики и эксплуатационные свойства в установившемся режиме.

Издание предназначено для студентов направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, а также может быть полезно аспирантам и техническому персоналу, обеспечивающему эксплуатацию соответствующего оборудования.

УДК 621.313
ББК 31.21

ISBN 978-5-361-00728-8 (ч.2)
ISBN 978-5-361-00726-4

© Сотников В. В., 2019
© Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В. Г. Шухова, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ..... 5
4.1. Общие сведения..... 5
4.2. Устройство активной части..... 9
4.3. Системы электромагнитного возбуждения..... 11
4.4. Принцип действия синхронного генератора..... 14
4.5. Математическое описание синхронной машины……..... 15
4.5.1. Принятые допущения……..……..…… 15
4.5.2. Составляющие магнитного поля…….. 15
4.5.3. Магнитное поле возбуждения..... 16
4.5.4. Магнитное поле реакции якоря..... 19
4.5.5. Уравнения электрического равновесия……..… 20
4.6. Эксплуатационные характеристики синхронного генератора при автономной работе……..... 24
4.6.1. Характеристика холостого хода..... 24
4.6.2. Внешняя характеристика..... 26
4.6.3. Регулировочная характеристика..... 27
4.6.4. Характеристика трехфазного короткого замыкания..... 28
4.7. Параллельная работа генератора с сетью..... 30
4.7.1. Оптимальные условия включения генератора на параллельную работу с сетью..... 30
4.7.2. Методы синхронизации генераторов…..... 32
4.7.3. Работа подключенной к сети синхронной машины в режиме генератора и двигателя..... 35
4.8. Зависимость электромагнитной мощности и момента синхронной машины от угла нагрузки……... 37
4.9. Статическая устойчивость синхронной машины……. 39
4.10. Регулирование реактивной мощности синхронной машины при параллельной работе с сетью..... 41
4.11. Синхронные двигатели..... 43
4.11.1. Область применения. Устройство..... 43
4.11.2. Уравнения, векторные диаграммы..... 44
4.11.3. Механическая характеристика..... 46
4.11.4. Способы пуска..... 47
4.11.5. Регулирование частоты вращения..... 49
4.11.6. Торможение..... 50
4.12. Синхронные компенсаторы..... 51
4.13. Внезапное короткое замыкание синхронного генератора…. 53
4.13.1. Физические процессы..... 54
4.13.2. Схема замещения..... 57
4.13.3. Расчет ударного тока короткого замыкания..... 58

ГЛАВА 5. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА..... 59
5.1. Общие сведения..... 59
5.2. Устройство..... 62
5.3. Способы возбуждения..... 72
5.4. Якорные обмотки..... 74
5.4.1. Простая петлевая обмотка..... 76
5.4.2. Простая волновая обмотка..... 79
5.5. Физические процессы в машине постоянного тока..... 81
5.5.1. Принцип действия генератора постоянного тока..... 81
5.5.2. Принцип действия двигателя постоянного тока..... 83
5.5.3. О характере индуктируемой электродвижущей силы и тока в обмотке якоря..... 84
5.6. Магнитное поле в воздушном зазоре..... 84
5.6.1. Режим холостого хода..... 84
5.6.2. Режим нагрузки..... 85
5.7. Математическое описание машины постоянного тока..... 87
5.7.1. Электродвижущая сила..... 87
5.7.2. Электромагнитный момент..... 89
5.7.3. Уравнение электрического равновесия цепи якоря..... 90
5.8. Генераторы постоянного тока..... 90
5.8.1. Эксплуатационные характеристики..... 90
5.8.2. Принцип самовозбуждения..... 95
5.9. Двигатели постоянного тока..... 96
5.9.1. Уравнения и характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения..... 97
5.9.2. Уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения..... 99
5.9.3. Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения..... 100
5.9.4. Регулирование частоты вращения..... 101
5.9.5. Пуск. Изменение направления вращения..... 106
5.9.6. Способы торможения..... 108
5.10. Потери мощности и КПД..... 111
5.11. Коммутация..... 113
5.11.1. Свойства щеточного контакта..... 114
5.11.2. Причины искрения на коллекторе..... 116
5.11.3. Классическая теория коммутации..... 117
5.11.4. Устранение электромагнитных и потенциальных причин искрения..... 120
5.11.5. Выбор марки щеток..... 123
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... 125

ГЛАВА 4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. Общие сведения

Синхронными называют электрические машины переменного тока, у которых в установившемся режиме частота вращения ротора жестко связана с частотой вращения якоря и, в частности, равна ей: $n_2 = n_1$. Они применяются в качестве генераторов электрической энергии переменного тока, двигателей и компенсаторов реактивной мощности.

Синхронные генераторы (СГ) являются основными производителями электроэнергии переменного тока. Их устанавливают на мощных тепловых, гидроэлектрических и атомных электростанциях, на предприятиях промышленности, сельского хозяйства, строительства, а также на передвижных электростанциях и транспортных установках: тепловозах, автомобилях, самолетах и т.д. Конструкция синхронных генераторов во многом зависит от типа привода.

Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами и используются на тепловых и атомных электростанциях (рис. 4.1). Турбина и генератор имеют наилучшие технико-экономические показатели при высоких частотах вращения. Поэтому при частоте напряжения 50 Гц, принятой в нашей стране и большинстве других стран, турбогенераторы выполняются двух- и четырехполюсными на 3000 и 1500 об/мин соответственно. Диапазон мощностей составляет 2,5–1200 МВА. Турбогенераторы предельных мощностей имеют весьма низкий удельный расход материалов, который, в частности, у ТВВ-1200-4 составляет 0,54 кг/кВА. Поэтому они являются относительно компактными электрическими машинами.

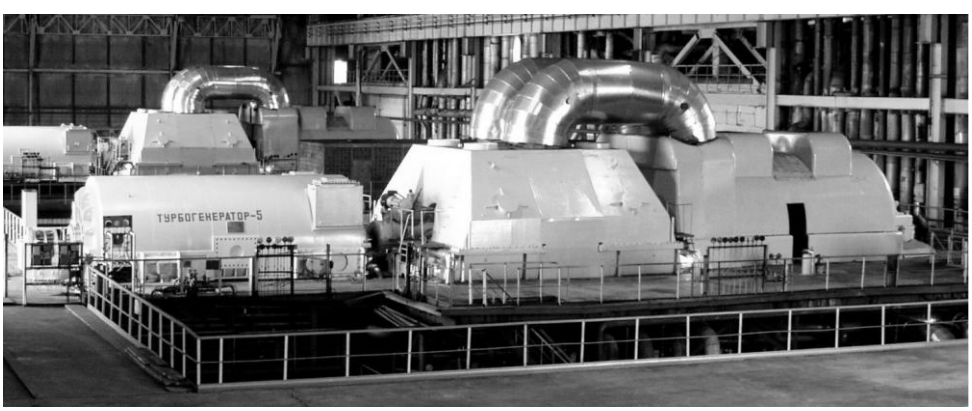
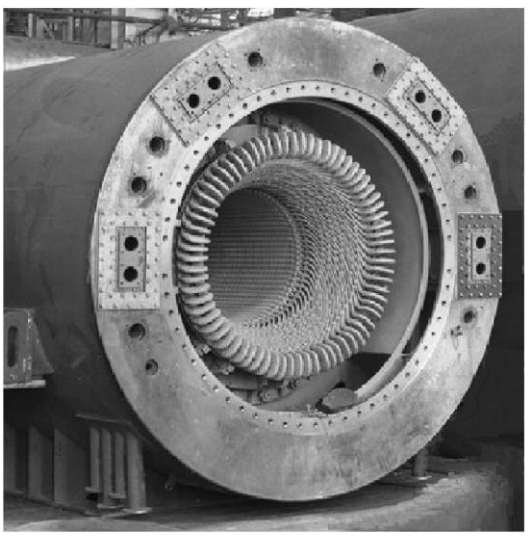
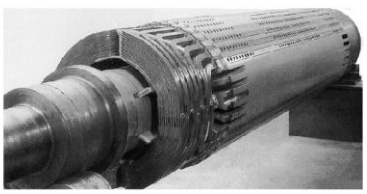


Рис. 4.1. Турбогенераторная установка

Статор и ротор турбогенератора представлены на рис. 4.2. Быстроходность определяет особенности конструктивного исполнения. Ротор имеет неявнополюсную конструкцию и расположен на одном валу с паровой турбиной. С целью обеспечения механической прочности при большой окружной скорости он выполняется из цельной поковки специальной легированной стали с высокими механическими и магнитными свойствами. Предельный диаметр ротора по условию механической прочности составляет 1,2–1,25 м. Активная длина ротора достигает 6–7 м.





а *б*

Рис. 4.2. Статор (*а*) и ротор (*б*) турбогенератора

Гидрогенераторы устанавливаются на гидроэлектростанциях (ГЭС) (рис. 4.3). Они выпускаются в широком диапазоне мощностей (до 800 МВт). По массе и габаритам гидрогенераторы предельных мощностей являются наиболее крупными электрическими машинами. Это обусловлено тем, что для достижения гидравлической турбиной наилучших технико-экономических показателей при имеющемся напоре и расходе воды, они должны приводиться во вращение с относительно небольшой частотой: 50–120 об/мин. При таком условии, как следует из выражения (2.22) (см. ч. 1), для обеспечения частоты переменного тока $f = 50$ Гц требуется несколько десятков (и более) полюсов. Поэтому мощные гидрогенераторы изготавливаются с явнополюсными роторами весьма большого диаметра (14–16 м) при относительно малой длине (1,5–2 м). Обычно их выполняют с вертикальным расположением вала. Масса ротора крупной машины составляет несколько сот тонн.

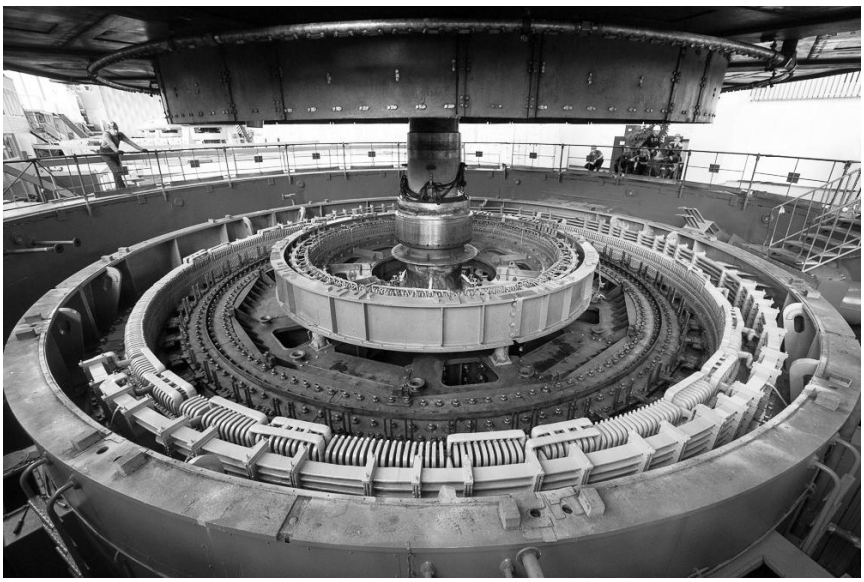


Рис. 4.3. Гидрогенератор Зейской ГЭС во время монтажа

Дизель-генераторы (рис. 4.4) приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания и используются на предприятиях различных отраслей как автономные источники электроэнергии. Обычно они имеют роторы явнополюсного типа с числом полюсов $2p = 4–16$.

Рис. 4.4. Синхронный генератор типа СГСБ900К-12 (500 об/мин): стационарный бесщёточный с приводом от двигателей внутреннего сгорания

Синхронный генератор может работать автономно или параллельно с сетью, к которой присоединены другие генераторы.

Синхронные двигатели преимущественно применяются в электроприводах компрессоров, насосов, мельниц, экскаваторов, вентиляторов и других механизмов, которые не требуют регулирования частоты вращения. Они выпускаются в широком диапазоне мощностей; наиболее выгодно их использование при мощности 300 кВт и выше (рис. 4.5).

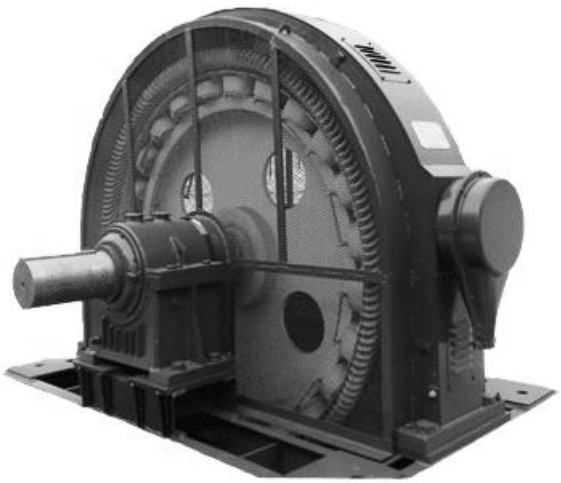


Рис. 4.5. Синхронный двигатель большой мощности типа СДМ:
Элементы буквенного обозначения: С – синхронный; Д – двигатель (ТД – турбодвигатель); М – использование в приводе мельниц

В бытовой электронной аппаратуре, киноаппаратуре и системах автоматики широко применяются синхронные микродвигатели (рис. 4.6) различных типов: с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые.

Рис. 4.6. Синхронный микродвигатель

Синхронные компенсаторы – это машины, специально предназначенные для генерирования в сеть реактивной мощности индуктивного или емкостного характера в зависимости от режима возбуждения. Они выполняются на мощности до десятков МВА и более. Устанавливаются преимущественно на крупных подстанциях для регулирования режимов работы энергетических систем (рис. 4.7).

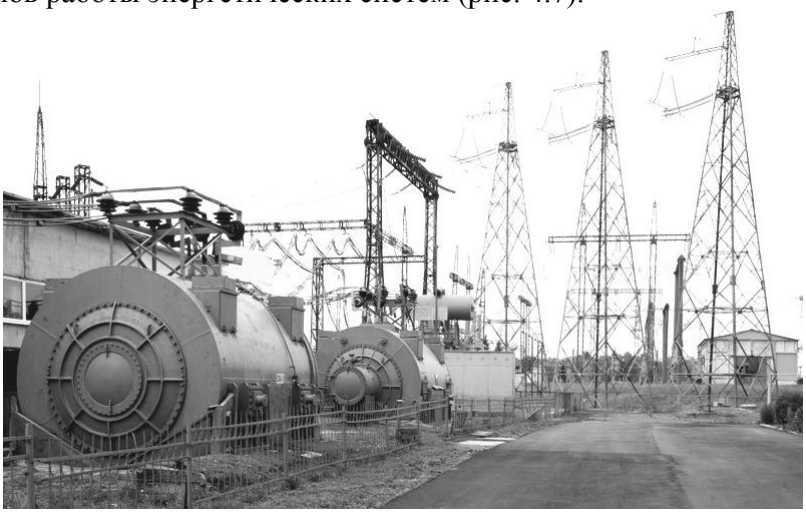


Рис. 4.7. Синхронные компенсаторы на подстанции

4.2. Устройство активной части

Синхронная машина состоит из статора и ротора (рис. 4.8, *а*). Статоры синхронных машин имеют принципиально ту же конструкцию, что и статоры асинхронных машин. Сердечник собирается из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью снижения потерь энергии на вихревые токи. В крупных машинах он шихтуется. В пазах на внутренней стороне сердечника укладывается распределенная трехфазная обмотка статора. Фазы обмотки статора преимущественно соединяются в звезду (рис. 4.8, *б*).

Роторы синхронных машин могут иметь неявнополюсную и явнополюсную конструкции.

Неявнополюсными выполняют двух- или четырехполюсные роторы турбогенераторов (см. рис. 4.2, *б*) и турбодвигателей. На внешней поверхности сердечника выполняют пазы, в которые укладывается распределенная обмотка возбуждения.

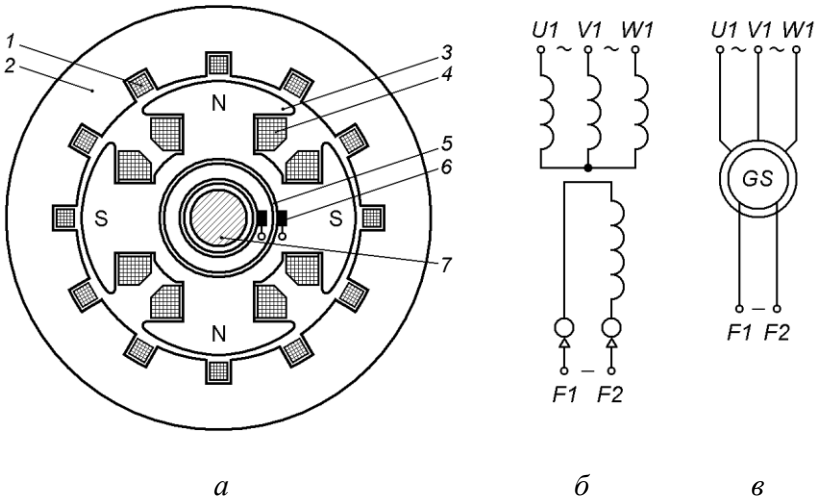


Рис. 4.8. Трехфазный синхронный генератор:
а – устройство; *б* – развернутая схема; *в* – упрощенная схема
1 – обмотка статора; *2* – сердечник статора; *3* – полюсы ротора; *4* – обмотка возбуждения; *5* – контактные кольца; *6* – щетки; *7* – вал

Явнополюсные роторы имеют сосредоточенную обмотку возбуждения в виде катушек, расположенных на полюсах (см. рис. 4.8, *а*). Их конструктивное исполнение весьма разнообразно. В крупных машинах сердечник ротора состоит из полюсов, которые устанавливаются на массивном стальном ободе, насаживаемом на вал. Обод одновременно выполняет функцию ярма, замыкающего магнитную цепь полюсов. Сердечники полюсов с полюсными наконечниками обычно набирают из стальных пластин электротехнической или малоуглеродистой стали толщиной 0,5–3 мм.

Обмотка возбуждения вращающегося ротора СМ получает питание от источника постоянного тока (на рис. 4.8 – через контактные кольца и щетки), возбуждая магнитное поле с чередующимися северными и южными полюсами. В качестве полюсов могут также использоваться постоянные магниты.

Явнополюсные синхронные машины могут также снабжаться демпферной (успокоительной) обмоткой в виде замкнутых по торцам стержней (см. ниже рис. 4.33, *б*), которые размещают в пазах полюсных наконечников сердечника ротора. У синхронных двигателей она используется для асинхронного пуска. В неявнополюсных машинах роль демпферной обмотки выполняет массивный сердечник ротора.

Обычно в синхронной машине статор является якорем, а ротор – индуктором. В возбудителях генераторов, чтобы не использовать узел контактных колец, часто применяют обращенную конструктивную

схему, в которой обмотку якоря располагают на роторе, а обмотку возбуждения – на статоре. Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения, что вращается – якорь или индуктор.

4.3. Системы электромагнитного возбуждения

Системой возбуждения синхронной машины называется совокупность устройств, предназначенных для питания обмотки возбуждения постоянным током. Она также обеспечивает пуск (двигателей) и синхронизацию, регулирование тока возбуждения (в зависимости от режима работы), форсировку (быстрое нарастание) тока возбуждения или гашение магнитного поля в аварийных режимах. Система возбуждения относятся к числу наиболее ответственных частей машины. В ее состав входят: источник питания (возбудитель), выпрямитель (если источник вырабатывает переменный ток), регулятор тока возбуждения и другие функциональные элементы. Мощность системы возбуждения обычно составляет от 0,2–5% полезной мощности машины (меньшее значение относится к машинам большой мощности).

Существует следующие виды систем возбуждения.

1. **Прямые и косвенные**. В прямых системах ротор возбудителя непосредственно сопряжен с валом генератора и приводится во вращение тем же первичным двигателем (рис. 4.9, *а*). В косвенных системах ротор возбудителя приводится во вращение отдельным электрическим двигателем (рис. 4.9, *б*). Например, на крупных электрических станциях предусматривается возбуждение генераторов от отдельно стоящих возбудителей, которые приводятся в действие собственными электродвигателями и включаются в качестве резерва в схему сразу нескольких турбоустановок.

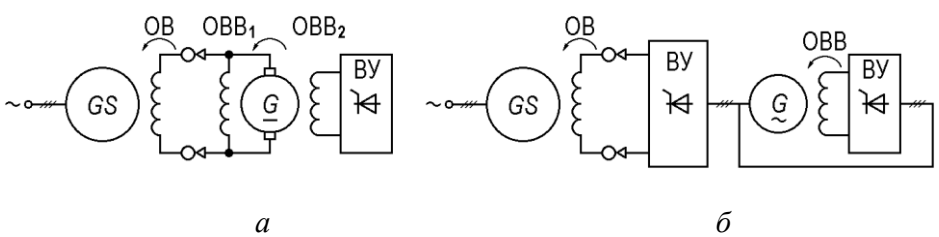


Рис. 4.9. Щеточные системы независимого возбуждения:
а – прямая электромашинная с возбудителем постоянного тока, *б* – косвенная вентильная (ВУ – выпрямитель управляемый: ОВ – обмотка возбуждения синхронного генератора *GS*; $ОВВ_1$ и $ОВВ_2$ – параллельная и регулировочная обмотки возбуждения возбудителя постоянного тока *G*; ОВВ – обмотка возбуждения возбудителя переменного тока *G*)

Гидрогенераторы и турбогенераторы снабжаются прямой системой, как более надежной.

При большой мощности возбудителя для питания его обмотки возбуждения используют подвозбудитель.

2. **Электромашинные и вентильные.** В электромашинных системах (в современных генераторах не применяются) в качестве источника постоянного тока, непосредственно питающего обмотку возбуждения генератора *GS*, используется возбудитель в виде генератора *G* постоянного тока (см. рис. 4.9, *а*). В вентильных системах таким источником является полупроводниковый управляемый выпрямитель ВУ (см. рис. 4.9, *б*), подключенный к генератору переменного тока *G* (возбудителю). Указанные системы возбуждения применяются в генераторах (в том числе турбо- и гидрогенераторах), двигателях и синхронных компенсаторах.

3. **Системы самовозбуждения и независимого возбуждения**.

В системах самовозбуждения на создание первичного магнитного поля расходуется часть мощности основной или дополнительной обмотки якоря самого генератора. При этом обмотка возбуждения соединяется с цепью якоря через выпрямительное устройство.

В независимых системах обмотка возбуждения получает питание от источника, не связанного с самим генератором и не зависящего от режима его работы.

Системы самовозбуждения имеют меньшую стоимость, системы независимого возбуждения более надежны.

В бесщеточной схеме самовозбуждения (рис. 4.10) обмотка возбуждения ОВ генератора *GS* получает питание от возбудителя *G* (обращенного типа) переменного тока через диодный выпрямитель В. Его обмотка возбуждения ОВВ подключена на шины синхронного генератора *GS* через понижающий трансформатор *T* и управляемый выпрямитель ВУ. Начальное возбуждение генератора происходит за счёт остаточного намагничивания машины.

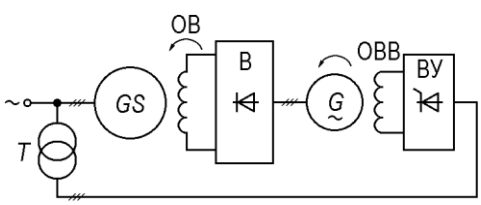


Рис. 4.10. Бесщеточная вентильная система самовозбуждения:
В – выпрямитель диодный; ВУ – выпрямитель управляемый; ОВ – обмотка возбуждения синхронного генератора *GS*; ОВВ – обмотка возбуждения возбудителя *G* переменного тока обращенного типа; *T* – понижающий трансформатор

В синхронных генераторах (реже в двигателях) средней и большой мощности получила распространение вентильная система самовозбуждения, в которой первичным источником питания служит уложенная в пазах статора дополнительная обмотка переменного тока, работающая чаще всего на третьей пространственной гармонике магнитного поля. Недостатком этой системы является зависимость мощности, вырабатываемой этой обмоткой, от режима работы генератора.

4. **Щеточные и бесщеточные**. В щеточных системах (см. рис. 4.9) обмотка возбуждения получает питание через узел контактных колец, в бесщеточных – через выпрямитель от трехфазной якорной обмотки возбудителя переменного тока обращенной конструкции (см. рис. 4.10). Выпрямитель и якорь возбудителя установлены на валу возбуждаемой синхронной машины и вращаются вместе с ним. Основное преимущество бесщеточного возбуждения состоит в отсутствии щеточного контакта в цепи обмотки ротора. Это, с одной стороны, позволяет обеспечить протекание тока возбуждения в несколько тысяч ампер, необходимого для сверхмощных синхронных машин, и с другой – значительно повысить надежность системы.

Щеточные системы более просты по конструкции и применяются в машинах малой и средней мощности, бесщеточные системы вентильного возбуждения – в машинах средней и большой мощности.

5. **Статические системы возбуждения** являются управляемыми полупроводниковыми выпрямителями (рис. 4.11) и не содержат в своем составе электромашинных возбудителей.

Рис. 4.11. Возбудитель тиристорный типа ВТЕ для синхронных машин

У генераторов они получают питание от шин генератора или от шин собственных нужд, у двигателей – от промышленной сети.

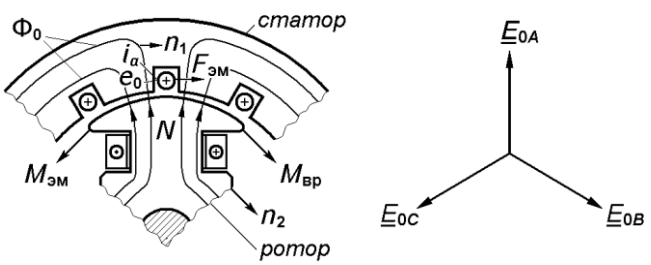
4.4. Принцип действия синхронного генератора

Синхронный генератор преобразует механическую энергию первичного двигателя в электрическую энергию переменного тока. Предположим, что обмотка возбуждения генератора получает питание от источника постоянного тока и создает в зазоре генератора синусоидально распределенное магнитное поле с числом пар полюсов p (рис. 4.12, *а*).

При вращения ротора периодическое (многополюсное) магнитное поле индуктирует в обмотке статора генератора переменную ЭДС e_0, которая изменяется во времени по синусоидальному закону с частотой, прямо пропорциональной числу p пар полюсов и частоте n_2 вращения ротора: $f_1 = pn_2$. Действующее значение этой ЭДС рассчитывается по той же формуле, что и для обмотки статора асинхронной машины:

$$E_0 = 4{,}44 f w \Phi_0 k_{об} = 4{,}44 p n_2 w \Phi_0 k_{об}, \qquad (4.1)$$

где Φ_0 – магнитный поток полюса ротора (индуктора); w – число витков в фазе обмотки статора; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности обмотки статора (распределение по пазам и укорочение шага).



а *б*

Рис. 4.12. Принцип действия синхронного генератора:
а – физические процессы; *б* – векторная диаграмма ЭДС

Чтобы получить симметричную трехфазную систему ЭДС (рис. 4.12, *б*), отдельные фазы трехфазной обмотки статора расположены со взаимным сдвигом их магнитных осей в пространстве на угол $\alpha_{пр} = 2\pi / (3p)$, соответствующий 120° электрическим градусам.

Процесс наведения ЭДС не требует затрат механической энергии. Поэтому предварительно раскрученный ротор при идеальном холостом ходе (отсутствии механических и иных потерь) мог бы вращаться бесконечно долго.

Когда к генератору подключена нагрузка, под действием ЭДС e_0 по обмотке якоря протекает ток i. Обычно подключенные к генератору электроприемники всегда потребляют активную мощность, вследствие чего ток якоря имеет активную составляющую i_a, совпадающую по фазе с индуктируемой ЭДС e_0 (см. рис. 4.12, *а*). Направление протекания этой составляющей под северными и южными полюсами противоположно, и на проводники обмотки статора со стороны поля возбуждения действуют электромагнитные силы $F_{эм}$ одного направления: в сторону вращения ротора (рис. 4.12, *а*). При этом в соответствии с третьим законом Ньютона к ротору приложены противодействующие силы, создающие тормозной момент $M_{эм}$.

Волна тока имеет одинаковую с полем возбуждения периодичность распределения по окружности зазора и вращается с той же частотой. При синхронном вращении они неподвижны относительно друг друга, что обеспечивает неизменное во времени направление действия электромагнитных сил.

Для поддержания непрерывного вращения ротора тормозной электромагнитный момент генератора компенсируется вращающим моментом приводного двигателя: $M_{эм} = M_{вр}$. Этим обеспечивается непрерывное преобразование механической энергии в электрическую.

4.5. Математическое описание синхронной машины

4.5.1. Принятые допущения

При построении математической модели синхронной машины примем следующие упрощения:

1) рассматривается симметричный установившийся режим работы;

2) синхронная машина конструктивно симметрична;

3) зубчатость сердечников статора и ротора не учитывается: их поверхность, обращенная к зазору предполагается гладкой;

4) магнитная система не насыщена, магнитная проницаемость материала $\mu = \text{const}$.

При сделанных допущениях переменное магнитное поле в области расположения якорной обмотки будет содержать только одну временную гармонику основной частоты.

4.5.2. Составляющие магнитного поля

Магнитное поле синхронной машины создается обмотками возбуждения и якоря (рис. 4.13.).

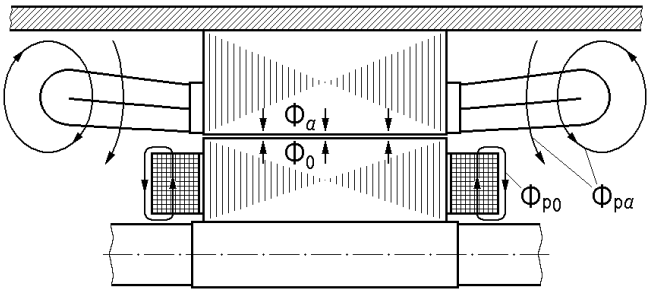


Рис. 4.13. Составляющие магнитного потока синхронной машины

По признаку сцепления с обмоткой якоря в магнитном потоке возбуждения выделяют две составляющие:

Φ_0 – основной рабочий магнитный поток возбуждения, сцепленный с обмоткой якоря и индуктирующий в ней ЭДС E_0. Основной магнитный поток пересекает зазор между статором и ротором.

Φ_{p0} – магнитный поток рассеяния обмотки возбуждения, несцепленный с обмоткой якоря и не оказывающий на нее индукционного действия. В установившемся режиме эта составляющая не влияет на работу синхронной машины. Она проявляет себя только при переходных процессах.

Вращающимся потоком возбуждения Φ_0 в замкнутой электрической цепи якоря индуктируется ток, который, обтекая якорную обмотку, создает собственный магнитный поток. При симметричном установившемся режиме работы этот поток вращается синхронно с индуктором, не оказывая индукционного действия на обмотку возбуждения. Большая часть этого магнитного потока якоря пересекает зазор и замыкается через магнитную систему машины. Она называется потоком реакции якоря Φ_a. Меньшую часть потока якоря, не пересекающую зазор, относят к потоку рассеяния Φ_{pa}. В нее входит поток рассеяния лобовых частей и другие составляющие, в основном аналогичные потоку рассеяния обмотки статора асинхронной машины (см. п. 3.4.2, часть 1).

Указанные выше составляющие магнитного потока обмоток возбуждения и якоря (Φ_0, Φ_{p0}, Φ_a, Φ_{pa}) схематично изображены на рис. 4.13.

4.5.3. Магнитное поле возбуждения

Магнитное поле возбуждения создается током, обтекающим обмотку возбуждения. При вращении ротора оно индуктирует ЭДС в обмотке якоря, в результате чего на зажимах генератора возникает напряжение. К напряжению на выводах генератора предъявляется требование, чтобы оно изменялось во времени по синусоидальному закону.

С целью анализа периодическую функцию изменения во времени линейного напряжения можно разложить в гармонический ряд Фурье. Согласно ГОСТу степень ее синусоидальности оценивается по коэффициенту искажения линейного напряжения при холостом ходе и номинальном напряжении:

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100\%,$$

где $U_{(1)}$ – действующее значение основной гармонической; $U_{(n)}$ – действующее значение n-ой гармонической составляющей напряжения.

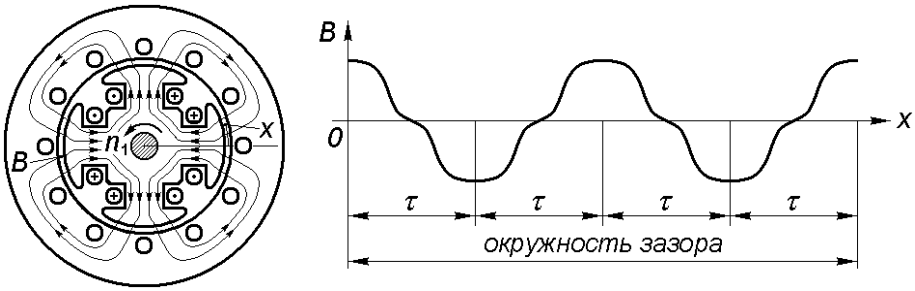
Коэффициент искажения синусоидальности линейных напряжений в трехфазных генераторах переменного тока частотой 50 Гц не должен превышать 5% для генераторов мощностью выше 100 кВ·А и 10% для генераторов мощностью от 10 до 100 кВ·А.

Для получения синусоидально изменяющихся во времени ЭДС и, соответственно, напряжения на зажимах генератора необходимо, чтобы распределение магнитного поля возбуждения машины по окружности зазора между статором и ротором, по возможности, было близко к синусоидальному закону. Это также приводит к снижению добавочных потерь в самом генераторе и у потребителей, обусловленных высшими гармоническими составляющими. Для достижения требуемых параметров напряжения необходимо соответствующим образом спроектировать синхронную машину.

Характер распределения магнитного поля в зазоре зависит от распределения МДС обмотки возбуждения и геометрии зазора.

В явнополюсной синхронной машине обмотка возбуждения располагается на ферромагнитных полюсах, а междуполюсное пространство заполнено немагнитной средой (рис. 4.14, *а*), так что магнитная система не обладает круговой симметрией. Приближение распределения магнитного поля по окружности зазора к синусоидальному закону (рис. 4.14, *б*) достигают варьированием относительной ширины полюсного наконечника, а также изменением его формы, посредством которой величину воздушного зазора под ним выполняют неравномерной: под серединой полюсного наконечника она меньше, у краев – больше.

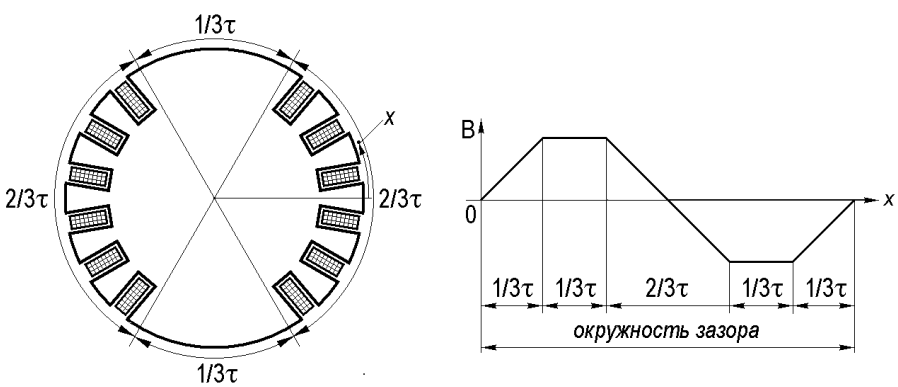
В неявнополюсной СМ, пренебрегая зубчатостью сердечника якоря, величину воздушного зазора можно принять постоянной. Для достижения близкого к синусоидальному характера изменения поля возбуждения



а *б*

Рис. 4.14. Распределение магнитного поля возбуждения в явнополюсной синхронной машине ($2p = 4$):
а – картина магнитного поля в поперечной плоскости;
б – распределение магнитной индукции по окружности зазора

по окружности зазора, стремятся максимально уменьшить пространственную гармонику 3-го порядка. Для этого обмотку возбуждения распределяют по пазам сердечника так, что она занимает 2 / 3 периметра окружности на каждом полюсном делении (рис. 4.15, *а*). Поскольку при неизменном зазоре распределение нормальной компоненты индукции магнитного поля приближенно совпадает с распределением МДС обмотки возбуждения (рис. 4.15, *б*), это приводит к подавлению 3-й пространственной гармоники (для нее коэффициент распределения $k_{р3} \approx 0$) и определенному ослаблению гармоник более высокого порядка.



а *б*

Рис. 4.15. Распределение магнитного поля возбуждения в неявнополюсной синхронной машине ($2p = 2$):
а – индуктор; *б* – распределение магнитной индукции по окружности зазора

В излагаемой ниже теории учитываются только первая пространственная гармоника поля, на которой происходит преобразование энергии. Магнитная система принимается ненасыщенной; в случае необходимости влияние насыщения на магнитное поле и процессы в машине учитывается дополнительно.

Для улучшения синусоидальности ЭДС E_0, индуктированной в обмотке якоря синхронного генератора (при любой конструкции ротора), применяют распределение ее катушек по пазам и укорочение шага (см. п. 2.8, ч. 1).

4.5.4. Магнитное поле реакции якоря

Реакция якоря – это, в широком смысле, возникновение в замкнутой цепи обмотки якоря тока как реакции на индукционное действие вращающегося магнитного поля возбуждения. В узком смысле согласно терминологии, регламентированной ГОСТом, реакцией якоря называется воздействие поля реакции якоря на магнитное поле возбуждения машины. В соответствии с этим определением потоком реакции якоря является большая часть магнитного потока якоря, которая пересекает воздушный зазор между сердечниками статора и ротора, замыкаясь через те же пути, что и поле возбуждения (см. п. 4.5.2). При этом изменяется степень намагниченности соответствующих участков магнитопровода и их магнитное сопротивление, что оказывает влияние на величину самого потока реакции якоря и потока возбуждения.

Магнитный поток реакции якоря влияет на работу и характеристики синхронной машины в установившемся режиме и при переходных процессах, а также оказывает самоиндукционное действие на обмотку якоря аналогично обычной катушке индуктивности. Он определяется силой тока якоря и сопротивлением магнитной цепи, которое, в свою очередь, зависит от эквивалентной величины воздушного зазора и степени насыщения стали магнитопровода. В неявнополюсной СМ воздушный зазор – равномерный (без учета зубчатости сердечников статора и ротора), и величина магнитного потока реакции якоря не зависит от пространственного сдвига его магнитной оси относительно оси полюсов. В явнополюсной СМ из-за наличия немагнитного междуполюсного пространства воздушный зазор – резко неравномерный. Изменение положения магнитной оси поля якоря относительно полюсов приводит к изменению магнитного сопротивления потоку реакции якоря.

Угол сдвига в пространстве магнитной оси потока реакции якоря относительно оси полюсов при автономной работе синхронного генератора зависит от характера нагрузки и параметров обмотки якоря. При параллельной работе синхронной машины с сетью он зависит от режима возбуждения (см. ниже п. 4.10).

4.5.5. Уравнения электрического равновесия

Теория синхронных машин, как и асинхронных, строится на концепции вращающегося магнитного поля. Однако имеется значительное различие: в синхронных машинах индукционные действия полей возбуждения и реакции якоря учитываются по отдельности, в то время как в асинхронных машинах вводятся в рассмотрение ЭДС обмоток статора и ротора, наводимые их результирующим основным магнитным потоком.

Рассмотрим вначале неявнополюсный СГ. При вращении ротора магнитное поле возбуждения индуктирует в обмотке якоря ЭДС. В режиме нагрузки по обмотке якоря протекает ток, создающий собственный магнитный поток, который, вращаясь в пространстве с синхронной частотой, наводит в якорной обмотке ЭДС самоиндукции.

Таким образом, каждую фазу обмотки якоря можно рассматривать как «активную» катушку индуктивности, в которой (в отличие от обычной катушки) первичное поле возбуждения дополнительно индуктирует ЭДС E_0 (рис. 4.16, *а*). Фаза обмотки якоря имеет эквивалентные параметры: активное сопротивление r и индуктивное сопротивление x_c, называемое «синхронным», которое, являясь коэффициентом пропорциональности между амплитудой ЭДС самоиндукции и амплитудой тока якоря, учитывает самоиндукционное действие поля якоря. В неявнополюсной СМ это поле и, как следствие, сопротивление x_c не зависят от характера нагрузки. На рис. 4.16, *б* представлена схема замещения фазы обмотки якоря неявнополюсного СГ.

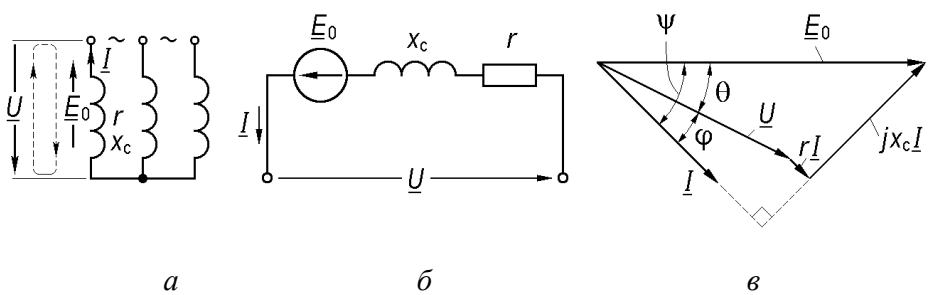


Рис. 4.16. Математическое моделирование неявнополюсного СГ:
а – схема обмотки якоря СГ с принятыми условными положительными направлениями;
б – схема замещения; *в* – векторная диаграмма

В соответствии со вторым законом Кирхгофа по контуру каждой фазы обмотки якоря ЭДС, падения напряжения и напряжение на нагрузке уравновешены. Учитывая выбранные условные положительные направления ЭДС, тока и напряжения (см. рис. 4.16, *а*), для фазы обмотки якоря неявнополюсного СГ может быть записано соответствующее уравнение:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jx_c\underline{I} - r\underline{I}. \qquad (4.2)$$

Количественные и фазовые соотношения между составляющими этого уравнения в графической форме отображаются векторной диаграммой (рис. 4.16, *в*). Разность фаз φ между напряжением $\underline{U}$ и током $\underline{I}$ генератора при автономной работе определяется характером нагрузки, а при параллельной работе с сетью (см. ниже п. 4.9) – режимом возбуждения. Угол θ сдвига по фазе между ЭДС $\underline{E}_0$ и напряжением $\underline{U}$, зависящий от нагрузки генератора, называется углом нагрузки. Приблизительно (если пренебречь падением напряжения на активном и индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки якоря) он соответствует электрическому углу между магнитными осями поля возбуждения и результирующего магнитного поля, причем в направлении вращения генератора магнитная ось поля возбуждения находится впереди поля якоря. Как следствие, в режиме генератора ЭДС $\underline{E}_0$ всегда опережает по фазе напряжение $\underline{U}$ (см. рис. 4.16, *в*) на этот же угол.

В явнополюсных машинах из-за резко выраженной неравномерности воздушного зазора, обусловленной немагнитной средой между полюсами, индуктивное сопротивление x_c обмотки якоря зависит от характера нагрузки и, таким образом, является переменным. Это приводит к значительному усложнению математического аппарата для описания процессов в СМ в установившемся режиме.

Для исключения из уравнений переменных параметров французским электротехником Блонделем в 1895 г. был предложен метод двух реакций. Суть метода заключается в том, что относительно ЭДС $\underline{E}_0$ ток обмотки якоря $\underline{I}$ разлагается на активную $\underline{I}_q$ и реактивную $\underline{I}_d$ составляющие (рис. 4.17, *а*), называемые также «продольным» и «поперечным» током:

$$\underline{I} = \underline{I}_q + \underline{I}_d. \qquad (4.3)$$

Предполагается, что каждая из составляющих (4.3) создает собственное магнитное поле реакции якоря: $\underline{\Phi}_a = \underline{\Phi}_{aq} + \underline{\Phi}_{ad}$. Активная составляющая $\underline{I}_q$ совпадает по фазе с $\underline{E}_0$. Магнитные оси (рис. 4.17, *б*) создаваемого ею потока Φ_{aq} проходят вдоль поперечных осей «*q*» индуктора под электрическим углом $\pi/2$ относительно осей «*d*» полюсов, из-за чего этот поток реакции якоря называют поперечным. Большая часть этого поля замыкается через полюсные наконечники, зазор и сердечник статора. При этом со стороны одного края полюсного наконечника линии поля поперечной реакции направлены согласно с полем возбуждения, а с другого – встречно. Если магнитная система генератора не насыщенна, результирующий поток через полюс остается неизменным: насколько с одной стороны полюсного наконечника он увеличивается,

настолько с другой – уменьшается. При насыщенной магнитной системе увеличение потока с одной стороны всегда меньше его уменьшения с другой, вследствие чего результирующее значение потока на полюсном делении уменьшается. В этом смысле поперечная реакция якоря оказывает размагничивающее действие на генератор.

Рис. 4.17. Реакция якоря в явнополюсном СГ:
а – разложение тока якоря на продольную $\underline{I}_d$ и поперечную $\underline{I}_q$ составляющие; *б* – поле поперечной реакции якоря от тока $\underline{I}_q$; *в* – поле продольной реакции якоря от тока $\underline{I}_d$

Реактивная составляющая $\underline{I}_d$ тока индуктивного или емкостного характера, соответственно, отстает от ЭДС E_0 или опережает ее по фазе на $\pi / 2$. Магнитные оси создаваемого ею потока Φ_{ad} направлены вдоль осей «*d*» полюсов (рис. 4.17, *в*), из-за чего эту составляющую потока реакции якоря называют продольной. При индуктивном характере составляющей $\underline{I}_d$ тока продольная реакция якоря направлена встречно полю возбуждения и размагничивает генератор (см. рис. 4.17, *в*), а при емкостном, наоборот, согласно, и – намагничивает.

Составляющие $\underline{I}_q$ и $\underline{I}_d$ тока якоря также называют «поперечной» и «продольной» по аналогии с возбуждаемыми ими составляющими потока реакции.

Индукционное действие вращающихся с синхронной частотой поперечной Φ_{aq} и продольной Φ_{ad} составляющих потока реакции якоря Φ_a совместно с потоком рассеяния Φ_{pa} учитывается введением «синхронных» индуктивных сопротивлений x_q и x_d. Соответствующая схема замещения представлена на рис. 4.18, *а*. В явнополюсной СМ магнитная проводимость поперечному потоку реакции якоря меньше, чем продольному, вследствие чего $x_q < x_d$.

Следует отметить, что в методе двух реакций используется принцип наложения, который применим только для линейных сред. Поэтому использование этого метода для явнополюсной синхронной машины предполагает ненасыщенное состояние ее магнитной цепи.

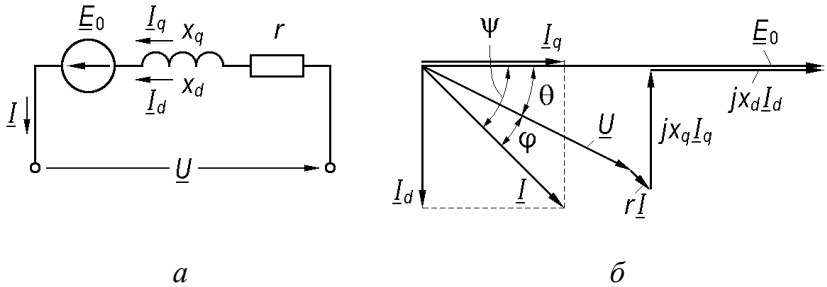


Рис. 4.18. Математическое моделирование явнополюсного СГ:
а – схема замещения; *б* – векторная диаграмма

Исходя из второго закона Кирхгофа, для фазы обмотки якоря явнополюсного синхронного генератора может быть записано уравнение электрического равновесия:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jx_q\underline{I}_q - jx_d\underline{I}_d - r\underline{I}. \qquad (4.4)$$

Уравнение (4.4) в наглядной форме представлено векторной диаграммой на рис. 4.18, *б*.

В СМ средней и большой мощности активное сопротивление обмотки якоря намного меньше синхронных индуктивных сопротивлений, и с целью упрощения математического описания им пренебрегают, полагая $r \approx 0$. Уравнения электрического равновесия (4.2) и (4.4) для фазы обмотки якоря примут вид:

для неявнополюсного СГ:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jx_c\underline{I}, \qquad (4.5)$$

для явнополюсного СГ:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jx_q\underline{I}_q - jx_d\underline{I}_d. \qquad (4.6)$$

По уравнениям (4.5) и (4.6) могут быть построены соответствующие упрощенные векторные диаграммы (рис. 4.19).

Угол φ между векторами напряжения $\underline{U}$ и тока якоря $\underline{I}$ зависит от характера нагрузки. Угол θ между векторами ЭДС $\underline{E}_0$ и тока якоря $\underline{I}$ называется углом нагрузки, так как он определяется активной мощностью генератора.

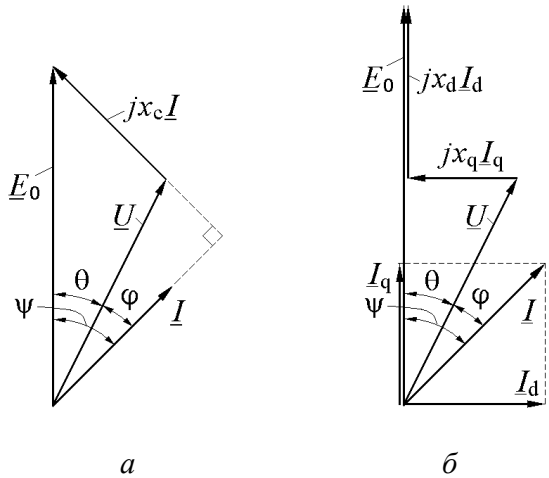


Рис. 4.19. Упрощенные ВД неявнополюсного (*а*) и явнополюсного (*б*) СГ

4.6. Эксплуатационные характеристики синхронного генератора при автономной работе

При автономной работе генератор самостоятельно питает группу приемников электрической энергии или отдельную сеть. Такая работа характерна для генераторов резервного электропитания, а также для большинства генераторов относительно небольшой мощности. Характеристики определяют эксплуатационные свойства генератора. Их снимают экспериментально, поддерживая частоту вращения ротора n неизменной, равной номинальному значению: $n = n_{ном}$. При этом частота f индуктируемой в обмотке якоря ЭДС будет также номинальной, так как $f = pn$ (n, об/с).

4.6.1. Характеристика холостого хода

Холостым ходом автономно работающего СГ называется режим его работы, при котором цепь якоря разомкнута, и ток в обмотке якоря отсутствует: $I = 0$. В этом режиме в генераторе существует только магнитное поле возбуждения. При вращении ротора в обмотке якоря наводится ЭДС E_0, которая в отсутствие падения напряжения создает на зажимах генератора напряжение $\underline{U} = \underline{E}_0$.

Характеристикой ХХ (рис. 4.20) называется зависимость индуктированной в обмотке якоря ЭДС E_0 от тока возбуждения: $E_0 = f(I_в)$.

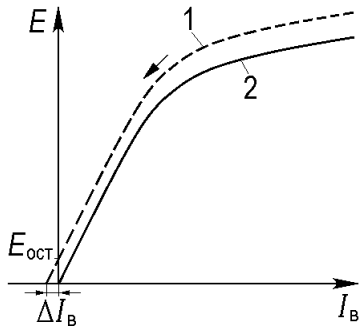


Рис. 4.20. Характеристика холостого хода СГ

Поскольку число витков w и обмоточный коэффициент $k_{об}$ фазы зависят только от конструкции обмотки, а по условию проведения опыта частота вращения n постоянна, то в соответствии с выражением (4.1) ЭДС фазы обмотки якоря прямо пропорциональна магнитному потоку Φ_0 полюсов: $E_0 = k\Phi_0$. При синусоидальном законе распределения поля возбуждения в зазоре коэффициент пропорциональности $k = 4{,}44fwk_{об} = 4{,}44pnwk_{об}$. Следовательно, характеристика ХХ в другом масштабе повторяет кривую намагничивания машины $\Phi_0 = f(I_в)$, что позволяет оценить свойства и степень насыщения ее магнитной цепи.

Наличие петли гистерезиса у ферромагнитного материала сердечника ротора (на котором расположена обмотка возбуждения) приводит к тому, что кривая намагничивания машины и, следовательно, характеристика $E_0 = f(I_в)$ получается неоднозначной, хотя при используемых в сердечниках магнитомягких ферромагнитных материалах возможный разброс значений ЭДС невелик. Для устранения этой неоднозначности ее снимают, начиная с наибольшего тока возбуждения (не ниже значения, обеспечивающего напряжение $1{,}3U_{ном}$ на выводах машины). Полученную характеристику (на рис. 4.20 изображена пунктиром) смещают вдоль оси абсцисс на величину $\Delta I_в$, определяемую путем графической экстраполяции.

На начальном участке эта характеристика линейна, ее крутизна тем больше, чем меньше магнитное сопротивление. При дальнейшем увеличении тока возбуждения рост ЭДС замедляется вследствие насыщения магнитопровода.

Характеристика ХХ является одной из важнейших для генератора. Она отражает его магнитное состояние и определяет возможности регулирования ЭДС. В правильно спроектированном СГ точка номинального напряжения $E_0 = U_{ном}$ обычно находится на изгибе («колене») кривой. Если эта точка лежит за изгибом на участке, соответствующем насыщенному магнитопроводу, то возможность регулирования напряжения в сторону увеличения будет ограничена. Когда она находится на прямолинейной части характеристики ХХ, это соответствует заниженному

значению индукции в магнитопроводе, что приводит к увеличению размеров магнитопровода.

Характеристика ХХ служит также основой для определения ряда важных параметров СГ и расчета других его характеристик.

При $I_в = 0$ в обмотке якоря индуктируется некоторая остаточная ЭДС $E_{ост}$ (1,5÷2% от $U_{ном}$), обусловленная остаточной намагниченностью сердечника ротора. Это явление используется для самовозбуждения СГ.

Сравнение характеристик ХХ синхронных генераторов показывает, что при однотипных конструкциях они мало отличаются друг от друга, если величины E_0 и $I_в$ выражены в относительных единицах: $E_{0*} = E_0 / U_{ном}$, $I_{в*} = I_в / I_{вб}$) (базовый ток возбуждения $I_{вб}$ по характеристике ХХ соответствует $E_0 = U_{ном}$). Усредненная характеристика ХХ, выраженная в относительных единицах подобным образом, называется нормальной.

4.6.2. Внешняя характеристика

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при номинальной частоте вращения и неизменном токе возбуждения: $U = f(I)$.

Возможно рассмотрение семейства характеристик при варьировании некоторого параметра. Каждая внешняя характеристика из семейства снимается при неизменном характере нагрузки: $\varphi = \text{const}$. Примерный вид семейства характеристик при различном характере нагрузки приведен на рис. 4.21, *а*.

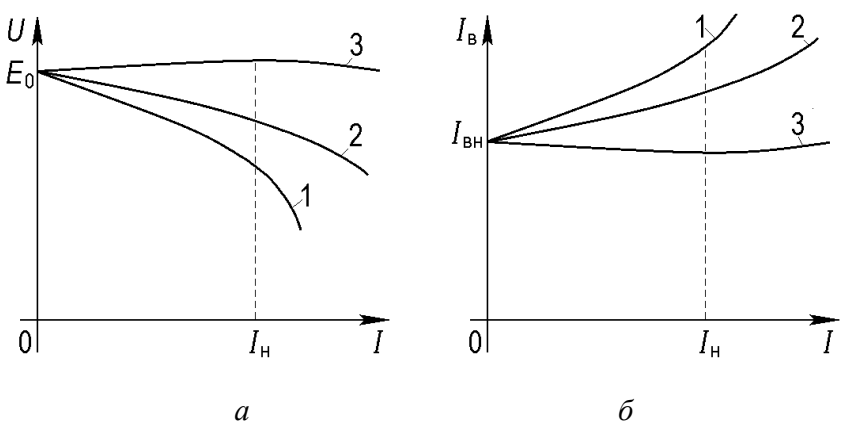


Рис. 4.21. Семейство внешних (*а*) и регулировочных (*б*) характеристик СГ при различном характере автономной нагрузки:
1 – активно-индуктивная, *2* – активная, *3* – активно-емкостная

Характеристику можно построить расчетным путем, например, используя выражения (4.5)–(4.6), или снять экспериментально.

Зависимость напряжения на зажимах генератора от силы тока и характера нагрузки, как это следует из выражений (4.2) и (4.4), математически объясняется падением напряжения на обмотке якоря, в основном, на ее синхронных индуктивных сопротивлениях.

Вид внешних характеристик можно также объяснить действием реакции якоря, зависящей от характера нагрузки (угла φ), который влияет на сдвиг по фазе ψ между ЭДС $\underline{E}_0$ и током якоря $\underline{I}$ и величину продольной (реактивной) составляющей $\underline{I}_d$ (см. рис. 4.17).

При активно-индуктивной нагрузке (отстающем токе) составляющая $\underline{I}_d$ значительна. Создаваемая ею продольная размагничивающая реакция якоря растет с увеличением тока нагрузки, уменьшая магнитный поток и индуктируемую им ЭДС $E \approx U$. Поэтому с увеличением тока I напряжение U на зажимах генератора падает (кривая *1*).

При чисто активной нагрузке ($\varphi = 0$) также имеется продольная размагничивающая составляющая МДС реакции якоря, но меньшего значения. Соответственно в меньшей степени падает напряжение (кривая *2*).

При активно-емкостной нагрузке (опережающем токе) возможна продольная намагничивающая реакция якоря, поэтому с увеличением I напряжение U растет (кривая *3*).

Стабильность напряжения генератора оценивают величиной отклонения напряжения ΔU в установившемся режиме:

$$\Delta U = (E_0 - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}}.$$

Изменение напряжения ΔU на зажимах генератора определяется при неизменном токе возбуждения ($I_{\text{в}} = I_{\text{вном}}$) при сбросе нагрузки от номинальной ($I = I_{\text{ном}}$, $U = U_{\text{ном}}$, $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{ном}}$) до нуля ($I = 0$, $U = E_0$) и обычно составляет величину $\Delta U = 25$–35%.

4.6.3. Регулировочная характеристика

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки ($I_{\text{в}} = f(I)$) при неизменном напряжении на выводах генератора и номинальной частоте вращения. Она снимается при неизменном коэффициенте мощности нагрузки ($\cos\varphi = \text{const}$).

Регулировочная характеристика показывает, как следует регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным.

Вид регулировочных характеристик (рис. 4.21, *б*) преимущественно зависит от действия реакции якоря и прямо следует из вида внешних

характеристик. Например, при активно-индуктивной нагрузке напряжение генератора уменьшается. Следовательно, для поддержания постоянства напряжения с возрастанием нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения.

Изменяя $I_в$, мы влияем на величину магнитного потока возбуждения $Ф_0$ и на индуктируемую им ЭДС E_0, которая, в свою очередь, создает на зажимах генератора напряжение U.

Изменение напряжения при нагрузке может отрицательно сказываться на работе потребителей. Регулировкой тока возбуждения напряжение генератора можно поддерживать неизменным по величине. В современных моделях это осуществляется автоматически специальным регулятором, входящим в систему возбуждения.

Обычно при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке в установившемся режиме требуется увеличение тока $I_в$ в 1,5–2 раза, которое тем больше, чем больше x_d.

4.6.4. Характеристика трехфазного короткого замыкания

Характеристикой короткого замыкания называется зависимость тока генератора от тока возбуждения ($I_к = f(I_в)$) при симметричном трехфазном коротком замыкании обмотки якоря СГ. Характеристика КЗ имеет вид прямой, выходящей из начала координат (рис. 4.22), что объясняется следующим.

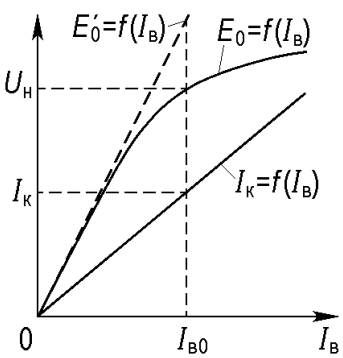


Рис. 4.22. Характеристика короткого замыкания и определение ОКЗ

В режиме короткого замыкания при обычном соотношении параметров обмотки якоря ($x_d \gg r$) ток является практически индуктивным: $\psi \approx \pi / 2$. При этом, как следует из п. 4.6, реакция якоря имеет продольный размагничивающий характер (см. рис. 4.17, *в*), магнитная цепь генератора не насыщена и синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси $x_d = \text{const}$.

Магнитный поток возбуждения $Ф_0$ и наводимая им в обмотке якоря ЭДС E'_0 будут пропорциональны току возбуждения, вследствие чего за-

висимость $E'_0 = f(I_в)$ при ненасыщенном магнитопроводе называется спрямленной характеристикой холостого хода (на рис. 4.22 показана пунктиром). Ее можно построить, продолжив начальный участок обычной характеристики ХХ. Принимая во внимание постоянство x_d, ток КЗ якоря в соответствии с законом Ома ($I_к = E'_0 / x_d$) будет прямо пропорционален E'_0 при одном и том же токе возбуждения. Таким образом, характеристика КЗ $I_к = f(I_в)$ в ином масштабе подобна спрямленной характеристике холостого хода.

По характеристике КЗ и ХХ (см. рис. 4.22) находят важный параметр $k_{ОКЗ}$, называемый *отношением короткого замыкания*. ОКЗ равно относительному значению $I_{к0*}$ тока короткого замыкания, соответствующему такому току возбуждения $I_{в0}$, при котором напряжение холостого хода равно номинальному значению ($E_0 = U_н$):

$$k_{ОКЗ} = I_{к0*} = I_{к0} / I_н. \qquad (4.7)$$

Примем во внимание, что основная часть потока продольной реакции якоря замыкается по той же магнитной цепи, что и поток возбуждения. В режиме ХХ магнитная цепь насыщена, ее магнитной проводимости пропорционально насыщенное значение $x_{dн}$ синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси и ЭДС E_0. В режиме КЗ магнитная цепь ненасыщенна, ее магнитной проводимости пропорционально ненасыщенное значение x_d и ЭДС E'_0. Поэтому применительно к условиям режимов, по которым определяется ОКЗ, справедливо следующее приближенное равенство отношений, в которых соответствующие проводимости сокращаются: $E'_0 / x_d = E_0 / x_{dн}$. На основании выражения (4.7) с учетом того, что $E_0 = U_н$, а $E'_0 / x_d = I_{к0}$, получим:

$$k_{ОКЗ} = I_{к0} / I_н = U_н / (x_{dн} I_н) = 1 / x_{d*}, \qquad (4.8)$$

т.е. ОКЗ обратно пропорционально насыщенному значению x_{d*}.

Обычные значения ОКЗ составляют: у неявнополюсных машин – 0,4–0,85; у явнополюсных – 0,6–1,7; у синхронных компенсаторов – 0,4–0,7.

С увеличением ОКЗ повышается перегрузочная способность машины. Так как синхронное индуктивное сопротивление x_d обратно пропорционально магнитному сопротивлению потоку якоря, ОКЗ возрастает с увеличением воздушного зазора. Однако это приводит к росту МДС обмотки возбуждения для создания одинакового магнитного потока и, соответственно, увеличение массы, габаритов и стоимости.

С уменьшением ОКЗ (увеличением x_d) у автономно работающих генераторов при активно-индуктивной нагрузке в большей степени сни-

жается напряжение (см. рис. 4.21, *а*), что увеличивает требования к системе его регулирования.

4.7. Параллельная работа генератора с сетью

Каждая электростанция обычно содержит несколько генераторов, которые работают параллельно на общие шины (общую сеть). Отдельные электростанции связаны между собой линиями электропередачи, в результате чего образуется энергетическая система. Большинство энергосистем объединено в Единую энергетическую систему (ЕЭС) России, в которой работает большое количество генераторов. Во всех точках такой энергетической системы частота напряжения должна быть одинакова, поэтому включенные в нее генераторы должны быть синхронизированы.

Параллельная работа в составе энергосистемы дает ряд преимуществ: повышается надежность электроснабжения потребителей, легче организовать техническое обслуживание и ремонт электрооборудования без нарушения электроснабжения, возникает возможность маневрирования энергоресурсами и т.п. По мере роста потребности в электроэнергии появляется возможность постепенно наращивать мощность электростанций путем поэтапного ввода отдельных генераторов и включения их на параллельную работу.

При параллельной работе в составе энергосистемы мощность каждого генератора значительно меньше суммарной мощности включенных в нее генераторов. Поэтому приближенно можно принять, что сеть имеет бесконечно большую мощность и работа генератора никаким образом не сказывается на ней. При таком допущении сопротивление сети $Z_c = 0$, математическое описание работы генератора существенно облегчается, позволяя выявить основные закономерности.

4.7.1. Оптимальные условия включения генератора на параллельную работу с сетью

Прямое включение генератора на сеть при неподвижном индукторе не может привести к самостоятельному втягиванию генератора в синхронизм, так как для этого индуктор под действием электромагнитных сил должен за сотую долю секунды набрать синхронную частоту вращения, что невозможно вследствие большой инерции. После подключения к сети возникающее магнитное поле якорной обмотки, вращаясь вокруг индуктора, вызывает знакопеременный электромагнитный момент, который может привести к повреждению ротора.

Можно считать, что напряжения генератора и сети изменяются во времени по синусоидальному закону:

$$u_г = U_{гm}\sin(\omega_г t - \alpha_г),\ \ u_с = U_{сm}\sin(\omega_с t - \alpha_с).$$

Когда частота вращения генератора отличается от синхронной ($\Omega_г \neq \Omega_с$), соответственно, частота его напряжения ($\omega_г = p\Omega_г$) отличается от частоты напряжения сети: $\omega_г \neq \omega_с$. При условии, что $U_{гm} = U_{сm} = U_m$ и $\alpha_г = \alpha_с$,

$$\Delta u = U_{гm}\sin(\omega_г t - \alpha_г) - U_{сm}\sin(\omega_с t - \alpha_с) = 2U_m\cos\frac{(\omega_г + \omega_с)t}{2}\sin\frac{(\omega_г - \omega_с)t}{2}.$$

Разностное напряжение $\Delta u = u_г - u_с$, как видно из полученного выражения, пульсирует с частотой $(\omega_с + \omega_г) / 2$, изменяясь по амплитуде от 0 до $2U_m$ с частотой биений $\Delta\omega = \omega_с - \omega_г$. График его изменения показан на рис. 4.23.

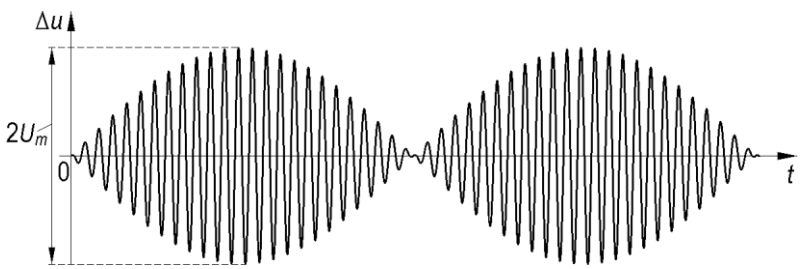


Рис. 4.23. Разностное напряжение биения $\Delta u = u_г - u_с$

При разности фаз генератора и сети $\alpha = \pi$ напряжение биения достигает максимального значения $\Delta U = 2U$, вызывая протекание по обмотке якоря значительного тока $I = 2U / x_с$.

При включении генератора на параллельную работу с сетью необходимо избегать значительных бросков тока и сопровождающих их ударных электромагнитных сил и моментов. Наиболее оптимальный режим включения соответствует $I = 0$. При этом напряжение генератора должно быть равно напряжению сети:

$$U_{гm}\sin(\omega_г t - \alpha_г) = U_{сm}\sin(\omega_с t - \alpha_с).$$

Для выполнения этого условия необходимо достичь равенства:

1) частоты напряжений генератора и сети ($f_г = f_с$);

2) действующих значений этих напряжений ($U_г = U_с$);

3) их начальных фаз ($\alpha_г = \alpha_с$).

Кроме этого, необходимо, чтобы чередование фаз у генератора и сети было одинаковым.

Для включения генераторов на параллельную работу с сетью разработаны специальные методы. Совокупность производимых при этом операций называется синхронизацией.

В точном смысле термина, синхронизация – это процесс уравнивания частоты, величины и фазы напряжения включаемого генератора с соответствующими параметрами напряжения на шинах электростанции.

Автономно работающий СГ всегда синхронизирован, так как частота его вращения определяет частоту сети, которую он питает.

4.7.2. Методы синхронизации генераторов

Метод точной синхронизации. При включении на параллельную работу с сетью этим методом синхронный генератор должен быть нормально возбужден. Основная трудность состоит в определении момента совпадения по фазе напряжений СГ и сети, для чего в автоматическом режиме применяют синхронизаторы, а в ручном – используют вольтметры и специальный прибор: синхроноскоп.

В лабораторных условиях вузов для генераторов с фазным напряжением $U_г = 220$ В синхроноскоп можно выполнить на лампах накаливания со схемой включения «на мигание» или «на вращение» света.

Схема установки с ламповым синхроноскопом «на мигание» света изображена на рис. 4.24. В этой схеме лампы включены параллельно контактам включающего аппарата, т.е. на разностное напряжение ΔU одноименных фаз генератора и сети, максимальное значение которого достигает удвоенного фазного напряжения. Поэтому необходимо принять меры, чтобы напряжение на его элементах не превышало допустимого значения. Периоды биений разностного напряжения ΔU на различных фазах синхроноскопа практически совпадают во времени. Их частота определяет частоту мигания света, и для глаз человека лампы синхроноскопа зажигаются и гаснут практически одновременно. Чем меньше частота биений, тем меньше частота мигания света ламп.

В схеме «на вращение света» лампы одной фазы синхроноскопа соединяют одноименные фазы, а двух других – разноименные фазы генератора и сети. В этом случае биения разностного напряжения ΔU на фазах синхроноскопа будут сдвинуты во времени на треть периода биений $T_б = 2\pi / \Delta\omega$, благодаря чему лампы зажигаются и гаснут поочередно. Если лампы фаз синхроноскопа равномерно расположены по окружности, создается впечатление «вращения» света.

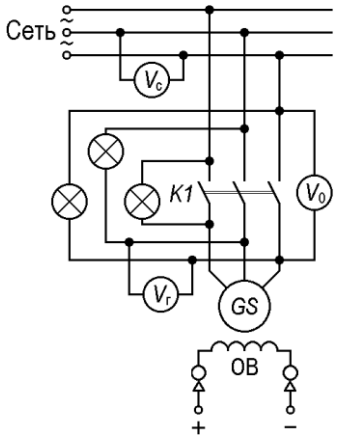


Рис. 4.24. Включение СГ на параллельную работу методом точной синхронизации в лабораторных условиях

Точная синхронизация осуществляется следующим образом. С помощью первичного двигателя устанавливают частоту вращения ротора, при которой $f_г \approx f_с$. В обмотке возбуждения ОВ с помощью регулируемого источника постоянного напряжения устанавливают такой ток, чтобы напряжение на выводах генератора $U_г = U_с$, что контролируется вольтметрами $V_г$ и $V_с$. Обычно строгого равенства частот $f_г$ и $f_с$ не достигают, и после выполнения всех операций лампы синхроноскопа медленно зажигаются и гаснут с периодом в несколько секунд. Лампы накаливания гаснут при напряжении 25–50% от номинального значения. Включение генератора на параллельную работу с сетью должно производиться в середине периода погасания ламп, когда вольтметр V_0 показывает нуль. Включение в этот момент времени обеспечивает равенство начальных фаз напряжений генератора и сети. На электростанциях подгонка этих величин осуществляется персоналом вручную или автоматически.

С помощью лампового синхроноскопа также определяется совпадение чередования фаз у генератора и сети. В случае несовпадения возникает «вращение» света (для осуществления возможности «вращения» света лампы располагают симметрично по окружности).

Метод точной синхронизации обеспечивает наиболее благоприятные условия включения генератора на параллельную работу с сетью и применяется в нормальных условиях работы. При полном соблюдении всех условий при включении СГ на сеть броски тока и сопутствующие негативные явления будут отсутствовать. Недостаток метода – длительность процесса, который занимает несколько минут.

Метод самосинхронизации. Применение этого метода значительно упрощает и ускоряет процесс включения на параллельную работу, так как не требует точной подгонки частоты и фазы напряжения включаемой синхронной машины. Он реализуется относительно несложной системой автоматизации, требует меньше времени на включение в сравне-

нии с методом точной синхронизации, что особенно важно в аварийных условиях, когда возникает необходимость в быстром включении резервных генераторов.

Обмотка возбуждения замыкается на специальный резистор во избежание возникновения опасного для изоляции высокого напряжения, создаваемого индуктируемой ЭДС. С помощью приводного двигателя ротор разгоняется до подсинхронной скорости ($s < 3\%$), и невозбужденный генератор подключается к сети. После этого обмотка возбуждения подключается к источнику питания. Создается магнитный поток, и возникающий при этом электромагнитный момент обеспечивает втягивание генератора в синхронизм.

В момент включения генератора на сеть на выводах системы возбуждения должно быть напряжение, обеспечивающее номинальное напряжение в режиме холостого хода генератора.

Недостатком метода самосинхронизации является бросок тока $I_{вкл}$, который может возникнуть в обмотке статора при подключении к сети. Этот ток, обычно не превышающий 3,5-кратного значения номинального тока, приводит к снижению напряжения $U_ш$ на сборных шинах электростанции, соединяющей синхронизируемый генератор с системой, так как $\underline{U}_ш = \underline{U}_{сист} - jx_{сист}\underline{I}_{вкл}$. Он быстро уменьшается и обычно не оказывает существенного влияния на генератор и сеть.

Метод самосинхронизации используют для гидрогенераторов, ветроагрегатов, агрегатов с приводом от двигателей внутреннего сгорания. Для турбогенераторов этот метод не применяется ввиду нецелесообразности, поскольку на прогрев частей паровой турбины перед включением турбоустановки требуется значительное время.

В случае аварии в энергосистеме методом самосинхронизации могут включаться все генераторы.

Метод грубой синхронизации. На автономных электростанциях нашел также применение метод грубой синхронизации, отличающийся непродолжительностью, простотой операций и надежностью. Он состоит в том, что генератор подключают к сети не прямо, а через токоограничивающий реактор. Здесь, как и в методе точной синхронизации, возбужденный до номинального напряжения генератор доводится до подсинхронной частоты вращения. После этого генератор включают на шины сначала через реактор, а спустя несколько секунд, – напрямую (реактор выключают). В отличие от метода точной синхронизации включение генератора выполняют в произвольный момент времени, фаза его ЭДС $\underline{E}_0$ может быть любой. По этой причине разностное напряжение может достигать двойного значения (см. рис. 4.21). Возможные броски тока и ударные электромагнитные моменты ограничивают до безопасных значений с помощью реактора. Его сопротивление рассчитывается таким

образом, чтобы ток включения генератора не превышал номинального значения.

Втягивание генератора в синхронизм происходит так же, как и в методе самосинхронизации.

4.7.3. Работа подключенной к сети синхронной машины в режиме генератора и двигателя

Будем считать, что после включения на параллельную работу синхронная машина работает в режиме идеального ХХ (рис. 4.25, *б*). При этом ток по обмотке якоря не протекает: машина не отдает и не потребляет из сети электрическую энергию. Механические и магнитные потери мощности в генераторе покрывает первичный двигатель.

Если с помощью приводного двигателя приложить вращающий момент к валу СМ, то ее индуктор начнет ускоряться. При этом индуктированная им ЭДС $\underline{E}_0$ сдвигается в сторону опережения по фазе относительно напряжения $\underline{U}$ на угол θ (рис. 4.25, *а*). Возникает напряжение рассогласования $\Delta\underline{U}$, вызывающее в обмотке статора ток $\underline{I} \approx \Delta\underline{U} / jx_c$, взаимодействие которого с полем возбуждения создает уравновешивающий тормозной электромагнитный момент. В результате после некоторого переходного процесса индуктор продолжит вращение с синхронной частотой $\Omega_2 = \Omega_1$. При этом машина работает в режиме генератора, отдавая энергию в сеть.

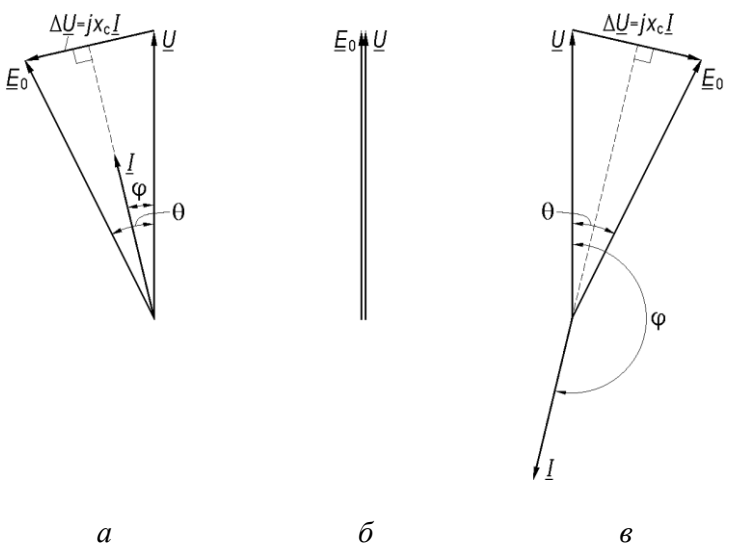


Рис. 4.25. Векторные диаграммы при нагрузке СМ:
а – режим генератора; *б* – режим ХХ; *в* – режим двигателя

Если к валу СМ приложить тормозной момент, то ее индуктор начнет замедляться. Одновременно индуктированная им ЭДС $\underline{E}_0$ начнет отставать по фазе в сторону относительно напряжения $\underline{U}$ на угол θ (рис. 4.25, *в*). Напряжение рассогласования $\Delta\underline{U}$ будет иметь противоположную предыдущему случаю фазу и вызывать в обмотке статора соответствующий ток $\underline{I}$, который создаст вращающий электромагнитный момент. Он уравновесит приложенный тормозной момент, в результате чего индуктор продолжит синхронное вращение. При этом машина работает в режиме двигателя, потребляя из сети активную мощность.

Таким образом, режим работы синхронной машины, подсоединенной к сети, зависит от направления действия на вал ротора внешнего механического момента: вращающего – в режиме генератора и тормозного – в режиме двигателя. Регулирование активной мощности производится путем его изменения.

Для наглядности можно поставить в соответствие механическую аналогию в виде муфты (рис. 4.26), состоящей из вращающихся без трения с одинаковой частотой частей: внешней и внутренней, связанных между собой пружинами.

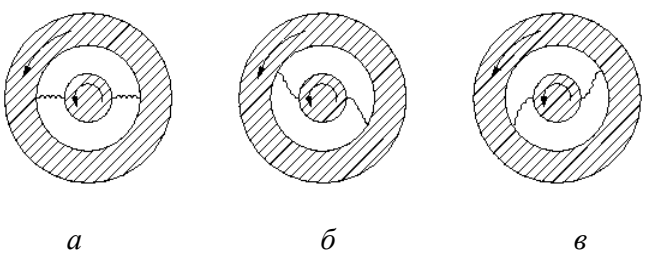


Рис. 4.26. Взаимодействие синхронно вращающихся частей муфты, связанных пружинами:

а – на вращающие части моменты не действуют;
б – к внутренней части приложен вращающий момент, к наружной – тормозной;
в – к наружной части приложен вращающий момент, к внутренней – тормозной

При свободном вращении (рис. 4.26, *а*) части муфты между собой не взаимодействуют (режим идеального ХХ). Если к внутренней части приложить вращающий момент (рис. 4.26, *б*), а к наружной – тормозной, пружины будут растягиваться до тех пор, пока вращающий и тормозной моменты не уравновесятся (аналогия с режимом генератора). При этом внутренняя часть повернется относительно наружной в сторону опережения на некоторый угол. Если поменять на обратное действие вращающего и тормозного моментов (рис. 4.26, *в*), процесс уравновешивания будет протекать аналогично, но уже наоборот, наружная часть повернется относительно внутренней в сторону опережения

(аналогия с режимом двигателя). После переходного процесса уравновешивания вращающего и тормозного моментов обе части муфты будут вращаться синхронно.

4.8. Зависимость электромагнитной мощности и момента синхронной машины от угла нагрузки

Получим зависимость электромагнитной мощности $P_{эм}$ и момента $M_{эм}$ явнополюсной синхронной машины от угла нагрузки θ. Если пренебречь потерями в обмотке якоря (для СМ, подключенной к сети → обмотка якоря + его сердечник), то мощность, отдаваемая в сеть в генераторном режиме или потребляемая из сети в двигательном режиме, соответствует электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = mUI\cos\varphi$$

Согласно векторной диаграмме разность фаз между напряжением $\underline{U}$ на зажимах якорной обмотки и током нагрузки $\underline{I}$ составляет: $\varphi = \phi - \theta$. Преобразуя $\cos(\phi - \theta)$ по известным правилам тригонометрии, и учитывая, что $I_q = I\cos\phi$, а $I_d = I\sin\phi$, получим:

$$P_{эм} = mUI\cos(\phi - \theta) = mUI(\cos\phi\cos\theta + \sin\phi\sin\theta) = mUI_q\cos\theta + mUI_d\sin\theta.$$

Выразим составляющие I_q и I_d тока якоря из упрощенной векторной диаграммы:

$$I_q = U\sin\theta/x_q; \quad I_d = (E_0 - U\cos\theta) / x_d.$$

После подстановки составляющих I_q и I_d в выражение для мощности, получим:

$$P_{эм} = \frac{mUE_0}{x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2}\sin 2\theta\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right). \qquad (4.9)$$

По значению мощности можно рассчитать электромагнитный момент:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\Omega} = \frac{mUE_0}{\Omega x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2\Omega}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta, \qquad (4.10)$$

где Ω – угловая частота вращения ротора.

Согласно выражениям (4.9)–(4.10), в явнополюсной машине электромагнитная мощность и момент складываются из двух составляющих, в частности:

$$M_{эм} = M_{в} + M_{р}.$$

Первая (основная) составляющая $M_{в}$, пропорциональная $\sin\theta$, обусловлена взаимодействием токов обмотки якоря и обмотки возбуждения. Вторая составляющая $M_{р}$, пропорциональная $\sin 2\theta$, появляется из-за периодического (число периодов в 2 раза больше, чем у основного магнитного поля) изменения магнитной проводимости по окружности зазора, вызванного неравенством воздушного зазора между сердечниками статора и ротора по продольной и поперечной оси. Вследствие этого возникают силы магнитного тяжения, стремящиеся совместить ось полюсов с магнитной осью результирующего поля. Возникновение второй составляющей можно объяснить также взаимодействием токов обмотки якоря и молекулярных токов полюсов ротора. Аналогичные силы будут действовать на размагниченную стрелку компаса в магнитном поле Земли. Эту составляющую называют реактивным моментом. Как видно из выражения (4.10), она пропорциональна разности обратных значений индуктивных сопротивлений по поперечной и продольной оси.

Зависимость $M_{эм} = f(\theta)$ или $P_{эм} = f(\theta)$ называется угловой характеристикой (рис. 4.27). При идеальном ХХ $M_{эм} = 0$ и $\theta = 0$. При некотором значении угла нагрузки θ_m электромагнитный момент достигает максимального значения M_m, а затем уменьшается; $M_{эм} = 0$ при $\theta = \pi$.

Реактивный момент явнополюсной синхронной машины увеличивает крутизну рабочего участка угловой характеристики и ее максимальный момент.

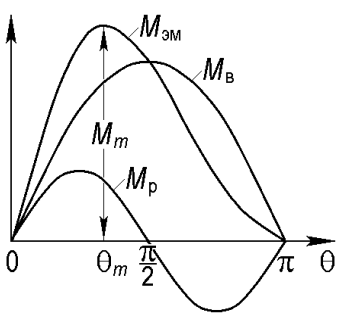


Рис. 4.27. Угловая характеристика СМ

У неявнополюсной синхронной машины ротор – цилиндрический, значения индуктивных сопротивлений по поперечной и продольной оси одинаковы ($x_q = x_d$) и, следовательно, электромагнитная мощность и момент имеют по одной составляющей, обусловленной возбуждением:

$$P_{эм} = mE_0U\sin\theta / (x_d) = P_m\sin\theta. \quad (4.11)$$

$$M_{эм} = mE_0U\sin\theta / (\Omega x_d) = M_m\sin\theta. \quad (4.12)$$

4.9. Статическая устойчивость синхронной машины

Реальная работа синхронной машины часто сопровождается изменением параметров режима, что связано с изменениями нагрузки, напряжения и т.п. Статической устойчивостью (или устойчивостью в малом) машины, работающей параллельно с сетью, называется ее способность сохранять синхронное вращение (т.е. условие $n_2 = n_1$) при достаточно малом медленном изменении нагрузки.

Рассмотрим условия статической устойчивости на примере неявнополюсного синхронного генератора машины при изменении внешнего вращающего момента $M_{вн}$, приложенного к его валу. Исследование проведем с использованием угловой характеристики (рис. 4.28), которая в соответствии с выражением (4.12) имеет вид синусоиды.

Предположим, генератор работает при некотором моменте на валу в точке *A* угловой характеристики. Пусть вращающий момент первичного двигателя $M_{вн}$ увеличивается так медленно, что инерцией можно пренебречь. В этом случае вращающий момент первичного двигателя уравновешивается электромагнитным тормозным моментом генератора в любой точке (например, точке *B*) на участке $0 < \theta < \pi / 2$ угловой характеристики.

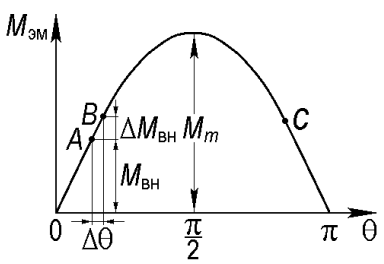


Рис. 4.28. К определению статической устойчивости СМ

Аналогичный процесс будет иметь место при уменьшении $M_{вн}$. В результате ротор продолжит вращение с синхронной частотой.

Таким образом, ротор синхронного генератора, включённого на параллельную работу с сетью, продолжит вращаться синхронно при медленном изменении внешнего момента на валу в пределах рабочего участка угловой характеристики.

Аналогично синхронизируется двигатель при изменении тормозного момента на валу.

В диапазоне углов $\pi / 2 < \theta < \pi$ (например, в точке C) устойчивая работа генератора при возрастании внешнего момента невозможна, так как увеличение угла θ приводит к уменьшению электромагнитного момента, из-за чего рассогласование между вращающим и тормозным моментами возрастет. В результате ускорение ротора и величина угла θ будут возрастать, что может привести или к переходу в точку устойчивой работы (аналогичную точке B) на последующих положительных полуволнах, или к выпадению из синхронизма (вращение ротора с отличной от магнитного поля статора частотой), если ротор вследствие инерции проскочит положения устойчивости.

Выпадение из синхронизма является аварийным режимом. Когда положение ротора соответствует обратной полуволне угловой характеристики, по обмотке якоря протекает большой ток под суммарным воздействием ЭДС E_0 генератора и напряжения сети $U_с$, вызывающий ее перегрев. Одновременно на ротор действует знакопеременный момент, что может привести к его поломке.

Статическая устойчивость обеспечивается только при углах $0 < \theta < \pi / 2$, соответствующих $M_{эм} < M_m$. Точка $\theta = \pi / 2$ является предельной по условиям статической устойчивости.

Из рассмотренного выше процесса следует, что синхронная машина работает устойчиво, если $dM_{эм} / d\theta > 0$, и неустойчиво, если $dM_{эм} / d\theta < 0$. Чем меньше угол θ, тем больший запас по устойчивости имеет машина. Если машина работает в установившемся режиме при некотором угле θ, то малое отклонение $\Delta\theta$ от этого угла сопровождается возникновением момента, называемого синхронизирующим, который стремится восстановить исходный угол θ:

$$\Delta M_{эм} = (dM_{эм} / d\theta)\Delta\theta,$$

Соответствующая синхронизирующая мощность:

$$\Delta P_{эм} = (dP_{эм} / d\theta)\Delta\theta.$$

Производные $dM_{эм} / d\theta$ и $dP_{эм} / d\theta$ являются коэффициентами пропорциональности при дифференциалах $\Delta M_{эм}$ и $\Delta P_{эм}$ и называются, соответственно, коэффициентами синхронизирующего момента и синхронизирующей мощности. Из выражения (4.12) следует, что в неявнополюсной машине они равны $dM_{эм} / d\theta = M_m \cos\theta$, $dP_{эм} / d\theta = P_{эм\,m} \cos\theta$, уменьшаясь от максимального значения до нуля в диапазоне углов $0 < \theta < \pi / 2$. Статическая устойчивость синхронной машины тем выше, чем больше указанные коэффициенты.

В неявнополюсной СМ положение ротора, соответствующее $\theta = \pi / 2$ (см. рис. 4.28), при котором эти коэффициенты становятся равными нулю, характеризует предел статической устойчивости.

Обычно синхронные машины работают при $\theta = 20–35°$.

Статическая перегружаемость синхронной машины характеризуется кратностью максимального момента или мощности:

$$k_п = M_m / M_н = P_m / P_н. \qquad (4.13)$$

Согласно выражениям (4.11) и (4.12) для неявнополюсной машины, максимальные значения мощности и момента обратно пропорциональны синхронному индуктивному сопротивлению x_d, и в соответствии с выражением (4.8), прямо пропорциональны ОКЗ. Согласно ГОСТу соотношения (4.13) должны быть не менее: для турбогенераторов – 1,6–1,7; для гидрогенераторов – 1,7; для синхронных двигателей большой и средней мощности – 1,65.

Статическую устойчивость можно изменять, регулируя ток возбуждения. Как следует из выражений (4.11)–(4.12), это влияет на величину E_0 (через поток возбуждения) и, следовательно, на максимальные значения мощности и момента и статическую перегружаемость.

При увеличении тока возбуждения статическая устойчивость повышается. Поэтому при угрозе выпадения из синхронизма (например, генератора при КЗ на линии) увеличивают максимальный момент путем форсировки возбуждения.

4.10. Регулирование реактивной мощности синхронной машины при параллельной работе с сетью

Регулирование реактивной мощности СМ при параллельной работе с сетью может быть осуществлено путем изменения тока возбуждения. Покажем это на примере машины неявнополюсной конструкции. Для упрощения будем полагать, что активная мощность остается постоянной.

Изменение тока возбуждения влияет на возбуждаемый им магнитный поток, которому прямо пропорциональна индуктируемая в обмотке якоря ЭДС E_0. Так как напряжение на выводах обмотки якоря равно напряжению сети и постоянно, то из уравнения электрического равновесия (4.5) следует, что для сохранения баланса одновременно с E_0 должен изменяться ток якоря $\underline{I}$. Установим характер этого изменения.

Активная мощность СМ может быть рассчитана по формуле

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

Ток якоря относительно напряжения U на зажимах, может быть разложен на активную и реактивную составляющие: $\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_p$ (рис. 4.29, *а*), зависящие от характера нагрузки. Так как m и U – постоянные величины, то при постоянстве активной мощности ($P = \text{const}$) регулирование тока возбуждения не должно влиять на активную составляющую тока якоря ($I_a = I\cos\varphi = \text{const}$) и, следовательно, изменение тока якоря происходит за счет его реактивной составляющей $I_\text{р} = I\sin\varphi$, которая определяет реактивную мощность:

$$Q = mUI\sin\varphi = mUI_\text{р}.$$

При регулировании тока возбуждения ток $\underline{I}$ якоря изменяется таким образом, что конец изображающего его вектора описывает прямую (годограф), перпендикулярную вектору напряжения $\underline{U}$, что следует из условия $I\cos\varphi = \text{const}$ (см. рис. 4.29, *а*). Очевидно, что при этом изменяется угол φ сдвига по фазе между напряжением и током, определяющий характер нагрузки.

Режим возбуждения при токе $I_\text{вп}$, соответствующем $\varphi = 0$ (активная нагрузка), называют режимом полного или нормального возбуждения.

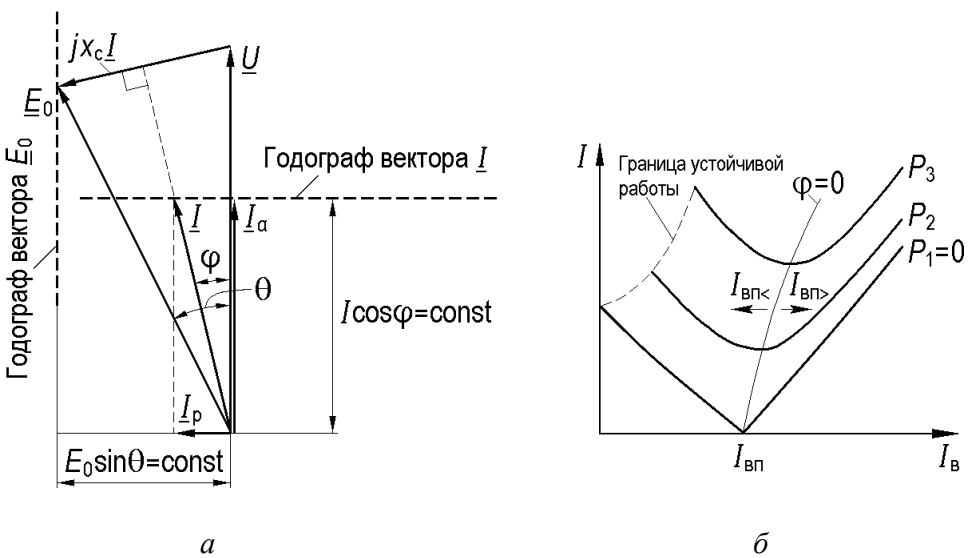


Рис. 4.29. Регулирование реактивной мощности СМ:
а – векторная диаграмма; *б* – *U*-образные характеристики

При меньшем токе возбуждения ($I_\text{в} < I_\text{вп}$) имеет место режим недовозбуждения, при большем ($I_\text{в} > I_\text{вп}$) – режим перевозбуждения.

В режиме недовозбуждения СМ ток якоря $\underline{I}$ опережает по фазе напряжение $\underline{U}$ (см. рис. 4.29, *а*), потребляя из сети реактивную мощность индуктивного характера (аналогично катушке индуктивности), а в режиме перевозбуждения отстает от него по фазе, генерируя в сеть реактивную мощность индуктивного характера (аналогично конденсаторной батарее).

Из выражений (4.11)–(4.12) можно сделать вывод, что при регулировании тока возбуждения с сохранением постоянства мощности произведение $E_0 \sin\theta = \text{const}$. Это условие выполняется тогда, когда конец изображающего ЭДС $\underline{E}_0$ вектора описывает прямую (годограф), параллельную вектору напряжения $\underline{U}$.

Зависимость тока якоря СМ от тока возбуждения $I = f(I_в)$ при неизменных значениях активной мощности и напряжении на выводах обмотки якоря называют *U*-образной характеристикой. На рис. 4.29, *б* изображено семейство указанных характеристик ($P_3 > P_2 > P_1$).

Качественный характер этих зависимостей можно установить из выражения для активной мощности $P = mUI\cos\varphi = \text{const}$, откуда следует, что $I = (P / mU) / \cos\varphi$. Так как $P / mU = \text{const}$, минимальное значение тока якоря будет соответствовать $\cos\varphi = 1$, т.е. активной нагрузке. Таким образом, минимумы *U*-образных характеристик лежат на кривой $\varphi = 0$, которая, по сути, является регулировочной характеристикой для активной нагрузки (см. рис. 4.21, *б*). Слева от этой кривой (в режиме недовозбуждения) и справа (в режиме перевозбуждения) сила тока якоря увеличивается для каждой из *U*-образных характеристик.

СМ преимущественно работают в области перевозбуждения, так как в этом режиме они генерируют реактивную мощность в сеть и имеют более высокую статическую устойчивость.

4.11. Синхронные двигатели

4.11.1. Область применения. Устройство

Синхронные двигатели нашли широкое применение в электроприводах, требующих повышенной перегрузочной способности и работающих с постоянной частотой вращения: компрессоров, насосов и др. В настоящее время получают распространение регулируемые синхронные электроприводы на основе полупроводниковой преобразовательной техники.

Несмотря на более сложную конструкцию в сравнении с асинхронными двигателями, они имеют свои специфические достоинства:

1. Возможность получения оптимального режима по реактивной мощности путем регулирования тока возбуждения. СД могут генериро-

вать в сеть реактивную мощность, компенсируя часть реактивной мощности, потребляемой приемниками активно-индуктивного характера, прежде всего АД. Это свойство часто используется в системах промышленного электроснабжения путем использования СД большой мощности напряжением выше 1 кВ.

Номинальный коэффициент мощности синхронных машин при частоте 50 Гц должен быть: для синхронных генераторов – 0.8 (при отстающем токе относительно напряжения сети); для синхронных двигателей – 0,9 (при опережающем токе относительно напряжения сети).

2. Перегрузочная способность у синхронных двигателей выше чем у асинхронных, и в меньшей степени зависит от изменения напряжения сети, так прямо пропорциональна напряжению сети в первой степени, а не во второй. При необходимости она может быть повышена путем увеличения тока возбуждения.

3. Постоянство частоты вращения при изменении нагрузки, что требуется для некоторых типов приводов.

Устройство синхронных двигателей в целом не отличается от аналогичных по мощности и исполнению синхронных генераторов (см. п. 4.2). В современных приводах их возбуждение преимущественно осуществляются от тиристорных возбудителей (см. рис. 4.11).

Принцип работы СМ в режиме двигателя был описан выше в п. 4.7.3.

4.11.2. Уравнения, векторные диаграммы

Как показано в п. 4.7.3, синхронная машина, работающая параллельно с сетью, естественным образом переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложить тормозной момент. При этом установившаяся частота вращения двигателя в пределах статической устойчивости остается неизменной, жестко связанной с частотой сети соотношением: $n_2 = n_1 = f_1 / p$, об/с, что является специфическим свойством синхронного двигателя.

Для математического описания целесообразно выбрать естественное для двигателя условное положительное направление тока якоря, когда его направление совпадает с направлением действия приложенного напряжения (рис. 4.30, *а*).

Схема замещения (рис. 4.30, *б*) неявнополюсного СД (турбодвигателя) содержит те же элементы, что и у СГ (см. рис. 4.16, *б*), так происходящие в них физические процессы одинаковы. В соответствии с выбранными условными положительными направлениями ЭДС, тока и напряжения на основании второго закона Кирхгофа для фазы обмотки якоря может быть записано уравнение электрического равновесия:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + jx_c\underline{I} + r\underline{I}. \qquad (4.13)$$

Количественные и фазовые соотношения между составляющими этого уравнения отображаются векторной диаграммой (рис. 4.30, *в*).

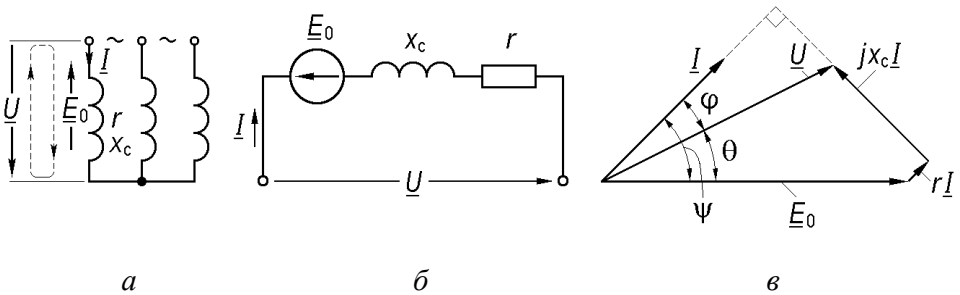


Рис. 4.30. Математическое моделирование неявнополюсного СД:
а – схема обмотки якоря СД с принятыми условными положительными направлениями;
б – схема замещения; *в* – векторная диаграмма

При аналогичных с неявнополюсным двигателем условных положительных направлениях ЭДС, тока и напряжения (см. рис. 4.30, *а*), для фазы обмотки якоря явнополюсного двигателя может быть записано уравнение:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + jx_q\underline{I}_q + jx_d\underline{I}_d + r\underline{I}. \qquad (4.14)$$

В СД средней и большой мощности активное сопротивление обмотки якоря намного меньше синхронных индуктивных сопротивлений, и с целью упрощения математического описания в уравнениях (4.13) и (4.14) ими можно пренебречь, полагая $r \approx 0$. Упрощенные уравнения электрического равновесия для фазы обмотки якоря примут вид:

для неявнополюсного СД

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + jx_c\underline{I}, \qquad (4.15)$$

для явнополюсного СД

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + jx_q\underline{I}_q + jx_d\underline{I}_d. \qquad (4.16)$$

По этим уравнениям могут быть построены соответствующие упрощенные векторные диаграммы (рис. 4.31).

Возникновение опережающего угла θ между осью результирующего поля и осью полюсов ротора может быть объяснено с физической стороны тем, что результирующее вращающееся магнитное поле «тянет» за собой ротор.

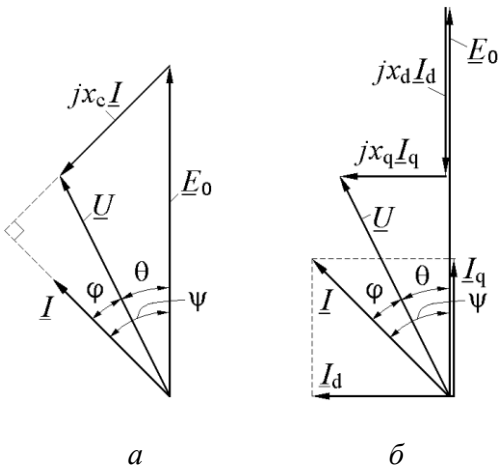


Рис. 4.31. Упрощенные ВД неявнополюсного (*а*) и явнополюсного (*б*) СД

У синхронного двигателя зависимость электромагнитного момента $M_{эм}$ от угла нагрузки θ описывается тем же выражением (4.10), что и у генератора.

4.11.3. Механическая характеристика

Как следует из принципа действия, синхронный двигатель может развивать вращающий момент только при синхронной частоте вращения. Поэтому в пределах статической устойчивости механическая характеристика СД представляет собой отрезок прямой линии (0…M_m), параллельный оси абсцисс (рис. 4.32).

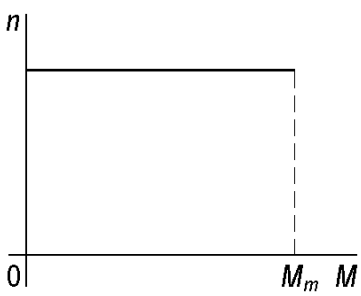


Рис. 4.32. Механическая характеристика СД

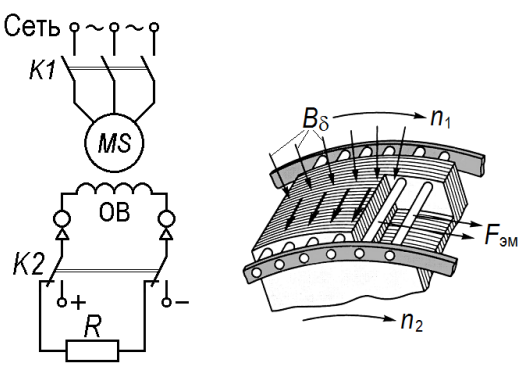
При превышении максимального момента M_m двигатель выпадает из синхронизма.

4.11.4. Способы пуска

Пуск и последующая синхронизация двигателей зависят от условий пуска. Легкий пуск характеризуется небольшим моментом сопротивления на валу и малым моментом инерции вращающихся масс. Тяжелый пуск происходит в условиях большого момента сопротивления на валу и момента инерции.

Как следует из принципа действия, на ротор синхронного двигателя действует вращающий момент только тогда, когда его частота вращения равна синхронной ($n_2 = n_1$). Когда двигатель подключается к сети создаваемое обмоткой якоря магнитное поле вращается с синхронной частотой, и на ротор действует знакопеременный электромагнитный момент, среднее значение которого равно нулю. Хотя в течение половины каждого периода ($0{,}5 / f_1$) изменения сетевого напряжения на ротор действует вращающий момент, из-за наличия момента инерции за столь короткое время он не может достичь синхронной частоты вращения. Следовательно, при подключении к сети синхронный двигатель не разовьет устойчивого пускового момента и не сможет самостоятельно прийти во вращение. Чтобы синхронный двигатель мог втянуться в синхронизм и нести нагрузку, необходимо предварительно разогнать его ротор до частоты вращения, близкой к синхронной.

1. **Асинхронный пуск** СД производят по схеме рис. 4.33, *а*. Для его осуществления в пазах полюсных наконечников выполняют дополнительную короткозамкнутую обмотку из латуни или меди (рис. 4.33, *б*), аналогичную обмотке короткозамкнутого ротора АД, которая создает пусковой момент. В турбодвигателях роль пусковой обмотки выполняет массивный сердечник ротора.



а *б*

Рис. 4.33. Асинхронный пуск СД: *а* – схема, *б* – пусковая обмотка

Синхронный двигатель пускается невозбужденным путем подключения выводов статора к сети. При этом создается вращающееся магнитное поле, и за счет асинхронного вращающего момента двигатель трогается и разгоняется до близкой к синхронной частоте вращения (скольжение $s < 0{,}05$).

В процессе асинхронного пуска обмотка возбуждения шунтируется балластным резистором, сопротивление которого в 5–10 раз превышает ее собственное. Это позволяет предотвратить пробой изоляции обмотки возбуждения, так как при больших скольжениях в ней наводится значительная ЭДС, и может возникнуть опасное перенапряжение. При скорости вращения, близкой к синхронной, обмотка возбуждения отключается от резистора и подключается к источнику питания постоянного тока. Возникающий ток возбуждения создает магнитный поток, возникает синхронный момент, и ротор СД втягивается в синхронизм.

Аналогично производится пуск синхронных компенсаторов.

Асинхронный прямой пуск синхронных машин прост, экономичен и широко используется на практике для двигателей средней мощности. Однако он обладает существенными недостатками:

– протекание пусковых токов по клетке ротора приводит к выделению в ней значительной энергии, которая может вызвать перегрев (400–500°С) и обрыв стержней;

– большие электродинамические воздействия на обмотки и механические – на вал вследствие больших ударных токов и моментов;

– значительные «провалы» напряжения в энергосистеме.

Для снижения пусковых токов применяют те же методы, что и для короткозамкнутых АД: снижение напряжения с помощью автотрансформатора и включение последовательно в цепь статора реакторов.

В режиме, когда синхронная машина вращается в среднем с синхронной частотой, короткозамкнутая пусковая обмотка является демпфером, гасящим колебания ротора при резких толчках нагрузки.

Предположим, нагрузка на валу СД резко увеличилась на некоторую величину. Это приводит к замедлению ротора, возникает скольжение вращающегося поля якоря относительно ротора, в демпферной обмотке индуктируются токи, и создается дополнительный асинхронный вращающий момент.

Если нагрузка на валу снижается, то ротор ускоряется ($n_2 > n_1$). Скольжение имеет другой знак и в демпферной обмотке индуктируются токи, создающие тормозной момент.

С целью демпфирования колебаний ротора короткозамкнутая обмотка устанавливается в дизель-генераторах и гидрогенераторах.

В турбогенераторах и турбодвигателях роль демпферной и пусковой обмотки выполняет массивный сердечник ротора.

Демпферная обмотка повышает также динамическую устойчивость синхронных машин.

2. **Частотный пуск** от тиристорных преобразователей частоты мощных синхронных машин начал применяться с середины 70-х годов прошлого столетия и является наиболее рациональным способом плавного пуска, регулирования частоты вращения и рекуперативного торможения. Он нашел широкое применение для пуска обратимых гидроагрегатов ГАЭС, газотурбинных установок, синхронных компенсаторов и т.д.

Типичная схема привода с синхронным двигателем, получающем питание от преобразователя частоты, показана на рис. 4.34.

С помощью преобразователя частота тока в обмотке якоря плавно увеличивается до требуемого значения, и возбуждаемое вращающееся магнитное поле увлекает за собой индуктор.

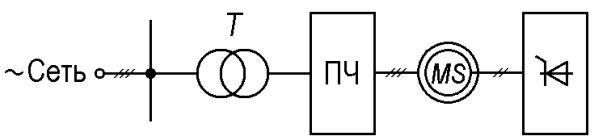


Рис. 4.34. Схема питания СД от преобразователя частоты

С помощью преобразователя частоты может быть также реализована синхронизация приводного двигателя с сетью. В этом режиме путем плавного увеличения частоты питающего напряжения двигатель разгоняется до синхронной скорости и при выполнении условий синхронизации переключается на сеть.

3. Пуск с помощью разгонного двигателя. Посредством приводного двигателя ротор разгоняется до подсинхронной частоты вращения. Далее приводной механизм отключается, и ротор втягивается в синхронизм. В качестве разгонного часто используют асинхронный двигатель с короткозамкнутым или фазным ротором.

4.11.5. Регулирование частоты вращения

Для синхронных двигателей возможен единственный способ регулирования частоты вращения: изменение частоты питающего напряжения. При этом двигатель должен получать питание от преобразователя частоты (см. рис. 4.34). Для улучшения характеристик, например, увеличения перегрузочной способности, возможно регулирование тока возбуждения.

Регулирование частоты вращения относительно номинальной возможно как в сторону увеличения (вверх), так и уменьшения (вниз). Диапазон регулирования может быть весьма широким: 1:100 и более.

Как и асинхронном приводе, при регулировании частоты вращения синхронных двигателей одновременно с частотой необходимо изменять и величину питающего напряжения. Однако в синхронных двигателях способ частотного регулирования без самосинхронизации, аналогичный используемому в асинхронном приводе, применяется в основном при небольших моментах инерции, например, в приводах вентиляторов. Синхронный привод, в отличие от частотно-регулируемого асинхронного электропривода с разомкнутой системой управления, во всем диапазоне регулирования имеет постоянную частоту вращения независимо от напряжения питания и момента нагрузки.

При больших моментах инерции приводного механизма, а также при пуске, частоту питающего напряжения необходимо изменять плавно во избежание выпадения из синхронизма. Для таких электроприводов применяют метод частотного регулирования с самосинхронизацией, при котором синхронный двигатель в принципе не может выпасть из синхронизма. В этом методе векторного управления формирование напряжения преобразователя осуществляется с учетом положения ротора. Благодаря этому обеспечиваются углы нагрузки $\theta < \pi / 2$ (см. рис. 4.28) и, таким образом, условия устойчивой работы двигателя выполняются автоматически, а его перегрузочная способность определяется только перегрузочной способностью преобразователя частоты.

4.11.6. Торможение

В СМ постоянный по направлению момент возникает только при синхронном вращении ротора и поля статора. Поэтому синхронный двигатель по принципу действия не может иметь режим ЭМТ. Однако, когда он снабжен пусковой короткозамкнутой обмоткой, подобно АД его можно перевести в режим ЭМТ изменением порядка чередования питающих фаз по схеме рис. 3.24. При этом обмотка возбуждения, как и при асинхронном пуске, замыкается на балластный резистор.

Динамическое торможение производится путем отключения статорной обмотки от сети переменного тока и замыкания ее на соединенные в звезду резисторы, которые играют роль нагрузки. При этом двигатель переводится в режим автономно работающего генератора, и на его ротор действует тормозной момент.

4.12. Синхронные компенсаторы

Потребители электрической энергии кроме активной мощности потребляют от генераторов системы реактивную мощность индуктивного характера. Она необходима для возбуждения рабочих переменных магнитных полей в трансформаторах, асинхронных двигателях, индукционных печах и других электроприемниках. Соответственно, в потребляемом ими токе возникает индуктивная реактивная составляющая, увеличивающая общий ток, что вызывает дополнительные потери энергии в трансформаторах и сетях. Поэтому экономически выгодно для компенсации реактивной мощности потребителей устанавливать источники реактивной мощности, одними из которых являются синхронные компенсаторы.

Синхронный компенсатор (СК) конструктивно представляет собой электродвигатель синхронного типа облегчённой конструкции без рабочего конца вала, работающий на холостом ходу. Он потребляет из сети относительно небольшую активную мощность, расходуемую на компенсацию потерь.

Для получения максимального эффекта от компенсации источники реактивной мощности целесообразно приближать к приемникам. С другой стороны, синхронные компенсаторы выгодно использовать при большой реактивной мощности (единицы – десятки МВА). Поэтому их обычно устанавливают на крупных подстанциях (рис. 4.35, *а*, см. также рис. 4.7), расположенных в районах сосредоточения потребительских нагрузок.

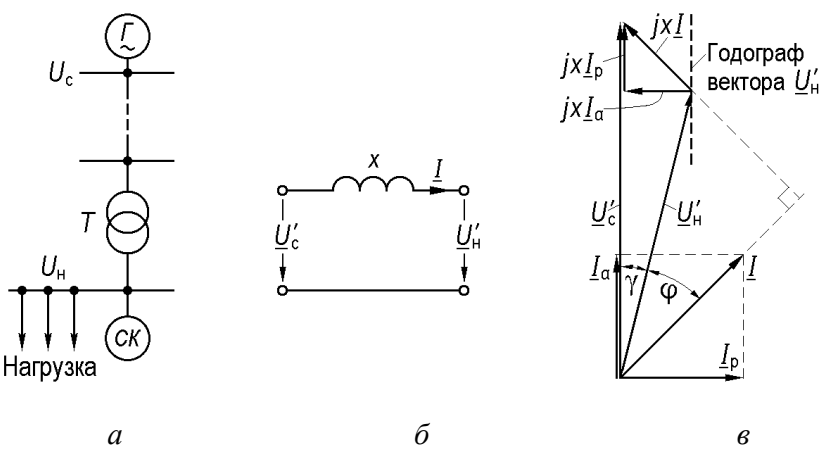


Рис. 4.35. Изменение напряжения и тока на шинах подстанции при регулировании тока возбуждения СК:
а – схема подключения; *б* – схема замещения; *в* – векторная диаграмма

Проанализируем влияние регулирования тока возбуждения СК на сеть в месте присоединения, используя ее упрощенную схему замещения (рис. 4.35, *б*). В ней с целью упрощения учтено только суммарное индуктивное сопротивление x всех элементов сети. Перед суммированием параметры этих элементов должны быть приведены к одному классу напряжения (приведенные напряжения отмечены штрихом). Ток в схеме соответствует этому же классу.

Изменение напряжения и тока на шинах подстанции при регулировании тока возбуждения СК, равное напряжению на его выводах, можно пояснить с помощью векторной диаграммы на рис. 4.35, *в*. Примем за исходные параметры напряжение $U_н$ на шинах подстанции и суммарный ток нагрузки I. Разложим вектор этого тока на активную и реактивную составляющие относительно напряжения системы $U_с$. В соответствии со схемой замещения (см. рис. 4.35, *б*)

$$\underline{U}_с' = \underline{U}_н' + jx\underline{I} = \underline{U}_н' + jx\underline{I}_a + jx\underline{I}_p.$$

При регулировании тока возбуждения изменяется реактивная составляющая тока $\underline{I}_p$ (см. п. 4.11.) и вместе с ней составляющая $jx\underline{I}_p$ записанного уравнения. Составляющая $jx\underline{I}_a$ при сделанном упрощении остается постоянной. Из этого следует, что конец вектора напряжения $\underline{U}_н'$ в процессе регулирования скользит вдоль прямой (на рис. 4.35, *в* показана пунктиром), параллельной вектору $\underline{U}_с'$. При этом изменяется величина напряжения $\underline{U}_н'$ и его фаза.

Поскольку большинство электроприемников имеет активно-индуктивный характер, для СК основным является режим перевозбуждения, когда он отдает в сеть реактивную мощность (см. рис. 4.35, *в*). При этом реактивная составляющая $\underline{I}_p$ и в целом ток $\underline{I}$ уменьшаются, сеть загружается преимущественно активным током нагрузки. Это приводит к снижению потерь во всех ее элементах, а также дает возможность увеличить пропускную способность.

Регулирование силы и характера реактивного тока СК позволяет также регулировать величину напряжения в месте подключения. Необходимость в этом возникает из-за колебания нагрузки в дневное и ночное время: в период повышенной нагрузки оно снижается, при спаде нагрузки – возрастает.

Синхронные компенсаторы запускаются методом асинхронного пуска, для чего снабжаются пусковыми обмотками или сердечники полюсов выполняются массивными. При необходимости для ограничения пускового тока в цепь обмотки якоря включаются реакторы (см. рис. 3.17, ч. 1). Синхронизация с сетью обычно производится методом самосинхронизации.

4.13. Внезапное короткое замыкание синхронного генератора

Переходные процессы обычны при эксплуатации синхронных машин. Причинами их возникновения могут являться: включение и отключение СМ, коммутации в цепи обмоток, резкие толчки момента на валу, резкое изменение нагрузки, форсировка тока возбуждения, регулирование напряжения на выводах, внезапное короткое замыкание (ВКЗ) в цепи обмоток самих машин и во внешней цепи.

Исследование переходных процессов в СМ имеет большое практическое значение, так как позволяет предвидеть их последствия и принять меры к предотвращению возможных повреждений, могущих повлечь значительные убытки. В сравнении со стационарным режимом в переходных процессах проявляются дополнительные электромагнитные явления, требующие учета. Подробное рассмотрение переходных процессов и их строгое математическое описание является задачей специальных курсов. Ниже рассматривается преимущественно физическая сторона явлений при переходном процессе, возникающем при ВКЗ на выводах обмотки якоря синхронного генератора.

Внезапное трехфазное короткое замыкание является аварийным режимом, при котором генератор испытывает значительные электрические и механические нагрузки. В то же время это наиболее интересный пример для анализа переходных процессов в СМ, так как в нем наиболее ярко проявляются электромагнитные явления, которые возникают и в других переходных режимах.

Рассмотрение переходного процесса при ВКЗ проведем при следующих допущениях:

– до момента ВКЗ по обмотке возбуждения протекал постоянный ток, на источник которого этот переходной процесс влияния не оказывает;

– до момента ВКЗ синхронный генератор находился в режиме ХХ;

– замыкание произошло непосредственно на зажимах генератора (это дает возможность не учитывать параметры внешних цепей);

– замыкание выводов обмотки якоря генератора – трехфазное симметричное и мгновенное: все выводы замыкаются между собой одновременно в течение бесконечно малого промежутка времени;

– магнитная цепь остается не насыщенной: $\mu = \text{const}$;

– частота вращения ротора не изменяется.

Принятые допущения упрощают анализ, позволяя выявить основные закономерности изменения токов и магнитных потоков в обмотках СГ при переходном процессе после ВКЗ.

4.13.1. Физические процессы

Непосредственно при ВКЗ в обмотках СГ происходит очень быстрое изменение во времени токов. В таких условиях основное влияние на переходной процесс оказывают ЭДС взаимо- и самоиндукции. Иными словами, обмотки СГ при этих условиях проявляют себя как индуктивные контуры. Это позволяет в момент ВКЗ не учитывать влияние активных сопротивлений, считая контуры обмоток идеальными. Как известно из ТОЭ, потокосцепления таких контуров неизменны во времени: $\Psi = \text{const}$.

Потокосцепление каждой обмотки состоит из основного магнитного поля (взаимоиндукции) и поля рассеяния. Рассмотрим вначале переходной процесс при учете только основных полей.

Напомним, что по условию до момента ВКЗ генератор работал в режиме ХХ. При этом в обмотке якоря вращающейся обмоткой возбуждения, обтекаемой постоянным током $I_в$ (рис. 4.36, *а*), индуктировалась симметричная синусоидальная трехфазная ЭДС e_0, векторная диаграмма которой изображена на рис. 4.12, *б*.

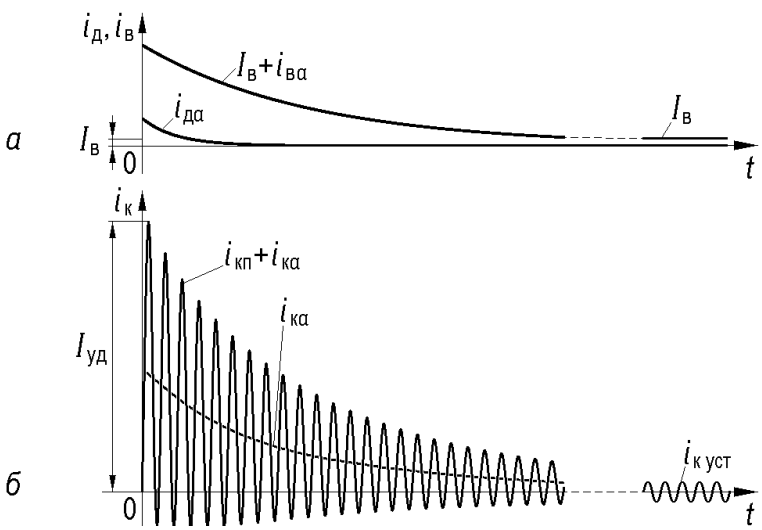


Рис. 4.36. Токи в обмотках СГ при ВКЗ:
а – в обмотке возбуждения и демпферной; *б* – в обмотке якоря:
$i_в = I_в + i_{вa}$ – ток в обмотке возбуждения ($I_в$ – установившийся постоянный ток, $i_{вa}$ – апериодическая составляющая); $i_д$ – ток в демпферной обмотке ($i_{дa}$ – апериодическая составляющая); $i_к = i_{кп} + i_{кa}$ – ток в обмотке якоря ($i_{кп}$ – периодическая составляющая; $i_{кa}$ – апериодическая составляющая); $I_{уд}$ – ударный ток КЗ; $i_{к\ уст}$ – установившийся периодический ток

В самом начале переходного процесса (при $t = 0_+$) действие этой ЭДС вызывает протекание по обмотке якоря соответствующего синусоидального (периодического) тока $i_{кп}$ (рис. 4.36, *б*). Этот возрастающий практически индуктивный (продольный) ток возбуждает вращающееся синхронно с индуктором магнитное поле реакции якоря, направленное встречно полю возбуждения (см. рис. 4.17, *в*). Вследствие этого суммарное потокосцепление обмотки возбуждения стремится уменьшиться, что в соответствии с законом электромагнитной индукции индуктирует в ней ЭДС, вызывающую добавочный апериодический ток $i_{ва}$. В свою очередь, создаваемый им магнитный поток согласно правилу Ленца направлен встречно потоку реакции якоря. Таким образом, апериодический ток $i_{ва}$ обмотки возбуждения и создаваемый им поток для сохранения неизменным начального суммарного потокосцепления ($\Psi_{в\,\Sigma} = \text{const}$) направлены согласно с исходным током и потоком возбуждения, так что результирующий поток обмотки возбуждения возрастает, увеличиваются наводимые им в обмотке якоря ЭДС и ток $i_{кп}$ и т.д.

В демпферной обмотке генератора (если она установлена на роторе) аналогично тому, как это происходит в обмотке возбуждения, наводится апериодический ток $i_{да}$ (см. рис. 4.36, *а*).

Если бы обмотки обладали только основными полями, то вследствие взаимоиндукции возрастание токов в них происходило бы до бесконечности. Однако наличие потоков рассеяния, ограничивает токи обмоток. Как и в теории трансформаторов, их действие учитывается введением индуктивностей рассеяния соответствующих обмоток.

На вышеописанном начальном этапе ВКЗ в обмотке якоря возникает трехфазный синусоидальный ток $i_{кп}$, а в обмотке возбуждения – добавочный апериодический ток $i_{ва}$ постоянного направления, совпадающего с направлением тока возбуждения $I_{в\,уст}$. Однако при ВКЗ в обмотках возникают и отличные от описанных составляющие токов.

Как известно из теории переходных процессов, в электрической цепи, обладающей самоиндукцией, сила тока не может измениться мгновенно. Так что при любом характере изменения режима работы цепи должно выполняться начальное условие: сила тока непосредственно перед ($t = 0_-$) и после ($t = 0_+$) момента изменения режима должна оставаться неизменной: $i_{t=0-} = i_{t=0+} = \text{const}$. Это начальное условие носит название первого закона коммутации. Оно вытекает из второго закона Кирхгофа для рассматриваемого контура. Покажем это на частном примере.

Пусть некоторая неразветвленная разомкнутая электрическая цепь, содержащая источник переменной ЭДС e, индуктивность L и резистивный элемент r, в некоторый момент времени замыкается накоротко за бесконечно малый промежуток времени, т.е. мгновенно. Такое замыкание предполагает мгновенное изменение тока, но для цепи в любой

момент времени, в том числе и в момент замыкания, должен выполняться второй закон Кирхгофа: $e = Ldi / dt + ir$. Это равенство может быть выполнено только в том случае, если скорость изменения тока в момент замыкания имеет конечное значение $di / dt = C$ (C – некоторое конечное число). Из этого следует, что сила тока – непрерывная функция времени и поэтому имеет одно и тоже значение непосредственно перед и тотчас после момента замыкания: $i_{(t=0-)} = i_{(t=0+)}$. Поскольку изменения токов в обмотках СГ в момент ВКЗ не происходит, то потокосцепление всех его обмоток в этот момент остается постоянным.

По условию СГ работал в режиме ХХ, поэтому в момент ВКЗ обмотка якоря может иметь потокосцепление Ψ_0 только с обмоткой возбуждения: $\Psi = \Psi_0$. Если у некоторой фазы обмотки якоря $\Psi = 0$ (магнитные оси этой фазы и обмотки возбуждения сдвинуты в пространстве относительно друг друга на электрический угол $\pi/2$), то в этой фазе ток имеет только периодическую (синусоидальную) составляющую. Если же $\Psi \neq 0$, наряду с периодической (синусоидальной) $i_{\text{кп}}$ в этой фазе возникнет апериодическая (свободная) составляющая тока $i_{\text{к}a}$, в момент коммутации равная ей по величине и противоположная по направлению. Благодаря этому выполняется начальное условие: $i_{\text{к}(t=0-)} = i_{\text{к}(t=0+)} = 0$. Максимальное значение она имеет при $\Psi = \Psi_{0\max}$, когда магнитные оси рассматриваемой фазы и обмотки возбуждения совпадают в пространстве.

Апериодическая составляющая тока $i_{\text{к}a}$, имея постоянное направление, возбуждает в магнитопроводе генератора постоянный магнитный поток. При этом в обмотках возбуждения и демпферной, которые вращаются в этом потоке, наводятся синусоидальные токи, которые, в свою очередь, оказывают индукционное действие на обмотку якоря. В результате взаимной индукции при ВКЗ во всех обмотках СГ возбуждаются апериодические и периодические составляющие токов.

Для инженерной практики наиболее важен ток в обмотке якоря. Его периодическая составляющая основной частоты наводится током возбуждения и апериодическими составляющими тока в обмотках возбуждения и демпферной. Апериодическая составляющая тока якоря индуктируются вследствие изменения во времени амплитуды периодических составляющих токов в обмотке возбуждения и демпферной.

В начальный период ВКЗ составляющие тока в обмотках максимальны, затем с течением времени они уменьшаются до значений установившегося режима. Спадание периодического тока $i_{\text{кп}}$ в обмотке якоря обусловлено спаданием апериодических составляющих тока $i_{\text{в}a}$ и $i_{\text{д}a}$ в обмотках ротора. Скорость спадания определяется постоянными времени соответствующих обмоток.

4.13.2. Схема замещения

Схема замещения СГ при ВКЗ служит для расчета периодической составляющей $I_{кп}$ тока якоря в начальный момент переходного процесса. К ее топологии можно прийти следующим путем. Возникающие при ВКЗ периодические и апериодические составляющие токов в обмотках якоря, возбуждения и демпферной изменяются во времени, вследствие чего между этими тремя обмотками имеет место взаимная индукция, описанная выше. Периодическая составляющая тока якоря имеет практически индуктивный характер, то есть, является продольной.

При отсутствии демпферной обмотки в явнополюсном СГ индуктивно связаны обмотки якоря и возбуждения. Схема замещения по продольной оси структурно аналогична Т-образной схеме замещения двухобмоточного трансформатора (см. часть 1, рис. 1.20).

В схему замещения явнополюсных СМ при наличии демпферной обмотки, а также неявнополюсных машин, имеющих массивный ротор, необходимо включить дополнительную параллельную ветвь по аналогии со схемой замещения трехобмоточного трансформатора (см. часть 1, рис. 1.42).

По окончании переходного процесса наступает установившийся режим КЗ с током $I_{к\,уст}$ в обмотке якоря. В обмотках возбуждения и демпферной установятся те же токи, которые протекали до момента ВКЗ. СГ описывается схемой замещения, содержащей только параметры обмотки якоря.

Если пренебречь активным сопротивлением обмоток, схемы замещения для описанных выше случаев имеют вид, представленный на рис. 4.37, *а*, *б*, *в*. Эквивалентные индуктивные сопротивления x''_d и x'_d схем замещения, соответствующие наличию и отсутствию демпферной обмотки, называют сверхпереходным и переходным.

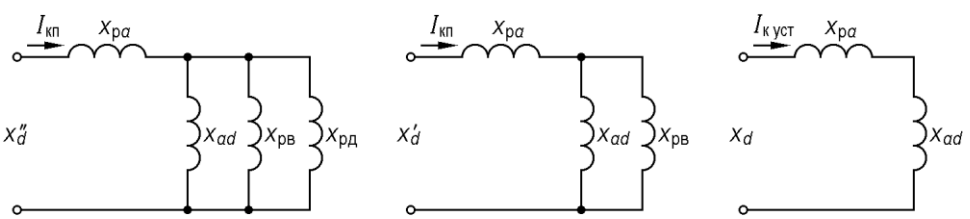


Рис. 4.37. Упрощенные схемы замещения СГ по продольной оси для расчета периодической составляющей $I_п$ тока якоря при сверхпереходном (*а*) и переходном (*б*) процессах и установившемся режиме (*в*):
x_{pa} – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, x_{ad} – индуктивное сопротивление реакции якоря, $x_{рв}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, $x_{рд}$ – индуктивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки

4.13.3. Расчет ударного тока короткого замыкания

Ударным ($I_{уд}$) называется наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания СГ (см. рис. 4.36, *б*). Как показывает анализ, оно возникает через половину периода после ВКЗ, когда периодическая составляющая тока складывается с совпадающей с ней по направлению апериодической составляющей.

С помощью схемы замещения можно рассчитать действующее значение периодической составляющей тока КЗ по закону Ома $I_{кп} = U / x''_d$. Апериодическая составляющая тока $i_{ка}$ учитывается специальным коэффициентом.

ГОСТом рекомендуется рассчитывать ударный ток КЗ по формуле

$$I_{уд} = \frac{1{,}05 \cdot 1{,}8 \cdot \sqrt{2} \cdot U}{x''_d}. \qquad (4.17)$$

Числовые коэффициенты в формуле (4.17) учитывают: 1,05 – возможность повышенного (на 5%) напряжения на зажимах генератора; 1,8 – вклад апериодической составляющей тока статора; $\sqrt{2}$ – связь амплитудного и действующего значения. Предполагается, что в момент ВКЗ потокосцепление $\Psi = \Psi_{0max}$.

Вызванный ВКЗ переходной процесс быстро заканчивается, и за это короткое время существенного перегрева обмоток не происходит. Основную опасность представляют электродинамические силы, которые возрастают в десятки и сотни раз, так как пропорциональны квадрату тока, протекающего по обмотке статора. Радиальные составляющие этих сил стремятся оттолкнуть обмотки статора и ротора СГ друг от друга и отогнуть лобовые части. Для предотвращения деформации и разрушения лобовых частей обмоток принимают специальные меры по их укреплению.

При ВКЗ на ротор воздействует также ударный момент, который может вызвать поломку вала.

ГЛАВА 5. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Общие сведения

Электрическими машинами постоянного тока (МПТ) называют машины для преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока (генераторы) или обратного преобразования (двигатели). Они выпускаются в широком диапазоне мощностей (единицы ватт – тысячи киловатт), напряжений (единицы – тысячи вольт), частот вращения (единицы – тысячи оборотов в минуту). Их используют преимущественно в качестве двигателей, а также и генераторов.

Первые промышленные образцы МПТ появились в 70-х годах XIX в. Вначале сердечник якоря выполнялся в форме кольца с намотанной на нем тороидальной обмоткой. После изобретения, так называемого, «барабанного» якоря машины приобрели современный вид.

Двигатели постоянного тока (ДПТ), в сравнении с другими типами двигателей, имеют разнообразные механические характеристики, обладают большей перегрузочной способностью и кратностью пускового момента, что удовлетворяет требованиям большинства механизмов. Они широко используются в качестве тяговых двигателей на электрифицированном транспорте, в подъемно-транспортных устройствах, в электроприводах прокатных станов, землеройных машин, металлорежущих станков и других областях, где требуется плавное регулирование частоты вращения в широких пределах. Также они применяются в тех случаях, когда их источниками питания служат аккумуляторные батареи: стартеры двигателей внутреннего сгорания, двигатели подводных лодок и др.

Электрические регулируемые приводы постоянного тока проще и дешевле аналогичных приводов с другими типами двигателей.

До конца XIX в. генераторы постоянного тока (ГПТ) были практически единственным источником электрической энергии в промышленности (электрическая энергия, получаемая с помощью химических источников даже в настоящее время имеет относительно высокую стоимость). Хотя в последние десятилетия сфера применения ГПТ сузилась в связи с развитием силовой электроники и широкого внедрения статических полупроводниковых выпрямителей, они используются в качестве возбудителей синхронных машин, сварочных генераторов, для питания двигателей постоянного тока в приводах системы «генератор – двигатель» и т.д.

Промышленность выпускает машины постоянного тока серий общего и специального назначения (крановые, металлургические, тяговые, микромашины систем автоматики). Конструкция двигателя серии 2П представлена на рис. 5.1.

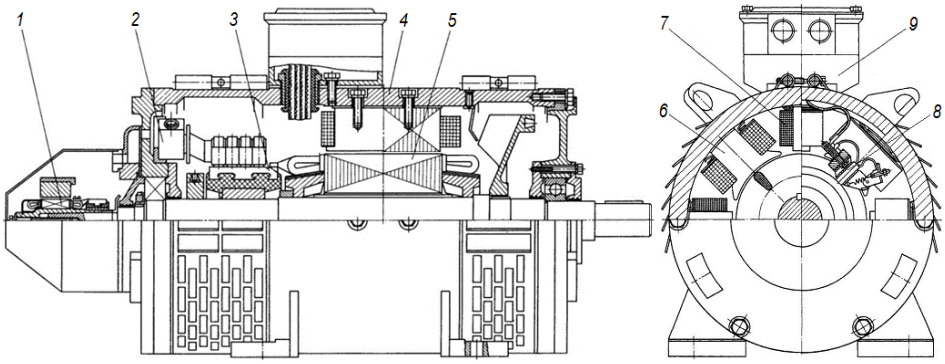


Рис. 5.1. Двигатель постоянного тока серии 2П:
1 – тахогенератор; *2* – траверса; *3* – коллектор; *4* – станина; *5* – якорь; *6* – главные полюсы; *7* – добавочные полюсы; *8* – щетки; *9* – коробка выводов

Условное буквенно-цифровое обозначение МПТ: **2П X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6.**

2П – номер серии;

X_1 – исполнение по способу защиты и вентиляции: Н – защищенное исполнение с независимой вентиляцией, Ф – защищенное исполнение (IP22) с обдувом от постороннего вентилятора, Б – закрытое исполнение с естественным охлаждением, О – закрытое исполнение с внешним обдувом от вентилятора (IP44);

X_2 – высота оси вращения, мм;

X_3 – условное обозначение длины якоря: М – средняя, L – большая;

X_4 – буква Г (при наличии встроенного тахогенератора);

X_5 – климатическое исполнение (УХЛ, О);

X_6 – категория размещения (цифра).

На внешней поверхности станины машины устанавливается коробка, в которой располагаются выводы обмоток. Их буквенно-цифровые обозначения приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Наименование обмотки	Обозначение выводов	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	*A1*	*A2*
Обмотка добавочного полюса	*B1*	*B2*
Компенсационная обмотка	*C1*	*C2*
Последовательная обмотка возбуждения	*D1*	*D2*
Параллельная обмотка возбуждения	*E1*	*E2*
Независимая обмотка возбуждения	*F1*	*F2*

В 80-х годах прошлого столетия в СССР была разработана серия 4П машин постоянного тока с улучшенными технико-экономическими показателями. Она включает в себя двигатели общепромышленного назначения, широкорегулируемые двигатели закрытого исполнения и др. Унификация конструкции и уменьшение количества модификаций позволило повысить уровень механизации производства, уменьшить материалоемкость и снизить себестоимость.

Двигатели мощностью до 10 кВт с нормальными регулировочными свойствами удовлетворяют большую часть потребности электроприводов постоянного тока. В двигателях серии 4ПО и 4ПБ такого диапазона мощности реализована унифицированная с асинхронными двигателями конструкция, позволившая при одинаковом габарите использовать те же станины, задние подшипниковые щиты, детали вентиляционного узла, коробки выводов и др.

Сердечник статора в этих двигателях имеет шихтованную неявнополюсную конструкцию. Он устанавливается в круглый чугунный или алюминиевый корпус с естественным охлаждением (4ПБ) или с охлаждением посредством вентилятора (4ПО), жестко закрепленного на валу двигателя (рис. 5.2).

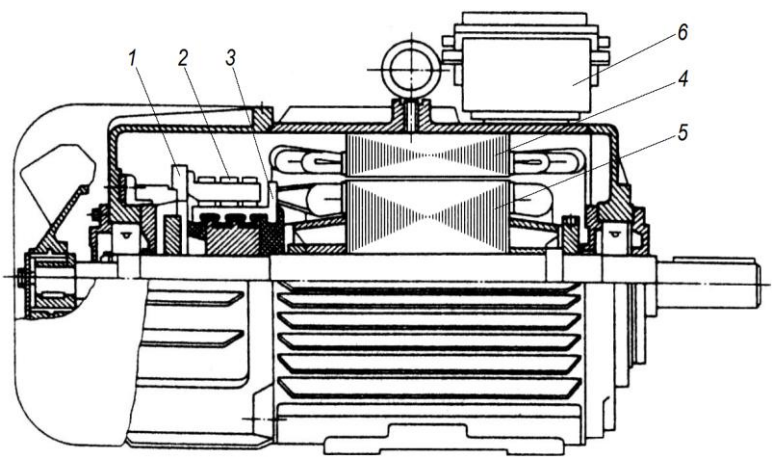


Рис. 5.2. Двигатель постоянного тока унифицированной конструкции серии 4ПО:
1 – траверса; *2* – щетки; *3* – коллектор; *4* – статор; *5* – якорь; *6* – коробка выводов

Достоинствами унифицированной конструкции в сравнении с традиционной являются:

1. Распределение по пазам улучшает теплоотдачу статорной обмотки, что позволяет существенно увеличить в ней плотность тока, что позволяет снизить расход обмоточной меди.

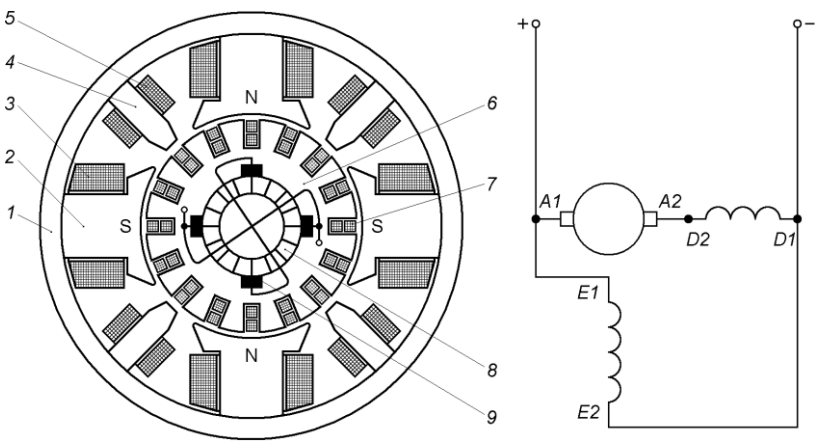
2. В неявнополюсной конструкции с равномерным зазором поле поперечной реакции якоря эффективно компенсируется по всей окружности, что улучшает условия коммутации. Одновременно устраняется размагничивающее действие реакции якоря. Это дает возможность в режиме нагрузки несколько уменьшить ток возбуждения по сравнению с некомпенсированными двигателями.

3. В шихтованном магнитопроводе в динамических режимах наводятся значительно меньшие, чем в традиционной конструкции, вихревые токи, ухудшающие условия коммутации.

4. Возможность использования технологического оборудования, применяемого для производства асинхронных двигателей.

5.2. Устройство

Машина постоянного тока состоит из статора и ротора, щеточно-коллекторного узла и подшипниковых щитов (рис. 5.3).



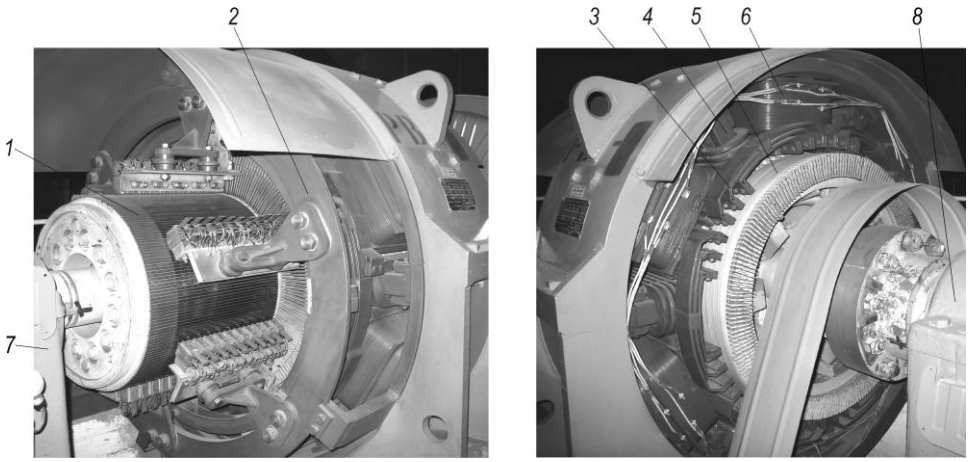
а *б*

Рис. 5.3. Устройство (*а*) и схема (*б*) смешанного возбуждения («длинный шунт») машины постоянного тока:
1 – станина; *2* – главные полюсы; *3* – обмотка возбуждения главных полюсов; *4* – добавочные полюсы; *5* – обмотка добавочных полюсов; *6* – якорь; *7* – обмотка якоря, *8* – коллектор, *9* – щетки

В подавляющем большинстве случаев статор в МПТ является индуктором, создающим первичное магнитное поле (поле возбуждения), а ротор – якорем, в обмотке которого наводится ЭДС и протекает ток нагрузки. Магнитопровод машины постоянного тока является симметрич-

ной 2*p*-полюсной разветвленной магнитной цепью и обеспечивает требуемое распределение магнитного поля в рабочем объеме.

Статор состоит из станины, главных и добавочных полюсов, установленных на ее внутренней стороне, и подшипниковых щитов с подшипниками, в которых вращается якорь. В крупных машинах якорь устанавливается на выносных подшипниковых опорах (рис. 5.4.). На статоре также крепятся щеточный аппарат и коробка выводов.



а *б*

Рис. 5.4. Машина постоянного тока независимого возбуждения:
а – вид со стороны коллектора, *б* – вид со стороны рабочего конца вала;
1 – коллектор; *2* – траверса; *3* – компенсационная обмотка; *4* – добавочные полюсы;
5 – якорь; *6* – главные полюсы; *7, 8* – подшипниковые опоры

При традиционном исполнении станина (остов) является частью магнитопровода – ярмом (замыкает магнитную цепь полюсов) и поэтому изготавливается из ферромагнитных материалов (малоуглеродистая сталь и др.). Обычно она имеет форму цилиндра с опорными лапами по бокам. При высотах оси вращения до 200 мм для изготовления монолитной станины обычно применяют отрезки цельнотянутых стальных труб. При высотах оси вращения 225–315 мм цилиндрическую часть станины сваривают из гнутого толстолистового проката. Для уменьшения влияния сварного шва на распределение магнитного потока возбуждения его располагают по оси главных полюсов.

В последнее время получили определенное распространение станины прямоугольной (многоугольной) формы.

Для удобства транспортировки, с целью упрощения монтажа, а в некоторых случаях – для удобства эксплуатации, станина может выпол-

няться разъемной. В двигателях постоянного тока, предназначенных для работы при переменной нагрузке в условиях частых пусков и реверсов, ярмо может изготавливаться шихтованным из листов электротехнической стали.

Главные полюсы (рис. 5.5, *а*) предназначены для создания рабочего магнитного поля. Каждый полюс состоит из сердечника и расположенной на нем одной (при параллельном и независимом возбуждении) или двух катушек (при смешанном возбуждении). С целью уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих из-за продольных и поперечных пульсаций магнитного потока, сердечники полюсов обычно выполняют из штампованных листов холоднокатаной анизотропной электротехнической стали толщиной 0,5–1 мм и скрепляют под прессом специальными заклепками с помощью нажимных щек. Полюса из такой стали хорошо проводят продольный поток возбуждения и плохо – поперечный поток реакции якоря. Сердечники полюсов со стороны якоря имеют расширенные наконечники специальной формы, которые увеличивают площадь распределения магнитного поля возбуждения по поверхности якоря, что уменьшает магнитное сопротивление воздушного зазора, а также насыщение зубцовой зоны якоря. Полюсы крепятся к станине болтами.

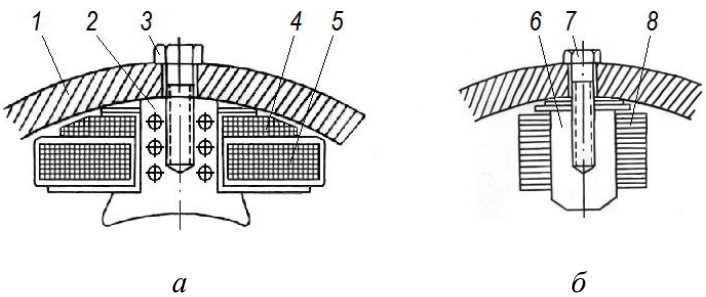


Рис. 5.5. Главный (*а*) и добавочный (*б*) полюсы:
1 – станина; *2* – сердечник главного полюса; *3* – болт крепления главного полюса; *4, 5* – обмотки возбуждения (последовательная и параллельная), *6* – сердечник добавочного полюса; *7* – болт крепления добавочного полюса; *8* – обмотка добавочного полюса

В обмотке возбуждения катушки соединяются последовательно или последовательно-параллельно таким образом, чтобы направление тока в них чередовалось, благодаря чему образуется периодическое (многополюсное) магнитное поле (см. рис. 5.2). Схема питания обмотки главных полюсов зависит от способа возбуждения (см. ниже п. 5.3).

В машинах небольшой мощности главные полюсы могут выполняться в виде постоянных магнитов.

Добавочные полюсы (рис. 5.5, *б*) предназначены для создания вспомогательного магнитного поля, компенсирующего поле реакции якоря в зоне нахождения коммутируемых секций обмотки якоря (зоне коммутации), что уменьшает искрение под щетками. Они устанавливаются посередине между главными полюсами (по оси геометрической нейтрали) и крепятся к станине болтами. Число добавочных полюсов, как правило, равно числу главных. Сердечники этих полюсов выполняют из штампованных тонких листов холоднокатаной анизотропной электротехнической стали или полосовой малоуглеродистой стали. Их наконечники имеет ширину, меньшую, чем в основной части сердечников, приблизительно равной ширине зоны коммутации. Воздушный зазор под добавочными полюсами больше, чем под главными. С целью настройки коммутации его регулируют путем установки прокладок из магнитного или немагнитного материала между полюсами и станиной. Обмотка добавочных полюсов включается последовательно с якорем (рис. 5.6).

В машинах большой мощности в наконечниках главных полюсов выполняют пазы, в которые укладывается изолированная компенсационная обмотка так, что ее витки охватывают добавочные полюсы (рис. 5.6, *а*, см. также рис. 5.4, *б*, позиция *3*). Она служит для компенсации поля поперечной реакции якоря. Чтобы поле было пропорционально току якоря, как и обмотка добавочных полюсов, она соединяется последовательно с якорем (рис. 5.6, *б*) таким образом, чтобы ее магнитное поле совпадало с полем соответствующих добавочных полюсов и было направлено встречно полю поперечной реакции якоря.

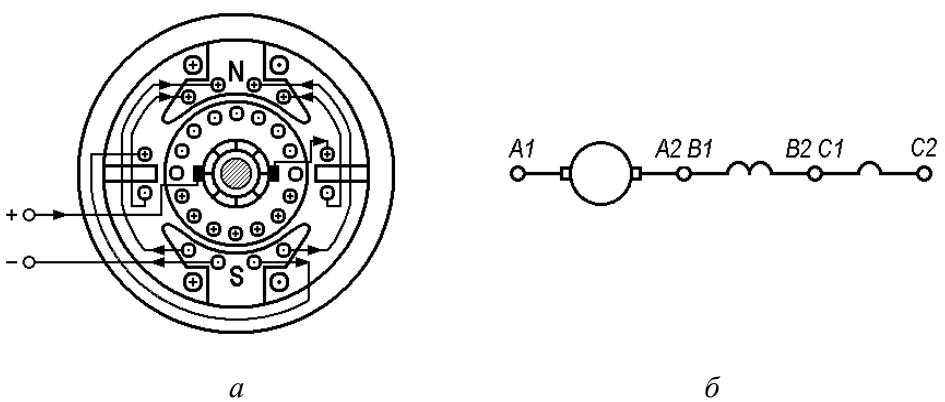


Рис. 5.6. Компенсации поля поперечной реакции якоря в МПТ:
а – схема соединений цепи якоря; *б* – принципиальная схема цепи якоря:
A1-A2 – якорь, *B1-B2* – обмотка добавочных полюсов,
C1-C2 – компенсационная обмотка

Применение компенсационной обмотки позволяет улучшить коммутацию и повышает стойкость машины к возникновению кругового огня на коллекторе. В обычных машинах для уменьшения поля поперечной реакции якоря воздушный зазор под главными полюсами несколько увеличивают. В компенсированных машинах необходимость этого отпадает, что позволяет уменьшить МДС обмотки возбуждения. Компенсационная обмотка и обмотка добавочных полюсов выполняются из медного провода или полосы, сечение которых рассчитывается на ток якоря.

В неявнополюсной конструкции статор имеет устройство, в целом сходное с традиционным исполнением (рис. 5.7).

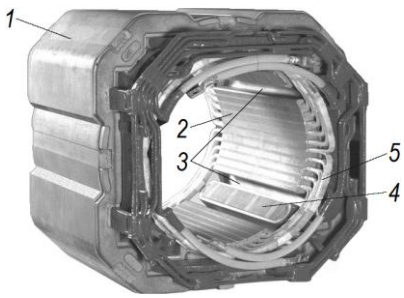


Рис. 5.7. Статор неявнополюсного ДПТ малой мощности ($2p = 4$):
1 – неявнополюсный магнитопровод; *2* – главные полюсы; *3* – обмотка возбуждения; *4* – добавочные полюсы; *5* – компенсационная обмотка

Сердечник статора имеет прямо- или многоугольную форму и собирается из отдельных штампованных пластин электротехнической стали. Для размещения распределенных обмоток на его внутренней стороне выполняются пазы. Обмотка возбуждения занимает два больших паза на каждом полюсном делении. Компенсационная обмотка располагается в пазах сердечника в пределах главного полюса.

Якорь машины постоянного тока состоит из сердечника с обмоткой и коллектора (рис. 5.8, см. также рис. 5.4), расположенных на валу. Во вращающемся якоре происходит преобразование электрической энергии в механическую (в двигателях) или, наоборот (в генераторах).

Сердечник якоря при вращении подвергается непрерывному перемагничиванию в постоянном магнитном поле полюсов, и в нем индуктируются вихревые токи. Для снижения потерь электрической энергии, обусловленных наличием гистерезиса и протеканием вихревых токов, в качестве материала для сердечника применяются магнитомягкие материалы, преимущественно листовая электротехническая сталь с увеличенным удельным электрическим сопротивлением.

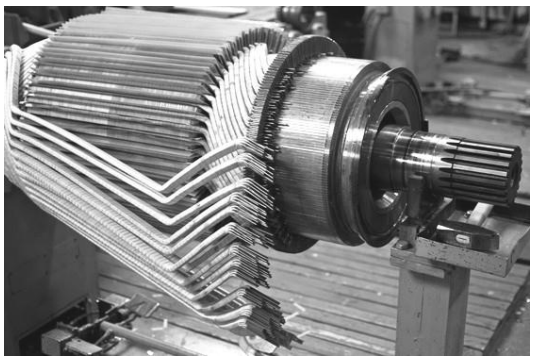


Рис. 5.8. Якорь МПТ
в процессе укладки обмотки

Для дополнительного снижения потерь от вихревых токов, сердечник собирается из отдельных штампованных листов этой стали толщиной 0,5, мм, изолированных друг от друга (рис. 5.9). Этот традиционный прием приводит к уменьшению сечения отдельных листов и увеличению электрического сопротивления протеканию вихревых токов. На внешней поверхности штампованных листов имеются пазы для размещения в них обмотки якоря. В сердечнике для прохождения охлаждающего воздуха могут выполняться осевые отверстия или радиальные каналы (в зависимости от устройства вентиляции).

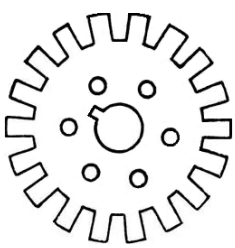


Рис. 5.9. Лист сердечника якоря
МПТ малой и средней мощности

Обмотка якоря выполняется из изолированного медного провода. Она состоит из секций, которые укладываются в пазах на внешней стороне сердечника. В машинах малой и средней мощности ее наматывают из круглого провода, что дает возможность использовать полузакрытые пазы. В машинах большой мощности для обмоток целесообразно использовать провод прямоугольного сечения. Секции обмотки якоря при этом получаются жесткими и их укладывают в открытые пазы (рис. 5.10, см. также рис. 5.8). Концы секций обмотки якоря соединяются путем пайки или сварки с пластинами коллектора, которые являются как бы общим продолжением концов секций.

Обмотки якорей могут иметь различные схемы и конструктивные исполнения, некоторые из них рассмотрены ниже. В пазах сердечника обмотка крепится с помощью клиньев, в лобовых частях – с помощью бандажей.

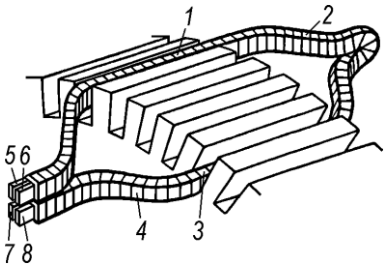


Рис. 5.10. Расположение двух одновитковых секций обмотки якоря в пазах сердечника:
1, 3 – верхняя и нижняя пазовые стороны; *2, 4* – лобовые части; *5–8* – выводы верхних и нижних сторон секций

Машины могут также выполняться с гладким якорем (двигатели серии ПГ), что позволяет улучшить коммутацию.

Коллектор – электромеханический узел, образующий совместно со щетками скользящий контакт. В традиционном исполнении коллектор состоит из изолированных друг от друга пластин клиновидного сечения, образующих в сборе цилиндр (рис. 5.11).

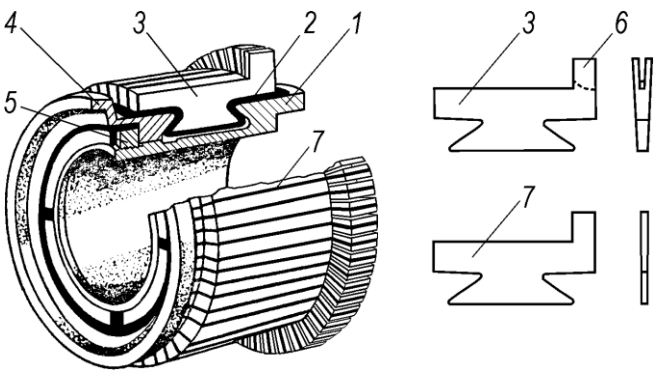


Рис. 5.11. Общий вид коллектора машины постоянного тока:
1 – корпус; *2* – изоляционная манжета; *3* – коллекторная пластина; *4* – нажимной конус; *5* – гайка; *6* – выступ; *7* – изоляционная прокладка

Коллекторные пластины изготавливают из меди твердых марок или сплавов с добавлением серебра, меньше подверженных истиранию щетками. Нижняя более узкая часть коллекторных пластин вырубается в виде «ласточкина хвоста», который используется для крепления. Пластины собираются на специальной втулке, которая после сборки несет весь комплект. При небольшой разнице диаметров якоря и коллектора торцевая часть каждой коллекторной пластины имеет со стороны якоря выступ с продольным шлицом (прорезью), который находится на уровне

концов секций обмотки, в который они впаиваются. Если в шлицы дополнительно впаивают концы уравнителей, их выполняют более глубокими.

В крупных машинах диаметр якоря может значительно превышать диаметр коллектора. В этом случае соединение выводов жестких секций с выступами на коллекторе производится с помощью специальных проводников из медной ленты толщиной 0,5–1,5 мм, называемых «петушками».

Конструктивные исполнения коллекторов весьма разнообразны.

В первых машинах постоянного тока коллектор отсутствовал, и щетки скользили непосредственно по проводникам обмотки якоря. При подобном устройстве контактного узла машина не могла работать надежно продолжительное время. Нечто похожее в настоящее время можно увидеть в исполнительных двигателях постоянного тока с печатным якорем, применяемых в системах автоматики. В них концы секций удлиняются, образуя коллектор. Однако такие двигатели не рассчитаны на продолжительную работу.

В машинах малой мощности широкое распространение получили коллекторы на пластмассе. Они имеют относительно простую конструкцию, в которой медные пластины запрессованы в пластмассу, скрепляющую их в единую конструкцию и изолирующую друг от друга.

В машинах средней и большой мощности применяются, так называемые, «арочные» коллекторы, в которых коллекторные пластины с помощью выполненных на них «ласточкиных хвостов» зажимаются на стальном основании (втулке) между подвижным и неподвижным конусными фланцами. При этом клиновидный профиль приводит к образованию бокового давления между пластинами, называемого «арочным распором», который придает сборной конструкции целостность.

В быстроходных машинах коллекторные пластины стягиваются бандажными кольцами.

В качестве изоляции коллектора используют материалы на основе слюды: между пластинами устанавливают прокладки из миканита или слюдинита толщиной 0,5–1,5 мм, а между пластинами и металлическими деталями коллектора – миканитовые манжеты в виде конических колец.

Узел токосъема предназначен для электрической связи посредством скользящего контакта (через коллектор) внешней цепи с вращающейся обмоткой якоря. Существует большое разнообразие его конструкций. Традиционно он состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных бракетов (пальцев) и траверсы (см. рис. 5.4, *а*).

Щетка (рис. 5.12) – электропроводящая деталь токосъемного устройства, непосредственно соприкасающаяся с коллектором и обеспечивающая электрическую связь подвижной и неподвижной частей

вращающейся электрической машины. Она состоит из элемента *1* (собственно, щетки), непосредственно осуществляющего контакт, который изготавливают путем прессования из композитного материала на основе угольного, графитного или металлического порошков.

Рис. 5.12. Конструкция щетки:
1 – щетка разрезная из двух блоков;
2 – накладка; *3* – токоведущий провод;
4 – наконечник

На щетке установлена накладка *2*, равномерно распределяющая давление на щетку и защищающая ее верхнюю поверхность от механических повреждений. Токоведущий провод *3* (обычно неизолированный) с наконечником *4* соединяет щетку с другими элементами узла токосъема.

Характеристики щетки зависят от состава композитного материала, из которого они изготовлены, технологии производства и конструкции (форма и размеры, способ монтажа и др.).

По составу материала наиболее распространены щетки следующих классов:

– графитные (Г), состоящие преимущественно из натурального графита и связующих смол;

– углеграфитные (Г), состоящие из углеродных материалов (кокс, сажа), натурального или искусственного графита и связующих смол;

– электрографитированные (ЭГ), состоящие преимущественно из различных форм углеродных материалов (кокс, сажа, антрацит) и прошедшие высокотемпературную обработку (графитацию);

– металлографитные (МГ), изготовленные из металлических порошков, натурального графита и связующих веществ (или без них).

По конструкции различают:

– цельные (моноблочные) щетки, выполненные из материала одной марки (см. рис. 5.13, *а*);

– цельные составные щетки из склеенных между собой двух и более блоков, выполненных из различных материалов;

– разрезные щетки (рис. 5.13, *б*) из двух и более не скрепленных между собой блоков из одного и того же материала, электрически соединенных между собой в верхней части; устанавливаются в одной обойме;

– спаренные щетки (тандем) из двух и более не скрепленных между собой блоков из одного и того же материала, электрически соединенных между собой в верхней части; каждый блок устанавливается в своей ячейке обоймы (рис. 5.13, *в*).

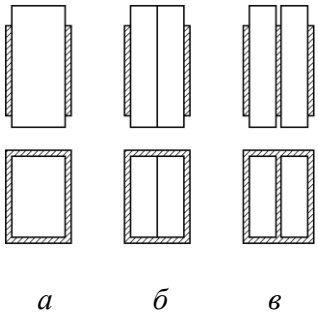


Рис. 5.13. Конструктивные типы щеток:
а – цельная; *б* – разрезная;
в – спаренная (тандем)

Конструкции щеток непрерывно совершенствуются. Промышленность выпускает широкий сортамент щеток различных марок. Марка, геометрические размеры и число щеток выбирается на стадии проектирования. Общие рекомендации по их выбору имеются в справочных руководствах.

Щетки устанавливаются в обоймах щеткодержателей.

Щеткодержатель *1* (рис. 5.14) обеспечивает контакт щетки *3* с коллектором, удерживая ее в обойме и создавая давление на коллектор через пружинно-нажимной механизм *2*. Он также снабжен элементом *5* собственного крепления.

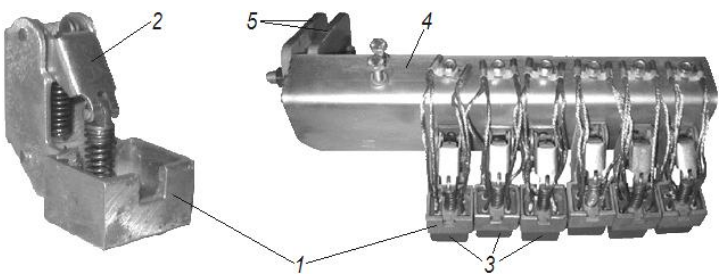


Рис. 5.14. Узел токосъема серии МПЭ:
1 – щеткодержатель типа ДРПра; *2* – пружинно-нажимной механизм щеткодержателя;
3 – щетки; *4* – бракет; *5* – изоляционные элементы крепления

Обозначение типа щеткодержателей:

– первая буква – общее название изделия (Д – щеткодержатель);

– вторая буква – тип щеткодержателя (Н – наклонный; Р – радиальный; Т – тандем (Тн – наклонный, Тр – радиальный, Ц – цилиндрический, П – подвижный, Д – двойной);

– третья буква – вид пружинного-нажимного механизма (Пр, Пра, Прс, Пс, Пч, Пчр, Пк, Пкр).

Щеткодержатели могут иметь различное конструктивное исполнение, выполняться одно-, двух-, трех- и многощеточными, с радиальным

и наклонным («реактивные») положением щеток относительно поверхности коллектора. Наклонное положение уменьшает трение щеток о корпус. Реактивные щеткодержатели применяют в машинах небольшой мощности с постоянным направлением вращения.

Щеткодержатели устанавливают на плоских поверхностях щеточных бракетов *4* или пальцах цилиндрической, призматической или иной формы, в свою очередь, закрепленных на траверсе (см. рис. 5.4, *а*). Также возможно крепление к подшипниковому щиту или непосредственно к корпусу машины. В машинах средней и большой мощности на каждом бракете, количество которых обычно равно числу полюсов, установлено несколько щеткодержателей, электрически соединенных между собой. Во избежание замыкания бракеты изолируются с помощью элементов *5* от траверсы и корпуса машины. Их полярности чередуются. Щеточные бракеты одной полярности соединяются между собой и с помощью отводов с выводными зажимами или с другими обмотками машины.

Траверса является несущей конструкцией узла токосъема и крепится к станине или подшипниковым щитам (см. рис. 5.4, *а*, позиция *2*). Обычно предусматривается возможность поворота траверсы вокруг оси машины для регулирования положения щеток относительно полюсов с целью настройки коммутации и ее фиксации в выбранном положении, а также для удобства осмотра щеткодержателей. Неправильное положение щеток по отношению к геометрической нейтрали может привести к искрению.

5.3. Способы возбуждения

Возбуждением называется создание в машине постоянного тока первичного магнитного поля. Различают возбуждение электромагнитное и от постоянных магнитов (магнитоэлектрическое).

При электромагнитном возбуждении источником магнитного поля является обмотка возбуждения, которая получает питание от некоторого источника. Этот способ широко используется в МПТ, так как позволяет достичь высоких значений индукции магнитного поля в воздушном зазоре, осуществлять регулирование этого поля. Существуют схемы независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения, отличающиеся соединением обмотки возбуждения главных полюсов относительно якоря (рис. 5.15).

При независимом возбуждении источниками питания обмотки возбуждения могут быть выпрямитель или любой другой внешний источник постоянного тока, не связанный с якорем машины.

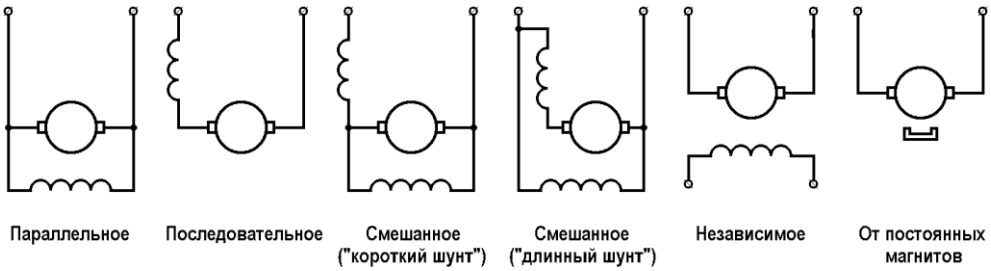


Рис. 5.15. Схемы возбуждения МПТ

При параллельном возбуждении обмотка возбуждения подключается параллельно якорю, и на нее подается напряжение якоря. Для увеличения сопротивления обмотку возбуждения выполняют многовитковой из провода относительно небольшого сечения.

При последовательном возбуждении обмотка возбуждения включается последовательно в цепь якоря, и через нее протекает его полный ток. Вследствие этого она выполняется с относительно небольшим числом витков из провода соответствующего сечения.

При смешанном возбуждении на главных полюсах размещают две обмотки возбуждения, одна из которых (ОВ1) подключается параллельно, а другая (ОВ2) – последовательно в цепь якоря. Схемы смешанного возбуждения двигателей и генераторов могут несколько различаться. Чтобы падение напряжения на последовательной обмотке ОВ2, не влияло на силу тока в параллельной обмотке ОВ1, в двигателях секция ОВ1 включается на напряжение источника питания («длинный шунт»), как и цепь якоря, а в генераторах она подключается параллельно якорю («короткий шунт»).

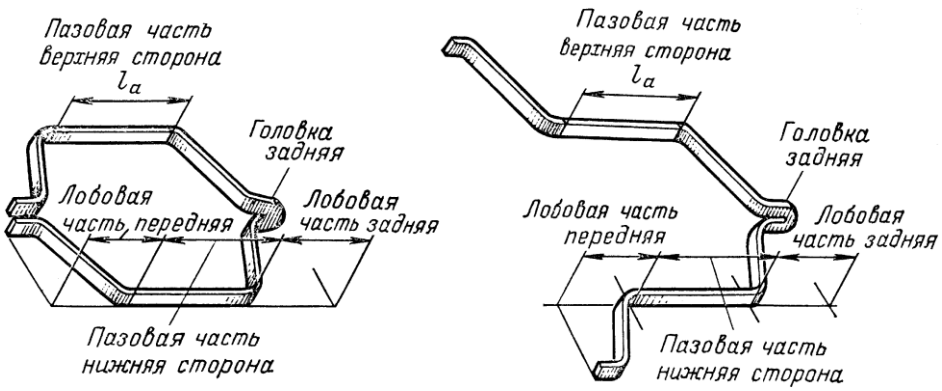
В современных электроприводах при параллельном и смешанном возбуждении (при схеме «длинный шунт») параллельная обмотка часто включается на отдельный источник питания.

Относительная мощность, потребляемая цепью возбуждения, в различных машинах составляет 1–5% от номинальной, причем меньшие значения соответствуют машинам большей мощности.

При возбуждении от постоянных магнитов (см. рис. 5.15) не требуется источник питания, но одновременно отсутствует возможность регулирования потока возбуждения. Недостатком является также определенная нестабильность характеристик магнитов: зависимость от воздействия поля реакции якоря, вибраций, ударов, температуры и т.д. Кроме этого, постоянные магниты, способные создать такие же высокие значения индукции в зазоре, как и электромагниты, весьма дороги.

5.4. Якорные обмотки

В МПТ якорные обмотки обычно выполняют двухслойными и располагают в пазах сердечника. Конструктивной элементарной частью обмотки является секция (катушка), состоящая из одного или нескольких витков. Одновитковые секции называются стержневыми. Сторона секции, расположенная в верхнем слое, называется начальной, а в нижнем слое – конечной. В зависимости от схемы соединения на коллекторе концы секций могут отгибаться вовнутрь (в петлевых обмотках) или во внешнюю сторону (волновые обмотки) (рис. 5.16).



а *б*

Рис. 5.16. Секции петлевой (*а*) и волновой (*б*) обмоток

В реальном пазу сердечника якоря в каждом слое может находиться несколько ($U_п$) рядом лежащих сторон соседних секций. Например, в пазу сердечника, изображенного на рис. 5.10, расположено рядом две секции. В этом случае вводят понятие элементарного паза, который объединяет одну пару (верхнюю и расположенную под ней нижнюю) сторон. Число элементарных ($Z_э$) и реальных (Z) пазов якоря связано очевидным соотношением: $Z_э = U_п Z$. Расположение в реальном пазу нескольких сторон секций ($U_п > 1$) уменьшает эквивалентную индуктивность коммутируемых секций за счет увеличения взаимной индуктивности, что приводит к улучшению коммутации.

Расстояние y_1 между сторонами одной и той же секции называется первым частичным (основным) шагом обмотки и обычно выражается количеством элементарных пазов. Чтобы в секции при вращении якоря наводилась максимальная ЭДС, этот шаг должен быть равен полюсному

делению $\tau = Z_э / 2p$, которое не всегда выражается целым числом элементарных пазов. Поэтому он принимается ближайшему целому числу:

$$y_1 = Z_э / 2p \pm \varepsilon, \tag{5.1}$$

где ε – правильная дробь; обычно с целью экономии проводникового материала обмотка выполняется с несколько укороченным шагом ($y_1 = Z_э / 2p < \tau$).

Обмотка якоря образуется путем последовательного соединения на коллекторе секций, следующих друг за другом по схеме обмотки. Так что с электрической точки зрения коллекторные пластины являются общим продолжением пар концов верхней и нижней сторон соединяемых секций. Из этого также следует, что число секций обмотки якоря равно числу коллекторных пластин:

$$S = K. \tag{5.2}$$

В двухслойной обмотке также $S = K = Z_э$.

Секции обмотки якоря могут иметь как одинаковый, так и различный шаг (равносекционная и ступенчатая обмотки). Обмотки со ступенчатым шагом лучше в коммутационном отношении. Однако они более сложны и поэтому используются только в крупных машинах.

Секции обмотки расположены в пазах по окружности якоря. При вращении якоря в них будет наводиться ЭДС. Пространственное распределение ЭДС секций по окружности коллектора имеет периодический характер, поскольку полярность главных полюсов чередуется. Направление ЭДС в сторонах секций, находящихся под полюсами определяется полярностью полюсов. Под северными и южными полюсами оно противоположно. При вращении якоря это распределение остается неизменным относительно неподвижных главных полюсов (определяющих распределение индукции). Поскольку концы секций обмотки якоря присоединятся к коллектору, то создаваемое ЭДС пространственное распределение напряжения между коллекторными пластинами по окружности коллектора в неподвижной системе координат также остается неизменным при вращении якоря. Это позволяет путем наложения на коллектор определенным образом электрически соединенных между собой щеток образовать определенное число параллельных ветвей с одинаково направленными и равными по величине ЭДС.

При установке по линии геометрической нейтрали щетки контактируют с коллекторными пластинами и соединенными с ними концами секций, пазовые стороны которых находятся на этой линии (посередине междуполюсного пространства). Сами концы этих секций и лежащие на

них щетки за счет отгиба лобовых частей сдвинуты относительно соответствующих пазовых сторон примерно на половину полюсного деления и пространственно расположены примерно по оси главных полюсов (см. рис. 5.4, *а*).

При таком расположении щеток верхние стороны секций каждой параллельной ветви при вращении якоря всегда будут расположены под одним полюсом, а нижние – под другим, противоположной полярности. Это обеспечивает наведение в ветвях максимальной ЭДС.

Способ соединения секций в группах, образующих параллельные ветви, определяется результирующим шагом y – расстоянием между начальными (или конечными) сторонами секций, следующих друг за другом по схеме обмотки. Поскольку выводы начальных сторон секций присоединяются к коллектору, то результирующий шаг обмотки, выраженный числом элементарных пазов равен шагу обмотки по коллектору, выраженному числом коллекторных делений: $y = y_к$. Два принципиально различающихся способа соединения секций реализованы в простой петлевой ($y_к = 1$) и простой волновой обмотках якоря ($y_к = (K - 1) / p$).

Основной y_1 и результирующий y шаги определяют второй частичный шаг y_2 – расстояние между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей по схеме секции.

Обычно шаги обмотки по якорю (y_1, y_2, y) выражаются не в единицах длины, а числом элементарных пазов.

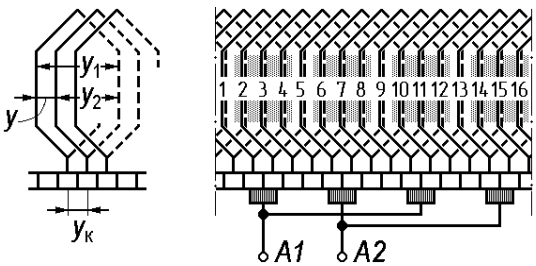
Якорные обмотки изображаются с помощью различного вида схем, наиболее информативными из которых являются развернутые. В этих схемах для простоты каждая секция изображается как одновитковая, ее начальная сторона – сплошной линией, конечная – пунктирной.

5.4.1. Простая петлевая обмотка

Если на каждой коллекторной пластине конец одной секции соединен с началом другой, лежащей в соседнем элементарном пазу, то образованная таким образом обмотка называется простой петлевой (рис. 5.17). Концы секций у такой обмотки присоединены к соседним коллекторным пластинам. При этом одновитковая секция имеет форму петли, из-за чего обмотка получила соответствующее название.

Из порядка соединения секций следует, что в простой петлевой обмотке $y = y_к = \pm 1$. Обычно выбирают «+», что соответствует, так называемой, неперекрещенной обмотке, в которой выводы секций не пересекаются. Как видно из схемы соединения секций (рис. 5.17, *а*) в петлевой обмотке $y_2 = y_1 - y$. Петлевая обмотка может быть выполнена с любым числом полюсов и пазов.

Если на коллектор наложить $2p$ симметрично расположенных относительно друг друга щеток, сдвинутых относительно друг друга по коллектору на $K/(2p)$ коллекторных делений (на полюсное деление по коллектору), то между каждой парой щеток окажутся включенными последовательно $S/(2p)$ секций (рис. 5.17, *б*). Когда щетки расположены на линии геометрической нейтрали, начальные стороны этих секций будут расположены под главными полюсами одной полярности, а конечные – под главными полюсами противоположной полярности. В этом случае при работе машины между щетками будет наводиться максимальная ЭДС.



а *б*

Рис. 5.17. Принцип образования (*а*) и схема (*б*) простой петлевой обмотки

Наложенные на коллектор $2p$ щеточных пальцев можно разбить на две группы противоположной полярности. Равнопотенциальные пальцы каждой группы отстоят друг от друга по коллектору на K/p коллекторных делений (на двойное полюсное деление по коллектору). Напряжение между щетками в группе равно нулю и с помощью проводника их соединяют накоротко.

Щеточные пальцы (бракеты), имеющие противоположную полярность, отстоят друг от друга по коллектору на $K/(2p)$ коллекторных делений (на одно полюсное деление по коллектору).

Поскольку в простой петлевой обмотке между каждой парой щеточных пальцев включено последовательно $S/(2p)$ секций, образованные вышеуказанным образом две группы пальцев противоположной полярности разбивают простую петлевую обмотку на $2a = 2p$ параллельных ветвей (a – число пар параллельных ветвей). Каждая параллельная ветвь включена между соседними щеточными пальцами противоположной полярности, и в нее входят последовательно соединенные секции, верхние стороны которых находятся под одним главным полюсом, а нижние – под другим (соседним).

Уравнительные соединения 1-го рода. Реальная многополюсная машина постоянного тока всегда имеет некоторую магнитную асимметрию (в частности, неодинаковый воздушный зазор из-за эксцентричного положения якоря) и, как следствие, различающееся по величине среднее значение магнитной индукции под главными полюсами. Из-за этого при вращении якоря ЭДС параллельных ветвей его обмотки несколько различаются между собой. Поскольку ветви имеют относительно небольшое сопротивление, это вызывает протекание по образованным ими контурам значительных уравнительных токов. Их наложение на токи нагрузки приводит к значительному увеличению токов в одних ветвях и уменьшению в других. Аналогичное наложение токов происходит и в щетках одинаковой полярности. Неравномерное распределение токов влечет дополнительные потери энергии. Кроме того, перегрузка щеточно-коллекторного узла ухудшает коммутацию.

Для уменьшения уравнительных токов в петлевой обмотке выполняют уравнительные соединения 1-го рода (рис. 5.18). Они электрически соединяют точки обмотки, которые отстоят друг от друга на двойное полюсное деление и имеют теоретически равный потенциал. Поэтому шаг уравнителей равен двойному полюсному делению:

$$y_{\text{ур}} = S / p = K / p. \qquad (5.3)$$

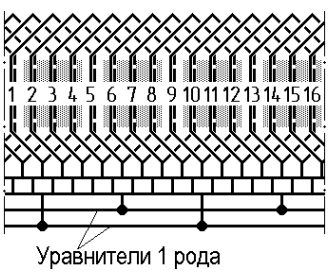


Рис. 5.18. Уравнительные соединения 1-го рода в простой петлевой обмотке

По окружности обмотки якоря число равнопотенциальных точек, электрически соединенных уравнителями, соответствует числу p пар полюсов. Каждая группа уравнителей при шаге (5.3) образует в обмотке p короткозамкнутых контуров.

Максимальное число групп уравнителей 1-го рода, которые можно установить в обмотке якоря, равно K / p. Полное их число устанавливают только в машинах большой мощности. В остальных случаях – от ⅓ до ¼ полного числа. Присоединение уравнителей к обмотке производят в легко доступных местах: к выступам коллектора и петушкам (под лобовыми частями обмотки якоря) или, в стержневых обмотках, с противоположной стороны – к головкам лобовых частей.

В машине, обладающей магнитной симметрией (с одинаковым распределением индукции под всеми полюсами) и имеющей равное число секций в параллельных ветвях петлевой обмотки, суммарный магнитный поток через образованные уравнителями контуры, охватывающими двойное полюсное деление, будет равен нулю при любом положении якоря. При вращении якоря ЭДС в этих контурах индуктироваться не будут и, таким образом, в этом случае уравнители никакого влияния на работу машины не оказывают.

Если машина не обладает магнитной симметрией, то образованные уравнителями в обмотке короткозамкнутые контуры пересекает некоторый разностный магнитный поток пары соседних полюсов. Вращение якоря приводит к индуктированию в этих контурах переменной (при рассмотрении в системе координат ротора, см. ниже п. 5.5.3) ЭДС, которая вызывает соответствующий индукционный ток. По правилу Ленца создаваемый индукционным током вторичный магнитный поток направлен встречно первичному разностному магнитному потоку, компенсируя его до некоторого значения, которое значительно меньше исходного. Тем самым, уравнительные соединения первого рода устраняют магнитную асимметрию в машинах, что приводит к снижению уравнительных токов в ветвях обмотки до небольшой величины.

Описываемый процесс во многом аналогичен установившемуся короткому замыканию трехфазного синхронного генератора, при котором поле продольной реакции якоря размагничивает генератор. Отличие заключается в том, что в машине постоянного тока у короткозамкнутых контуров периодичность поля реакции («число пар полюсов») вдвое меньше, чем у основного поля, в силу того, что их шаг вдвое превышает полюсное деление якоря. Поэтому эти контуры компенсируют только «разностное» поле полюсов, вызывающее магнитную несимметрию.

Аналогично описанному выше, уравнители 1-го рода влияют на поле добавочных полюсов и компенсационной обмотки.

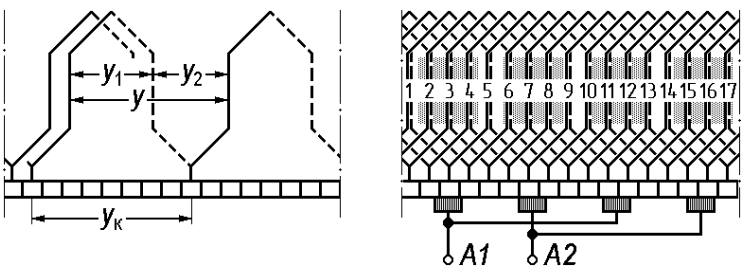
5.4.2. Простая волновая обмотка

Если на каждой коллекторной пластине конец одной секции соединен с началом другой, расположенной приблизительно через двойное полюсное деление $y = y_1 + y_2 \approx 2\tau$ (рис. 5.19, *а*), то образованная таким образом обмотка называется простой волновой. При таком соединении одновитковая секция имеет форму волны, из-за чего обмотка получила соответствующее название.

В отличие от простой петлевой обмотки, у которой концы каждой секции присоединены к соседним коллекторным пластинам, в простой волновой обмотке к соседним коллекторным пластинам должны быть присоединены начало и конец группы из p секций, последовательно соединенных за один обход по якорю. Только в этом случае обмотка замкнется сама на себя после соединения всех секций обмотки. Отсюда следует, что условием выполнения простой волновой обмотки является соотношение:

$$py = py_к = K \pm 1. \qquad (5.4)$$

Обычно выбирают «–», что соответствует полному обходу по якорю за вычетом одного коллекторного деления. При этом получается, так называемая, неперекрещенная обмотка (рис. 5.19, *б*).



а *б*

Рис. 5.19. Принцип образования (*а*) и схема (*б*) простой волновой обмотки

Поскольку между двумя соседними коллекторными пластинами включено p последовательно соединенных секций, то между пластинами, отстоящими друг от друга по коллектору на полюсное деление $K/(2p)$, будет включено $pK/(2p) = K/2 = S/2$ секций, т.е. половина секций обмотки. Поэтому относительно выводов наложенных на коллектор двух щеточных пальцев противоположной полярности, сдвинутых на полюсное деление, простая волновая обмотка имеет число параллельных ветвей $2a = 2$, не зависящее от числа полюсов. При этом секции, следующие друг за другом по схеме и принадлежащие одной параллельной ветви, лежат под одноименными главными полюсами. Это обеспечивает одинаковое направление ЭДС в них.

В принципе, для простой волновой обмотки достаточно двух щеточных пальцев, но обычно устанавливают полный комплект, соответствующий числу полюсов. Это приводит к улучшению коммутации маши-

ны. При этом пальцы одинаковой полярности соединяют между собой накоротко.

Из принципа образования простой волновой обмотки и ее схемы видно, что в одну параллельную ветвь входят последовательно соединенные секции, начальные стороны которых расположены под полюсами одной полярности, а в другую – секции, начальные стороны которых расположены под полюсами противоположной полярности. Поскольку первый частичный шаг $y_1 \approx \tau$, то начальные и конечные стороны секций, входящих в каждую параллельную ветвь, находятся под одними и теми же полюсами. Поэтому ЭДС параллельных ветвей равны между собой даже при наличии магнитной несимметрии, так что применение уравнительных соединений 1-го рода не требуется. Это является существенным преимуществом простой волновой обмотки.

5.5. Физические процессы в машине постоянного тока

5.5.1. Принцип действия генератора постоянного тока

Генератор постоянного тока предназначен для преобразования механической энергии приводного двигателя в электрическую энергию постоянного тока.

Пусть в генераторе возбужден магнитный поток Ф, который замыкается через сердечник якоря. Предположим, что с помощью приводного двигателя якорь генератора приводится во вращение с частотой n. Поскольку в обмотке якоря первый частичный шаг $y_1 \approx \tau$, при вращении начальные стороны секций обмотки якоря пересекают силовые линии магнитного поля полюсов одной полярности, а конечные – противоположной полярности, в результате чего в них наводятся ЭДС, которые суммируются по контуру секции. Их направление в расположенных под одним из главных полюсов проводниках параллельной ветви, показано на рис. 5.20.

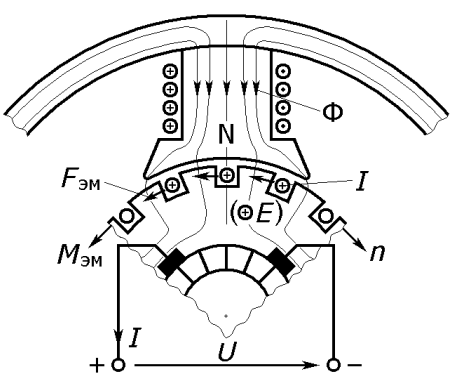


Рис. 5.20. К принципу действия ГПТ

Когда щетки одной полярности соединены между собой, они разбивают обмотку якоря на параллельные ветви. Относительно статора щетки неподвижны, поэтому места их контакта с коллектором связаны с определенными участками обмотки якоря, которые при вращении не изменяют своего положения относительно статора и создаваемого им постоянного магнитного поля. При установке щеток на коллекторе по линии геометрической нейтрали в параллельную ветвь входят секции, верхние стороны которых находятся под полюсом (полюсами) одной полярности, а нижние – под полюсом (полюсами) противоположной полярности. ЭДС каждой параллельной ветви обмотки равна сумме ЭДС ее последовательно соединенных секций. Относительно неподвижных щеток противоположной полярности направление ЭДС во всех параллельных ветвях при вращении якоря остается постоянным. Постоянная по величине и направлению ЭДС якоря создает между этими щетками постоянное во времени напряжение U.

В режиме ХХ преобразования механической энергии в электрическую в генераторе не происходит. Предварительно раскрученный якорь, в обмотке которого индуктируется ЭДС, при отсутствии потерь энергии в дальнейшем мог бы вращаться бесконечно долго без участия первичного двигателя. Если к выводам якоря подключить электроприемник (нагрузку), то по образовавшейся замкнутой цепи под действием ЭДС будет протекать ток. Положение щеток на линии геометрической нейтрали обеспечивает протекание тока в якоре под северными полюсами – в одном направлении, под южными – в противоположном.

Со стороны магнитного поля главных полюсов на обтекаемые током проводники обмотки якоря действуют электромагнитные силы. Направление действия этих сил (см. рис. 5.20), которое можно определить по известному правилу левой руки, противоположно направлению вращения якоря, то есть они создают тормозной электромагнитный момент. Чтобы непрерывно питать нагрузку, необходимо обеспечить стационарный режим вращения якоря. Для этого тормозной момент электромагнитных сил должен быть уравновешен вращающим моментом приводного двигателя: $M_{эм} = M_{дв}$. Чем больше протекающий по обмотке генератора ток нагрузки, тем, соответственно, больше действующий на якорь тормозной момент электромагнитных сил и уравновешивающий его вращающий момент приводного двигателя.

Описанным путем механическая энергия, подводимая от приводного двигателя, преобразуется генератором в электрическую энергию, потребляемую электроприемником. Потребляемая энергия и потери в генераторе компенсируются подведением механической энергии от приводного двигателя. Этим обеспечивается выполнение закона сохранения энергии.

5.5.2. Принцип действия двигателя постоянного тока

Двигатели постоянного тока преобразуют электрическую энергии постоянного тока в механическую энергию, используемую для привода рабочих машин. Рассмотрим для конкретности принцип действия двигателя независимого возбуждения. Предположим, что обмотка возбуждения главных полюсов запитана от источника постоянного тока и в двигателе создан магнитный поток возбуждения Ф (рис. 5.21).

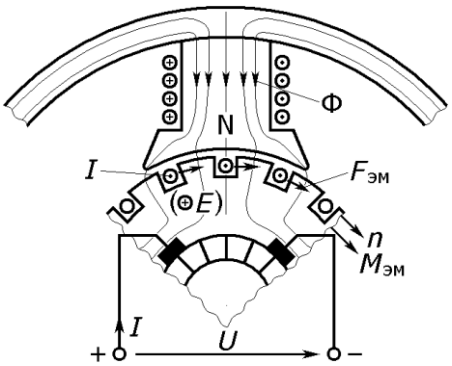


Рис. 5.21. К принципу действия двигателя постоянного тока

Если на якорь подать постоянное напряжение U, то в проводниках его обмотки возникнет ток I_a, на которые поле возбуждения оказывает силовое действие. В двигателе постоянного тока, как и в генераторе, щеточно-коллекторный узел разбивают обмотку якоря на параллельные ветви. Когда щетки расположены на линии геометрической нейтрали, ток якоря под северными полюсами имеет одно направление, под южными – противоположное. Благодаря этому, электромагнитные силы $F_{эм}$ под всеми полюсами имеют одинаковое направление и создают момент $M_{эм}$, приводящий якорь во вращение с частотой n. При этом в обмотке якоря наводится ЭДС E, направление которой неизменно относительно неподвижных щеток, к которым приложено постоянное напряжение U, и противоположно току.

В момент подачи напряжения сила тока в якоре максимальна, так как ротор неподвижен ($n = 0$) и противо-ЭДС $E = 0$. По мере разгона двигателя противо-ЭДС увеличивается, и сила тока в якоре уменьшается. Увеличение частоты вращения двигателя будет продолжаться до тех пор, пока его вращающий момент не станет равным моменту сопротивления нагрузки на валу ($M_{дв} = M_{сопр}$). Механическая мощность, передаваемая через вал рабочей машине, компенсируется электрической мощностью, поступающей от источника питания постоянного тока. В этом состоит преобразование электрической энергии в механическую.

В режиме идеального ХХ (при отсутствии нагрузки и потерь) преобразования электрической энергии в механическую не происходит.

5.5.3. О характере индуктируемой электродвижущей силы и тока в обмотке якоря

В п. 5.5.1 было показано, что поскольку щетки неподвижны относительно главных полюсов, направление ЭДС в секциях и, соответственно, параллельных ветвях обмотки, образуемых наложенными на коллектор щетками, при вращении якоря остается постоянным во времени. Если же выделить некоторую произвольную секцию, то очевидно, что при вращении якоря ее стороны поочередно проходят под северными и южными полюсами, и наводимая в ней ЭДС является переменной.

Иными словами, индуктированная напряженность электрического поля в сторонах секций, пересекающих в процессе вращения произвольно выбранную точку, неподвижную в системе координат статора, постоянна по направлению в этой точке. И, наоборот, в точке произвольно выбранной секции, неподвижной в системе координат ротора, направление действия индуктированной напряженности при вращении якоря периодически изменяется.

То есть ЭДС вращающегося якоря можно считать переменной или постоянной в зависимости от системы координат, в которой рассматривается процесс ее наведения.

При вращении якоря под щетками происходит непрерывный процесс переключения (коммутации) секций обмотки из параллельных ветвей с одним направлением ЭДС в параллельные ветви с противоположным направлением ЭДС. Секции уходят из параллельной ветви под одной щеткой, а приходят в нее из-под другой щетки (другой полярности). Это может происходить не одновременно, вследствие чего количество секций в параллельной ветви может колебаться на ±1.

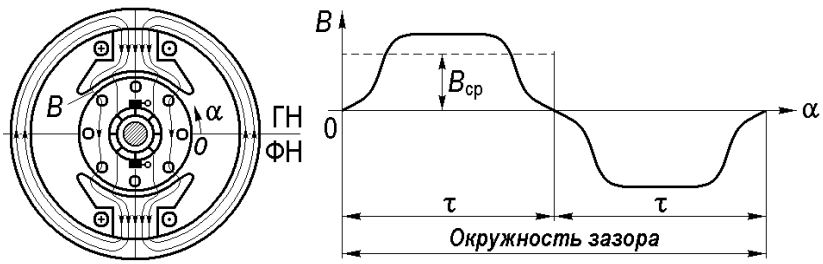
Поскольку на линии геометрической нейтрали магнитное поле возбуждения и, соответственно, ЭДС секций, находящихся в этой зоне, близки к нулю, изменение во времени ЭДС параллельной ветви из-за колебания на ±1 числа ее секций весьма незначительно: $E_{пв} \approx \text{const}$.

5.6. Магнитное поле в воздушном зазоре

5.6.1. Режим холостого хода

При идеальном ХХ ток по обмотке якоря не протекает ($I_a = 0$) и все магнитное поле создается главными полюсами (рис. 5.22, *а*).

По окружности машины полярность главных полюсов чередуется, поэтому распределение индукции магнитного поля возбуждения в зазоре имеет периодический осесимметричный характер (рис. 5.22, *б*). Из-за явнополюсной конструкции под полюсными наконечниками индукция во много раз больше, чем в междуполюсном пространстве.



а *б*

Рис. 5.22. Магнитное поле возбуждения МПТ в режиме ХХ:
а – замыкание линий поля по магнитопроводу машины;
б – график распределения магнитной индукции по окружности зазора;
ГН – геометрическая нейтраль; ФН – физическая нейтраль

Геометрической нейтралью называется радиальная линия, проходящая через центр машины и середину междуполюсного пространства. Физическая нейтраль – это радиальная линия, проходящая через центр машины и точки окружности зазора на поверхности якоря, где магнитная индукция равна нулю.

В режиме ХХ индукция поля возбуждения на линии геометрической нейтрали равна нулю. Таким образом, в этом режиме геометрическая и физическая нейтрали совпадают (см. рис. 5.22, *а*).

5.6.2. Режим нагрузки

В режиме нагрузки по обмотке якоря протекает ток. При этом МДС обмотки якоря возбуждает собственное магнитное поле, называемое полем реакции якоря. Таким образом, результирующее магнитное поле в зазоре МПТ создается суммарным действием МДС главных полюсов и обмотки якоря (рис. 5.23).

Реакцией якоря называется комплекс физических явлений, связанных с воздействием поля якоря на поле полюсов. Происходящие при этом физические процессы очень важны для работы МПТ.

Поперечная реакция якоря. При ХХ имеется только поле возбуждения (рис. 5.23, *а*), направленное вдоль оси главных полюсов. Если при отсутствии возбуждения через обмотку якоря пропустить ток, то ось его

магнитного поля будет проходить по линии токораздела, определяемого положением щеток: на рис. 5.23, *б* – вдоль геометрической нейтрали (поперек оси главных полюсов). Аналогично направлено магнитное поле реакции якоря, замыкаясь в основном через зубцы якоря и полюсный наконечник главных полюсов. Такой характер распределения поля реакции якоря называется поперечным.

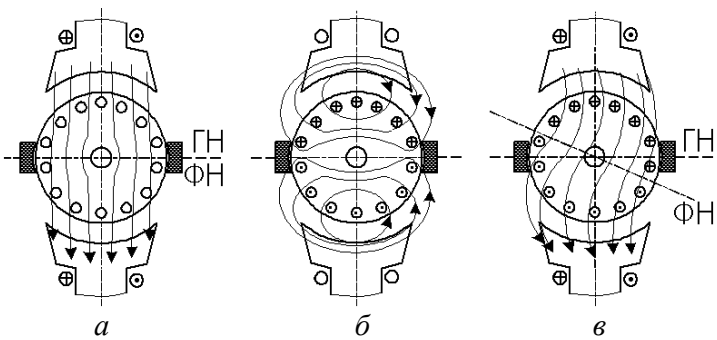


Рис. 5.23. Магнитное поле МПТ:
а – поле возбуждения (ХХ), *б* – поле поперечной реакции якоря при отсутствии возбуждения, *в* – результирующее поле

В режиме нагрузки магнитные поля возбуждения и поперечной реакции якоря действуют одновременно (рис. 5.23, *в*), и распределение результирующего поля изменяется: под одним краем полюса оно ослабевает, а под другим усиливается. При отсутствии насыщения магнитное сопротивление потоку возбуждения не изменяется. Но если под действием результирующего магнитного поля возникает насыщение (или оно усиливается в уже насыщенной машине), то магнитное сопротивление потоку возбуждения возрастает, что приводит к его уменьшению (на 1–2%). В этом случае поперечная реакция якоря оказывает определенное размагничивающее действие.

Наложение поля поперечной реакции якоря на поле возбуждения смещает физическую нейтраль МПТ относительно геометрической нейтрали (см. рис. 5.23, *в*): у генераторов – по направлению вращения, у двигателей – в обратную сторону.

Усиление результирующего поля под одним краем и ослабление под другим приводит к резко неравномерному распределению индукции в зазоре, что приводит при движении секций обмотки в магнитном поле к соответствующему распределению напряжения между коллекторными пластинами: отношение $\frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{ср}}}$ может достигать значений 1,8–1,85. Увеличение напряжения между коллекторными пластинами может привести

к пробою по проводящим мостикам из угольной пыли, к возникновению дуги и кругового огня.

Поле поперечной реакции якоря наводит ЭДС в коммутируемых секциях, что приводит к усилению искрения под щетками (см. ниже п. 5.12). Для его компенсации в зоне коммутации устанавливают добавочные полюсы.

Дополнительным способом снижения влияния поля поперечной реакции якоря в машинах малой и средней мощности является увеличение зазора между краями наконечников главных полюсов и сердечником якоря. Однако этот прием увеличивает магнитное сопротивление потоку возбуждения, для сохранения которого требуется увеличение МДС обмотки возбуждения, в свою очередь, влекущее увеличение массогабаритных показателей.

Для полного устранения негативного действия поля поперечной реакции якоря в специально выполненных пазах главных полюсов укладывают компенсационную обмотку (см. рис. 5.4, позиция *3*), которая электрически включается последовательно в цепь якоря согласно с обмоткой добавочных полюсов. В результате поле машины под главными полюсами при нагрузке остается практически неизменным.

Компенсационные обмотки усложняют и удорожают машину, поэтому применяются только в машинах средней и большой мощности.

5.7. Математическое описание машины постоянного тока

5.7.1. Электродвижущая сила

Электродвижущая сила якорной обмотки соответствует ЭДС одной параллельной ветви. В соответствии с законом электромагнитной индукции, ее величина равна скорости изменения суммарного магнитного потока всех витков параллельной ветви. При стационарном процессе она постоянна:

$$E = -\,d\Psi / dt = wB_{\text{ср}}S, \qquad (5.7)$$

где Ψ – магнитное потокосцепление, w – число витков параллельной ветви, $B_{\text{ср}}$ – среднее значение индукции на полюсном делении (см. рис. 5.22, *б*), S – площадь, пересекаемая активными сторонами витка секции в единицу времени, которая прямо пропорциональна линейной скорости v:

$$S = 2l_a v = 2l_a \pi D_a n / 60,$$

где n – частота вращения, об/мин, l_a – длина активной части проводников обмотки (см. рис. 5.16).

В теории электрических машин постоянного тока обычно принято использовать не число витков w параллельной ветви, а число активных проводников обмотки якоря N, через которое число витков выражается очевидной формулой: $w = N / (4a)$.

Введением среднего значения $B_{ср}$ магнитной индукции на полюсном делении учитывается тот факт, что проводники параллельной ветви находятся в различном по интенсивности поле возбуждения. Эту индукцию можно выразить через величину магнитного потока Ф главного полюса:

$$B_{ср} = \Phi / (l_a \tau).$$

При вращении якоря из-за зубчатого строения его сердечника меняется положение зубцов относительно главных полюсов и, следовательно, изменяется магнитное сопротивление потоку. Это приводит к продольной пульсации магнитного потока главных полюсов Ф, хотя и весьма небольшой. Из-за дискретного распределения обмотки положение проводников параллельной ветви относительно главных полюсов и кривой распределения индукции при вращении также не остается постоянным.

Вследствие действия указанных причин ЭДС параллельной ветви пульсирует во времени. Однако относительное значение этих пульсаций при большом числе пазов весьма незначительно. Для сглаживания пульсаций при небольшом числе пазов в машинах небольшой мощности иногда выполняют скос главных полюсов или пазов якоря.

Учитывая сказанное, можно принять, что значение ЭДС весьма близко к его среднему значению: $e(t) = E$.

Подставляя в формулу (5.7) выражения отдельных величин и, учитывая, что $\pi D_a / \tau = 2p$, получим:

$$E = (N / 4a)[\Phi / (l_a \tau)][2 l_a \pi D_a n / 60] = pN / (60a)\Phi n = c_E \Phi n, \qquad (5.8)$$

или

$$E = (N / 4a)[\Phi / (l_a \tau)][2 l_a \Omega D_a / 2] = pN / (2\pi a)\Phi\Omega = c\Phi\Omega, \qquad (5.9)$$

где $c_E = pN / (60a)$ и $c = pN / (2\pi a)$ – для изготовленной машины постоянные коэффициенты, зависящие от ее конструктивных параметров, n, об/мин, и Ω, рад/с, – частота вращения якоря в соответствующих единицах.

Таким образом, индуктируемая в обмотке якоря ЭДС прямо пропорциональна частоте вращения якоря и величине магнитного потока.

Заметим, что обычное небольшое укорочение шага секции несущественно влияет на величину индуктируемой в ней ЭДС. Это обусловлено тем, что распределение индукции на полюсном делении обычно имеет трапецеидальный вид, при котором значения индукции под краями и серединой полюса отличаются незначительно. Под полюсами в наиболее сильном по величине магнитном поле в одинаковых условиях находится большая часть верхних и нижних сторон секций параллельной ветви, которые вносят основной вклад в суммарную ЭДС.

Поэтому укорочение даже на один элементарный паз (обычно меньше) выводит из под полюса (из зоны наиболее сильного поля) не более, чем одну сторону секции, что при относительно большом числе секций практически не сказывается на величине суммарной ЭДС.

В обмотках машин переменного тока укорочение шага выполняется существенно большим, что заметно влияет на величину амплитуды основной пространственной гармоники индукции магнитного поля и основной временной гармоники индуктируемой ЭДС.

5.7.2. Электромагнитный момент

Как известно из курса физики, работа сил магнитного поля по перемещению в пространстве контура с током, равна работе электродвижущих сил, индуктируемых в этом контуре. При стационарном процессе это эквивалентно равенству соответствующих мощностей:

$$\Omega M_{\text{эм}} = EI_a \quad \text{или} \quad \Omega M_{\text{эм}} = c\Phi\Omega I_a.$$

После сокращения на Ω получим:

$$M_{\text{эм}} = c\Phi I_a. \tag{5.10}$$

Как видно из полученного выражения, электромагнитный момент МПТ прямо пропорционален току якоря и магнитному потоку на полюсном делении. В генераторе электромагнитный момент, действующий на якорь, является тормозным, а в двигателе – вращающим.

В машине постоянного тока обмотка якоря обычно расположена в пазах. Зубцы сердечника якоря имеют меньшее магнитное сопротивление для потока и магнитный поток возбуждения замыкается через них. Они, как бы, экранируют проводники якоря. Поэтому электромагнитные силы приложены в основном не к проводникам якоря, а преимущественно к зубцам.

5.7.3. Уравнение электрического равновесия цепи якоря

Как указывалось в п. 5.5.1 и 5.5.2 в МПТ щетки одинаковой полярности соединены между собой, вследствие чего направление ЭДС всех параллельных ветвей относительно щеток одинаково. Их ЭДС равны, и в этом случае, как известно из курса ТОЭ, общая ЭДС E обмотки якоря равна ЭДС отдельной параллельной ветви: $E = E_{пв}$. На выводах якоря действует соответствующее напряжение: $U = E = \text{const}$. При нагрузке по обмотке якоря протекает ток I_a.

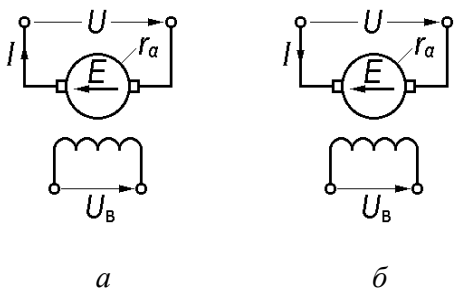


Рис. 5.24. Условные положительные направления ЭДС, напряжения и тока для ГПТ (*а*) и ДПТ (*б*)

Если принять условные положительные направления ЭДС, напряжения и тока в соответствии с рис. 5.24, то согласно второму закону Кирхгофа уравнения электрического равновесия цепи якоря будут иметь вид:

для генератора

$$U = E - I_a r_a - \Delta U_щ; \tag{5.5}$$

для двигателя

$$U = E + I_a r_a + \Delta U_щ, \tag{5.6}$$

где I_a – сила тока в якоре; $r_a = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко}$ – сопротивление цепи якоря ($r_{оя}$ – сопротивление обмотки якоря; $r_{дп}$ – сопротивление добавочных полюсов, $r_{ко}$ – сопротивление компенсационной обмотки); $\Delta U_щ$ – падение напряжения на щетках, приблизительно равное 1,5–2 В.

5.8. Генераторы постоянного тока

5.8.1. Эксплуатационные характеристики

Эксплуатационные характеристики определяют рабочие свойства генераторов. Они снимаются экспериментально или рассчитываются для установившегося режима работы при номинальной частоте вращения

якоря: $n = n_н = \text{const}$. Основными из них являются характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная. Так как ферромагнитные материалы, из которых изготавливают магнитопроводы, обладают гистерезисом, вид одних и тех же характеристик зависит от условия их снятия, которые устанавливаются ГОСТом.

Характеристикой холостого хода генератора называется зависимость ЭДС обмотки якоря от тока возбуждения ($E = f(I_в)$) при отсутствии нагрузки ($I = 0$) и заданной частоте вращения. О величине ЭДС судят по напряжению ХХ ($I = 0$) на зажимах якоря, так как в соответствии с уравнением (5.5) при этом $U = E$.

Характеристику определяют аналогично синхронному генератору (см. п. 4.7.1.) при независимом возбуждении или самовозбуждении. При смешанном возбуждении ток параллельной обмотки не должен протекать через обмотку последовательного возбуждения. При последовательном возбуждении характеристику ХХ снимают по схеме независимого возбуждения.

Характеристика ХХ генератора постоянного тока качественно аналогична соответствующей характеристике синхронного генератора (см. рис. 4.20, кривая 2). При постоянной частоте вращения ЭДС якоря прямо пропорциональна магнитному потоку (см. формулы (5.8) и (5.9)), вследствие чего характеристика холостого хода в ином масштабе повторяет кривую намагничивания генератора $\Phi = f(I_в)$ и поэтому позволяет также судить о магнитных свойствах машины и степени насыщения магнитной системы, оказывающих значительное влияние на рабочие МПТ.

В отсутствие тока возбуждения в обмотке якоря ГПТ наводится остаточная ЭДС $E_{ост}$ (см. рис. 4.20, кривая *1*), обусловленная гистерезисными свойствами ферромагнитного материала главных полюсов и станины. Как было указано выше, в генераторах постоянного тока индуктором обычно является статор, имеющий магнитную цепь большей длины, чем ротор. Вследствие этого МДС остаточного намагничивания в них больше, чем в синхронных гекнераторах, и также больше относительная величина остаточной ЭДС, составляющая 5–10% номинального напряжения.

Ферромагнитные материалы обладают гистерезисными свойствами, и для конкретного генератора зависимости $E = f(I_в)$ при различных способах снятия в некоторой степени различаются. Поскольку для изготовления магнитопроводов используются магнитомягкие материалы, эти различия незначительны.

При небольших токах возбуждения зависимость $E = f(I_в)$ имеет линейный характер, а затем по мере возрастания тока вследствие насыще-

ния магнитопровода рост ЭДС замедляется, вследствие чего в характеристике возникает заметный перегиб – «колено».

Машины постоянного тока рассчитывают таким образом, что рабочая точка обычно располагается «на колене» характеристики холостого хода, т.е. в области ее перегиба.

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на обмотке якоря от тока нагрузки при номинальной частоте вращения и неизменных внешних сопротивлениях в цепях обмоток возбуждения: $U = f(I)$. Ее снимают при различных токах нагрузки, начиная со 150% от номинального до холостого хода. При независимом возбуждении внешнюю характеристику генератора определяют при номинальном токе возбуждения ($I_в = I_{вн} = \text{const}$). При параллельном возбуждении – при нерегулируемом сопротивлении цепи возбуждения ($R_{рег} = \text{const}$), соответствующем номинальному режиму.

Внешние характеристики генераторов независимого, параллельного и смешанного возбуждения представлены на рис. 5.25, *а*.

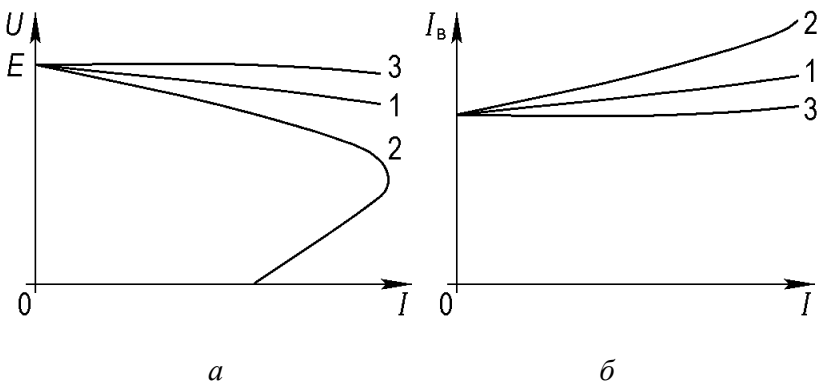


Рис. 5.25. Внешние (*а*) и регулировочные (*б*) характеристики ГПТ:
1 – независимое возбуждение, *2* – параллельное возбуждение, *3* и *4* – смешанное возбуждение, соответственно, при согласном и встречном включении обмоток

Зависимость напряжения от тока нагрузки описывается уравнением электрического равновесия цепи якоря (5.5). Как следует из этого уравнения, при независимом возбуждении (кривая *1*) напряжение на выводах генератора определяется двумя основными факторами:

1) падением напряжения в цепи якоря;

2) уменьшением ЭДС из-за определенного размагничивающего действия поперечной реакции якоря, увеличивающей насыщение отдельных участков магнитной цепи, по которой замыкается основной магнитный поток.

В режиме холостого хода $U = E$. При нагрузке напряжение генератора уменьшается.

Падение напряжения в цепи якоря, как это следует из уравнения (5.5), снижает напряжение по линейному закону, так как при независимом возбуждении через нагрузку протекает полный ток якоря. Однако размагничивающее действие поперечной реакции якоря в некомпенсированных генераторах приводит к более быстрому снижению напряжения при больших токах нагрузки (кривая *1*).

При параллельном (кривая *2*) и смешанном (кривая *3*) возбуждении от якоря одновременно получают питание и нагрузка, и параллельная обмотка возбуждения, так что ток якоря равен сумме их токов:

$$I_a = I_в + I. \qquad (5.11)$$

Однако сила тока в параллельной обмотке возбуждения намного меньше, чем в нагрузке, и ее влиянием на падение напряжения в цепи якоря можно пренебречь.

Если в генераторе параллельного возбуждения поддерживать постоянным ток возбуждения, то его внешняя характеристика будет полностью аналогична внешней характеристике генератора независимого возбуждения. Однако по условиям снятия внешней характеристики сопротивление регулировочного реостата должно оставаться неизменным: $R_{рег} = \text{const}$. В этом случае ток в параллельной обмотке возбуждения уменьшается с ростом нагрузки прямо пропорционально напряжению на выводах генератора:

$$I_в = U / (r_в + R_{рег}).$$

Уменьшение тока возбуждения приводит к уменьшению основного магнитного потока и, соответственно, ЭДС якоря, что является дополнительным фактором уменьшения напряжения. Поэтому внешняя характеристика ГПВ располагается ниже соответствующей характеристики ГНВ (кривая *2*).

При ослабленном основном магнитном потоке размагничивающее действие поперечной реакции якоря сказывается более сильно. В результате при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки до нуля сила тока достигает некоторого максимального (критического) значения, а затем начинает уменьшаться (см. рис. 5.25, *а*). При нулевом сопротивлении нагрузки (коротком замыкании) $U = 0$, $I_в = 0$, и ток в якоре поддерживается только остаточной ЭДС. Вследствие этого сила установившегося тока КЗ относительно невелика и не представляет опасности для генератора.

Этот режим следует отличать от внезапного короткого замыкания на зажимах работающего генератора, которое является тяжелым аварийным режимом из-за большого начального тока и недопустимого искрения под щетками.

При смешанном возбуждении генератор снабжается дополнительной обмоткой возбуждения, включенной последовательно в цепь якоря. Магнитный поток этой обмотки должен быть направлен согласно с магнитным потоком основной параллельной обмотки. Она предназначена для стабилизации напряжения при увеличении тока нагрузки и рассчитывается таким образом, чтобы индукционное действие создаваемого ею магнитного потока компенсировали факторы, уменьшающие напряжение. При согласном включении по потоку напряжение генератора смешанного возбуждения практически не зависит от нагрузки (кривая *3*).

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения (в обмотке независимого или параллельного возбуждения) от тока нагрузки при неизменном напряжении на выводах обмотки якоря и номинальной частоте вращения ротора. Она показывает, как нужно регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки ($I_в = f(I)$), чтобы поддерживать номинальное напряжение: $U = U_н = \text{const}$. При регулировании тока возбуждения изменяется магнитный поток и ЭДС генератора, оказывающая основное влияние на величину напряжения (см. формулу (5.5)).

Регулировочную характеристику генератора определяют при номинальном напряжении путем снятия одной ветви зависимости тока возбуждения: при уменьшении тока нагрузки, начиная со 150% от номинального до холостого хода.

Регулировочные характеристики генераторов независимого, параллельного и смешанного возбуждения представлены на рис. 5.25, *б*. Вид регулировочной характеристики определяется видом внешней характеристики: Если, например, при нагрузке напряжение уменьшается, то для его поддержания необходимо увеличивать ток возбуждения тем больше, чем оно ниже. Поэтому эти зависимости имеют противоположный характер.

В условиях эксплуатации напряжение современных генераторов поддерживают на заданном уровне автоматическим регулятором тока возбуждения. Глубина регулирования тока возбуждения определяется возможностями регулятора и соотношением между напряжением генератора при холостом ходе и при нагрузке.

В генераторе параллельного возбуждения требуется большая глубина регулирования тока возбуждения в сравнении с независимым возбуждением.

5.8.2. Принцип самовозбуждения

Самовозбуждением называется способ возбуждения магнитного поля генераторов, при котором обмотка главных полюсов получает питание от обмотки якоря. Оно используется в генераторах параллельного и смешанного возбуждения.

Самовозбуждение возможно при следующих условиях:

а) наличие остаточной намагниченности у магнитной системы статора, создающей остаточный магнитный поток, величина которого обычно составляет несколько процентов от номинального значения;

б) согласное направление остаточного магнитного потока и потока, вызываемого обмоткой возбуждения, что обеспечивается определенной полярностью подключения обмотки к якорю.

Рассмотрим принцип самовозбуждения на примере генератора параллельного возбуждения при отключенной нагрузке. Предположим, что условия самовозбуждения в нем выполняются.

Самовозбуждение – переходной процесс с изменением во времени значений ЭДС и тока. Качественно его можно описать следующим образом. При вращении якоря в остаточном магнитном поле в его обмотке наводится остаточная ЭДС, которая вызывает протекание тока по цепи «якорь – обмотка возбуждения». Обтекаемая током $i_в$ обмотка возбуждения создает магнитный поток $Ф_в$, который, накладываясь на остаточный магнитный поток $Ф_{ост}$, при выполнении второго условия самовозбуждения усиливает результирующий магнитный поток главных полюсов. Это приводит к увеличению ЭДС обмотки якоря, тока и потока возбуждения и т.д. В результате, на зажимах обмотки якоря установится некоторое напряжение.

Из физических соображений очевидно, что при отсутствии остаточного магнитного потока $e_{ост} = 0$ и самовозбуждение невозможно, так как отсутствуют условия для возникновения тока $i_в$.

Качественное описание процесса самовозбуждения не позволяет установить некоторые его особенности. Запишем в соответствии со вторым законом Кирхгофа по контуру «якорь – обмотка возбуждения» уравнение электрического равновесия:

$$L_{вa} di_в / dt = e - r_{вa} i_в, \qquad (5.12)$$

где $L_{вa} = L_в + L_a$ и $r_{вa} = r_в + r_a$ – суммарные значения индуктивности и активного сопротивления цепей возбуждения и якоря, $e = e_в + e_{ост}$ – мгновенные значения ЭДС, индуктируемые в обмотке якоря потоком обмотки возбуждения и остаточным магнитным потоком, $i_в$ – мгновен-

ное значение тока возбуждения, $L_в$ и L_a, $r_а$ и $r_в$ – индуктивности и активные сопротивления цепи возбуждения и якоря.

Составляющие уравнения (5.12) в графической форме представлены на рис. 5.26. При переходном процессе ток возбуждения должен возрасти до величины, при которой, с одной стороны, на якоре установится требуемое напряжение, а с другой, – магнитная система будет эффективно использована. Для этого необходимо $L_{ва}di_в / dt > 0$, чтобы прямая $r_{ва}i_в$ пересекала характеристику холостого хода $e = f(i_в)$ в области «колена». Это условие выполняется только в том случае, если сопротивление цепи возбуждения меньше дифференциального сопротивления начального участка характеристики холостого хода, называемого критическим: $r_{ва} < de / di_в = R_{кр}$ при $i_в = 0$.

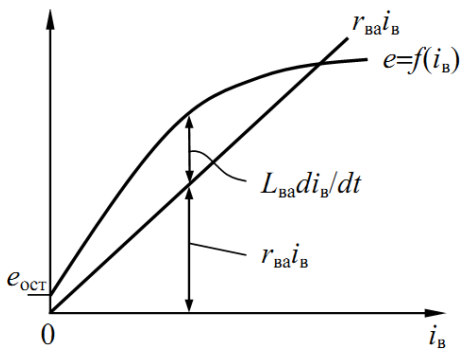


Рис. 5.26. К объяснению процесса самовозбуждения

Критическое сопротивление (дифференциальное сопротивление начального участка характеристики холостого хода, имеющего наибольшую крутизну) зависит от магнитного сопротивления потоку возбуждения (от величины воздушного зазора, так как на начальном участке насыщения нет и магнитное сопротивление железа невелико), частоты вращения якоря и МДС обмотки возбуждения.

Графическое решение уравнения (5.12) соответствует точке пересечения характеристики $e = f(i_в)$ с прямой $r_{ва}i_в$. После завершения переходного процесса на якоре генератора установится некоторое постоянное напряжение, определяемое уравнением (5.5).

5.9. Двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках, где требуется широкое и плавное регулирование частоты вращения (электроприводы прокатных станов, мощных металлорежущих станков, тяговый электропривод

и др.). Конструктивно двигатели и генераторы постоянного тока практически не отличаются.

Схемы возбуждения двигателей постоянного тока в целом аналогичны схемам генераторов постоянного тока. Их выполняют с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением, а также с возбуждением от постоянных магнитов (см. рис. 5.15).

Двигатели постоянного тока обладают определенными преимуществами в сравнении с другими типами электродвигателей:

– большое разнообразием механических характеристик;

– возможность экономичной работы в различных режимах: при постоянной мощности в широком диапазоне скоростей, продолжительная работа на низкой скорости, с рекуперацией энергии, при частых динамичных разгонах и торможении;

– регулирование скорости вращения в широких пределах;

– компактные размеры, небольшая масса и более высокий КПД преобразователя для двигателя постоянного тока.

Эти свойства до сегодняшнего времени обусловили их конкурентоспособность и широкое применение в приводах различных механизмов, несмотря на то, что они сложнее по конструкции, существенно дороже и требуют более частого обслуживания из-за наличия щеточно-коллекторного узла.

5.9.1. Уравнения и характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения

При независимом возбуждении якорь и обмотка возбуждения двигателя получают питание от различных источников, а при параллельном – подключены к зажимам одного и того же источника питания. В обоих случаях при постоянстве напряжения режим работы двигателя не оказывает влияние на цепь возбуждения. Поэтому у обоих способов возбуждения характеристики аналогичны. Упростим уравнение (5.6), полагая, что падение напряжения на щетках $\Delta U_{щ}$ приближенно учтено соответствующим увеличением сопротивления r_a цепи якоря:

$$U = E + I_a r_a.$$

Подставим в это уравнение выражение (5.8) для ЭДС и, решив его относительно частоты вращения, получим уравнение электромеханической характеристики $n = f(I_a)$:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a}{c_E \Phi} I_a . \qquad (5.13)$$

Из уравнения (5.13) видно, что эта линейная относительно тока якоря I_a характеристика зависит от напряжения на якоре, магнитного потока главных полюсов и сопротивления цепи якоря r_a.

Характер зависимости магнитного потока главных полюсов от тока якоря определяется типом возбуждения двигателя. Если не учитывать размагничивающее действие поперечной реакции якоря, то для двигателя независимого возбуждения можно приближенно принять $\Phi \approx \text{const}$. Тогда согласно полученному уравнению электромеханическая характеристика этого двигателя будет иметь вид прямой, несколько наклоненной к оси абсцисс (рис. 5.27).

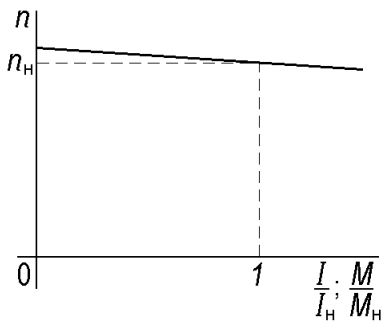


Рис. 5.27. Электромеханическая (механическая) характеристика ДПТ НВ

Выразив в уравнении (5.13) ток якоря через электромагнитный момент [в соответствии с (5.10) $I_a = M / (c\Phi)$], придем к уравнению механической характеристики $n = f(M)$:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a}{c_E c \Phi^2} M \,. \qquad (5.14)$$

При идеальном холостом ходе ($M = 0$) частота вращения n_0 двигателя, как это следует из уравнения (5.14), прямо пропорциональна напряжению U на якоре и обратно пропорциональна магнитному потоку Φ главных полюсов:

$$n_0 = \frac{U}{c_E \Phi} \,. \qquad (5.15)$$

Уравнение (5.14) и механическая характеристика двигателя независимого возбуждения качественно имеют такой же вид, как и электромеханическая (см. рис. 5.27). Частота вращения с ростом момента на валу изменяется незначительно: характеристика является «жесткой».

5.9.2. Уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения

У двигателей последовательного возбуждения обмотка возбуждения обтекается током якоря: $I_в = I_a$. Поэтому магнитный поток не остается постоянным.

При токах нагрузки, меньших (0,8–0,9)$I_{ном}$, магнитная цепь двигателя не насыщена и магнитный поток пропорционален току якоря: $\Phi = c_\Phi I_a$ и, следовательно, в соответствии с (5.10) $M = c_\Phi c I_a^2$. Совместное решение этого уравнения и (5.13) приводит к следующему выражению для механической характеристики двигателя последовательного возбуждения, в котором c_1 и c_2 – коэффициенты:

$$n = c_1 \frac{U}{\sqrt{M}} - c_2 r_a . \qquad (5.16)$$

Примерный вид механической характеристики двигателя последовательного возбуждения представлен на рис. 5.28. Как следует из полученного выражения (5.16), при ненасыщенной магнитной системе механическая характеристика имеет гиперболический характер. При увеличении момента нагрузки частота вращения двигателя значительно уменьшается. Такую характеристику называют «мягкой».

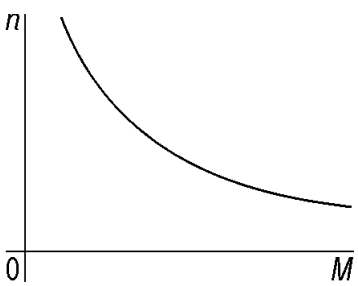


Рис. 5.28. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

При уменьшении нагрузки до значения, меньшего 25% от номинального, частота вращения резко увеличивается и может достигнуть опасных значений (двигатель идет вразнос). Поэтому режимы работы, близкие к холостому ходу, для двигателя последовательного возбуждения недопустимы, в связи с чем он должен быть жестко соединен с рабочей машиной посредством муфты или зубчатой передачи.

В диапазоне больших нагрузок, когда ток якоря близок или больше номинального, магнитная система насыщена. При насыщенной магнитной системе магнитный поток мало зависит от тока якоря и его можно

приближенно принять постоянным: $\Phi \approx \text{const}$. При этом зависимость $n = f(M)$ приближается к линейной.

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения в наибольшей степени подходит для электроприводов механизмов, которым для пуска, а также при малой частоте вращения требуется большой вращающий момент (транспортные, землеройные, подъемно-транспортные и др.).

При равных условиях с ростом нагрузки ток якоря двигателя последовательного возбуждения растет медленнее, чем у двигателей независимого и параллельного возбуждения, так как одновременно увеличивается магнитный поток. Соответственно, в меньшей степени изменяется мощность.

5.9.3. Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения

У двигателей смешанного возбуждения обтекаемая током якоря последовательная обмотка возбуждения по магнитному полю включается согласно с параллельной обмоткой. В зависимости от того, какая из обмоток возбуждения является основной, двигатель по своим свойствам приближается к двигателям параллельного или последовательного возбуждения, и его механическая характеристика имеет промежуточный вид (рис. 5.29).

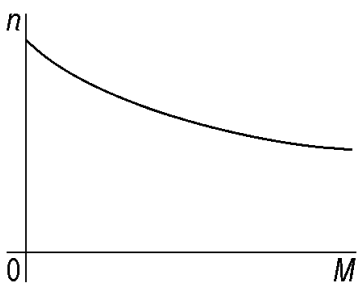


Рис. 5.29. Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения

Выполняя последовательную и параллельную обмотки с тем или иным соотношением МДС, можно получить механические характеристики различного вида. Это позволяет использовать его в электроприводах разнообразных механизмов: прокатных станов, прессов, в качестве стартеров двигателей внутреннего сгорания и т.п.

В отличие от последовательного, при смешанном возбуждении двигатель может работать в режиме холостого хода.

5.9.4. Регулирование частоты вращения

Как следует из закона инерции, якорь двигателя сам по себе без воздействия извне не может изменить частоту своего вращения. Воздействие извне характеризуется разностью вращающего момента $M_{вр}$ электромагнитных сил и тормозного момента $M_{торм}$, создаваемого рабочим механизмом, силами трения и т.д. Из основного закона динамики можно получить следующие уравнение электропривода:

$$M_{вр}(t) - M_{торм}(t) = Jd\Omega(t) / dt, \qquad (5.17)$$

где J – момент инерции электропривода, приведенный к оси двигателя. Ω – угловая частота вращения якоря двигателя.

В частном случае, когда в любой момент времени вращающий и тормозной моменты взаимно уравновешены ($M_{вр} = M_{торм}$), $\Omega = \text{const}$, т.е. якорь вращается равномерно. Как следует из уравнения (5.17), изменение частоты вращения ($d\Omega(t) / dt \neq 0$) происходит, когда $M_{вр} - M_{торм} \neq 0$. При $M_{вр} > M_{торм}$ угловая частота вращения увеличивается, а при $M_{вр} < M_{торм}$ – уменьшается.

Поскольку электропривод с рабочей машиной всегда обладают определенным моментом инерции ($J > 0$), то если даже под воздействием каких-либо факторов $M_{вр}$ или $M_{торм}$ изменяются скачком, угловая частота вращения Ω мгновенно измениться не может, что влечет за собой процесс перехода от одного установившегося состояния к другому. Он будет продолжаться до тех пор, пока вращающий и тормозной моменты не будут взаимно уравновешены. В настоящем параграфе изменение частоты вращения при регулировании рассматривается в установившемся режиме после окончания переходного процесса. Посредством некоторого аппарата регулируются электрические величины, влияющие на величину вращающего момента $M_{вр}$. При этом предполагается, что $M_{торм} = \text{const}$.

Электрическое регулирование приводит к изменению электромеханических свойств двигателя. Из уравнений (5.13) и (5.14) электромеханической и механической характеристик двигателя постоянного тока видно, что для изменения частоты вращения можно регулировать напряжение U якоря, ток возбуждения (магнитный поток Ф полюсов) и сопротивление цепи якоря r_a. Рассмотрим регулирование частоты вращения на примере двигателя независимого возбуждения.

1. Регулирование тока возбуждения (полюсное регулирование).

В двигателях независимого возбуждения для питания ОВ обычно используют управляемые выпрямители (рис. 5.30), посредством которых

осуществляется регулирование тока возбуждения. Реостатное регулирование используется только в двигателях небольшой мощности.

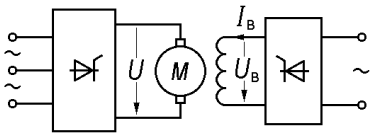


Рис. 5.30. Питание ДПТ от управляемого выпрямителя

Регулирование тока возбуждения приводит к изменению магнитного потока полюсов. Магнитная система двигателей обычно проектируется без существенного запаса, так что регулирование магнитного потока возможно преимущественно в сторону ослабления. При этом одновременно увеличивается частота вращения холостого хода (5.15) и коэффициент при независимой переменной M в уравнении (5.14), снижающий степень жесткости механической характеристики.

Анализ показывает, что при относительно небольших нагрузках ослабление магнитного потока возбуждения приводит к росту частоты вращения (рис. 5.31). В зоне больших моментов в соответствии с выражением (5.10) это вызывает значительное возрастание тока якоря. Когда вызванное им падение напряжение в цепи якоря превышает ЭДС ($E > I_a r_a$), дальнейшее ослабление потока приводит к уменьшению частоты вращения. При этом необходимо контролировать ток якоря, чтобы он не превышал допустимых пределов.

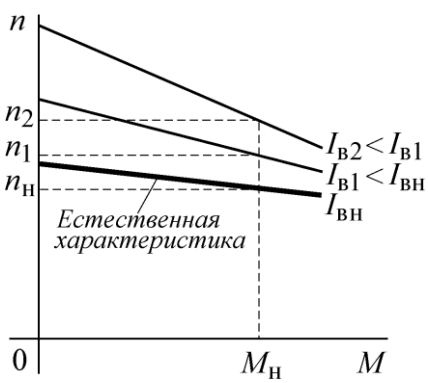


Рис. 5.31. Механические характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения при регулировании тока возбуждения

Способ полюсного регулирования целесообразно применять при постоянстве мощности, при котором значение момента нагрузки с ростом частоты вращения снижается. Обычно он обеспечивает диапазон регулирования $n_{max} / n_{min} = 2–3$ (преимущественно регулирование – вверх). Нижний предел n_{min} ограничивается насыщением магнитной цепи ма-

шины, которое не позволяет сильно увеличивать магнитный поток. Верхний предел n_{max} – условием механической прочности, предельным значением тока якоря, а также ухудшением коммутации и опасностью возникновения кругового огня.

Полюсное регулирование является экономичным, так как на возбуждение требуется относительно небольшая мощность, и капитальные затраты невелики.

2. Регулирование напряжения на якоре (якорное регулирование).

Этот способ реализуется с помощью регулируемого источника питания: генератора постоянного тока (система «генератор-двигатель») или управляемого выпрямителя (система «выпрямитель-двигатель»). При этом обмотка возбуждения питается от независимого источника постоянного тока (см. рис. 5.30), поэтому предполагаем, что $I_{возб} = \text{const}$, $\Phi \approx \text{const}$.

Естественной называется механическая характеристика двигателя при номинальных значениях напряжения якоря и тока возбуждения, соответствующая нормальной схеме включения его обмоток при отсутствии добавочных сопротивлений в цепях. На рис. 5.32 представлено семейство механических характеристик при регулировании напряжения, где $U_н$ – естественная характеристика, U_1 и U_2 – искусственные.

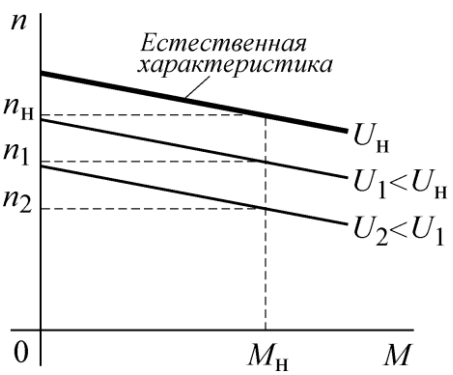


Рис. 5.32. Механические характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения при регулировании напряжения на якоре

В этом семействе меньшая частота вращения соответствует меньшему напряжению. Без учета размагничивающего действия поперечной реакции якоря ($\Phi \approx \text{const}$) коэффициент при независимой переменной M в уравнении (5.14) механической характеристики и, как следствие, жесткость механических характеристик при различных напряжениях остается приблизительно постоянной. При этом в соответствии с выражением (5.15) изменяется частота вращения холостого хода. Поэтому семейство механических характеристик имеет вид параллельных прямых.

При снятии напряжения двигатель остановится ($I_a = 0$ $M_{вр} = 0$).

Данный способ является экономичным и обеспечивает широкий диапазон регулирования: 1:10 и более. В основном в процессе регулирования напряжение (и, соответственно, частота вращения n), уменьшается, так как его существенное увеличение выше $U_н$ невозможно по условиям эксплуатации.

Его преимуществом является также то, что индуктивность обмотки якоря значительно меньше индуктивности обмотки главных полюсов (меньше число витков), что обеспечивает более быстрое затухание переходных электромагнитных процессов.

Разновидностью якорного регулирования является широтно-импульсный способ регулирования, при котором на двигатель подаются импульсы неизменного по амплитуде напряжения (рис. 5.33). Среднее значение напряжения $U_{ср}$ на якоре определяется относительной продолжительностью импульса $T_и/T$.

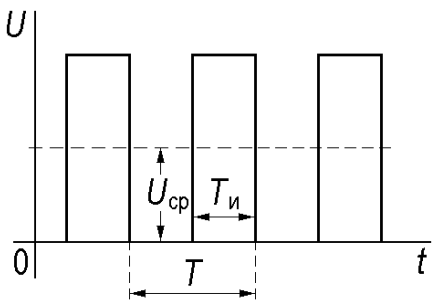


Рис. 5.33. Импульсное регулирование среднего напряжения на якоре

3. Реостатное регулирование осуществляют путем включения регулировочных сопротивлений $R_р$ в цепь якоря (см. ниже рис. 5.37 с аналогичной схемой). Из уравнения механической характеристики (5.14) следует, что в этом случае коэффициент при независимой переменной M увеличится и, как следствие, жесткость механических характеристик и частота вращения (при сохранении момента) уменьшатся. При сохранении частоты вращения на холостом ходе ($n_0 = \text{const}$ при условии $U = U_н = \text{const}$; $I_в = I_{в\,ном} = \text{const}$) семейство механических характеристик будет выходить из одной точки. Соответствующие механические характеристики при различных регулировочных сопротивлениях представлены $R_р$ на рис. 5.34.

При значениях регулировочного сопротивления $R_р \gg r_a$ частота вращения из-за мягкости характеристики становится нестабильной, вследствие чего диапазон регулирования ограничен: $n_{max} / n_{min} = 2–3$ (однозонное регулирование – вниз).

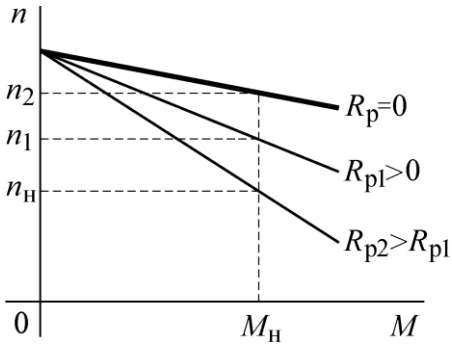
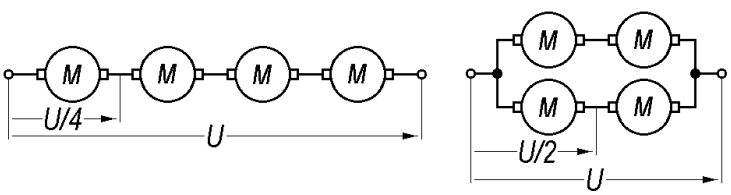


Рис. 5.34. Механические характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения при реостатном регулировании

Недостатком рассматриваемого способа является наличие значительных потерь мощности в регулировочном реостате ($\Delta P = I^2 R_р$), пропорциональных относительному уменьшению частоты вращения, и снижение общего КПД электропривода. В современных приводах этот способ не применяется.

Особенности регулирования частоты вращения двигателей последовательного возбуждения. При последовательном возбуждении оно может осуществляться теми же способами, что и для независимого возбуждения. На железнодорожном транспорте, где на электровозах может использоваться от четырех до восьми одинаковых тяговых двигателей, якорное регулирование осуществляется путем применения различных схем включения двигателей: последовательное, последовательно-параллельное и параллельное включение (рис. 5.35).



а *б*

Рис. 5.35. Регулирование напряжения на якоре путем перегруппировки двигателей

Такой способ регулирования может быть реализован только при равной частоте вращения двигателей, так как в этом случае ЭДС якорей и, как следствие, напряжения на их зажимах будут одинаковы. В тяговых двигателях это условие выполняется, ввиду жесткой связи валов двигателей с колесными парами. Напряжение на якорях изменяется ступенчато (в зависимости от числа двигателей – 3–4 ступени). Соответственно,

регулирование осуществляется ступенчато вниз от основной частоты вращения.

Полюсное регулирование осуществляется путем шунтирования обмотки возбуждения реостатом (рис. 5.36), что приводит к ответвлению в него части тока якоря.

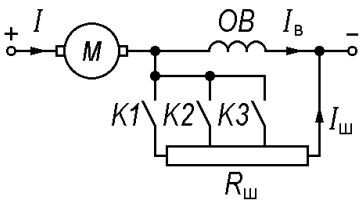


Рис. 5.36. Ослабление тока возбуждения шунтирующим реостатом

Сопротивление шунтирующего реостата $R_ш$ регулируется ступенчато путем поочередного замыкания накоротко контактами *K1*, *K2* и *K3* последовательно включенных ступеней. Чем оно меньше, тем меньше ток возбуждения $I_в$ (в реостат ответвляется больший ток):

$$I_в = I - I_ш$$

Соответственно, ослабляется магнитный поток. До подключения реостата по последовательной обмотке возбуждения протекал ток якоря *I*. После подключения – $I_в$. Отношение $k_о = I_в / I$ называется коэффициентом ослабления поля.

5.9.5. Пуск. Изменение направления вращения

Существует три способа пуска двигателей постоянного тока: прямой пуск, пуск с помощью пускового реостата и пуск от источника регулируемого напряжения.

В момент подключения двигателя к сети в неподвижном якоре противо-ЭДС не индуктируется, так что ток в цепи якоря ограничивается лишь ее электрическим сопротивлением. Поэтому при прямом пуске кратность тока – большая, что способно нарушить работу щеточно-коллекторного узла и вызвать «круговой огонь» на коллекторе. Кроме этого возникает большой пусковой момент, оказывающий на вращающиеся части электропривода ударное воздействие, способное вызвать их механическое разрушение. Прямой пуск от сети применяется иногда для двигателей мощностью до 1 кВт, пусковой ток которых не превышает (5–10)$I_н$.

В машинах средней и большой мощности сопротивление цепи якоря – небольшое. Ток при пуске может в десятки раз превышать номиналь-

ное значение, что недопустимо по условиям коммутации и может вызвать «круговой огонь» на коллекторе. Для снижения пускового тока подключение двигателей средней и большой мощности к сети осуществляется через пусковой реостат (рис. 5.37).

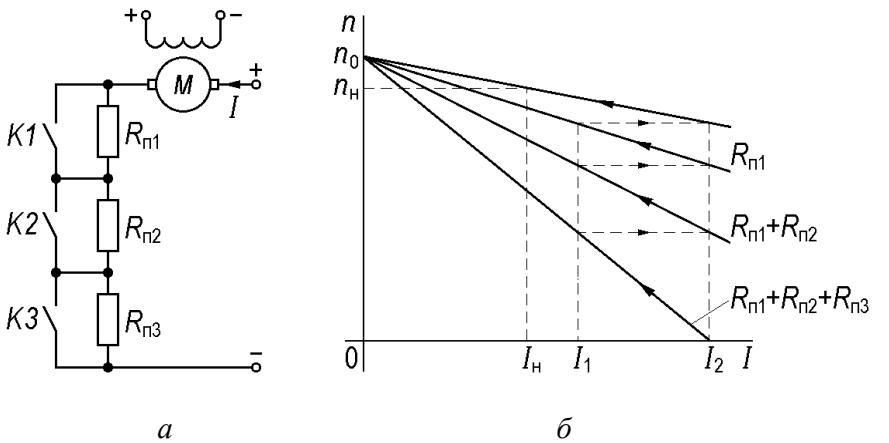


Рис. 5.37. Схема (*а*) и диаграмма (*б*) пуска ДПТ
с помощью трехступенчатого реостата

Замыкание резисторов реостата $R_{п1}$, $R_{п2}$ и $R_{п3}$ осуществляется контактами силовых контакторов *К1*, *К2* и *К3*. Механические характеристики соответствуют различным сопротивлениям ступеней пускового реостата: $R_{п1}$, $R_{п1} + R_{п2}$ и $R_{п1} + R_{п2} + R_{п3}$. Значения начального пускового тока I_1 и тока переключения ступеней реостата I_2 обычно находятся в пределах: $I_1 = (1{,}0–1{,}3)I_{a\ ном}$, $I_2 = (1{,}5–2{,}5)I_{a\ ном}$. Ток переключений I_2 выбирается таким образом, чтобы величина вращающего момента превышала момент сопротивления нагрузки на валу двигателя.

В современных приводах питание осуществляется от регулируемого источника питания. В этом случае при пуске напряжение плавно повышают от нуля до требуемого значения.

Изменение направления вращения (реверс) двигателей параллельного и независимого возбуждения выполняют путем изменения полярности подводимого напряжения на якоре (рис. 5.38), цепь которого обладает меньшей, чем обмотка возбуждения, индуктивностью.

При включенных ключах *К*1 и отключенных *К*2 к верхнему зажиму якоря подводится «+», к нижнему «–» источника питания. При включенных ключах *К*2 и отключенных *К*1 на зажимы подается напряжение обратной полярности. Подключение обмотки возбуждения при этом сохраняется прежним.

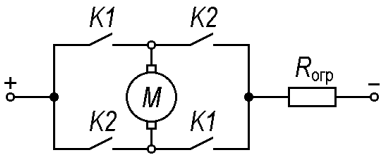


Рис. 5.38. Изменение направления вращения ДПТ

Для ограничения тока якоря последовательно включается ограничительный резистор $R_{огр}$.

В двигателях последовательного возбуждения осуществить реверс возможно также путем изменения полярности подключения обмотки возбуждения, так как ее индуктивность из-за относительно малого числа витков невелика.

5.9.6. Способы торможения

Как и в случае электрического торможения двигателей других типов для торможения двигателей постоянного тока необходимо искусственно создать такой режим их работы, при котором на вал будет действовать электромагнитный момент, противоположный направлению вращения. Рассмотрим возможные режимы на примере двигателя независимого возбуждения (рис. 5.39).

В двигателе постоянного тока независимого возбуждения тормозной момент может возникнуть в режимах рекуперативного, электродинамического торможения и противовключения.

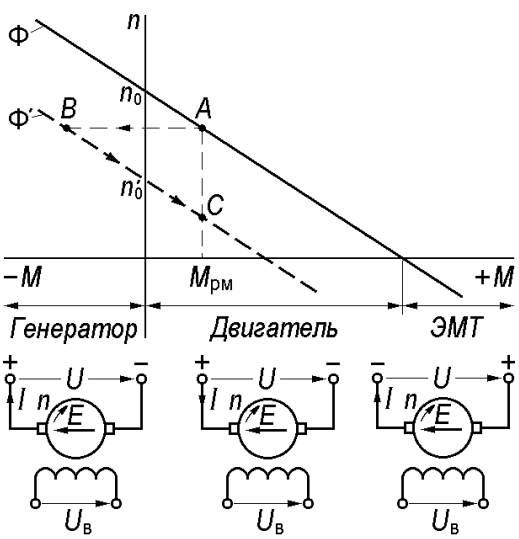


Рис. 5.39. Тормозные режимы ДПТ независимого возбуждения

Рекуперативное торможение реализуется путем перевода двигателя в генераторный режим работы на сеть постоянного тока. Оно возникает тогда, когда частота вращения двигателя больше частоты вразщения идеального холостого хода: $n > n_0$. При этом ЭДС E якоря превышает приложенное напряжение U и, как следует из уравнения (5.6), направление тока якоря изменяется на противоположное – возникает генераторный режим. Одновременно с током изменит направление электромагнитный момент ($M = -k\Phi I$), который будет тормозить якорь до момента достижения частоты вращения $n = n_0$. В этот отрезок времени происходит возврат (рекуперация) энергии в сеть.

Двигатель можно перевести в режим рекуперативного торможения искусственно. Предположим режиму работы соответствует точка A механической характеристики. Если резко увеличить ток возбуждения (и, соответственно, магнитный поток Ф), то изменившемуся режиму работы будет соответствовать точка B искусственной механической характеристики (показана пунктиром) с меньшей частотой вращения идеального холостого хода ($n_0' < n_0$). Торможение двигателя будет происходить до точки C, в которой вращающий момент сравняется с моментом рабочей машины.

В двигателе последовательного возбуждения отсутствует режим торможения с отдачей энергии в сеть, что следует из того, что механическая характеристика не пересекает ось абсцисс. На электроподвижном составе двигатели последовательного возбуждения для перевода в рекуперативный режим обмотку возбуждения подключают к отдельному источнику питания, т.е. переводят на независимое возбуждение.

Рекуперативное торможение целесообразно в приводах подъемных механизмов при спуске груза, в электротранспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. Это наиболее экономичный энергосберегающий вид торможения, так как потенциальная или кинетическая энергия движения груза или транспортного средства (трамвай, троллейбус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и за вычетом потерь возвращается обратно в сеть.

Торможение противовключением ДПТ реализуется путем изменения полярности напряжения на выводах обмотки якоря (подключение обмотки возбуждения должно оставаться прежним), которое производится переключением на реверс (см. рис. 5.38) в процессе работы. При этом ток якоря меняет направление и протекает под суммарным действием ЭДС и напряжения. Пренебрегая падением напряжения на щетках, он может быть рассчитан по формуле (5.6):

$$I_a = \frac{U + E}{r_a + R_{огр}}$$

Вследствие изменения направления тока электромагнитный момент якоря становится тормозным, и частота вращения уменьшается. Если в момент остановки якорь двигателя не отключить от источника питания, то произойдет реверсирование, начнется вращение в противоположную сторону в двигательном режиме. Поэтому метод торможения противовключением преимущественно используют в реверсивных схемах. Когда реверсирование не требуется, операцию торможения автоматизируют, чтобы двигатель отключался от сети при остановке.

Электродинамическое торможение создается переводом двигателя независимого возбуждения в генераторный режим путем подключения параллельно цепи якоря тормозного резистора с одной (рис. 5.40, *а*) или несколькими ступенями сопротивления. При этом обмотка возбуждения остается подключенной к источнику питания, и по ней протекает ток, возбуждая магнитный поток Ф.

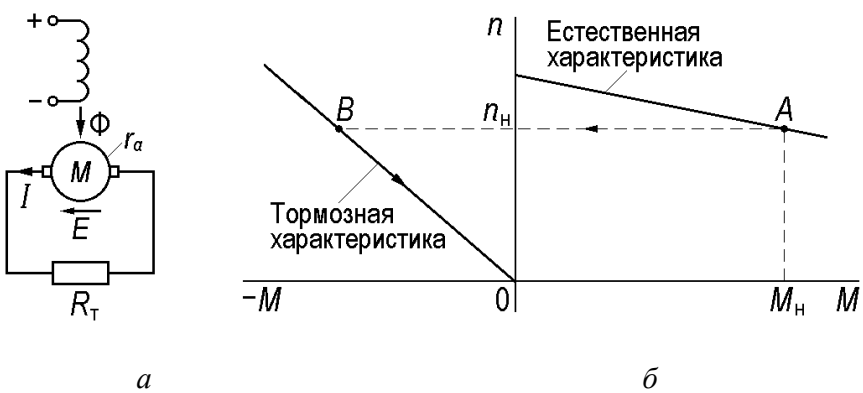


Рис. 5.40. Электродинамическое торможение ДПТ независимого возбуждения: *а* – схема; *б* – механические характеристики

После выполнения указанных коммутаций якорь продолжает вращение по инерции, и в его обмотке наводится ЭДС. Поскольку якорь замкнут на тормозной резистор $R_т$ (см. рис. 5.40, *а*), эта ЭДС аналогично режиму генератора вызывает в нем протекание тока I_a:

$$I_a = \frac{E}{r_a + R_т}.$$

При этом на ротор действует тормозной электромагнитный момент, для которого, с учетом (5.8) и (5.10), получим следующее выражение:

$$M = c\Phi I_a = c\Phi \frac{E}{r_a + R_т} = cc_E \frac{\Phi^2}{r_a + R_т} n .$$

Из полученного выражения следует, что при постоянном магнитном потоке Ф тормозной момент прямо пропорционален частоте вращения *n*, и тормозная характеристика имеет вид прямой, выходящей из начала координат (см. рис. 5.40, *б*). Ее наклон к оси абсцисс зависит от величины сопротивления цепи якоря: чем оно больше, тем сильнее наклон.

Предположим, что в номинальном режиме двигатель работает в точке *A* (рис. 5.40, *б*) естественной механической характеристики. При быстром переключении в режим торможения частота вращения не изменится, режим работы будет соответствовать точке *B* искусственной тормозной характеристики. В процессе уменьшения частоты вращения кинетическая энергия вращающихся масс преобразуется в теплоту, которая выделяется в тормозном резисторе $R_т$ и цепи якоря. Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря, причем ЭДС, ток якоря и тормозной момент по мере уменьшения частоты вращения *n* падают (см. рис. 5.40). Для поддержания тормозного момента на достаточном уровне тормозной резистор выполняют из нескольких ступеней сопротивления, которые по мере уменьшения частоты вращения якоря выводят. Таким образом поддерживается необходимый уровень тормозного момента, который согласно выражению (5.18) обратно пропорционален сопротивлению цепи якоря ($r_a + R_т$).

У двигателя последовательного возбуждения динамическое торможение может быть реализовано при самовозбуждении и независимом возбуждении. В первом случае необходимо выполнить условия самовозбуждения (см. п. 5.10.2). Для этого изменяют на противоположное включение обмотки возбуждения относительно якоря, чтобы ток возбуждения имел то же направление, что и в двигательном режиме, чем обеспечивается согласное направление остаточного магнитного потока и потока возбуждения. Этот способ применяется относительно редко. Во втором случае схема торможения, в целом, аналогична рис. 5.40, *а*, но поскольку последовательная обмотка возбуждения имеет небольшое сопротивление, ограничивают ток в ней.

5.10. Потери мощности и КПД

Как и в других типах электрических машин процесс преобразования энергии в машинах постоянного тока сопровождается ее потерями.

Они обусловлены электрическими потерями от протекания токов возбуждения ($\Delta P_в$) и нагрузки ($\Delta P_э$), магнитными потерями от перемагничивания и наведения вихревых токов в частях магнитопровода ($\Delta P_м$), механическими причинами ($\Delta P_{мех}$).

Ряд трудно учитываемых потерь $\Delta P_{доб}$ относят к добавочным: от неравномерного распределения тока по сечению якорной обмотки, вызванного вихревыми токами; в уравнительных соединениях; в сердечнике якоря от неравномерного распределения индукции при нагрузке; в наконечниках полюсов, вызванных пульсацией основного потока при вращении зубчатого якоря и др. В практических расчетах значение добавочных потерь в машинах без компенсационной обмотки принимают равным 1%: для генераторов – от полезной мощности P_2, для двигателей – от подводимой мощности P_1; при наличии компенсационной обмотки – 0,5%.

Перечисленные выше составляющие мощности применительно к двигателю независимого возбуждения отражены на энергетической диаграмме (рис. 5.24)

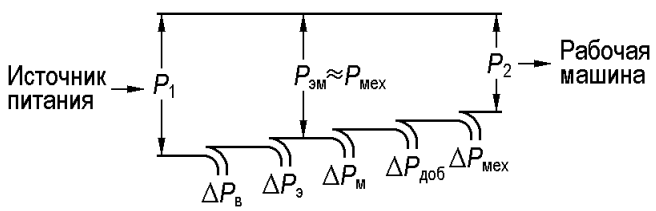


Рис. 5.24. Энергетическая диаграмма ДПТ независимого возбуждения

Коэффициент полезного действия электрической машины – это отношение полезной мощности P_2 к затраченной P_1. Он рассчитывается по общей формуле (1.23): $\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P)$. Мощность потерь ΔP обусловлена несколькими составляющими (см. рис. 5.24):

$$\Delta P = \Delta P_в + \Delta P_э + \Delta P_м + \Delta P_{доб} + \Delta P_{мех},$$

где $\Delta P_в$ – потери на возбуждение, $\Delta P_э$ – электрические потери в цепи якоря, $\Delta P_м$ – магнитные потери в сердечнике якоря, $\Delta P_{доб}$ – добавочные потери, к которым относят трудно поддающиеся расчету составляющие (потери в полюсных наконечниках и расположенных под ними зубцах сердечника якоря, вызванные пульсациями магнитного потока; потери в обмотке якоря от неравномерного распределения тока по сечению проводников; потери в уравнительных соединениях и др.), $\Delta P_{мех}$ – механи-

ческие потери (трение в подшипниках и щеточно-коллекторном узле, вентиляция и др.).

В современных машинах постоянного тока средней и большой мощности КПД составляет 83–96% (возрастает с увеличением мощности).

5.11. Коммутация

Как указывалось выше, щеточно-коллекторный узел разбивает обмотку якоря на параллельные ветви. При этом секции, которые присоединены к находящимся под щетками коллекторным пластинам, замыкаются через сопротивление щеточного контакта (см. ниже рис. 5.42, *а*). Число таких секций определяется числом коллекторных пластин, перекрываемых щетками, т.е. зависит от ширины щеток. Эти замкнутые щетками секции располагаются по схеме обмотки между смежными параллельными ветвями. Вращение якоря приводит к непрерывному переключению (коммутации) секций обмотки якоря из одних параллельных ветвей в другие (смежные). При этом все секции обмотки поочередно замыкаются щетками в течение весьма короткого промежутка времени, называемого периодом коммутации T.

Через замкнутые (коммутируемые) секции смежные параллельные ветви соединяются со щетками. Относительно щеток направление токов в парах смежных параллельных ветвей – одинаковое (токи смежных ветвей или подходят к щетке или отходят от нее), а по окружности якоря – противоположное. Поэтому в период коммутации происходит изменение направления и силы тока в коммутируемых секциях от $+ i_a$ до $- i_a$ (i_a – ток параллельной ветви).

Процесс коммутации вызывает на сбегающем крае скользящего контакта «щетка – коллектор» искрение, которое при определенной интенсивности вредно воздействует на контактную поверхность, приводя к преждевременному износу коллектора и щеток, что сокращает срок службы машины.

Качество коммутации характеризуется степенью искрения под сбегающим краем щетки, и согласно ГОСТу оценивается по шкале согласно табл. 5.2.

Допустимая степень искрения указывается в стандартах или технических условиях на конкретные виды машин. Если степень искрения не оговорена, то при номинальном режиме работы она должна быть не выше 1½.

Проблема коммутации является одной из основных в теории и практике машин постоянного тока. Ее решение связано с учетом большого числа взаимосвязанных факторов: физических, конструктивных, технологических, эксплуатационных и др.

Таблица 5.2

Степень искрения (классы коммутации)	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация).	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1¼	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
1½	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

5.11.1. Свойства щеточного контакта

Скользящий контакт «щетка – коллектор» обеспечивает электрическую связь обмотки якоря с внешней цепью и непосредственно влияет на процесс коммутации. О состоянии скользящего контакта можно судить по внешнему виду патины (политуры) коллектора. Патиной называется блестящая тонкая пленка из оксидов меди на поверхности коллектора, верхний слой которой содержит также большое количество частиц щеточного материала, в значительной мере влияющих на окраску. Вместе они образуют устойчивое покрытие, защищающее коллектор. При нормальном установившемся режиме работы контакта патина имеет характерную окраску различных оттенков (серо-коричневую, фиолетово-стальную и т.п.). Наличие патины на коллекторе является признаком хорошей коммутации. Интенсивное искрение разрушает па-

тину и контактную поверхность щеток, условия коммутации ухудшаются, срок службы машины сокращается.

Основными показателями, определяющими режим работы элементов скользящего контакта, являются окружная скорость $v_к$ на поверхности коллектора, плотность тока в скользящем контакте J и удельное нажатие H на щетки. Значения этих параметров для конкретной машины определяются в процессе ее расчета и увязываются с соответствующими параметрами щеток.

Как установлено исследованиями, проводимость между щетками и коллекторными пластинами обеспечивает совокупность факторов, различных по физической природе:

– механический контакт в многочисленных точках, хаотически меняющихся при вращении коллектора;

– электрохимические явления, обусловливающие проводимость для ионов;

– хаотически возникающие точечные электрические пробои пленки, формирующейся на поверхности коллектора и т.п.

Обусловленные перечисленными факторами зоны проводимости невелики по размерам, в процессе вращения коллектора перемежаются друг с другом и перемещаются по контактной поверхности. При этом с достаточной точностью можно считать, что усредненное значение проводимости под щеткой имеет постоянное значение.

Важной характеристикой является зависимость контактного падения напряжения от плотности тока (рис. 5.41): $\Delta U = f(J)$.

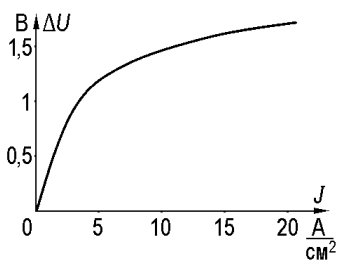


Рис. 5.41. Зависимость падения напряжения на щеточном контакте от плотности тока

Вид этой характеристики зависит от марки применяемых щеток, их полярности, температуры контактной поверхности, удельного давления, условий снятия и других факторов. Для электрографитированных, графитных и угольно-графитовых марок щеток зависимость $\Delta U = f(J)$ имеет нелинейный характер: в начале характеристики падение напряжения пропорционально плотности тока, а затем его рост замедляется (см. рис. 5.41). В рабочем диапазоне плотностей токов (10–15 А/см^2) оно изменяется достаточно медленно, и в практических расчетах часто принимают

$\Delta U \approx$ const. Для металлографитных щеток зависимость $\Delta U = f(J)$ близка к прямолинейной.

5.11.2. Причины искрения на коллекторе

Искрение на коллекторе имеет причины различной физической природы.

1. **Механические**: шероховатость поверхности коллектора, плохая притирка щеток к коллектору, выступание изоляционных прокладок между коллекторными пластинами, биение, эллиптичность формы коллектора, тугая или излишне свободная посадка щеток в щеткодержателях, недостаточное давление щеток на коллектор. Все это вызывает кратковременное нарушение электрического контакта между щетками и коллекторными пластинами, сопровождающееся возникновением дуги.

Механические причины устраняются при производстве и в процессе эксплуатации машины.

2. **Электромагнитные причины** связаны с изменением тока в коммутируемых секциях, что приводит к возникновению ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции. В соответствии с правилом Ленца явление самоиндукции замедляет изменение тока, который в момент схода щетки с коммутируемой секции не достигает значения тока параллельной ветви и происходит разрыв ступени тока, сопровождаемый искрением.

Механические и электромагнитные причины взаимно влияют друг на друга. Разрыв контакта вследствие механических причин влияет на ток в коммутируемых секциях и поэтому на электромагнитные причины. Искрение по электромагнитным причинам приводит к ухудшению состояния поверхности коллектора и увеличению негативного влияния на коммутацию механических причин.

3. **Причины потенциального характера** обусловлены чрезмерным повышением напряжения между коллекторными пластинами на свободной (не занятой щетками) поверхности коллектора, вызывающим пробой между ними через угольную пыль. Оно обычно возникает при тяжелых режимах работы с большими толчками тока якоря. Потенциальное искрение способно развиться в короткое замыкание между щетками противоположной полярности через электрическую дугу на поверхности коллектора в, так называемый, круговой огонь, который, как правило, приводит к повреждению коллектора и выходу машины из строя.

4. **Условия эксплуатации**: низкая влажность воздуха (влага является необходимым элементом химического процесса, обеспечивающего проводимость контакта), содержание агрессивных газов и масла в воздухе, частицы пыли, слишком низкая температура, малые нагрузки в течение длительного времени, вибрация машины.

В целом, коммутационная устойчивость МПТ и ее надежность характеризуются большим количеством взаимосвязанных факторов.

5.11.3. Классическая теория коммутации

Основные положения классической теории коммутации были разработаны Е. Арнольдом в первой трети XX в. Дальнейшее развитие теория коммутациии получила в трудах многих зарубежных и отечественных ученых (Р. Рихтер, К. И. Шенфер и др.).

Полный учет факторов, влияющих на коммутацию, приводит к громоздкой системе уравнений. Для упрощения анализа был сделан ряд допущений:

1) по параллельным ветвям обмотки протекают одинаковые токи;

2) удельное сопротивление скользящего контакта между щеткой и коллектором постоянно ($\rho = \text{const}$);

3) щетка контактирует с поверхностью коллектора всей своей плоскостью, удельная проводимость во всех точках контакта;

4) ширина щетки $b_щ$ равна одному коллекторному делению $b_к$ (при $b_щ = b_к$ щеткой накоротко замыкается только одна рассматриваемая секция);

5) толщина изоляционных промежутков между соседними коллекторными пластинами пренебрежимо мала;

6) оказывающие влияние на процесс коммутации причины механического и потенциального характера, активные сопротивления элементов коммутируемого контура (кроме сопротивления скользящего контакта), а также емкостные связи секций и элементов коллектора не учитываются.

Рассмотрим коммутирующую секцию петлевой обмотки (рис. 5.42, *а*) и ее схему замещения (рис. 5.42, *б*), на которой представлены физические величины и элементы схемы замещения с параметрами:

$v_к$ – линейная скорость рабочей поверхности коллектора;

i_a – ток параллельной ветви обмотки якоря;

$i_к$ – ток в коммутируемой секции;

$i_{щс}$ – ток в коллекторной пластине под сбегающим краем щетки;

$i_{щн}$ – ток в коллекторной пластине под набегающим краем щетки;

$r_{щс}$ – сопротивление контакта под сбегающим краем щетки;

$r_{щн}$ – сопротивление контакта под набегающим краем щетки;

$e_р$ – некоторая эквивалентная ЭДС, называемая реактивной, посредством которой суммарно учитываются явления само- и взаимоиндукции в коммутируемой секции:

$$e_р = e_s + \Sigma e_M,$$

где e_s – ЭДС самоиндукции коммутируемой секции, e_M – ЭДС взаимоиндукции, которая в общем случае может обусловлена магнитной связью с несколькими одновременно коммутирующими секциями;

$e_к$ – коммутирующая ЭДС (или ЭДС вращения), индуктируемая вследствие движения коммутируемой секции в результирующем магнитном поле добавочных полюсов и поперечной реакции якоря.

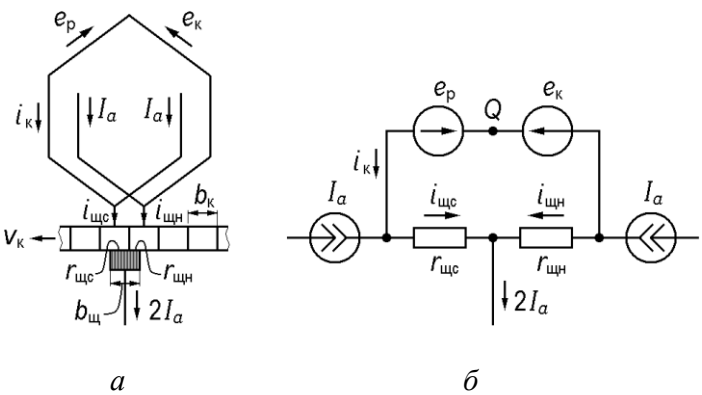


Рис. 5.42. Коммутирующая секция (*а*) и ее схема замещения (*б*)

Реактивная ЭДС $e_р$ изменяется во времени. С целью упрощения расчетов ее принимают как постоянную величину, среднюю за период коммутации.

Расчет по схеме замещения тока $i_к$ в коммутируемой секции можно провести любым известным из курса ТОЭ методом, в частности, методом эквивалентного генератора, согласно которому

$$i_к = U_{хх} / (r_{щн} + r_{щс}), \tag{5.19}$$

где $U_{хх} = i_a(r_{щн} - r_{щс}) + (e_р - e_к)$ – напряжение холостого хода между выводами, образованными в произвольной точке Q в результате разрыва цепи рассматриваемой секции; $r_{щн} + r_{щс}$ – эквивалентное сопротивление остальной цепи относительно этих выводов.

Заметим что ток $i_к$ замыкается через щетку в поперечном направлении, что учитывается в некоторых типах конструкции щеток.

Проведя деление в соответствии с выражением (5.19), получим:

$$i_к = i_a \frac{r_{щн} - r_{щс}}{r_{щн} + r_{щс}} + \frac{e_р - e_к}{r_{щн} + r_{щс}}. \tag{5.20}$$

Вследствие вращения якоря сопротивления контактов $r_н$ и $r_с$ являются функциями времени. При принятых выше допущениях эти сопротивления обратно пропорциональны площадям контактов, зависящим от времени t начала коммутации:

$$r_{щн}(t) = R_{кщ}[T / (T - t)], \quad r_{щс}(t) = R_{кщ}(T / t),$$

где $R_{кщ}$ – сопротивление контакта между коллекторной пластиной и щеткой при полном перекрытии, T – период коммутации:

$$T = b_щ / v_к. \tag{5.21}$$

После подстановки сопротивлений $r_{щн}(t)$ и $r_{щс}(t)$ в выражение (5.20) и некоторых преобразований можно получить следующее уравнение для тока в коммутируемой секции:

$$i_к = i_a(1 - 2\frac{t}{T}) + \frac{e_р - e_к}{r_{щн} + r_{щс}} \tag{5.22}$$

или

$$i_к = i_{прям} + i_{доб}.$$

На основании уравнения (5.22) можно построить графики изменения тока в коммутируемой секции при различных условиях (рис. 5.43).

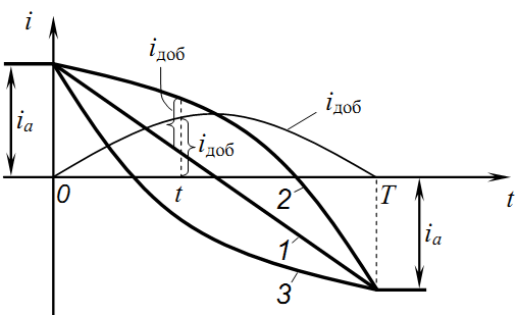


Рис. 5.43. Ток в коммутируемой секции: *1* – прямолинейная коммутация; *2* – замедленная коммутация; *3* – ускоренная коммутация

Если суммарная ЭДС в коммутируемой секции равна нулю ($e_р - e_к = 0$), то в соответствии с (5.22) ток будет изменяться по линейному закону (прямая *1*) согласно уравнению:

$$i = i_a (1 - 2\frac{t}{T}).$$

По характеру изменения тока такая коммутация названа «прямолинейной». В этом случае плотность тока под всеми точками щетки одинакова ($j_щ = \text{const}$), что с позиции классической теории считается благоприятным.

Если $e_р > e_к$, то изменение тока в коммутируемой секции имеет замедленный характер (кривая *2*). В этом случае возможно ввиду причин механического (см. п. 5.11.2) и технологического (допуски при изготовлении коллектора, установке щеткодержателей, добавочных полюсов и т.д.) характера, что после окончания коммутации ток в секции не достигает значения тока параллельной ветви, и в момент схода щетки с коллекторной пластины происходит разрыв остаточного тока, сопровождаемый искрением. Поэтому замедленная коммутация является неблагоприятной.

Последующие исследования показали, что на процесс коммутации оказывают влияние многие другие факторы: сопротивление коммутируемой секции и коллекторной пластины, ширина щетки, конструкция обмотки якоря и особенности ее укладки по пазам сердечника, механические факторы и др. При этом было установлено, что наиболее оптимальной является слегка ускоренная коммутация (кривая *3*), имеющая место при $e_р < e_к$ (при небольшой разнице), при которой остаточный ток в момент окончания коммутации практически отсутствует.

5.11.4. Устранение электромагнитных и потенциальных причин искрения

1. Компенсация реактивной ЭДС. На основании существующих формул расчета можно заключить, что среднее за период коммутации значение реактивной ЭДС и коммутационная ЭДС $e_к$ пропорциональны току якоря I_a. Это дает возможность осуществить автоматическую компенсацию реактивной ЭДС с помощью добавочных полюсов, обмотку которых включают последовательно в цепь якоря (см. рис. 5.6, *б*).

Добавочные полюсы создают в зоне коммутации вспомогательное магнитное поле, направленное встречно полю реакции якоря. Результирующее поле наводит в коммутируемой секции коммутационную ЭДС $e_к$. Настройкой добавочных полюсов добиваются того, чтобы коммутационная ЭДС была чуть больше или равной реактивной ЭДС ($e_к \geq e_р$). При этом коммутация приобретает несколько ускоренный характер, что снижает влияние на коммутацию преждевременной потери контакта со сбегающим краем щетки.

Добавочные полюсы обеспечивают удовлетворительную коммутацию только в пределах номинальной нагрузки при ненасыщенной магнитной цепи. Поскольку по обмотке добавочных полюсов протекает ток якоря при перегрузке происходит насыщение магнитной цепи, магнитное поле добавочных полюсов уменьшается, из-за чего коммутация становится замедленной. На насыщение магнитной цепи также оказывают влияние магнитные потоки рассеяния.

2. Уменьшение реактивной ЭДС $e_р$. Величина средней реактивной ЭДС является одним из основных критериев оценки коммутационной напряженности МПТ. Чем она больше, тем напряженнее машина в коммутационном отношении. Для ее снижения применяют меры конструктивного характера.

Ограничение числа витков секции. Поскольку реактивная ЭДС коммутируемой секции пропорциональна квадрату числа ее витков в машинах средней и большой мощности стремятся, по возможности, их уменьшить. В МПТ мощностью выше 50 кВт секции выполняют одновитковыми.

Выполнение пазов сердечника якоря относительно неглубокими и широкими. Такие реальные пазы обычно содержат несколько элементарных пазов. Подобное конструктивное выполнение увеличивает немагнитные промежутки для потока пазового рассеяния и уменьшает самоиндуктивность секций.

Увеличение воздушного зазора под добавочными полюсами. Для коммутируемых секций через наконечники добавочных полюсов создается дополнительный путь замыкания магнитного потока рассеяния. С целью уменьшения обусловленной этим потоком самоиндуктивности воздушный зазор под добавочными полюсами выполняют большим, чем под главными. Увеличение зазора дает также и негативный эффект: для создания требуемого магнитного потока необходимо увеличение МДС обмотки добавочных полюсов.

Увеличением щеточного перекрытия. Обычно ширину щетки выбирают так, чтобы она перекрывала более одного коллекторного деления: $b_щ / b_к = 1{,}5–3{,}0$. Это увеличивает период коммутации (см. формулу (5.21)) и число коммутируемых секций. Увеличение периода коммутации уменьшает скорость изменения тока в коммутируемых секциях и, как следствие, приводит к снижению реактивной ЭДС.

Возникновение нескольких одновременно коммутируемых секций вызывает взаимную индукцию. При одинаковом законе изменения тока в этих секциях ЭДС взаимной индукции в каждой из них суммируются. Однако существенного изменения реактивной ЭДС это не вызывает, так

как пропорционально за счет увеличения периода коммутации уменьшается скорость изменения тока и величины отдельных ЭДС.

Еще в начале 20-го столетия было обнаружено, что условия коммутации наиболее неблагоприятны для тех секций, которые последними в пазу оканчивают этот процесс. Это связано с тем, что при сходе щетки с коллекторной пластины происходит разрыв остаточного тока и очень быстрое уменьшение сопутствующего магнитного поля, вызывающего искрение. При наличии замкнутых контуров, образованных другими рядом лежащими в пазу коммутируемыми секциями энергия поля остаточного тока рассеивается («демпфируется») в этих контурах в виде потерь, вызванных протеканием индуктированного тока.

Чтобы для последней в пазу коммутируемой секции всегда имелись демпфирующие контуры, якорные обмотки выполняют с укороченным шагом, а при тяжелых условиях коммутации (толчкообразные нагрузки и т.д.) – со ступенчатым шагом.

Таким образом, увеличение щеточного перекрытия приводит к улучшению коммутации.

Благоприятное влияние на коммутацию оказывают также вихревые токи, наводимые потоками рассеяния в проводниках обмотки якоря, приводящие к снижению реактивной ЭДС.

3. Увеличение сопротивления коммутируемого контура $R_к$. В него входит сопротивление $r_с$ коммутируемой секции, нелинейные контактные сопротивления под набегающим $r_{щн}$ и сбегающим $r_{щс}$ краем щетки и поперечное сопротивление щетки $r_{щп}$:

$$R_к = r_с + r_{щн} + r_{щс} + r_{щп}.$$

При учете всех сопротивлений коммутирующего контура добавочный ток в соответствии с законом Ома может быть рассчитан по формуле:

$$i_{доб} = (e_р - e_к) / R_к.$$

При увеличении сопротивления $R_к$ добавочный ток $i_{доб}$ в коммутирующем контуре уменьшается, что благоприятно сказывается на коммутации.

Контактные сопротивления $r_{щн}$ и $r_{щс}$ пропорциональны падению напряжения на контакте. Поэтому щетки с повышенным значением этого напряжения улучшают коммутацию.

Через щетку в продольном направлении (к токоведущему проводу) проходит ток нагрузки; поперек щетки замыкается ток коммутируемых секций. Для снижения потерь энергии в щетках желательно уменьшение сопротивления в продольном направлении, а для улучшения коммутации – увеличение в поперечном направлении.

Поперечное сопротивление щетки $r_{щп}$ зависит от удельного сопротивления материала щеток и длины поперечного пути протекания добавочного тока. Более высокое удельное сопротивление имеют углеродно-графитовые материалы. Поэтому в машинах с напряженной коммутацией применяют щетки из этих материалов (марки УГ, ЭГ). Для увеличения поперечного пути протекания для $i_{доб}$ применяют разрезные и спаренные щетки, заставляя $i_{доб}$ дополнительно обтекать в продольном направлении обе половины щетки. Этот эффект значительно усиливается в слоистых щетках, состоящих из склеенных между собой тонких слоев из проводящего материала. Слои должны располагаться вдоль коллектора, препятствуя протеканию поперечного тока коммутирующей секции. Разрезные и слоистые щетки применяют в машинах с тяжелыми условиями коммутации, в частности, в тяговых двигателях.

4. Применение компенсационной обмотки. Как указывалось выше (см. п. 5.2), она компенсирует магнитное поле поперечной реакции якоря, что уменьшает искажение поля под главными полюсами. Это приводит к уменьшению максимального напряжения между коллекторными пластинами и устраняет обусловленное им искрение.

Компенсационную обмотку можно рассматривать как распределенную часть обмотки добавочных полюсов, которая создает в зоне коммутации соответствующую часть коммутирующего поля.

5.11.5. Выбор марки щеток

Правильный подбор щеток для конкретных машин и условий работы в значительной степени влияет на коммутацию. При выборе учитываются их физические свойства (электрическое сопротивление, падение напряжения в щеточном контакте, коэффициент трения, твердость, интенсивность износа) и конструкция.

Общие рекомендации по выбору.

Углеграфитные щетки используются в машинах с облегченными условиями коммутации (малая частота вращения, низкая плотность тока, низкое и среднее напряжение).

Графитный класс щеток предназначен для использования в машинах с облегченными условиями коммутации, требующих низкого трения, например, при высоких частотах вращения.

Электрографитированные щетки являются наиболее распространенным классом с широким спектром характеристик. Они используются в машинах со средними и затрудненными условиями коммутации (средняя и высокая частота вращения, средняя и высокая плотность тока, среднее и высокое напряжение).

Металлографитные (медно- бронзо- и серебрографитные) щетки применяются в низковольтных машинах с высокими плотностями тока.

Окончательное решение об использовании конкретной марки щеток принимается на основе анализа проведенных экспериментов с учетом режима работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Важнов А. И. Электрические машины [Текст] : учебник для энергетических и электротехнических вузов и факультетов / А. И. Важнов. – Л.: Энергия, 1969. – 768 с.

Вольдек А. И. Электрические машины [Текст]. А. И. Вольдек. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов [Текст]. В 2-х т. / А. В. Иванов-Смоленский. – 2-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

Том 1. Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах и их устройство. Основные вопросы теории и конструкции трансформаторов и асинхронных машин. – 650 с.

Том 2. Основные вопросы теории и конструкции синхронных машин, машин постоянного тока, вентильных и коллекторных машин переменного тока. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока (синхронных и асинхронных). – 520 с.

Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов [Текст]. И. П. Копылов – 6-е изд. – М.: Высшая школа, 2009. – 607 с.

Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины [Текст]. В 2-х частях.

Часть 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия. 1972. – 544 с.

Часть 2. Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия. 1973. – 648 с.

Петров Г. Н. Электрические машины [Текст]. В трех частях.

Часть 1. Введение. Трансформаторы. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

Часть 2. Асинхронные и синхронные машины. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1963. – 416 с.

Часть 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. – М.: Энергия, 1968. – 224 с.

Рихтер, Р. Электрические машины [Текст]. В 5 т. / Рудольф Рихтер Пер. с нем.

Том I. Расчетные элементы общего значения. Машины постоянного тока. – М.-Л.: ОНТИ. 1935. – 598 с.

Том II. Синхронные машины и одноякорные преобразователи. – М.-Л.: ОНТИ, 1936. – 688 с.

Том III. Трансформаторы. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 292 с.

Том IV. Индукционные машины. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939. – 472 с.

Том V. Коллекторные машины однофазного и многофазного переменного тока. Регулировочные агрегаты. – М.-Л.: ГЭИ, 1961. – 632 с.

Учебное издание

Сотников Владимир Васильевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 2. Синхронные машины. Машины постоянного тока

Учебное пособие

Редактор В. И. Пустовая

Подписано в печать 09.09.19. Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 11,0.
Тираж 135 экз. Заказ № Цена
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В. Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46