



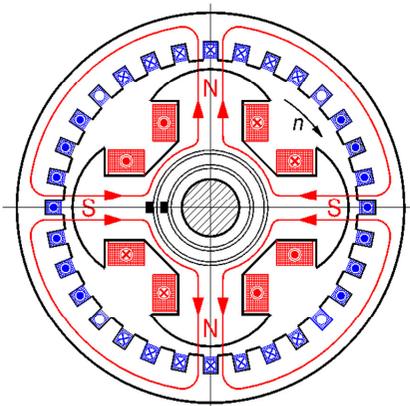
**Забудский
Евгений Иванович**

**профессор,
доктор технических наук**

Специализируется в области
электрических машин
и компьютерных технологий.

Результаты научной работы
и учебно-методической работы
представлены на личном

Web-сайте <http://zabudsky.ru>



Е. И. Забудский

Электрические машины

Часть 3

Е. И. Забудский

Электрические машины

Часть 3. Синхронные машины



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Москва
2019

Е. И. Забудский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть третья

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

2-е издание, переработанное и дополненное

В четырех частях

Учебное пособие для вузов

Рекомендовано

*Научно-методическим советом по технологиям,
средствам механизации и энергетическому оборудованию
в сельском хозяйстве Федерального УМО
по сельскому, лесному и рыбному хозяйству*

Москва
ООО “Мегаполис”
2019

УДК 621.314
ББК 31.261.8
3 12

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Электрические машины и электропривод” Кубанского государственного аграрного университета **С. В. Оськин**

доктор технических наук, профессор кафедры “Электрооборудование и электротехнические системы” Российского государственного аграрного заочного университета **Л. П. Шичков**

Забудский Е. И.

3 12 Электрические машины: учебное пособие для вузов / В 4 ч. Ч. 3.

Синхронные машины / Е. И. Забудский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО “Мегаполис”, 2019. – 295 с.

На обложке: макет гидроагрегата Братской ГЭС. Тип ГГ – СВ-1190/250-48

ISBN 978-5-6042398-1-0

Книга является третьей частью учебного пособия по курсу «Электрические машины». В соответствии с утвержденной программой, в ней рассматриваются принципы устройства и основные вопросы теории синхронных машин; режимы работы, характеристики и эксплуатационные свойства синхронных машин. Приведено описание экспериментальных работ.

Предназначено для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей вузов. Будет полезной для аспирантов соответствующих специальностей.

Рекомендовано Научно-методическим советом по технологиям, средствам механизации и энергетическому оборудованию в сельском хозяйстве Федерального УМО по сельскому, лесному и рыбному хозяйству: “Учебное пособие содержит сведения, необходимые для формирования профессиональных компетенций при подготовке бакалавров по направлению “Агроинженерия” и рекомендуется для использования в учебном процессе”.

УДК 621.314
ББК 31.261.8

ISBN 978-5-6042398-1-0

© Забудский Е. И., 2019
© ООО “Мегаполис”, 2019

Оглавление

Введение.....	7
1. Термины и определения	13
1.1. Машины переменного тока	13
1.2. Основные детали и сборочные единицы вращающихся электрических машин	13
1.3. Вращающиеся электрические машины, различающиеся областью применения, назначения или конструкцией	14
1.4. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по характеру магнитного поля в основном воздушном зазоре	15
1.5. Режимы работы и процессы, связанные с изменением состояния машин	15
1.6. Характеристики вращающихся электрических машин	17
1.7. Расчетные параметры вращающихся электрических машин.....	18
1.8. Электромашинные преобразователи	20
1.9. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по функциональному назначению	20
1.10. Информационные электрические машины	21
2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах	22
3. Обозначение выводов обмоток электрических машин, разработанных после 1.01.1987 г.	23
3.1. Обозначения выводов	23
3.1.1. Обмотки электрических машин постоянного тока	23
3.1.2. Обмотки трехфазных машин переменного тока	24
3.2. Определение направления вращения	25
3.3. Связь между обозначением выводов и направлением вращения ..	25
4. Устройство и принцип действия синхронных машин *.....	26
4.1. Устройство и принцип действия синхронного генератора	26
4.2. Явнополюсные синхронные машины	28
4.3. Неявнополюсные синхронные машины	44
5. Системы возбуждения синхронных машин	54
5.1. Проблема регулирования возбуждения синхронных машин и требования к системам возбуждения	54

5.2. Проблема автоматического регулирования возбуждения	55
5.3. Верхний предел (потолок) напряжения возбуждения	56
5.4. Скорость нарастания напряжения возбуждения	56
5.5. Гашение магнитного поля и переходные процессы в цепях индуктора	57
5.6. Схемы возбуждения синхронных генераторов	58
6. Номинальные величины и устройство исследуемой синхронной машины	60
6.1. Номинальные величины синхронной машины	60
6.2. Номинальные величины электромашинного возбудителя синхронной машины	61
6.3. Номинальные величины машины постоянного тока	61
7. Система относительных единиц	62
8. Работа № 1. Испытание трехфазного синхронного генератора, работающего на автономную сеть. Оглавление	63
9. Работа № 2. Опытное определение параметров синхронного генератора. Оглавление	114
10. Работа № 3. Параллельная работа синхронного генератора с сетью бесконечно большой мощности (б. б. м.). Оглавление	154
11. Работа № 4. Испытание трехфазного синхронного двигателя. Оглавление	202
Литература	276
Приложение 1.	
П1.1 Pascal-программа “Расчет экспериментальных значений величин в системе относительных единиц”	278
П1.2. Доклад на конференции International Conference "Modern (e-) Learning” (MeL 2011) // June 20 - July 03, 2011, / ITHEA, Sofia: Забудский Е.И. Учебно-методический комплекс дисциплины «Электрические машины» /Интернет-реализация/	282
* NB Теория синхронной машины изложена в разделе 3 Работ №№ 1, 2, 3 и 4, а также в Приложениях к ним. См. Оглавление этих Работ , соответственно, на с. 63, 114, 154 и 202	

Перечень рисунков в Введении, в 4- и 5-м разделах и в Приложении 1

Рис. В1. Общий вид базиса стенда “Синхронная машина”	11
Рис. В2. Стенд “Синхронная машина” с исследуемым агрегатом	12
Рис. В3. Передняя (приборная) панель стенда “Синхронная машина”	12
Рис. 4.1. Электромагнитная схема синхронной машины (а) и схема включения (б)	27
Рис. 4.2. Ротор синхронной машины: явнополюсной (а) и неявнополюсной (б)	29
Рис. 4.3, лист 1. Размещение обмоток синхронной машины	30
Рис. 4.3, лист 2. Размещение демпферной обмотки на полюсах явнополюсного ротора ...	31
Рис. 4.3, лист 3. Общий вид явнополюсного синхронного генератора ($2p = 4$)	32
Рис. 4.4. Статор синхронной машины средней мощности (на рис. 4.4...4.34 представлены фотографии)	33
Рис. 4.5, лист 1. Явнополюсный ротор синхронной машины средней мощности, $2p = 20$.	34
Рис. 4.5, лист 2. Явнополюсный ротор синхронной машины средней мощности: $a - 2p = 12$; $b - 2p = 4$	35
Рис. 4.6. Полюсы мощного синхронного гидрогенератора	36
Рис. 4.7. Гидрогенератор типа СВ 1690/175 - 64 (установлен на Красноярской ГЭС)	37
Рис. 4.8. Турбина Красноярской ГЭС	37
Рис. 4.9. Монтаж турбин Красноярской ГЭС	38
Рис. 4.10. Машинный зал Красноярской ГЭС; мощность ГЭС – 6000 МВт	38
Рис. 4.11. Красноярская ГЭС, вид на плотину	39
Рис. 4.12. Макет гидроагрегата, установленного на Саяно-Шушенской ГЭС	39
Рис. 4.13. Саяно-Шушенская ГЭС (СШ ГЭС); мощность ГЭС – 6400 МВт, 10 агрегатов (повреждена во время аварии 17 августа 2009 г.)	40
Рис. 4.14. Машинный зал СШ ГЭС 31 августа 2010 г.	40
Рис. 4.15. Машинный зал СШ ГЭС. Вид после аварии 17 августа 2009 г.	41
Рис. 4.16. Установка ротора ($2p = 42$) в кратер 4-го гидроагрегата СШ ГЭС	41
Рис. 4.17. Монтаж 4-го гидроагрегата на СШ ГЭС 12 мая 2010 г.	42
Рис. 4.18. Вид на плотину СШ ГЭС с левого берега Енисея	42
Рис. 4.19. Поселок Черёмушки и плотина СШ ГЭС, река Енисей	43
Рис. 4.20. Турбогенератор типа ТВФ-100-2; мощность – 100 МВт	46
Рис. 4.21. Статор турбогенератора, подготовленный для укладки обмотки	46
Рис. 4.22. Обмотанный статор турбогенератора типа ТВВ-300-2; мощность ТГ – 300 МВт	47
Рис. 4.23. Обмотанный статор турбогенератора. Мощность ТГ – 1640 МВ•А	47
Рис. 4.24. Участок механической обработки роторов турбогенераторов	48
Рис. 4.25. Фрезеровка пазов ротора турбогенератора типа ТГВ-300-2	48

Рис. 4.26. Процесс укладки обмотки возбуждения в пазы ротора ТГ	49
Рис. 4.27. Ротор ТГ с частично уложенной в пазы обмоткой возбуждения; проводники ОВ с боковыми вырезами для образования вентиляционных каналов ...	49
Рис. 4.28. Ротор турбогенератора с осевым вентилятором в сборе	50
Рис. 4.29. Элемент ротора с контактными кольцами турбогенератора мощностью более 300 МВт	50
Рис. 4.30. Токоподводящий щеточный аппарат	51
Рис. 4.31. Ввод ротора в расточку статора турбогенератора; мощность ТГ– 1333 МВ·А ..	51
Рис. 4.32. Турбогенератор типа ТГВ-500-2 на испытательном стенде	52
Рис. 4.33. Турбогенератор типа ТГВ-200 на специальной железнодорожной платформе ...	52
Рис. 4.34. Монтаж паровой турбины мощностью 500 МВт	53
Рис. 5.1. Схемы возбуждения синхронных машин	54
Рис. П1. Характеристика холостого хода синхронного генератора: <i>a</i> – в системе о. е.; <i>b</i> – в системе SI	281

Перечень таблиц в 3-, 4-, 6- и 7-м разделах

Табл. 3.1. Обозначение выводов обмоток машин <i>постоянного</i> тока	23
Табл. 3.2. Обозначение выводов обмотки статора	24
Табл. 3.3. Обозначение выводов обмоток ротора	24
Табл. 4.1. Основные данные трехфазных гидрогенератора Саяно-Шушенской ГЭС и турбогенератора Костромской ГРЭС	44
Табл. 6.1. Номинальные величины синхронной машины (исследуется в качестве генератора или двигателя)	60
Табл. 6.2. Номинальные величины электромашинного возбуждителя синхронной машины	61
Табл. 6.3. Номинальные величины машины постоянного тока (используется в качестве приводного двигателя или нагрузочного генератора в процессе исследования синхронной машины)	61
Табл. 7.1. Базисные величины в теории синхронных машин	62

Введение

В синхронных машинах угловая скорость вращения ротора, $\Omega = 2\pi n$, равна *синхронной угловой скорости поля*, $\Omega_s = 2\pi n_1$ (термин 37, с.18). Поля статора и ротора в синхронных машинах (как и во всех электрических машинах) неподвижны относительно друг друга, а так как в обмотке возбуждения ротора протекает постоянный ток, то поля статора и ротора неподвижны и относительно ротора.

Синхронные машины (термин 1, с.13) работают в трех режимах: генераторном, двигательном и в режиме синхронного компенсатора.

Наиболее распространенным режимом работы синхронных машин является *генераторный режим*. Почти вся электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, они являются самыми мощными из электрических машин. На Костромской тепловой электростанции эксплуатируется синхронный генератор (*турбогенератор*) мощностью 1200 МВт, скорость его ротора $n = n_1 = 3000$ об/мин; на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции – *гидрогенератор* мощностью 640 МВт, $n = n_1 = 142,8$ об/мин. Эти генераторы изготовлены в 1978–79 гг. в ЛПЭО “Электросила” (г. Санкт-Петербург) /см. табл. 4.1, с. 44/.

Турбогенераторы мощностью 300, 500 и 800 МВт являются основными машинами, которые используются на тепловых и атомных электрических станциях. Турбогенераторы имеют непосредственное охлаждение проводников обмотки статора водой и обмотки ротора водородом.

Конструктивное оформление крупных синхронных генераторов зависит от скорости вращения приводного двигателя. На тепловых и атомных электростанциях в качестве приводных двигателей используются высокоскоростные паровые и газовые турбины, их скорость n равна 1500 или 3000 об/мин. На гидроэлектростанциях приводными двигателями служат тихоходные водяные турбины. Все синхронные генераторы (и высокоскоростные, и тихоходные) должны вырабатывать напряжение одной частоты $f = 50$ Гц ($f = p \cdot n$). Поэтому *высокоскоростные генераторы* на тепловых и атомных электростанциях имеют число пар полюсов p равное 1 или 2, они называются *турбогенераторами* (термин 9, с.14); *тихоходные генераторы* на гидроэлектростанциях имеют несколько десятков пар полюсов, они называются *гидрогенераторами* (термин 10, с.14).

Турбогенераторы – *неявно*полюсные (термин 15, с. 15) быстроходные электрические машины. Роторы изготавливаются из цельных поковок высококачественной хромоникелевой или хромоникельмолибденовой стали. Предельный диаметр ротора по условиям механической прочности из-за больших центробежных сил не может превышать 1,2...1,5 м, поэтому роторы мощных генераторов делают длинными. Но длина их ограничена в связи с прогибом и составляет около 7,5...8,5 м. Турбогенераторы выполняются с *горизонтальным* валом.

Гидрогенераторы – *явно*полюсные (термин 14, с. 15) тихоходные электрические машины. Диаметр статора мощного гидрогенератора достигает 15 м, а длина примерно 2...3 м. Гидрогенераторы, как правило, имеют *вертикальное* расположение вала. Гидрогенераторы по габаритам значительно больше турбогенераторов.

Номинальное напряжение обмотки якоря турбо- и гидрогенераторов не превышает 24 кВ. Номинальное напряжение обмотки возбуждения – 24...400 В.

Синхронные генераторы для дизель-генераторных установок имеют мощность от сотен до десятков тысяч киловатт.

В режиме двигателя синхронные машины используются в качестве приводных двигателей мощных насосов, вентиляторов, воздуходувок. Предельная мощность синхронных двигателей достигает нескольких сотен мегаватт. Синхронные двигатели мощностью в десятки киловатт выпускаются в небольших количествах *из-за плохих пусковых свойств и склонности к качаниям*.

Одно из основных достоинств синхронных машин состоит в том, что они могут быть источниками реактивной мощности. Если асинхронные машины (и трансформаторы) для создания поля потребляют из сети реактивную мощность, то синхронные машины в зависимости от степени возбуждения или генерируют в сеть, или потребляют из сети реактивную мощность.

Как правило, синхронные генераторы и двигатели эксплуатируются с номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,9$. При этом синхронная машина работает при *перевозбуждении*, и реактивная мощность поступает в сеть.

Синхронные машины, назначением которых является *только* генерация или потребление реактивной мощности, называются *синхронными компенсаторами*. Направление реактивной мощности (генерация или потребление) зависит от величины тока возбуждения. Синхронный компенсатор – это по существу синхронный двигатель работающий в режиме холостого хода, т. е. без механической нагрузки на валу. Поэтому синхронный компенсатор не имеет выступающих концов вала.

Синхронные машины благодаря их преимуществам перед асинхронными находят новые применения, и их выпуск и области применения расширяются.

В *первом – третьем разделах* учебного пособия приведены выдержки из стандартов, касающиеся терминологии, буквенных обозначений синхронных машин и их элементов в электрических схемах, обозначений выводов обмоток.

В *шестом разделе* приведены номинальные данные синхронных машин, исследуемых в лабораторном цикле.

В *седьмом разделе* рассмотрена система относительных единиц, широко используемая в теории электрических машин.

В *четвертом, пятом и восьмом – одиннадцатом разделах* приведены основы теории и устройства синхронных машин и описана последовательность выполнения экспериментальных исследований процессов и явлений, а также обработки результатов: при автономной работе генераторов (*разд. 8*); при исследовании параметров синхронных машин в установившихся, переходных и несимметричных режимах их работы (*разд. 9*); при параллельной работе генераторов в сети бесконечно большой мощности, причем уделено внимание изучению статической и динамической устойчивости (*разд. 10*); при различных способах пуска синхронного двигателя и генерации им реактивной мощности (*разд. 11*).

В *Приложении 1* приведены: *Pascal-программа* для пересчета экспериментальных данных с целью представления их в системе относительных единиц; *текст доклада* «Учебно-методический комплекс дисциплины «Электрические машины» /Интернет-реализация/», сделанный автором на конференции *International Conference "Modern (e-) Learning" (MeL 2011) /ITHEA, Sofia*.

В *списке литературы*, наряду с традиционными источниками, приведены URL-адреса ряда предприятий, производящих электрические машины. Использование интернет-технологий позволит студентам непосредственно ознакомиться с номенклатурой и описанием выпускаемой электротехнической продукции.

По сравнению с первым изданием (2008 г.) материал книги подвергся переработке. Включён новый раздел «Синхронные двигатели малой мощности» (с. 242...277). Существенно расширен материал, касающийся устройства турбогенераторов и гидрогенераторов (с. 33...52). Раздел «Экспериментальное исследование» в Работы №№1, 2, 3 и 4 переработан с целью лучшего понимания последовательности и существа выполняемых экспериментов и др.

Автором разработаны и изготовлены стенды для экспериментального исследования синхронных машин (рис. В1,..., В3). Реализован фронтальный метод проведения работ. Фотографии и описание стендов, разделы настоящего учебного пособия и мультимедиа-материалы, а также электронный учебно-методический комплекс дисциплины «Электрические машины» размещены на web-сайте автора <http://zabudsky.ru>.

Примечание.

1. Реально в синхронной машине существует результирующее магнитное поле, созданное совместным действием МДС обмоток. Величина поля устанавливается в соответствии с магнитным состоянием (насыщением) магнитопровода. Для удобства анализа в пособии рассматривается раздельное существование поля индуктора и поля якоря (такое представление возможно, если магнитная система не насыщена).

2. В магнитном поле синхронной машины наряду с основной (первой) гармонической составляющей, выполняющей наибольшую роль в процессе преобразования энергии, содержатся также высшие гармонические. Последние в пособии не рассматриваются.



Рис. В1. Общий вид базиса стенда “Синхронная машина”:
под столешницей, в верхнем левом углу, расположен пусковой реостат



Рис. В2. Стенд “Синхронная машина” с исследуемым агрегатом:
 слева от стенда расположены машина постоянного тока и синхронная машина;
 справа – индукционный регулятор

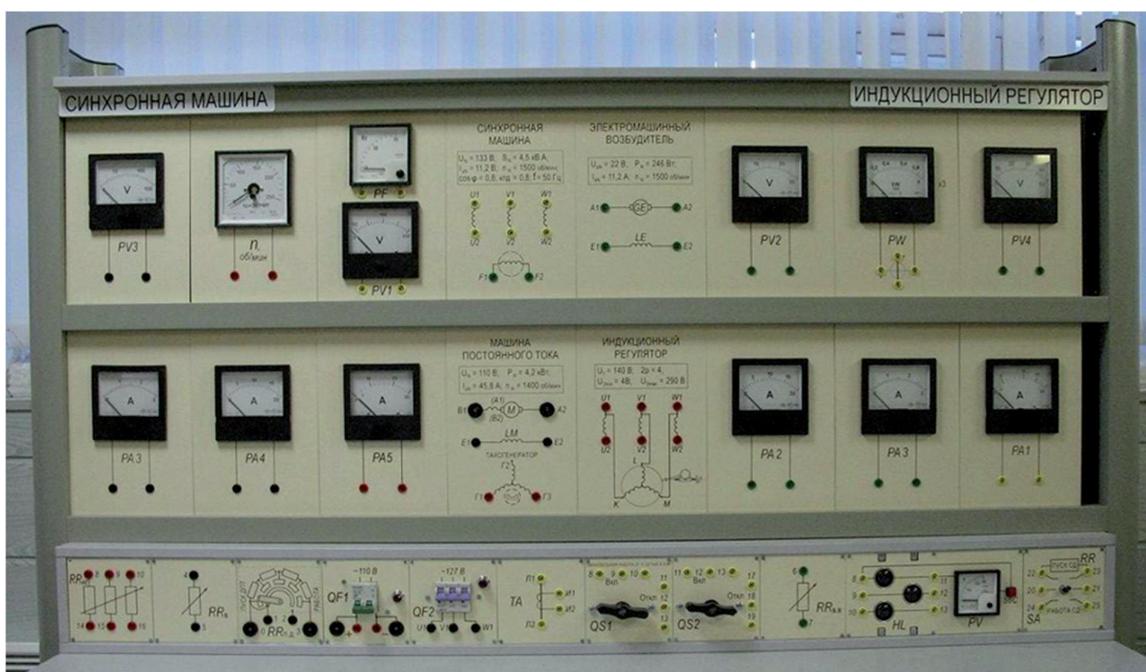


Рис. В3. Передняя (приборная) панель стенда “Синхронная машина”

1. Термины и определения

(выдержки из ГОСТ 27471–87 Машины электрические вращающиеся.
Термины и определения)

Термин	Определение
1.1. Машины переменного тока	
1. Синхронная машина (53)	Бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к обмотке якоря, <i>не</i> зависит от нагрузки в области допустимых нагрузок
2. Гистерезисный электродвигатель (57)	Неявнополюсный синхронный электродвигатель без обмотки возбуждения, ротор которого выполнен из магнитного материала с большим остаточным намагничиванием, пуск в ход которого осуществляется за счет потерь на гистерезис в роторе
3. Реактивный синхронный двигатель (58)	Синхронный двигатель, вращающий момент которого обусловлен неравенством магнитных проводимостей по <i>поперечной</i> (q) и <i>продольной</i> (d) осям ротора, не имеющего обмоток возбуждения или постоянных магнитов
1.2. Основные детали и сборочные единицы вращающихся электрических машин	
4. Якорь синхронной машины (371)	Часть синхронной машины, в которой индуцируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки
5. Индуктор синхронной машины (372)	Статор или ротор синхронной машины, на котором размещены постоянные магниты или обмотка возбуждения

Термин	Определение
6. Полюс вращающейся электрической машины (376)	Часть сердечника вращающейся электрической машины, на котором расположена обмотка возбуждения или выступающая в направлении воздушного зазора часть магнитопровода
7. Обмотка возбуждения вращающейся электрической машины (384)	Обмотка вращающейся электрической машины, предназначенная для создания магнитного поля возбуждения
8. Контактное кольцо вращающейся электрической машины (379)	Токопроводящее кольцо с расположенными на нем щетками, обеспечивающее протекание тока во вращающейся электрической машине из одной части цепи в другую при помощи скользящего контакта
1.3. Вращающиеся электрические машины, различающиеся областью применения, назначения или конструкцией	
9. Турбогенератор (121)	Синхронный генератор, приводимый во вращение от паровой или газовой турбины
10. Гидрогенератор (122)	Синхронный генератор, приводимый во вращение от гидравлической турбины
11. Электромашинный возбудитель (113)	Электромашинный генератор, предназначенный для питания обмотки возбуждения другой электрической машины
12. Электромашинный подвозбудитель (114)	Электромашинный генератор, предназначенный для питания обмотки возбуждения электромашинного возбудителя
13. Ударный генератор (111)	Синхронный генератор, предназначенный для выработки кратковременных импульсов тока в режиме короткого замыкания

Термин	Определение
1.4. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по характеру магнитного поля в основном воздушном зазоре	
14. Явнополюсная машина (11)	Разноименнополюсная машина, в которой полюса выступают в сторону основного воздушного зазора
15. Неявнополюсная машина (12)	Разноименнополюсная машина с равномерным основным воздушным зазором
1.5. Режимы работы и процессы, связанные с изменением состояния машин	
16. Возбуждение вращающейся электрической машины (317)	Создание магнитного потока во вращающейся электрической машине током в какой-либо из ее обмоток или постоянными магнитами
17. Реакция якоря вращающейся электрической машины (314)	Воздействие магнитодвижущей силы обмотки якоря на магнитное поле вращающейся электрической машины, создаваемое обмоткой возбуждения или постоянными магнитами
18. Продольная реакция якоря вращающейся электрической машины (315)	Реакция якоря вращающейся электрической машины, образуемая составляющей намагничивающей силы обмотки якоря, создающей магнитный поток, направленный по продольной оси полюсов
19. Поперечная реакция якоря вращающейся электрической машины (316)	Реакция вращающейся электрической машины, образуемая составляющей намагничивающей силы обмотки якоря, создающей магнитный поток, направленный по поперечной оси полюсов
20. Синхронизация синхронной машины (289)	Процесс, при котором синхронная машина приводится к синхронной и синфазной работе с другой, механически не связанной с ней, синхронной машиной или сетью

Термин	Определение
21. Точная синхронизация синхронной машины (290)	Синхронизация синхронной машины, при которой напряжение, частота и фаза регулируются так, чтобы они были как можно ближе к соответствующим значениям питающей сети или машины, с которой осуществляется синхронизация
22. Самосинхронизация синхронной машины (292)	Синхронизация, при которой синхронная машина, вращающаяся с частотой, близкой к синхронной, после включения ее в сеть и подачи постоянного тока в обмотку возбуждения сама входит в синхронизм
23. Грубая синхронизация синхронной машины (293)	Синхронизация синхронной машины путем включения ее в сеть без возбуждения при частоте вращения, близкой к синхронной, с последующим включением возбуждения
24. Синхронизм синхронной машины (296)	Устойчивая параллельная работа синхронной машины с питающей сетью или с другой синхронной машиной при синхронной частоте вращения
25. Вхождение в синхронизм синхронной машины (297)	Достижение включенной в питающую сеть синхронной машиной устойчивой синхронной частоты вращения
26. Выпадение из синхронизма синхронной машины (298)	Нарушение устойчивости параллельной работы синхронной машины с питающей сетью при синхронной частоте вращения, в результате которого она начинает вращаться с асинхронной частотой
27. Недовозбуждение синхронной машины (318)	Режим работы синхронной машины, при котором магнитный поток, создаваемый продольной составляющей магнитодвижущей силы обмотки якоря, совпадает по направлению с магнитным потоком обмотки возбуждения

Термин	Определение
28. Перевозбуждение синхронной машины (319)	Режим работы синхронной машины, при котором магнитный поток, создаваемый продольной составляющей магнитодвижущей силы обмотки якоря, направлен навстречу потоку обмотки возбуждения
29. Статическая устойчивость синхронной машины (304)	Способность синхронной машины сохранять устойчивую параллельную работу с питающей сетью с синхронной частотой вращения при <i>плавном нарушении</i> ее установившегося состояния
30. Динамическая устойчивость синхронной машины (305)	Способность синхронной машины сохранять устойчивую параллельную работу с питающей сетью с синхронной частотой вращения после колебаний этой частоты, вызванных <i>внезапным нарушением</i> установившегося состояния машины
1.6. Характеристики вращающихся электрических машин	
31. Магнитная характеристика вращающейся электрической машины (135)	Зависимость магнитного потока в воздушном зазоре вращающейся электрической машины от тока возбуждения
32. Характеристика холостого хода электромашиного генератора (136)	Зависимость электродвижущей силы обмотки якоря вращающегося электромашиного генератора от тока возбуждения при разомкнутой обмотке якоря и при заданной частоте вращения
33. Нормальная характеристика холостого хода электромашиного генератора (137)	Усредненная характеристика холостого хода электромашиного генератора, выраженная в относительных единицах

Термин	Определение
34. Угловая характеристика синхронной машины (144)	Зависимость активной мощности синхронной машины от угла сдвига $\theta_{вр}$ между напряжением на выводах обмотки якоря и ее электродвижущей силой по продольной оси при неизменных напряжении на выводах обмотки якоря, частоте тока в ней и токе возбуждения
35. V-образная характеристика синхронной машины (145)	Зависимость тока в обмотке якоря синхронной машины от тока возбуждения при неизменных значениях активной мощности и напряжении на выводах обмотки якоря
36. Рабочие характеристики вращающегося электродвигателя (149)	Зависимости: 1) подводимой мощности, 2) тока в обмотке якоря, 3) частоты вращения, 4) коэффициента полезного действия вращающегося электродвигателя от полезной мощности на валу при неизменных напряжении питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток
1.7. Расчетные параметры вращающихся электрических машин	
37. Синхронная частота вращения вращающейся машины переменного тока (189)	Частота вращения ротора вращающейся машины переменного тока, равная частоте вращения магнитного поля, <i>определяемой</i> частотой сети и числом ее полюсов
38. Асинхронная частота вращения вращающейся машины переменного тока (199)	Частота вращения ротора вращающейся машины переменного тока, отличающаяся от частоты вращения магнитного поля, участвующего в основном процессе преобразования энергии
39. Скольжение ротора машины переменного тока (202)	Разность между синхронной частотой вращения магнитного поля и частотой вращения ротора, выраженная в относительных единицах или в процентах от синхронной частоты вращения

Термин	Определение
40. Линейная нагрузка вращающейся электрической машины (164)	Отношение арифметической суммы действующих значений токов всех проводников обмотки якоря вращающейся электрической машины к длине окружности по поверхности якоря
41. Магнитная индукция в рабочем зазоре вращающейся электрической машины (165)	Амплитуда основной гармонической в кривой распределения магнитной индукции в рабочем зазоре в режиме холостого хода при номинальном напряжении вращающейся электрической машины
42. Коэффициент насыщения магнитной цепи вращающейся электрической машины (166)	Отношение суммы магнитных напряжений <i>всех</i> участков магнитной цепи вращающейся электрической машины к магнитному напряжению ее воздушного зазора
43. Отношение короткого замыкания (о. к. з.) синхронной машины (167)	Отношение тока возбуждения синхронной машины, соответствующего ее номинальному напряжению при холостом ходе, к току возбуждения при трехфазном коротком замыкании с номинальным током в обмотке якоря
44. Электрический угол вращающейся машины переменного тока (168)	Произведение значения <i>геометрического</i> угла, образованного двумя полуплоскостями, проходящими через ось вращения вращающейся машины переменного тока, на число пар полюсов
45. Угол нагрузки синхронной машины (169)	Угол $\theta_{пр}$ смещения оси полюсов индуктора синхронной машины из положения холостого хода в положение нагрузки при синхронной работе, измеряемый в электрических градусах

Термин	Определение
46. Максимальный момент синхронного вращающегося двигателя (183)	Наибольший вращающий момент, который может развивать синхронный вращающийся двигатель <i>без выпадения из синхронизма</i> , работая при номинальных значениях напряжения и частоты питающей сети
47. Максимальный момент асинхронного вращающегося двигателя (184)	Наибольший вращающий момент, который может развивать асинхронный вращающийся двигатель при работе с номинальными значениями напряжения и частоты питающей сети
48. Реактивный момент вращающейся электрической машины (186)	Вращающий момент, возникающий во вращающейся электрической машине с неравномерным воздушным зазором из-за стремления ротора занять положение, соответствующее наименьшему сопротивлению магнитного потока (<i>см. термин 3</i>)
1.8. Электромашинные преобразователи	
49. Индукционный регулятор (84)	Асинхронная машина с фазным ротором, предназначенная для плавного регулирования напряжения переменного тока за счет поворота ротора
1.9. Вращающиеся электрические машины, различающиеся по функциональному назначению	
50. Электромашинный компенсатор (5)	Синхронная машина, работающая без механической нагрузки, предназначенная для выдачи или потребления реактивной мощности
51. Информационная электрическая машина (8)	Вращающаяся электрическая машина, предназначенная для выработки электрических сигналов, характеризующих частоту вращения ротора или его угловое положение, или для преобразования электрического сигнала в соответствующее ему угловое положение ротора

Термин	Определение
1.10. Информационные электрические машины (см. п. 51)	
52. Тахогенератор (89)	Информационная электрическая машина, предназначенная для выработки электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения ротора
53. Синхронный тахогенератор (90)	Информационная электрическая машина, представляющая собой синхронный генератор с постоянными магнитами или независимого возбуждения, частота и амплитуда выходного напряжения которого пропорциональны частоте вращения ротора
54. Асинхронный тахогенератор (91)	Двухфазная асинхронная машина с полым ротором, возбуждаемая однофазным напряжением, амплитуда выходного напряжения которой пропорциональна частоте вращения ротора
55. Тахогенератор постоянного тока (92)	Маломощный генератор постоянного тока, выходное напряжение которого пропорционально частоте вращения ротора

Примечание. В скобках указаны номера согласно ГОСТ 27471–87

2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах

(выдержки из ГОСТ 2.710–81 Обозначения буквенные цифровые в электрических схемах)

Код элемента	Виды элементов
M	Двигатели
G	Генераторы
GC	Синхронный компенсатор
GE	Возбудитель генератора
LG	Обмотка возбуждения генератора
LM	Обмотка возбуждения электродвигателя
LE	Обмотка возбуждения возбудителя
LR	Реактор
RR	Реостат
PA	Амперметр
PV	Вольтметр
PW	Ваттметр
PF	Частотомер
PS	Регистрирующий прибор
TA	Трансформатор тока
QF	Выключатель автоматический в силовых цепях
QS	Разъединитель
SA	Переключатель
SBC	Выключатель кнопочный на включение
HL	Прибор световой сигнализации

3. Обозначение выводов обмоток электрических машин, разработанных после 1.01.1987 г.

(выдержки из ГОСТ 26772–85 Машины электрические вращающиеся.
Обозначение выводов и направления вращения)

3.1. Обозначения выводов

3.1.1. Обмотки электрических машин *постоянного* тока

Выводы обмоток электрических машин постоянного тока следует обозначать в соответствии с табл. 3.1.

Таблица 3.1. Обозначение выводов обмоток машин *постоянного* тока

Наименование обмотки	Обозначение вывода	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	A1	A2
Обмотка добавочного полюса	B1	B2
Двухсекционная обмотка добавочного полюса (присоединенная к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	1B1 2B1	1B2 2B2
Обмотка компенсационная	C1	C2
Обмотка компенсационная, двухсекционная (присоединенная к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	1C1 2C1	1C2 2C2
Обмотка последовательного возбуждения	D1	D2
Обмотка параллельного возбуждения	E1	E2
Обмотка независимого возбуждения	F1	F2

3.1.2. Обмотки трехфазных машин переменного тока

Выводы первичных обмоток трехфазных машин следует обозначать в соответствии с табл. 3.2.

Таблица 3.2. Обозначение выводов обмотки *статора*

Схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Открытая схема	6	Первая фаза	U1	U2
		Вторая фаза	V1	V2
		Третья фаза	W1	W2
Соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза	U	
		Вторая фаза	V	
		Третья фаза	W	
		Точка звезды	N	
Соединение в треугольник	3	Первый вывод	U	
		Второй вывод	V	
		Третий вывод	W	

Выводы вторичных обмоток трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором и обмоток возбуждения синхронных машин следует обозначать в соответствии с табл. 3.3.

Таблица 3.3. Обозначение выводов обмоток *ротора*

Наименование или схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Вторичная обмотка (открытая схема)	6	Первая фаза	K1	K2
		Вторая фаза	L1	L2
		Третья фаза	M1	M2

Продолжение табл. 3.3				
Наименование или схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение вывода	
			Начало	Конец
Соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза	K	
		Вторая фаза	L	
		Третья фаза	M	
		Точка звезды	Q	
Соединение в треугольник	3	Первый вывод	K	
		Второй вывод	L	
		Третий вывод	M	
Обмотка возбуждения синхронных машин	2	–	F1	F2

3.2. Определение направления вращения

Правым направлением следует считать вращение по направлению вращения часовой стрелки.

Если машина имеет только один конец вала (или два конца разных диаметров), то направление вращения рассматривают со стороны единственного конца вала (или со стороны конца вала наибольшего диаметра).

3.3. Связь между обозначением выводов и направлением вращения

Для бесколлекторных трехфазных машин переменного тока направление вращения будет правым, если алфавитная последовательность обозначения выводов группы фаз будет соответствовать временной последовательности напряжения на зажимах.

4. Устройство и принцип действия синхронных машин

4.1. Устройство и принцип действия синхронного генератора

Статор синхронной машины имеет такое же устройство, как и статор асинхронной машины (рис. 4.1,*a*). Трехфазная обмотка статора синхронной машины выполняется с таким же числом полюсов, как и ротор, и называется также обмоткой якоря. Сердечник статора вместе с обмоткой называется *якорем* (термин 4, с. 13). На рис. 4.1 сердечник якоря обозначен цифрой 1, а обмотка якоря – цифрой 2.

Ротор синхронной машины имеет обмотку возбуждения 3, питаемую через два контактных кольца 5 и щетки 6 постоянным током I_B от постороннего источника. В качестве источника чаще всего используется генератор постоянного тока [5] относительно небольшой мощности 0,3...3,0 % от мощности синхронной машины), который называется *возбудителем* (термины 11 и 12, с. 14) и устанавливается обычно на общем валу с синхронной машиной. Назначение обмотки возбуждения – создание в машине первичного магнитного поля. Ротор вместе со своей обмоткой возбуждения называется также *индуктором* 4 (термин 5, с. 13).

Если ротор синхронной машины (рис. 4.1,*a*) привести во вращение с некоторой скоростью n и возбудить его (термин 16, с. 15), то поток возбуждения Φ_B будет пересекать проводники обмотки якоря и в ее фазах будут индуцироваться ЭДС с частотой

$$f = p \cdot n. \quad (4.1)$$

Действующее значение этой ЭДС:

$$E_0 = 4,44fw\Phi_B k_0, \quad (4.2)$$

где w – число витков фазы; k_0 – обмоточный коэффициент обмотки статора.

ЭДС статора составляет симметричную трехфазную систему, и при подключении к обмотке статора симметричной нагрузки в ней будет протекать симметричная система токов. Машина работает в режиме синхронного генератора.

Обмотка статора с током создает такое же по своему характеру вращающееся магнитное поле, как и обмотка статора асинхронной машины. Это поле статора вращается в направлении вращения ротора со скоростью

$$n_1 = f/p. \quad (4.3)$$

Если подставить в (4.3) выражение для f из (4.1), то получим

$$n_1 = n. \quad (4.4)$$

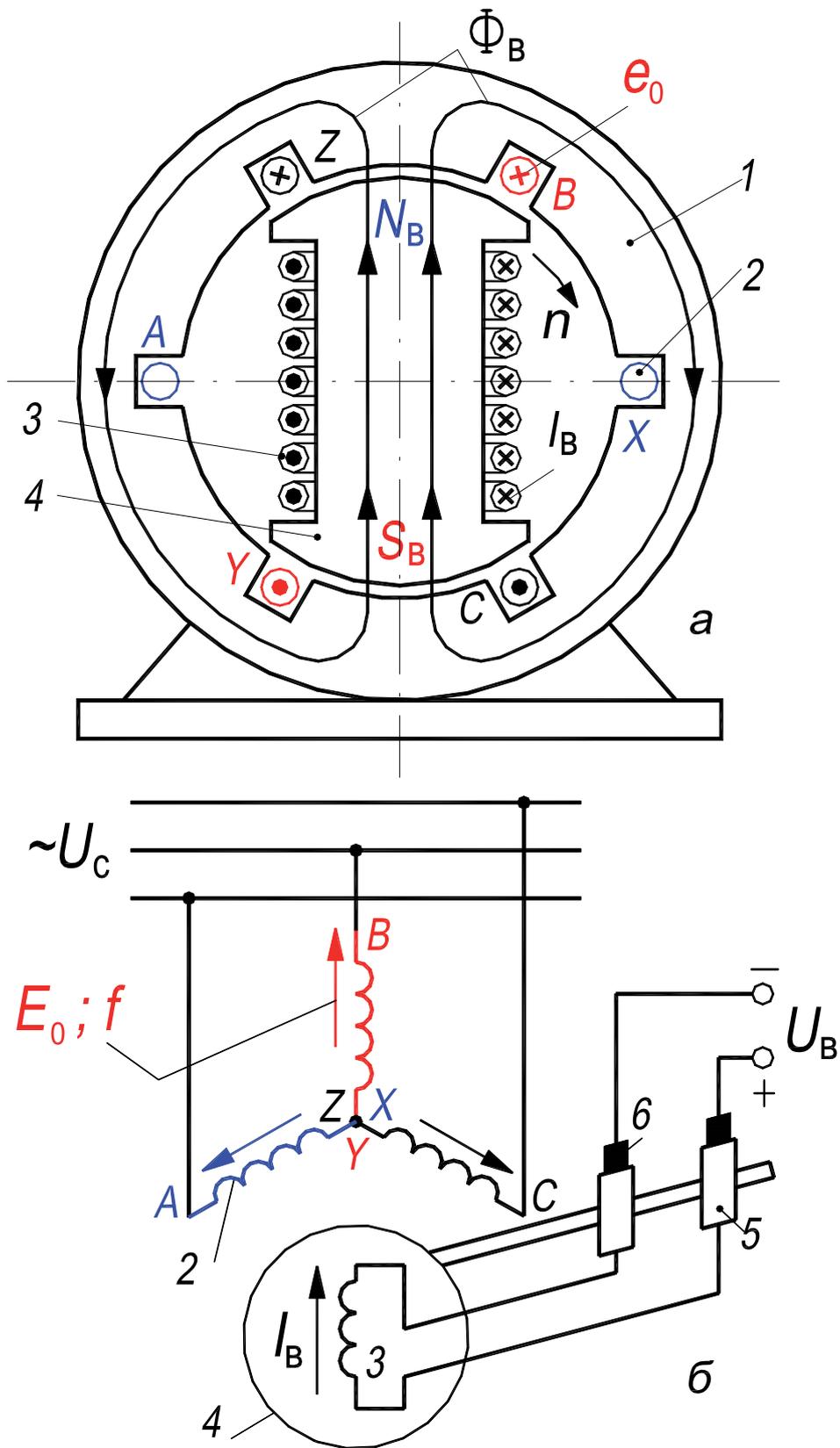


Рис. 4.1. Электромагнитная схема синхронной машины (а) и схема включения (б)

Вывод. Поля якоря и индуктора вращаются с одинаковой скоростью, $n_1 = n$, и образуют, таким образом, общее вращающееся поле, как и в асинхронной машине. Сам индуктор в установившемся режиме также вращается в пространстве со скоростью n . Скольжение индуктора синхронной машины $s = 0$ (скольжение ротора асинхронного двигателя $0 < s \leq 1$ [4]).

Поле якоря оказывает воздействие на поле индуктора и поэтому также называется *полем реакции якоря* (термин 17, с. 15).

Из формулы (4.1) следует, что чем больше число пар полюсов p синхронной машины, тем меньше должна быть ее скорость вращения n для получения заданной частоты f .

В соответствии с устройством ротора различают *явнополюсные* и *неявнополюсные* синхронные машины (рис. 4.1,..., 4.3) (термины 14 и 15, с. 15) [1, 2].

4.2. Явнополюсные синхронные машины

Имеют выступающие полюсы на роторе и изготавливаются с числом полюсов $2p \geq 4$ (рис. 4.2,*a* и 4.3).

Сердечники полюсов явнополюсных машин (рис. 4.3, лист 1) набираются из листов стали толщиной 1...2 мм и стягиваются с помощью шпилек. В средних и крупных машинах полюсы крепятся к выступам вала, к втулке вала или к ободу крестовины с помощью крепления типа “ласточкин хвост”. В малых машинах полюсы крепятся также с помощью болтов. Обмотка возбуждения крупных машин наматывается из голой полосовой меди “на ребро”, и проводники обмотки изолируются друг от друга изоляционными прокладками.

В полюсных наконечниках синхронных двигателей, в пазах, помещаются стержни пусковой обмотки из материала с повышенным удельным сопротивлением (*латунь* и др.), которые привариваются по торцам к короткозамыкающим сегментам, а последние соединяются в общие короткозамыкающие кольца (рис. 4.3). Такая обмотка напоминает беличью клетку короткозамкнутого асинхронного двигателя и служит для *асинхронного* пуска синхронного двигателя (Работа № 4, с. 202). Такие же по конструкции обмотки, но из *медных* стержней изготавливаются в синхронных генераторах и называются в этом случае успокоительными (или демпферными) обмотками (Работа № 3, с. 154). Полюсы синхронных двигателей часто делают также массивными из стальных поковок, и в этом случае роль пусковой обмотки выполняют сами массивные полюсы. Торцы наконечников соседних полюсов при этом соединяются проводниками в виде планок.

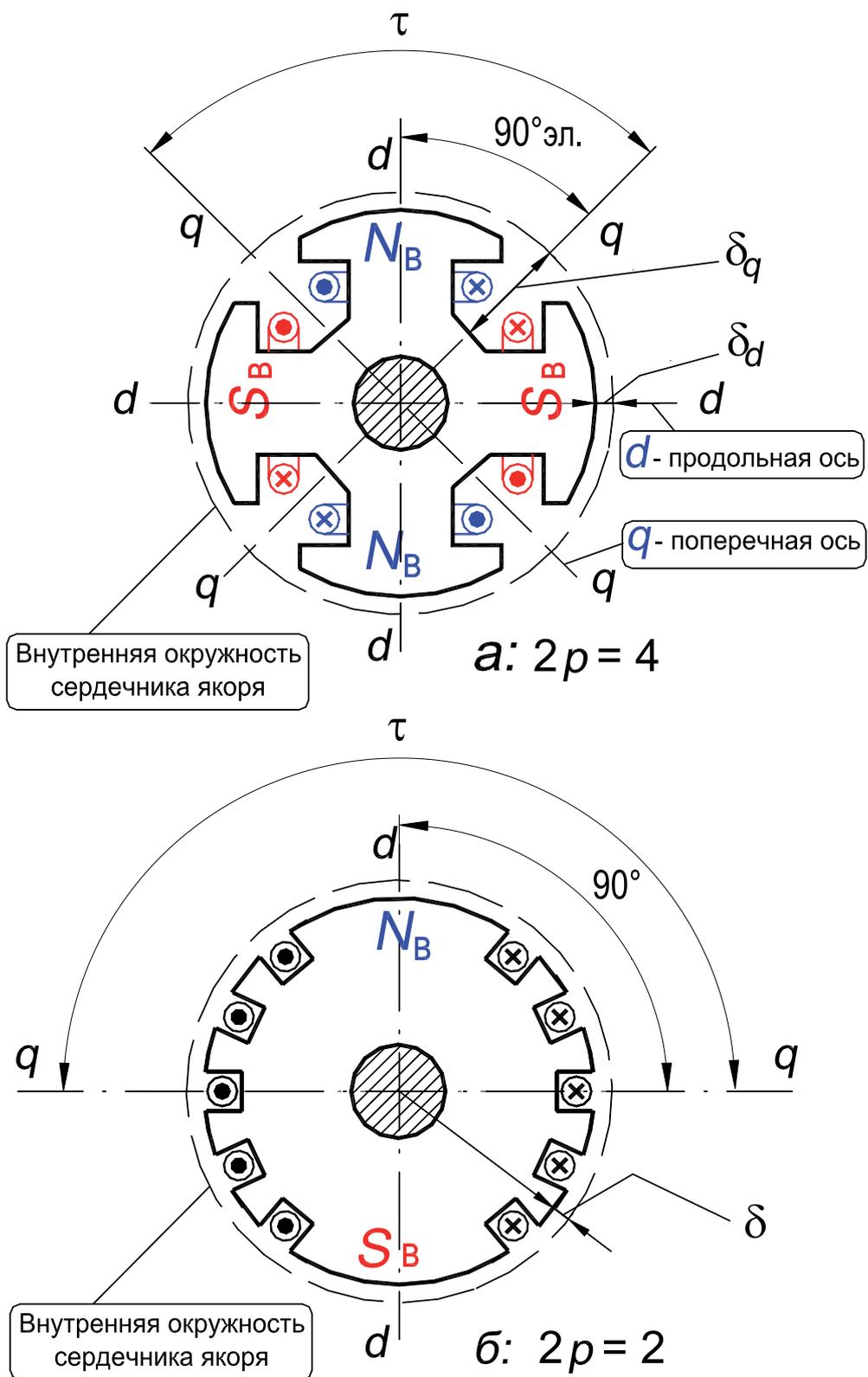


Рис. 4.2. Ротор синхронной машины:
 явнополюсной (а) /см. рис. 4.5, листы 1 и 2/ и неявнополюсной (б) /см. рис. 4.24 ... 4.28/

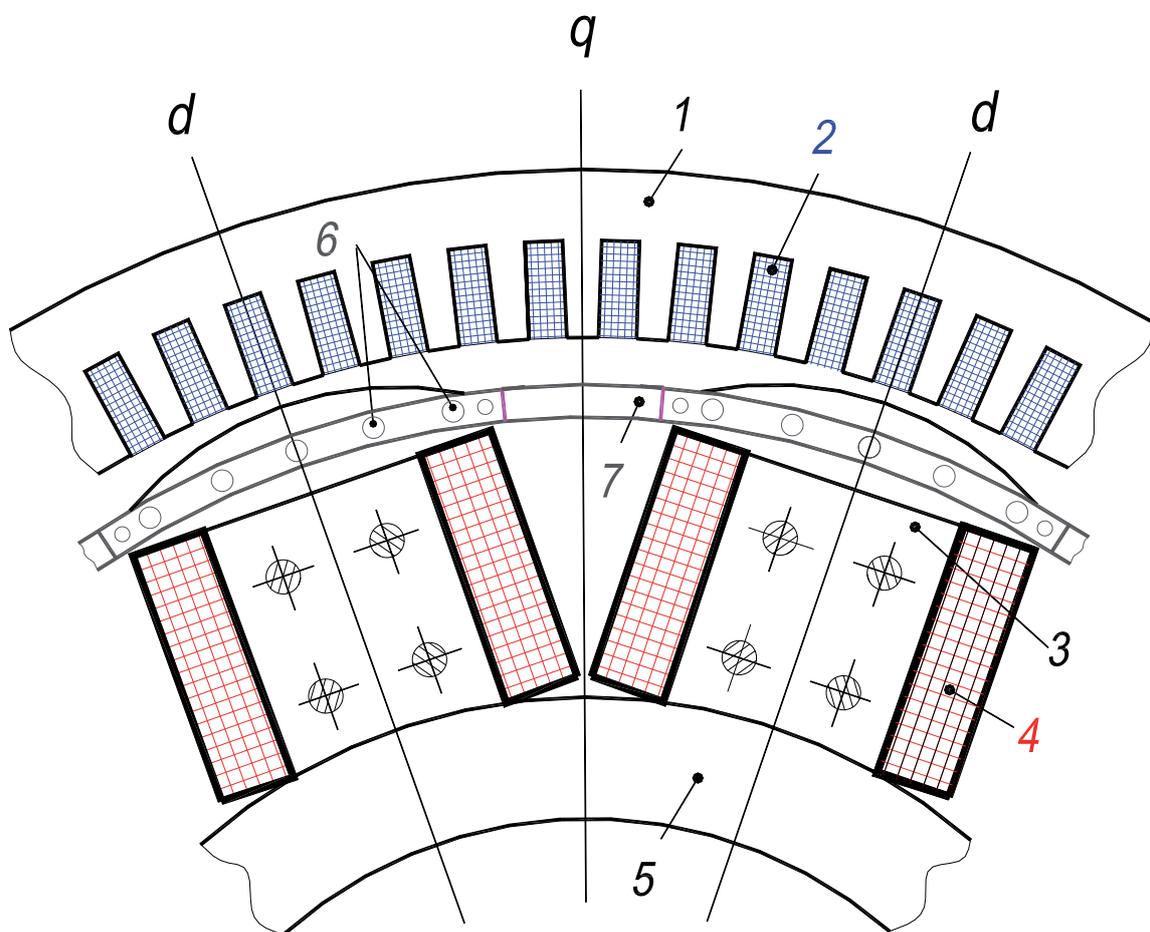
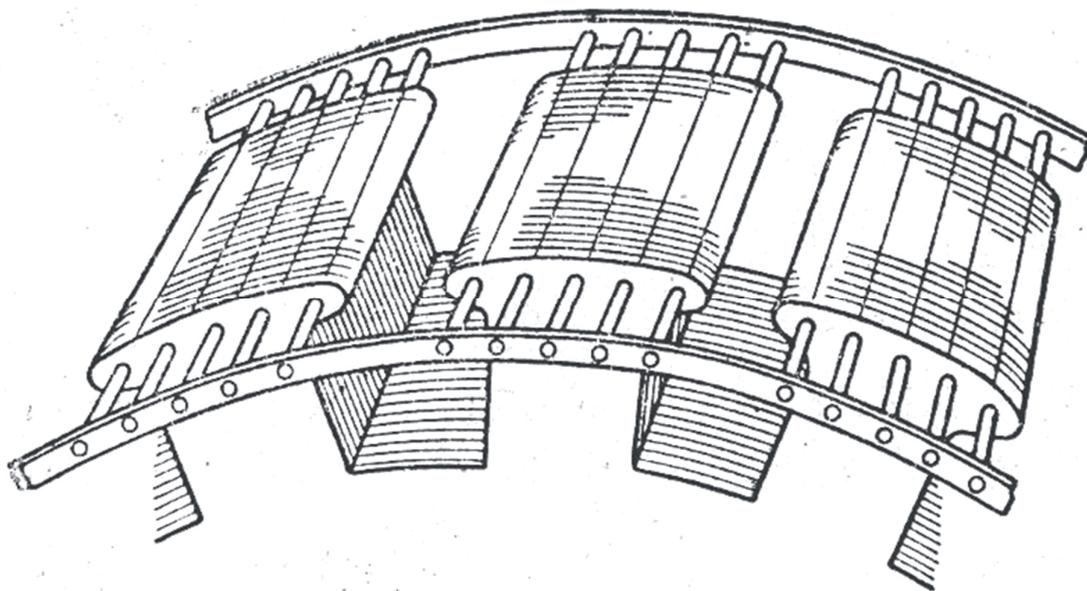
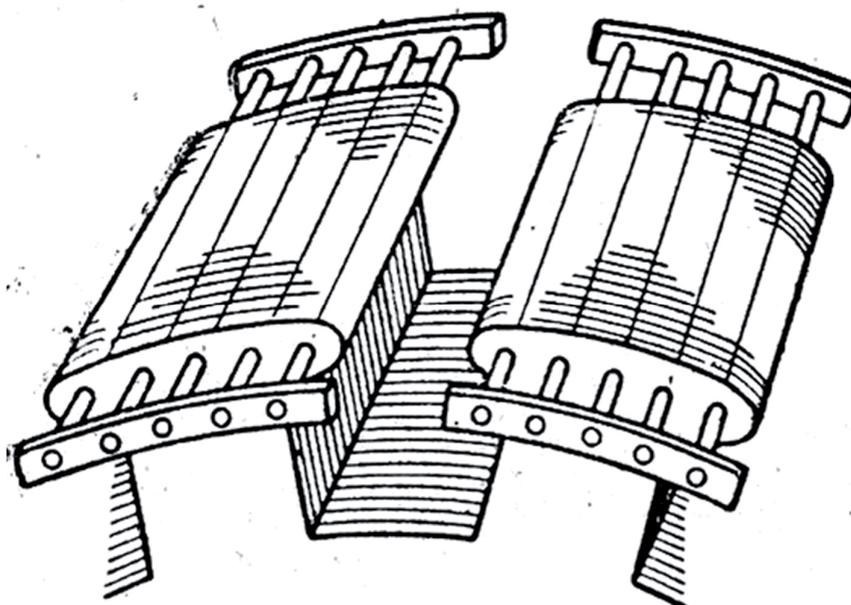


Рис. 4.3, лист 1. Размещение обмоток синхронной машины:

- 1 – сердечник якоря; 2 – обмотка якоря; 3 – сердечник полюса;
 4 – обмотка возбуждения; 5 – обод ротора; 6 – стержни демпферной обмотки;
 7 – торцевые короткозамыкающие кольца полной демпферной обмотки (по осям d и q)



а



б

Рис. 4.3, лист 2. Размещение демпферной обмотки на полюсах явнополюсного ротора (см. рис. 4.5, листы 1 и 2):

а – полная демпферная обмотка (по осям *d* и *q*);

б – неполная демпферная обмотка (по оси *d*)

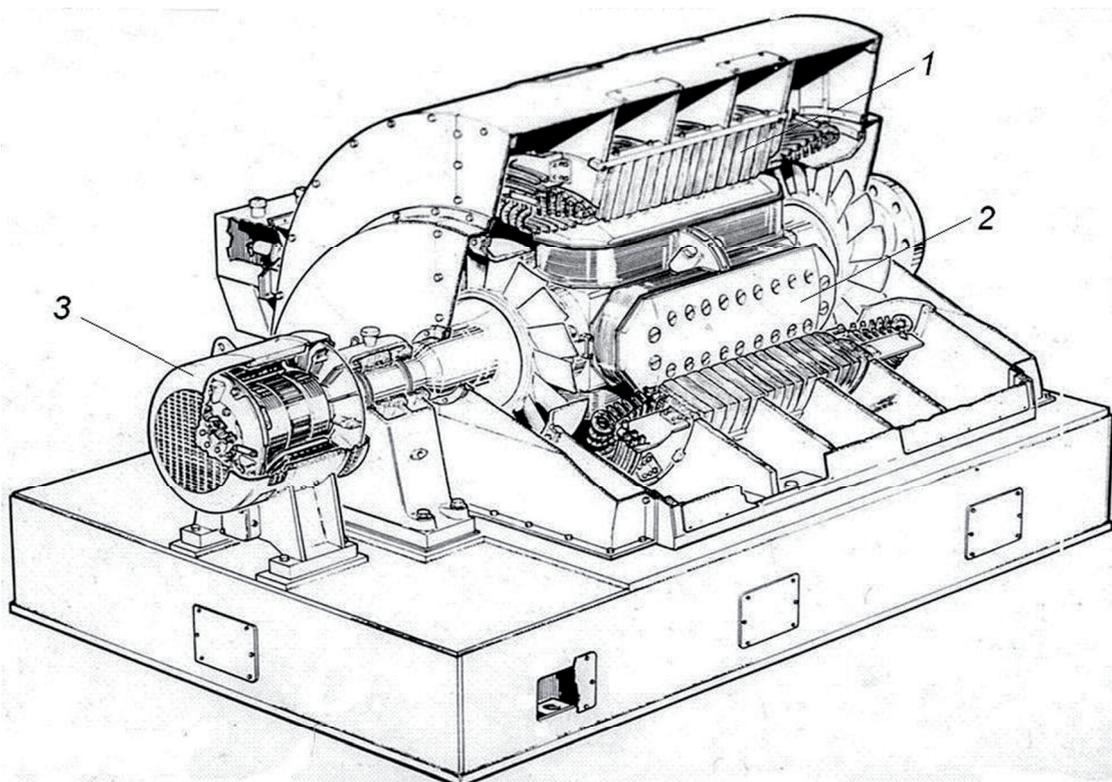
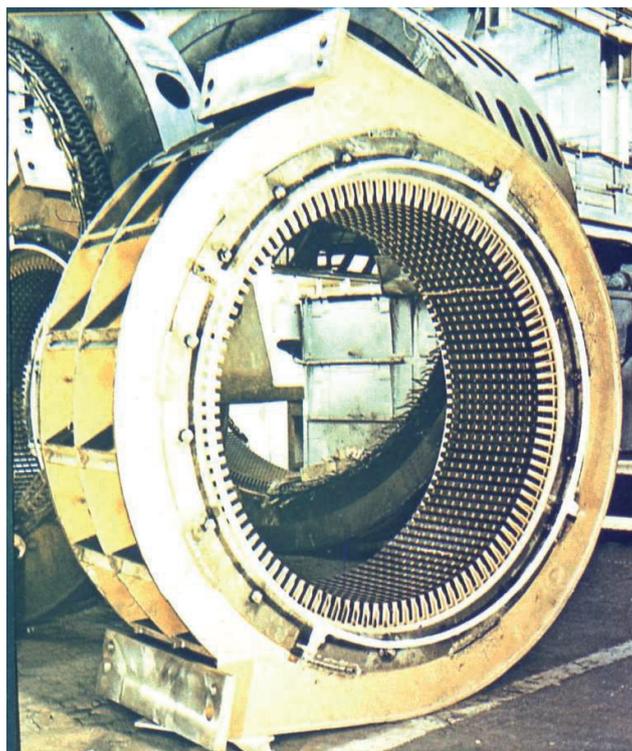


Рис. 4.3, лист 3. Общий вид явнополюсного СГ ($2p = 4$):

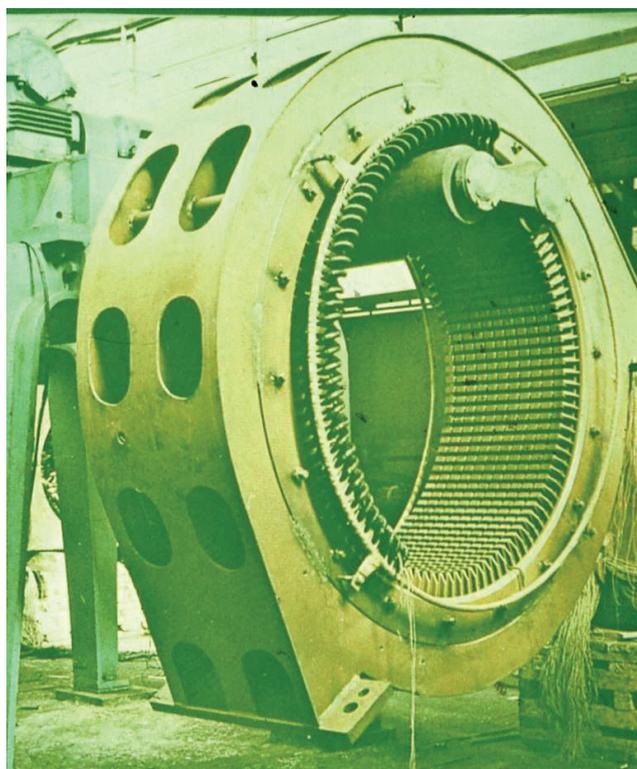
1 – якорь, *2* – индуктор (см. рис. 4.5, лист 2),

3 – возбудитель (генератор постоянного тока)

Далее на фотографиях (рис. 4.4,..., 4.19) представлены устройство и использование явнополюсных синхронных машин [11].

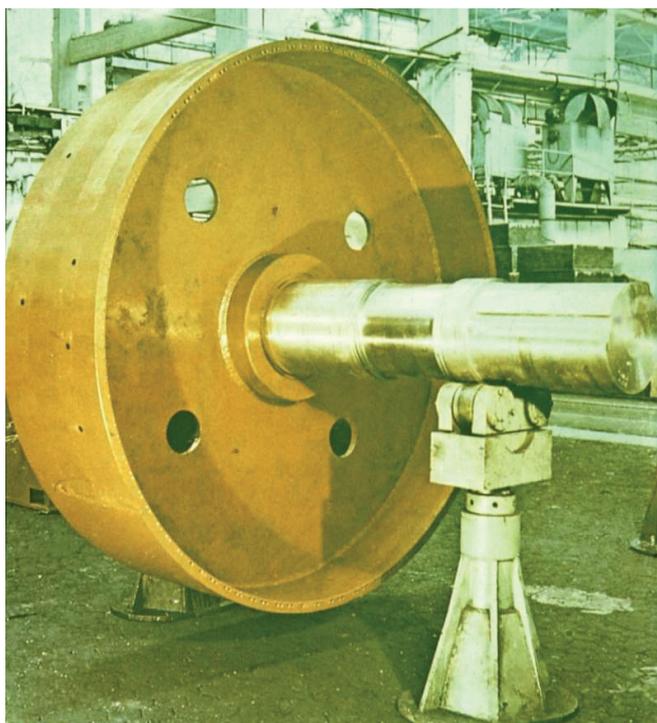


а

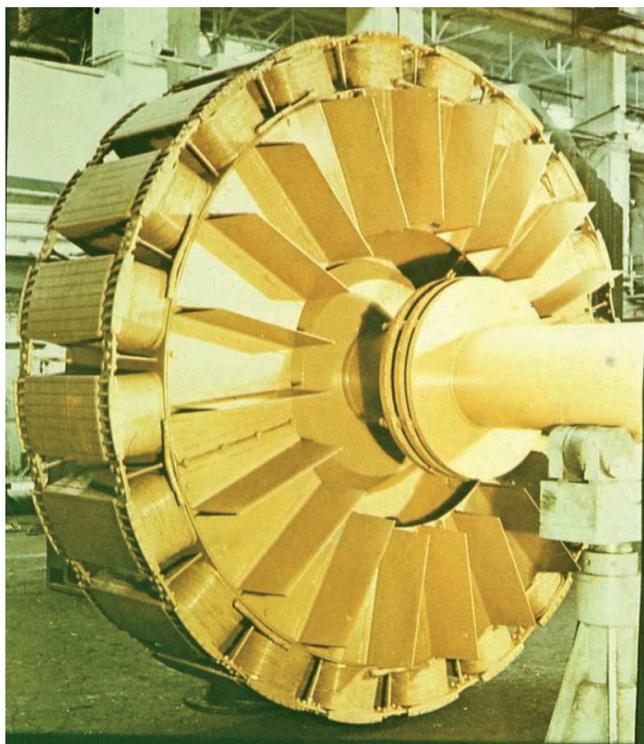


б

Рис. 4.4. Статор синхронной машины средней мощности:
а – сердечник статора без обмотки; *б* – с частично уложенной обмоткой

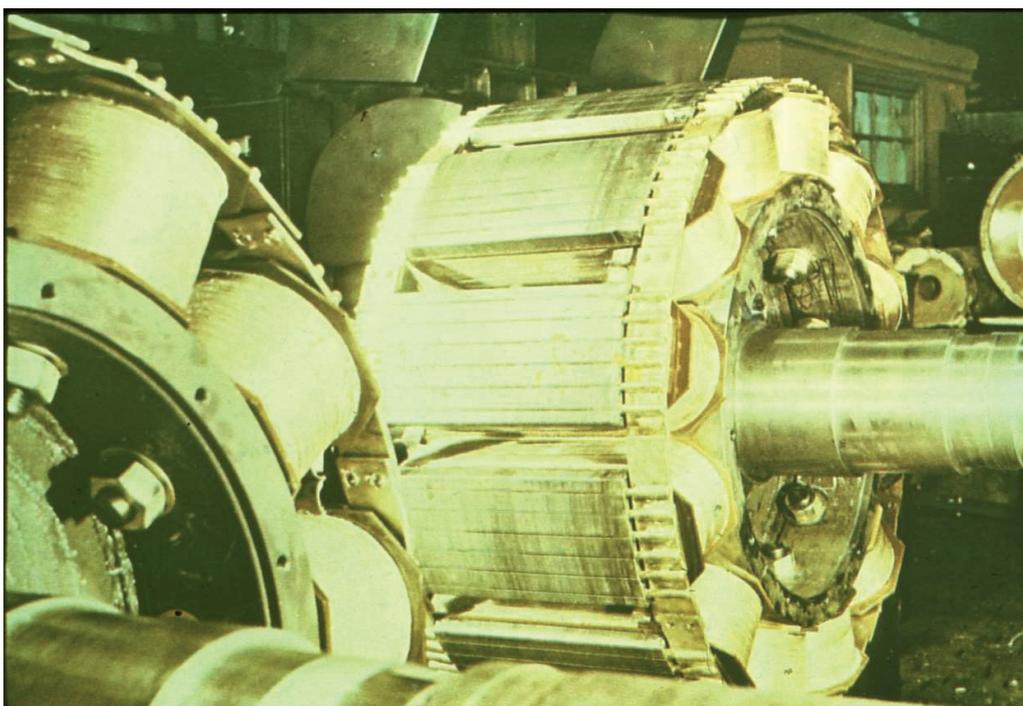


a

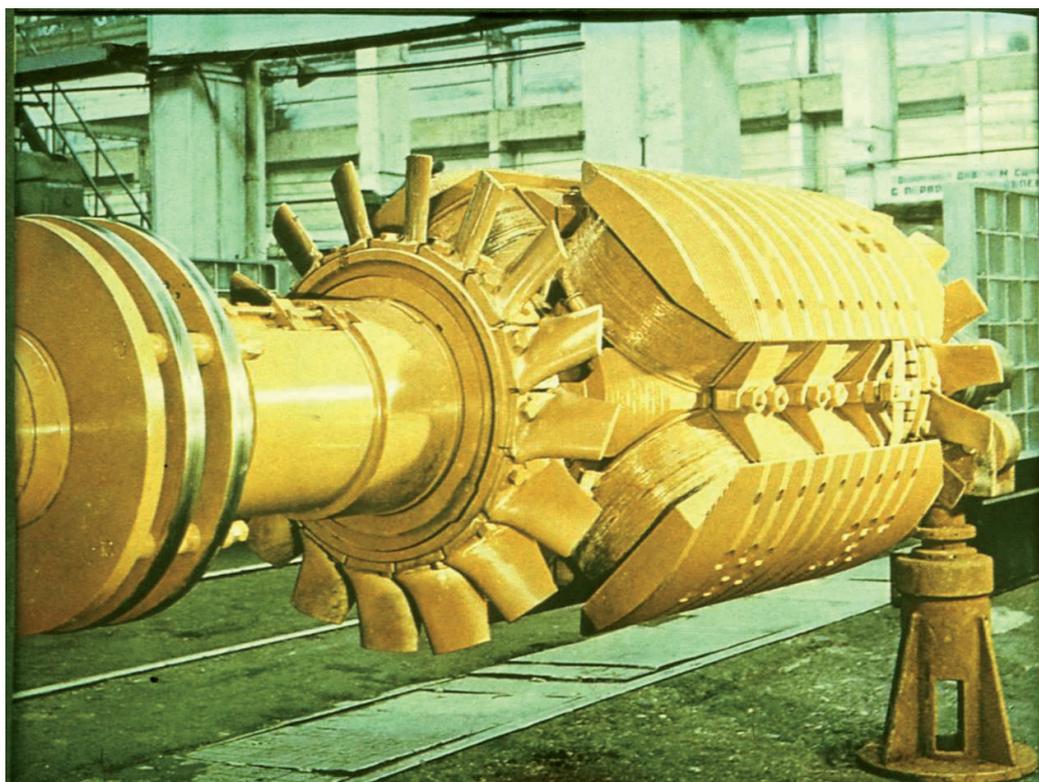


б

Рис. 4.5, лист 1. Явнополюсный ротор синхронной машины средней мощности:
a – остов ротора; *б*– ротор с установленными полюсами, $2p = 20$,
в полюсных наконечниках расположена демпферная обмотка
(аналог беличьей клетки асинхронного двигателя [4, с. 37])

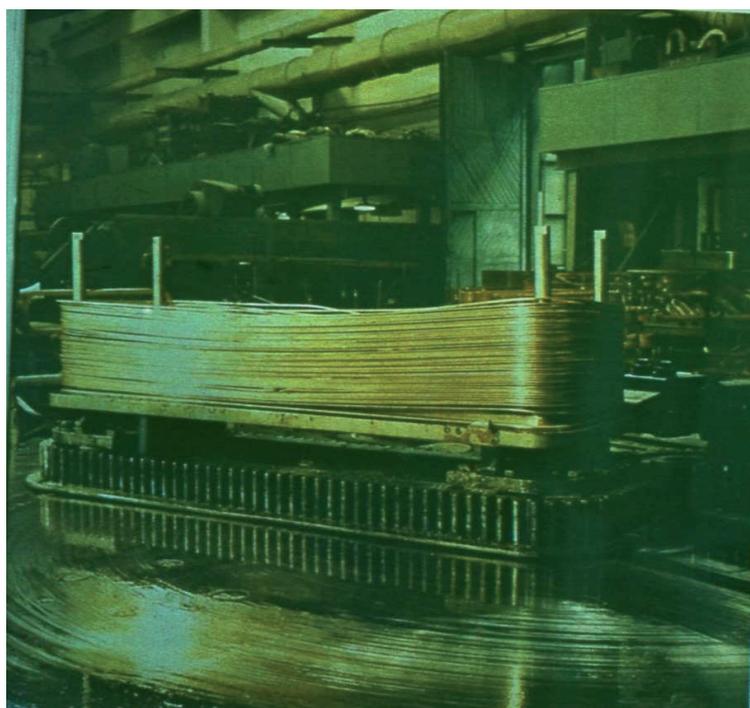


а



б

Рис. 4.5, лист 2. Явнополюсный ротор синхронной машины средней мощности:
 $a - 2p = 12$; $б - 2p = 4$



а



б

Рис. 4.6. Полюсы мощного синхронного гидрогенератора:

а – намотка “на ребро” катушки обмотки возбуждения; *б* – полюсы в сборе, на сердечниках размещены катушки возбуждения, в полюсных наконечниках расположены стержни демпферной обмотки

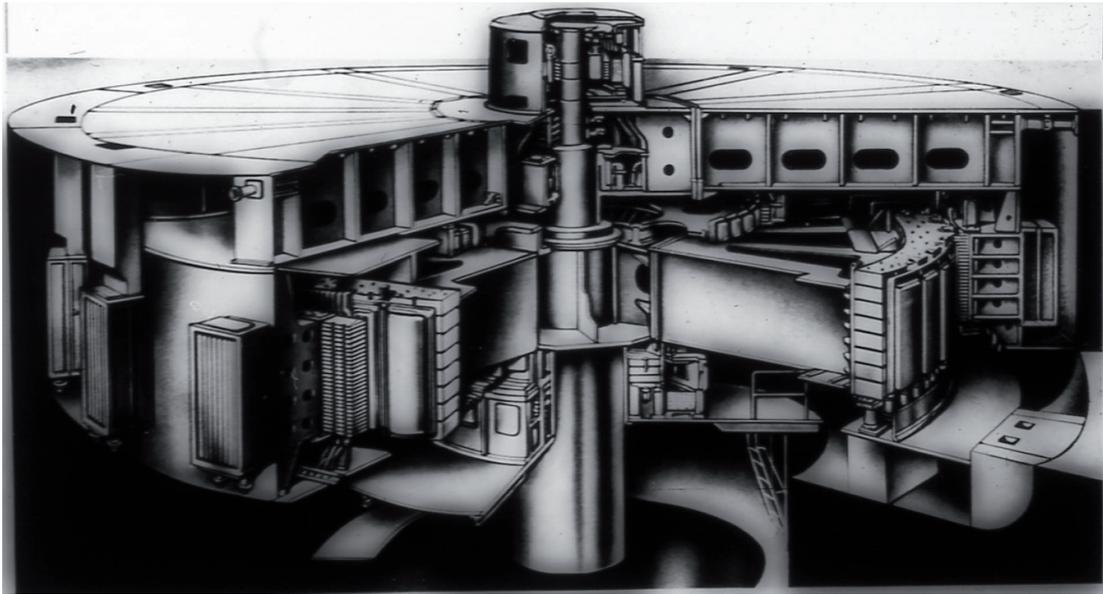


Рис. 4.7. Гидрогенератор типа СВ 1690/175 – 64 (вал вертикальный).
Мощность – 500 МВт; напряжение – 15,75 кВ; $\cos \varphi = 0,85$; частота вращения ротора – 93,8 об/мин; охлаждение обмотки статора – водяное; охлаждение обмотки ротора – воздушное; исполнение зонтичное; $2p = 64$. Установлен на Красноярской ГЭС



Рис. 4.8. Турбина Красноярской ГЭС.
Мощность турбины – 508 МВт. Диаметр колеса турбины – 7,5 м

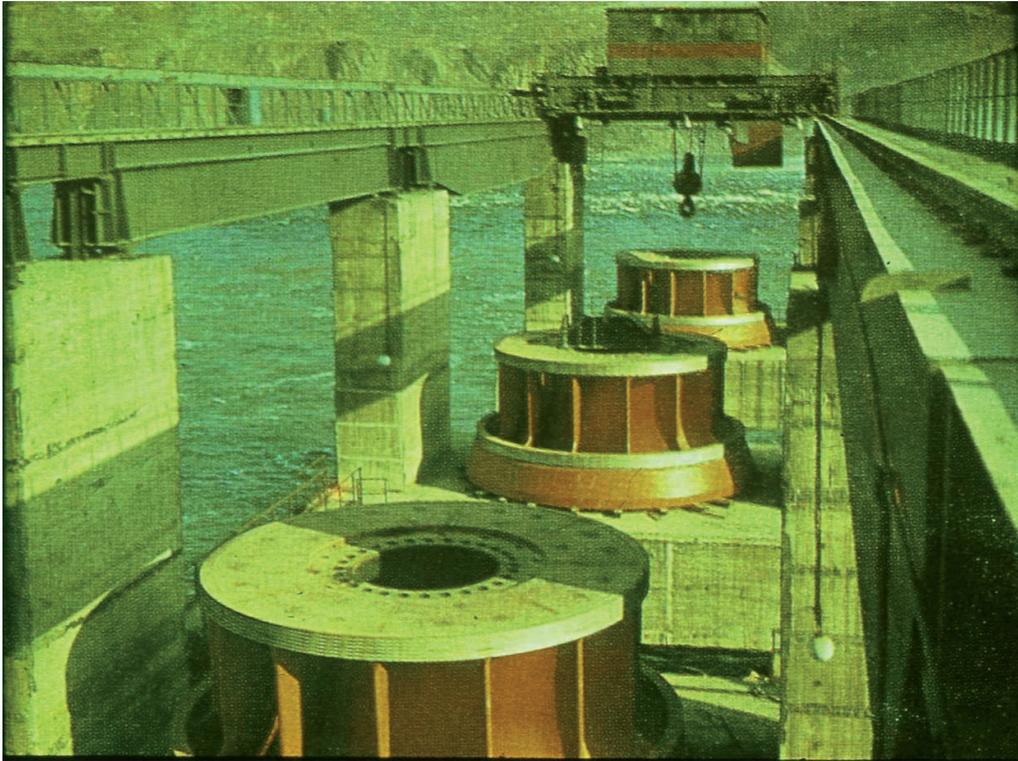


Рис. 4.9. Монтаж турбин Красноярской ГЭС

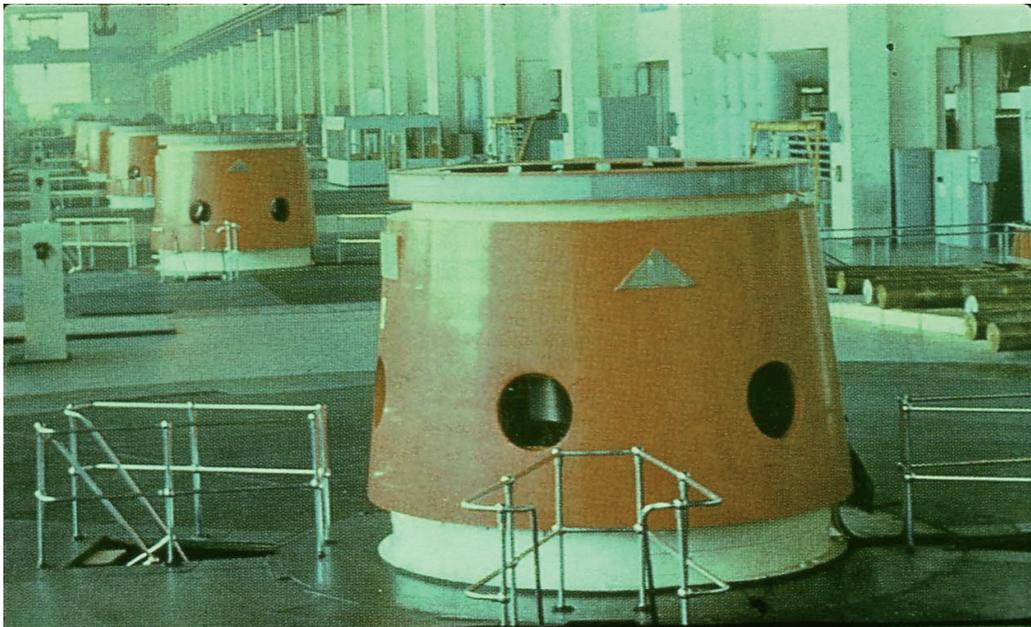


Рис. 4.10. Машинный зал Красноярской ГЭС.

Мощность ГЭС – 6000 МВт. Установлено 12 агрегатов мощностью 500 МВт каждый

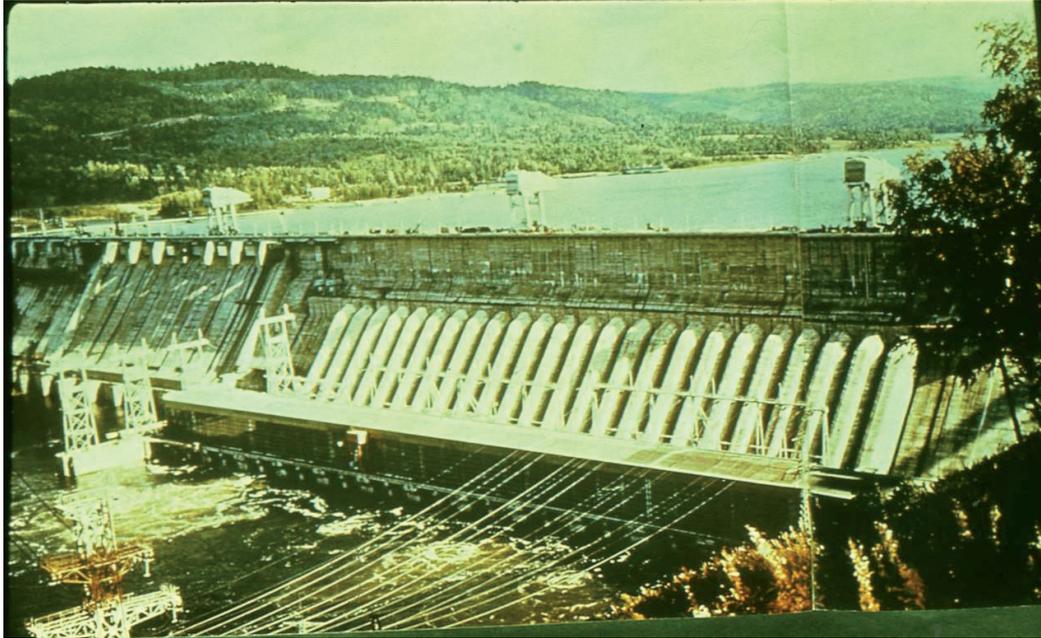


Рис. 4.11. Красноярская ГЭС, вид на плотину (река Енисей):
высота плотины – 124 м; длина – 1100 м

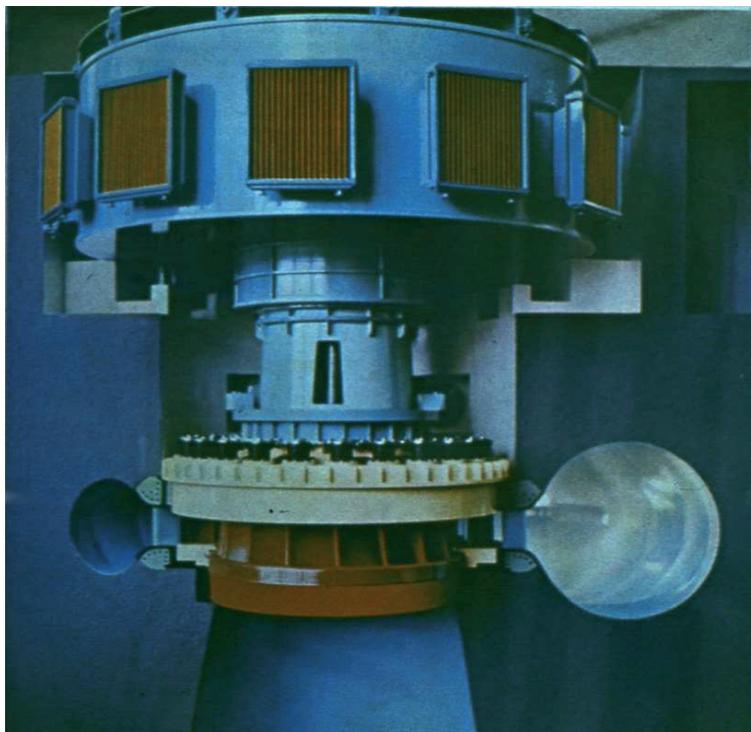


Рис. 4.12. Макет гидроагрегата, установленного на Саяно-Шушенской ГЭС
(номинальные данные – см. табл. 4.1, строка 1, на с. 44)



**Рис. 4.13. Саяно-Шушенская ГЭС (СШ ГЭС). Мощность – 6400 МВт, 10 агрегатов.
Повреждена во время аварии 17 августа 2009 г.**



Рис. 4.14. Машинный зал СШ ГЭС 31 августа 2010 г.;
частично восстановленный после аварии



Рис. 4.15. Машинный зал СШ ГЭС. Вид после аварии 17 августа 2009 г.



Рис. 4.16. Установка ротора ($2p = 42$) в кратер 4-го гидроагрегата СШ ГЭС; восстановительные работы 12 мая 2010 г.

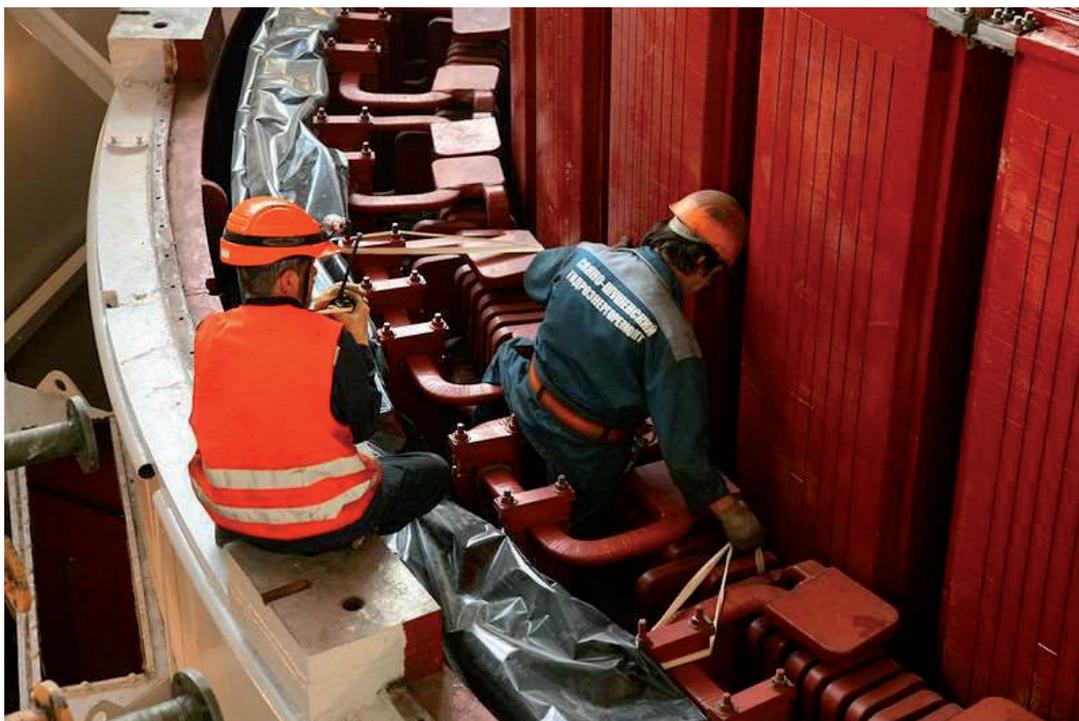


Рис. 4.17. Монтаж 4-го гидроагрегата на СШ ГЭС 12 мая 2010 г.



Рис. 4.18. Вид на плотину СШ ГЭС с левого берега Енисея.

Высота сооружения 242 м, длина по гребню 1074,4 м,
ширина по основанию – 105,7 м и по гребню — 25 м.

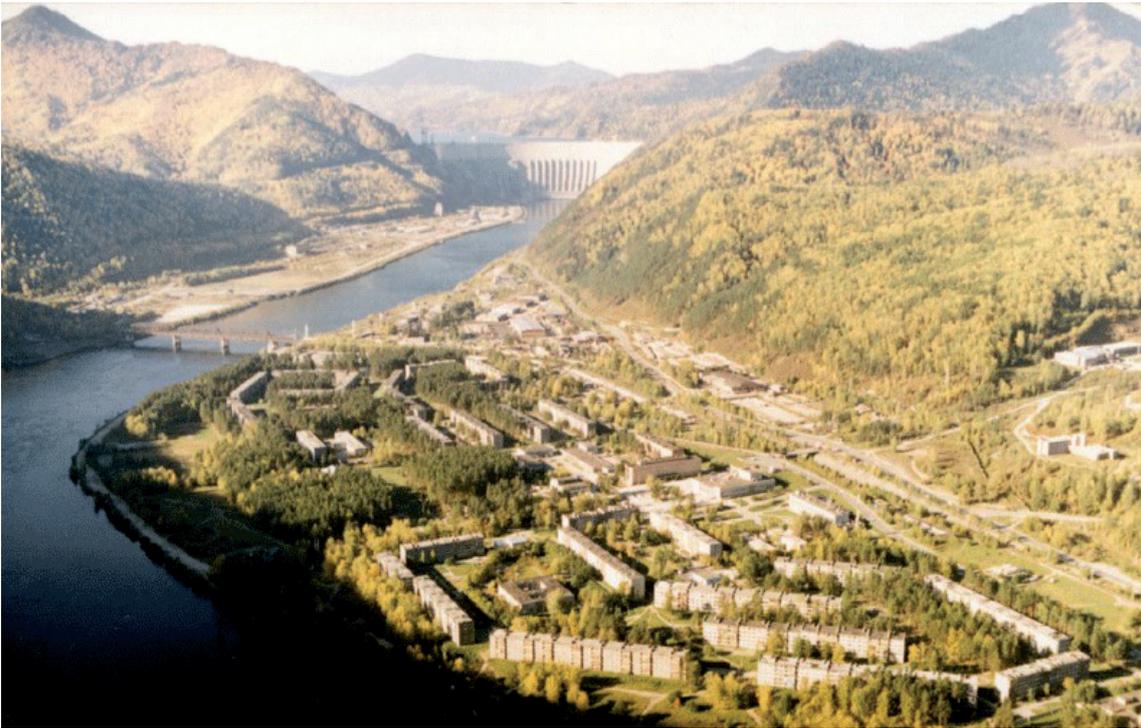


Рис. 4.19. Поселок Черёмушки и плотина СШ ГЭС, река Енисей

Явнополюсные синхронные машины мощностью до 10...12 кВт имеют иногда также обращенную конструкцию, когда индуктор (полюсы) является неподвижным, а якорь вращается. Такие машины напоминают по устройству машины постоянного тока [5], у которых коллектор заменен тремя контактными кольцами для отвода тока из обмотки якоря. Для машин большой мощности обращенная конструкция нецелесообразна, так как отвод из обмотки якоря больших токов при высоком напряжении с помощью колец и щеток чрезвычайно затруднителен и сложно осуществить надежную изоляцию вращающейся якорной обмотки высокого напряжения.

Явнополюсные синхронные машины с *горизонтальным* валом широко используются в качестве двигателей и генераторов, в частности в качестве дизель-генераторов, соединяемых с дизельными двигателями внутреннего сгорания. Дизель-генераторы обычно имеют один подшипник, вал генератора жестко соединяется с валом дизеля, и в качестве второй опоры ротора генератора используется подшипник самого дизеля. Во избежание затруднений, которые могут возникнуть при работе дизель-генератора вследствие неравномерности вращающего момента дизеля как поршневой машины, дизель-генератор снабжается маховиком или его ротор выполняется с повышенным маховым моментом (моментом

инерции). Аналогичную конструкцию имеют также синхронные двигатели, предназначенные для привода поршневых компрессоров.

Синхронные генераторы, сочленяемые с гидравлическими турбинами, работающими на гидроэлектростанциях, называются *гидрогенераторами* (термин 10, с. 14). Они имеют явнополюсную конструкцию и соединяются непосредственно с гидравлическими турбинами, их вал располагается *вертикально*.

Гидротурбины в зависимости от напора воды и мощности имеют обычно относительно малую скорость вращения ($n = 60 \dots 500$ об/мин). Скорость вращения тем меньше, чем меньше напор воды и чем больше мощность турбины. Гидрогенераторы поэтому являются тихоходными машинами и имеют большие размеры и массу, а также большое число полюсов $2p$, достигающее нескольких десятков. Для их размещения в полости статора диаметр внутренней окружности сердечника статора достигает 15 м, соответственно длина сердечника небольшая. В табл. 4.1 приведены данные гидрогенератора, установленного на Саяно-Шушенской ГЭС (1-я строка) /см. рис. 4.12,..., 4.19/. В таблице приняты следующие обозначения: D_a – диаметр расточки статора; l – длина активной части генератора; δ – величина зазора (под серединой полюсного наконечника); A – линейная нагрузка (термин 40, с. 19); B_δ – индукция в зазоре; G – масса генератора.

Таблица 4.1. Основные данные трехфазных гидро- (1) и турбогенератора (2)

№ пп.	$P_{\text{ном}}$, МВт	$U_{\text{л.ном}}$, кВ	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$, %	$2p$	$n_{\text{ном}}$, об/мин	D_a , м	l , м	δ , см	A , А/см	B_δ , Тл	G , т
1	640	15,75	0,9	98,3	42	142,8	11,85	2,75	3,0	1178	0,824	1790
2	1200	24,0	0,9	98,86	2	3000	1,55	8,00	15,0	2370	0,877	610

Примечание. Гидро- и турбогенератор изготовлены в ЛПЭО “Электросила”, г. Санкт-Петербург, и введены в эксплуатацию в 1978–79 гг.

4.3. Неявнополюсные синхронные машины

Имеют цилиндрический ротор, выполняемый обычно из *массивной стальной поковки* (рис. 4.2,б и 4.24). В роторе фрезеруются пазы для укладки обмотки возбуждения (рис. 4.25 и 4.26). Эти машины выпускаются с числом полюсов $2p = 2$ или $2p = 4$ и имеют поэтому большие скорости вращения (при $f = 50$ Гц соответственно 3000 и 1500 об/мин). Изготовление *крупных* машин с такими скоростями вращения при *явнополюсной* конструкции по условиям механической прочности ротора и крепления его полюсов и обмотки возбуждения невозможно.

Основными представителями неявнополюсных машин являются турбогенераторы (термин 9, с. 14), т. е. синхронные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с работающими на тепловых электростанциях паровыми турбинами. В настоящее время большинство турбогенераторов выполняется *двухполюсными*, так как паровые турбины являются в принципе быстроходными машинами и при больших скоростях вращения их технико-экономические показатели выше. Однако для атомных электростанций с водо-водяными реакторами выпускаются также *четырёхполюсные турбогенераторы*. В табл. 4.1 приведены данные *турбогенератора*, установленного на Костромской ГРЭС (2-я строка).

Роторы турбогенераторов большой мощности изготавливаются из *цельных* поковок высококачественной хромоникелевой или хромоникельмолибденовой стали. Однако и при этом предельный диаметр активной части ротора при $n = 3000$ об/мин по условиям механической прочности из-за больших центробежных сил *не может превышать* 1,20...1,50 м. В связи с этим роторы мощных машин приходится делать длинными. В то же время увеличение длины ротора ограничено пределом увеличения гибкости и прогиба ротора и пределом связанного с этим увеличения его вибраций. Наибольшая возможная активная длина ротора составляет примерно 7,5...8,5 м.

Таким образом, предельные размеры турбогенераторов ограничены возможностями современной металлургии. Поэтому дальнейшее увеличение предельных мощностей турбогенераторов связано уже не с увеличением их размеров, а с *увеличением электромагнитных нагрузок* (линейные нагрузки и плотности тока обмоток) и *интенсификацией способов охлаждения* (см. с. 53).

Далее на фотографиях (рис. 4.20,..., 4.34) представлены устройство и использование *неявнополюсных синхронных машин* [11].

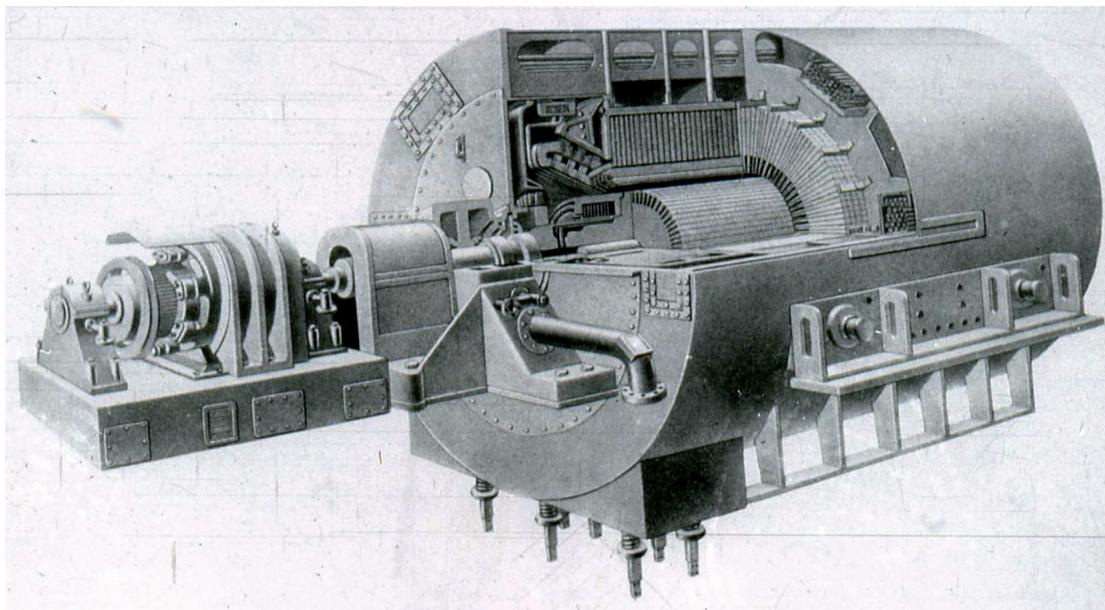


Рис. 4.20. Турбогенератор типа ТВФ-100-2;
мощность – 100 МВт, напряжение – 10,5 кВ, частота вращения – 3000 об/мин

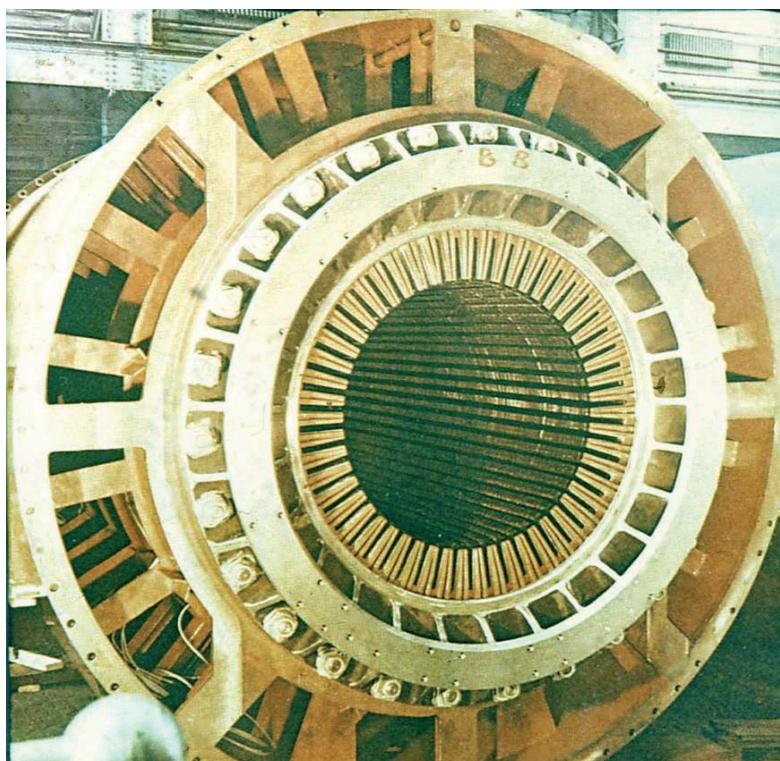


Рис. 4.21. Статор турбогенератора, подготовленный для укладки обмотки

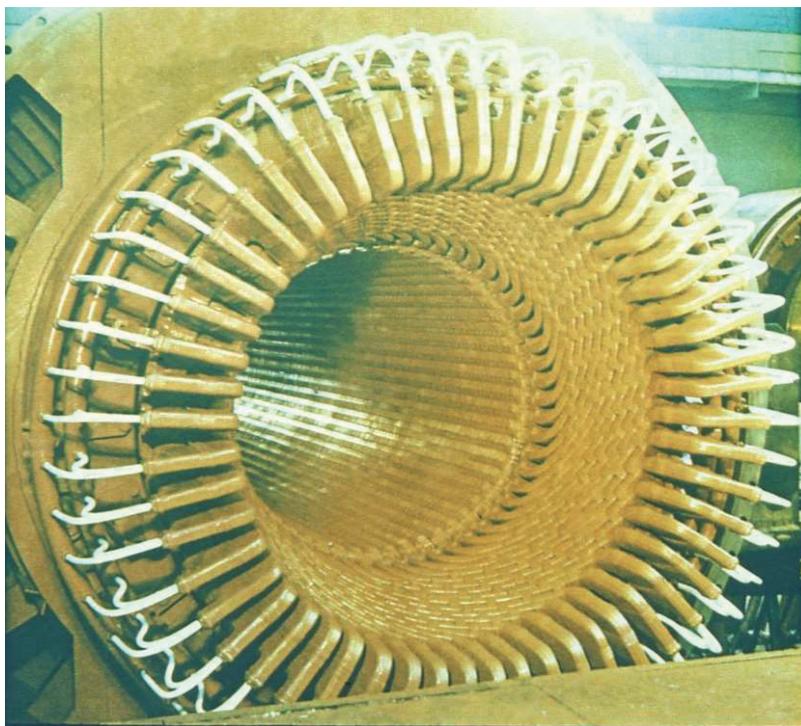


Рис. 4.22. Обмотанный статор турбогенератора типа ТВВ-300-2;
мощность ТГ – 300 МВт; частота вращения – 3000 об/мин



Рис. 4.23. Обмотанный статор турбогенератора. Мощность ТГ – 1640 МВ·А

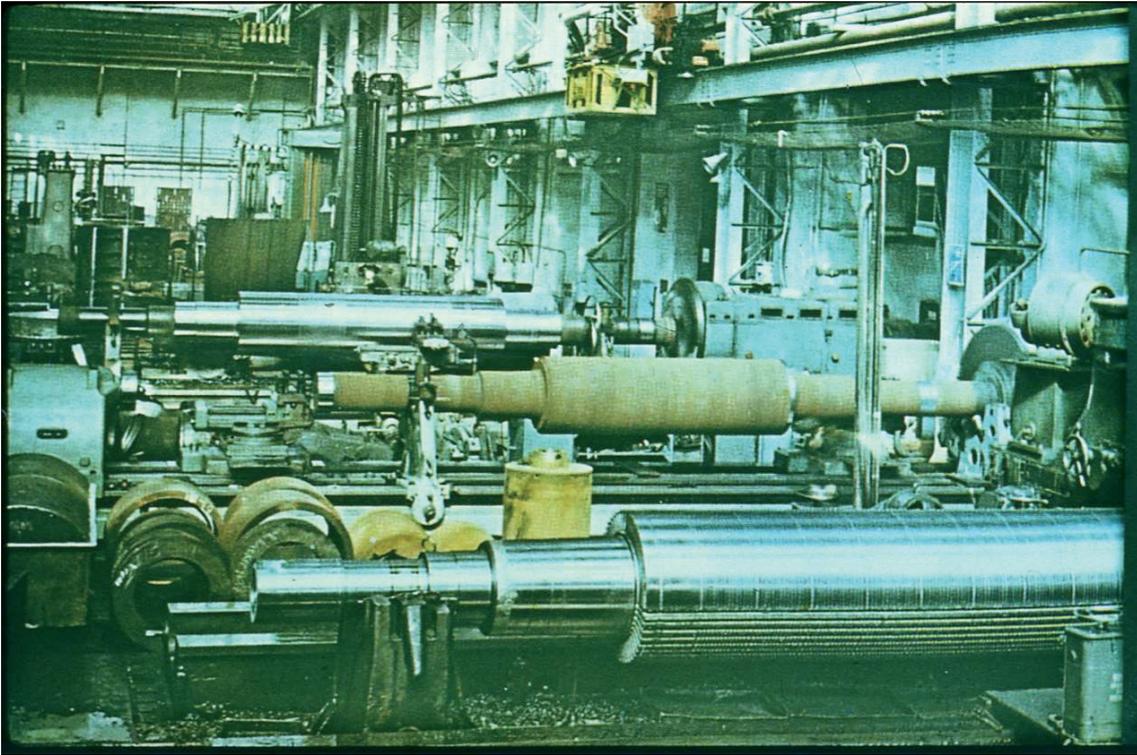


Рис. 4.24. Участок механической обработки роторов турбогенераторов

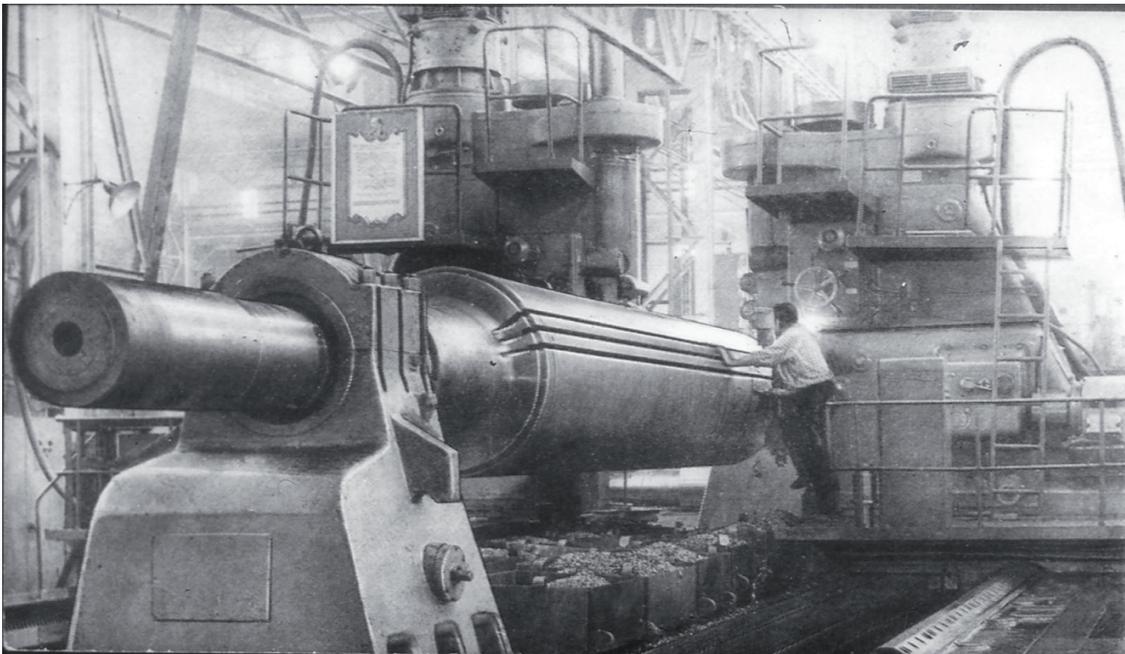


Рис. 4.25. Фрезеровка пазов ротора турбогенератора типа ТГВ-300-2

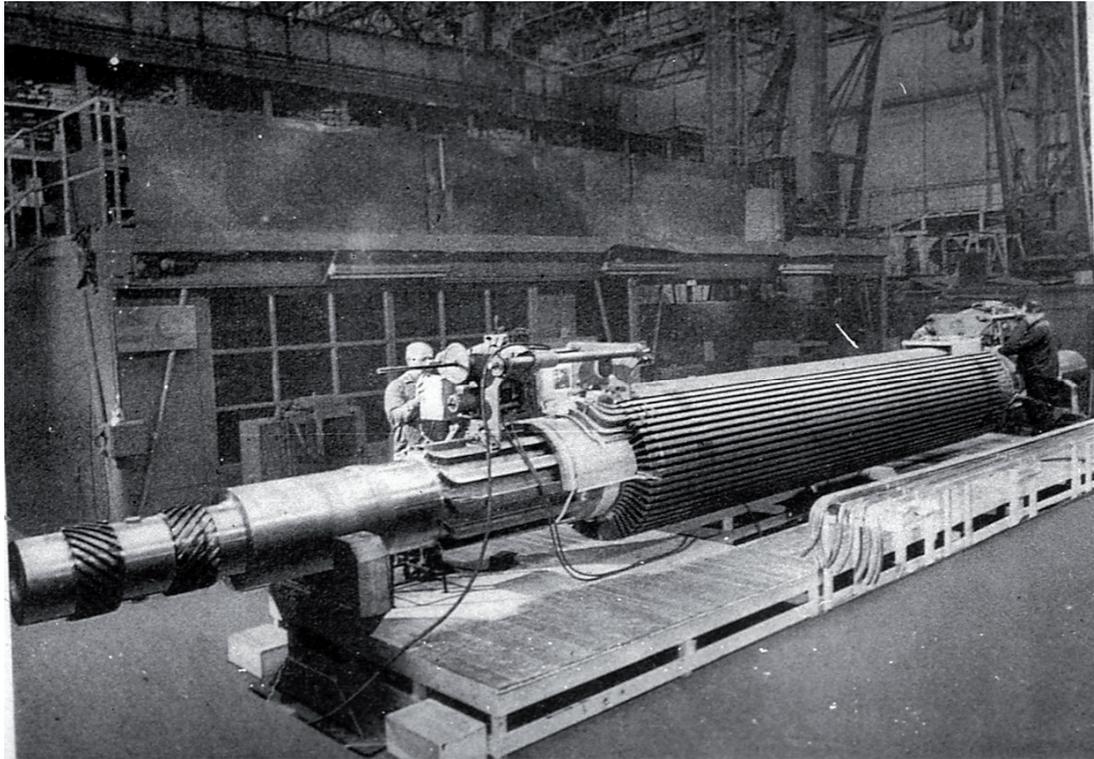


Рис. 4.26. Процесс укладки обмотки возбуждения в пазы ротора ТГ



Рис. 4.27. Ротор ТГ с частично уложенной в пазы обмоткой возбуждения; проводники ОВ с боковыми вырезами для образования вентиляционных каналов

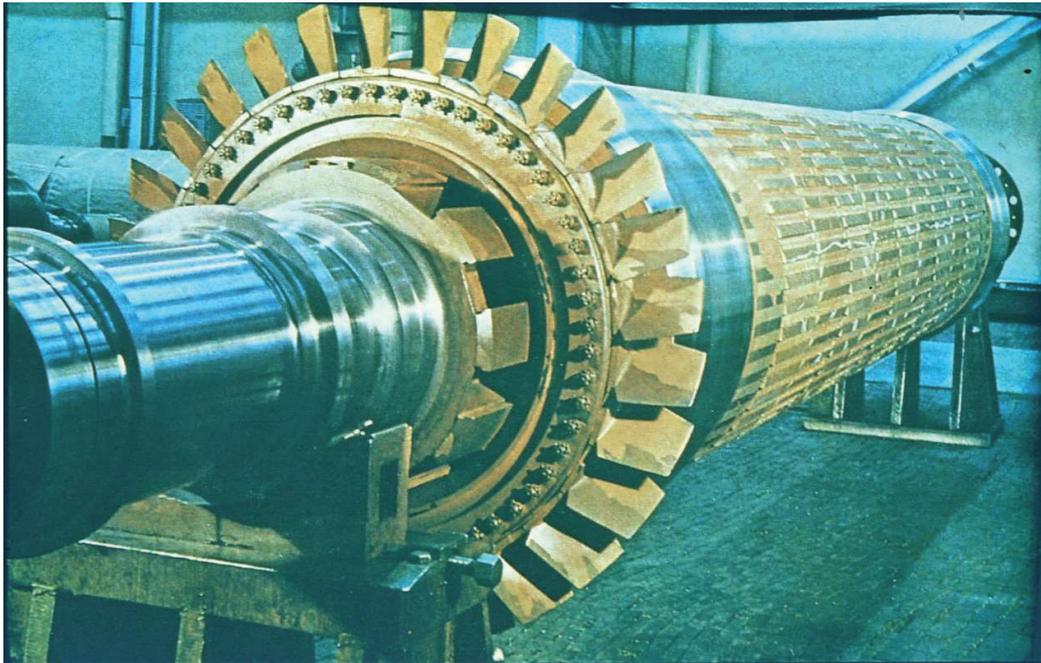


Рис. 4.28. Ротор турбогенератора с осевым вентилятором в сборе

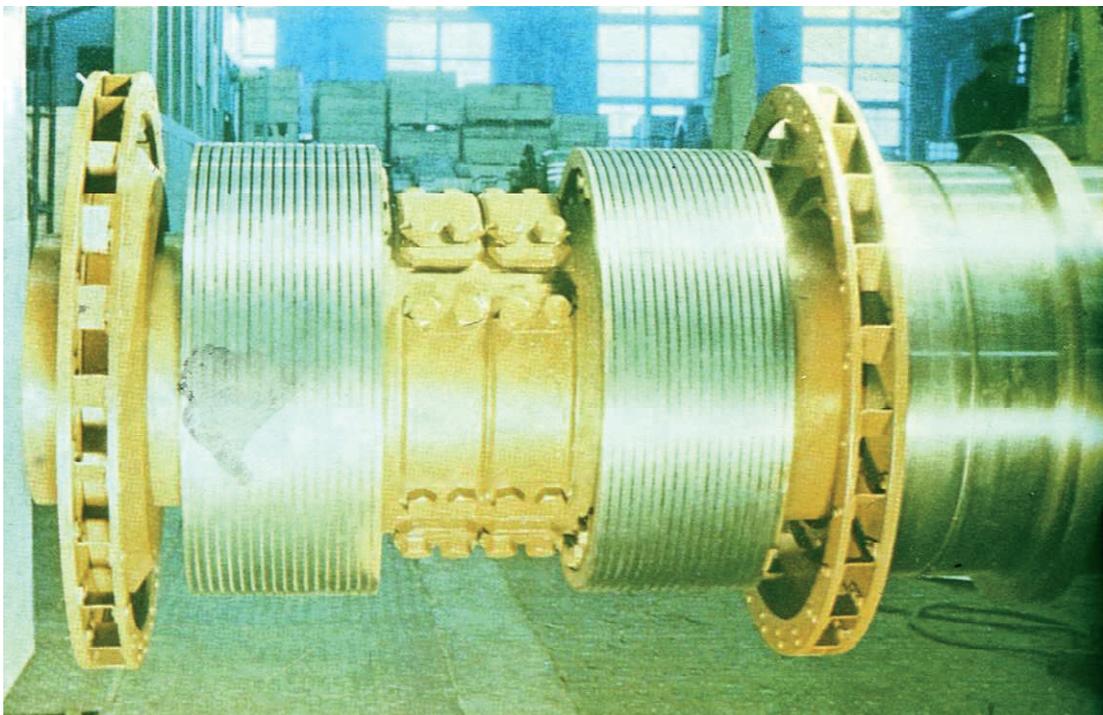


Рис. 4.29. Элемент ротора с контактными кольцами турбогенератора мощностью более 300 МВт

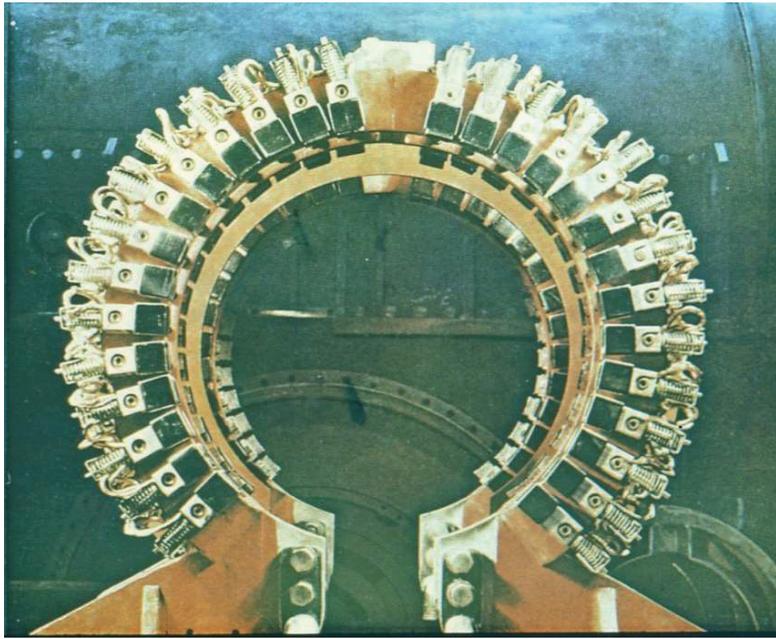


Рис. 4.30. Токосводящий щеточный аппарат;
накладывается на контактные кольца ротора турбогенератора

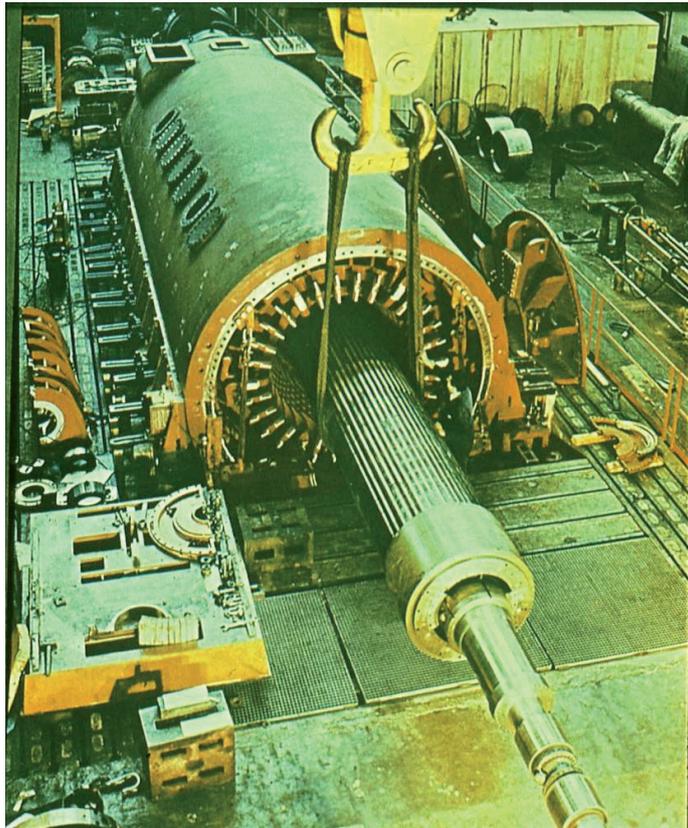


Рис. 4.31. Ввод ротора в расточку статора турбогенератора. Мощность – 1333 МВ·А

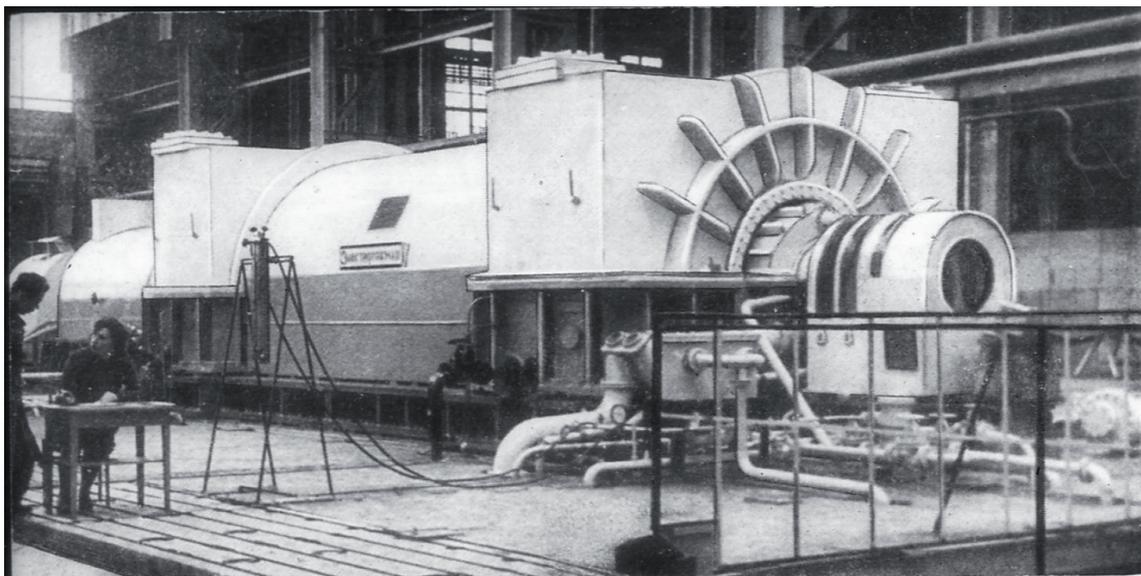
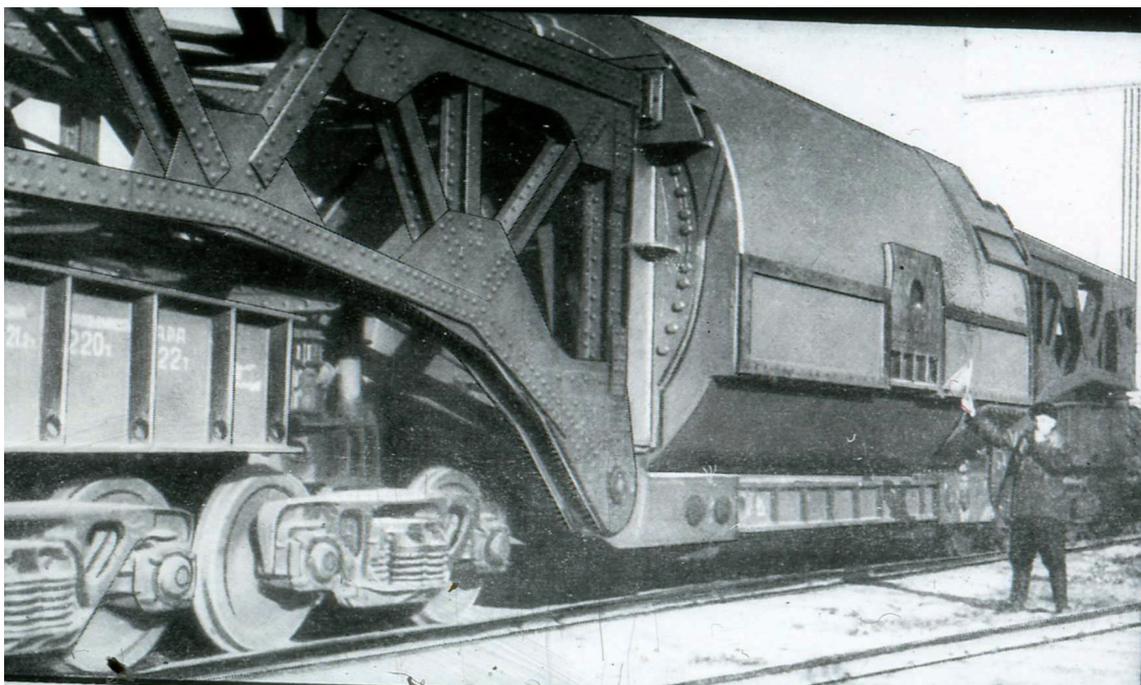


Рис. 4.32. Турбогенератор типа ТГВ-500-2 на испытательном стенде



**Рис. 4.33. Турбогенератор типа ТГВ-200
на специальной железнодорожной платформе**

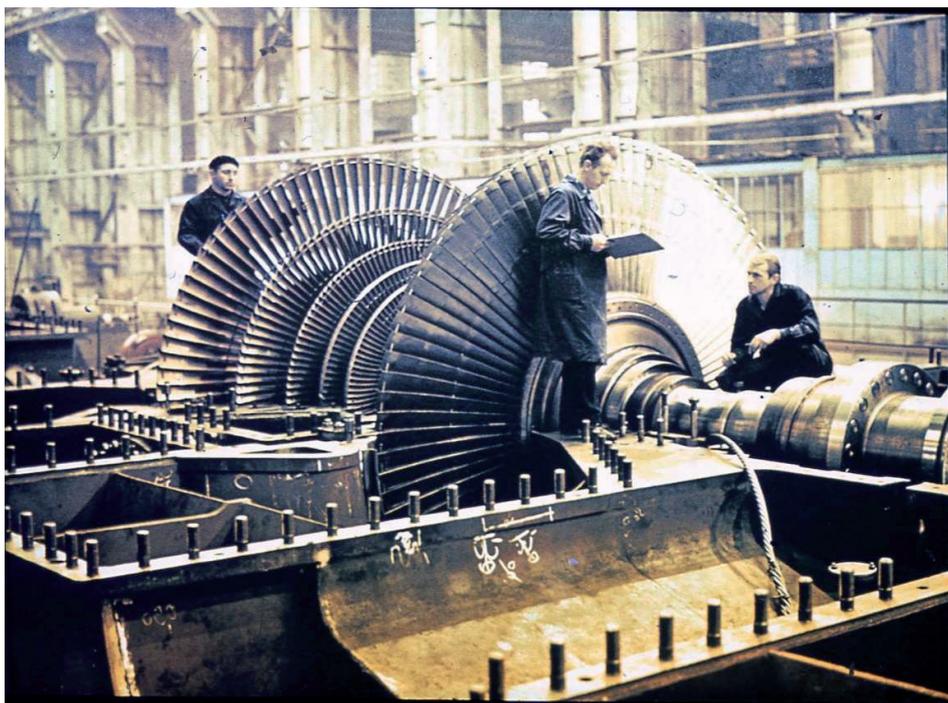


Рис. 4.34. Монтаж паровой турбины мощностью 500 МВт

Турбогенераторы мощностью до 30 МВт выполняются с замкнутой системой воздушного охлаждения, а при $P_{\text{ном}} \geq 30$ МВт воздушная охлаждающая среда заменяется *водородом* с избыточным давлением около 0,05 атм во избежание засасывания воздуха через уплотнения и образования гремучей смеси. Применение водорода позволяет усилить съём тепла, повысить мощность при заданных размерах машины и уменьшить вентиляционные потери.

Создание турбогенераторов с $P_{\text{ном}} > 150$ МВт требует дальнейшей интенсификации охлаждения. При этом идут по пути увеличения давления водорода в корпусе до 3...5 атм. При дальнейшем увеличении мощности ($P_{\text{ном}} \geq 300$ МВт) необходимо перейти к наиболее эффективному способу отвода тепла – к *внутреннему* охлаждению проводников обмоток *водородом* или *водой*. Для этой цели применяются *полые* проводники (рис. 4.22) или в случае охлаждения водородом также проводники *с боковыми вырезами* для образования вентиляционных каналов (рис. 4.27).

Выше указаны номинальные мощности турбогенераторов, при которых необходимо переходить к более интенсивным способам охлаждения, так как в противном случае достижение этих мощностей при наибольших, допустимых размерах машины невозможно. Непосредственное охлаждение обмоток водой применяется также в мощных гидрогенераторах.

5. Системы возбуждения синхронных машин

5.1. Проблема регулирования возбуждения синхронных машин и требования к системам возбуждения

Система возбуждения синхронной машины состоит из возбудителя и системы регулирования тока возбуждения I_B , замыкающегося в обмотке возбуждения (ОВ) синхронной машины и в обмотках возбудителя (рис. 5.1). Система возбуждения синхронной машины предназначена для питания её ОВ постоянным током I_B и регулирования значения этого тока.

К системам возбуждения предъявляются следующие основные требования: 1) высокая надежность в работе и 2) возможно большая простота и малая стоимость. Кроме того, *необходимость регулирования напряжения и обеспечения устойчивой работы синхронных машин* (Работа № 3, с. 154) налагает на системы возбуждения ряд дополнительных требований [2].

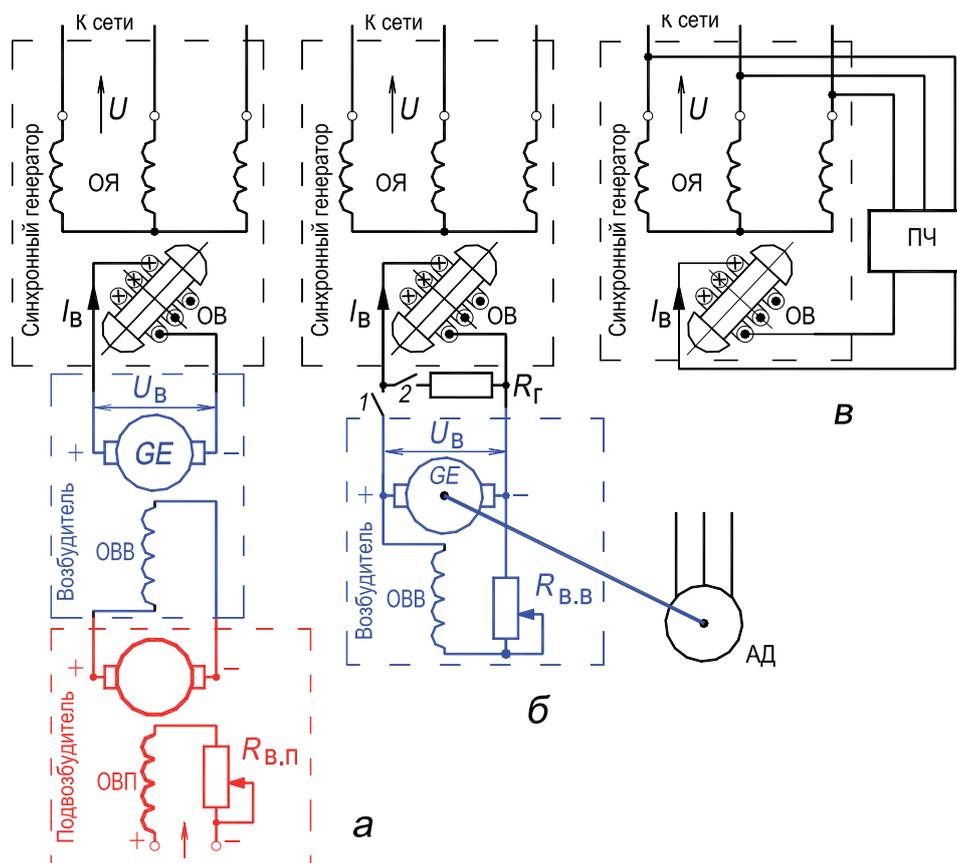


Рис. 5.1. Схемы возбуждения синхронных машин:

- а* – схема возбуждения с возбудителем и подвозбудителем постоянного тока, находящимися на общем валу с генератором;
- б* – схема возбуждения с устройством гашения поля;
- в* – схема самовозбуждения со статическим преобразователем \sim тока в постоянный

Для поддержания постоянства напряжения U на зажимах генератора при изменении нагрузки необходимо регулировать I_B и соответственно U_B в широких пределах. Согласно ГОСТ 533–2000 минимальное устойчивое значение напряжения возбуждения U_B турбогенератора должно быть не больше $0,2U_{B,ном}$.

5.2. Проблема автоматического регулирования возбуждения

Мощные синхронные генераторы, а во многих случаях и генераторы небольшой мощности снабжаются автоматическими регуляторами тока возбуждения, целью которых является: 1) поддержание постоянства напряжения U при изменениях нагрузки и 2) повышение *статической* и *динамической* устойчивости генератора (см. Работа № 3, разд. 3.1.4.1,б, с.172 и Прил. 10, с. 188). Вторая задача особенно важна для мощных генераторов, и при этом к системам и регуляторам возбуждения предъявляются повышенные требования.

При *медленных* изменениях напряжения U для поддержания $U - U_{ном} = const$ достаточно осуществлять так называемое пропорциональное регулирование, когда регулятор возбуждения или напряжения реагирует на изменение U , т. е. на величину $\Delta U = U - U_{ном}$, и в зависимости от значения и знака ΔU оказывает воздействие на орган, изменяющий соответствующим образом ток I_B . Например, для маломощных генераторов применяются угольные регуляторы напряжения, которые состоят из столбика угольных или графитовых дисков, пружины, сжимающей этот столбик, и электромагнита. Угольный столбик заменяет реостат возбуждения $R_{в.в}$ в схеме рис. 5.1,б, а катушка электромагнита присоединяется к зажимам генератора. При увеличении U электромагнит ослабляет давление пружины, сила сжатия столбика уменьшается, его сопротивление в результате этого увеличивается и I_B уменьшается. При уменьшении U действие происходит в обратном порядке.

Однако при *быстрых* изменениях U , как это имеет место при переходных процессах, и для увеличения устойчивости такое регулирование малоэффективно вследствие механической инерции подобного регулятора, имеющего подвижные части, и электромагнитной инерции цепи возбуждения обладающей большой индуктивностью. Во избежание этого для мощных ге-

нераторов применяют статические электромагнитные регуляторы, состоящие из элементов (электронные усилители и пр.), которые не имеют подвижных частей.

Автоматическими регуляторами возбуждения целесообразно снабжать также синхронные двигатели. Действие их при понижениях напряжения способствует поддержанию постоянства напряжения сети и повышает устойчивость работы двигателей.

5.3. Верхний предел (потолок) напряжения возбуждения

При коротких замыканиях в сети напряжение на зажимах генераторов U резко падает, развиваемая ими мощность поэтому также резко снижается, и так как мощности турбин (приводных двигателей) остаются неизменными, возникает опасность *выпадения генераторов из синхронизма* (термин 26, с. 16).

В этих случаях для поддержания U на возможно более высоком уровне и предотвращения выпадения генераторов из синхронизма (см. Работа № 3, разд. 3.1.4.1, с. 167 и Прил. 10.1, с. 188) применяется так называемая *форсировка возбуждения*, т. е. напряжение возбуждения U_B по возможности быстро поднимается до максимально возможного значения $U_{B,m}$.

В схеме возбуждения, представленной на рис. 5.1,б, это достигается тем, что специальное реле, реагирующее на резкое уменьшение напряжения, своими контактами шунтирует реостат возбуждения $R_{B,B}$ (на рисунке это реле не показано).

Чтобы форсировка возбуждения была эффективной, верхний предел (потолок) напряжения возбуждения $U_{B,m}$ должен быть достаточно большим. Согласно ГОСТ ИЕС 60034-3-2015 и ГОСТ 5616–89 требуется, чтобы у турбогенераторов $k_{B,m} = U_{B,m}/U_{B,НОМ} \geq 2$ и у гидрогенераторов $k_{B,m} = U_{B,m}/U_{B,НОМ} \geq 1,8$.

5.4. Скорость нарастания напряжения возбуждения

При форсировке возбуждения напряжение U_B должно возрастать по возможности быстро. Согласно ГОСТ ИЕС 60034-3-2015 и ГОСТ 5616–89 для турбогенераторов скорость нарастания напряжения возбуждения при его форсировке должна быть не менее $2U_{B,НОМ}$ в секунду, а для гидрогенераторов – не менее $1,5U_{B,НОМ}$ в секунду.

5.5. Гашение магнитного поля и переходные процессы в цепях индуктора

При *внутренних* коротких замыканиях в обмотке якоря синхронного генератора или на его выводах, автоматическая релейная защита с помощью выключателя отключает генератор от сети. Но короткое замыкание *внутри* генератора этим не устраняется, ток возбуждения I_B продолжает индуцировать ЭДС в обмотке якоря, и в ней продолжают течь большие токи короткого замыкания, которые вызывают сначала расплавление меди обмотки якоря в месте короткого замыкания, а затем также расплавление стали сердечника якоря. Поэтому во избежание больших повреждений генератора необходимо быстро довести ток возбуждения и поток генератора до нуля. Такая операция называется *гашением магнитного поля*.

Гашение поля возможно путем разрыва цепи возбуждения генератора с помощью, например, контактов I (рис. 5.1,б). Однако это недопустимо, так как при этом, во-первых, вследствие чрезвычайно быстрого уменьшения магнитного потока в обмотках генератора индуцируются весьма большие ЭДС, способные вызвать пробой изоляции. Особенно это относится к самой обмотке возбуждения и к ее контактными кольцам, так как номинальное напряжение цепи возбуждения относительно мало (24...400 В). Во-вторых, в магнитном поле генератора запасена значительная энергия, которая при разрыве цепи возбуждения гасится в дуге выключателя между контактами I , в результате чего этот выключатель может быстро прийти в негодность.

Разрыв цепи возбуждения возбудителя также недопустим в отношении возникающих при этом перенапряжений в обмотке возбуждения возбудителя. Кроме того, он не дает желательных результатов, так как обмотка возбуждения генератора ОВ оказывается замкнутой через якорь возбудителя и ввиду большой индуктивности и небольшого активного сопротивления этой цепи ток I_B будет затухать медленно, с постоянной времени 2...10 с. При этих условиях повреждения генератора при внутренних коротких замыканиях оказываются большими.

В связи с изложенным проблему гашения поля решают компромиссным образом – путем уменьшения тока I_B с такой скоростью, чтобы возникающие перенапряжения были в допустимых пределах, а внутренние повреждения генератора были минимальны.

Для этой цели разработаны соответствующие схемы и аппараты гашения поля. Одна из широко применяемых схем гашения поля изображена на рис. 5.1,б. В этой схеме при нормальной работе контакты 1 замкнуты, а контакты 2 разомкнуты. При коротком замыкании внутри генератора релейная защита подает команду на замыкание контактов 2 и отключение контактов 1. Цепь обмотки ОВ остается замкнутой через сопротивление R_{Γ} гашения поля, значение которого обычно в 3...5 раз больше сопротивления самой обмотки ОВ генератора. При этом ток $I_{\text{в}}$ затухает с определенной скоростью, которая тем больше, чем больше R_{Γ} . Контакты 1 и в данном случае работают в довольно тяжелых условиях, так как на них возникает сильная дуга. Гашение поля при аварийных режимах обеспечивается автоматом гашения поля за 0,8...1,5 с.

5.6. Схемы возбуждения синхронных генераторов

На рис. 5.1,а представлена наиболее распространенная *прямая* схема с электромашинными возбудителями. В прямых системах возбуждения якорь возбудителя GE жестко соединен с валом синхронной машины. К обмотке возбуждения ОВ синхронного генератора постоянный ток $I_{\text{в}}$ через контактные кольца подается с якоря возбудителя GE (контактные кольца на рис. 5.1 не показаны). Обмотка возбуждения возбудителя ОВВ питается от якоря *подвозбудителя*. Управление током $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения ОВ синхронного генератора осуществляется резистором $R_{\text{в.п.}}$, включенным в цепь обмотки возбуждения подвозбудителя ОВП.

Возбудитель и *подвозбудитель* (термины 11 и 12, с. 14) – генераторы постоянного тока [5]. Их якоря соединены муфтами с ротором синхронного генератора. Мощность обмотки возбуждения генераторов постоянного тока составляет 0,2...5 % мощности генератора. Поэтому мощность управления в каскадной схеме из двух генераторов постоянного тока – возбудитель и подвозбудитель (рис. 5.1,а) – составляет несколько процентов мощности возбуждения синхронного генератора. Коэффициент усиления схемы равен произведению коэффициентов усиления по мощности двух генераторов постоянного тока ($10^2 \dots 10^3$).

Предельная мощность генератора постоянного тока с частотой вращения 3000 об/мин составляет примерно 600 кВт. Поэтому генераторы постоянного тока в качестве возбудителей могут применяться в турбогенераторах

мощностью 100...150 МВт. Генераторы постоянного тока в качестве возбудителей находят широкое применение в синхронных двигателях и синхронных генераторах автономных энергетических систем.

На рис. 5.1,б дана схема *косвенного* возбуждения с возбудителем – генератором постоянного тока с параллельным возбуждением [5, с. 24,сл.]. В косвенных системах возбуждения якорь возбудителя *GE* приводится во вращение асинхронным АД или синхронным двигателем, которые подсоединяются к сети переменного тока, не зависящей от напряжения синхронного генератора.

Прямые системы более надежны, так как при аварийных ситуациях в энергосистеме ротор возбудителя продолжает вращаться вместе с ротором синхронной машины и обмотка возбуждения не обесточивается.

Наибольшее распространение получили схемы возбуждения со статическими преобразователями ПЧ переменного тока в постоянный (рис. 5.1,в). В 50-х годах XX века для возбуждения гидрогенераторов применялась схема возбуждения с ртутными выпрямителями, а в настоящее время широкое применение находят тиристорные схемы возбуждения. Тиристорные схемы возбуждения могут быть контактными и бесконтактными. В контактных схемах через кольца ток возбуждения от тиристорного преобразователя подается на обмотку возбуждения. При этом переменный ток на тиристорный преобразователь подается или от электромашинного возбудителя, или от сети.

В крупных турбогенераторах в качестве электромашинного источника электрической энергии используется индукторный высокочастотный генератор. Ротор индукторного генератора жестко связан с ротором турбогенератора. На роторе индукторного генератора нет обмоток, а обмотки якоря расположены на статоре. Принцип действия и устройство индукторного генератора рассмотрены в Работе № 1, Прил. 8.2, с. 108,сл. Используются и другие модификации систем возбуждения [1, 2].

6. Номинальные величины и устройство исследуемой синхронной машины

Краткое описание устройства исследуемой машины. Активная часть синхронной машины состоит из статора и ротора. Статор содержит сердечник, набранный из пластин электротехнической стали. В его пазах расположена трехфазная распределенная четырехполюсная обмотка ($p = 2$), которая соединена по схеме “треугольник”. Сердечник статора с трехфазной обмоткой составляют якорь синхронной машины.

Ротор явнополюсный. На полюсах расположены катушки сосредоточенной обмотки возбуждения, демпферной обмотки нет. Ротор с обмоткой возбуждения составляют индуктор синхронной машины.

Обмотка возбуждения питается постоянным током через систему “контактные кольца – щетки” от электромашинного возбудителя. В качестве возбудителя используется генератор постоянного тока параллельного возбуждения [5, с. 24, сл.], расположенный на корпусе синхронной машины.

Полезная мощность, на которую рассчитана синхронная машина, называется *номинальной*. Все другие величины, которые характеризуют работу машины при этой мощности, также называются номинальными. Основные номинальные величины указываются в паспортной табличке (на щитке), прикрепленной к корпусу машины. Принято, что для синхронного двигателя номинальная мощность является полезной мощностью на его валу, а для генератора – электрической мощностью, отдаваемой с выходных зажимов обмотки якоря.

6.1. Номинальные величины синхронной машины

(исследуется в качестве генератора или двигателя)

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	4,5	кВ·А
Напряжение	$U_{\text{л.ном}} = U_{\text{ф.ном}}$	$230/\sqrt{3}$	В
Линейный ток обмотки якоря	$I_{\text{л.ном}}$	19,4	А
Фазный ток обмотки якоря	$I_{\text{ф.ном}}$	11,2	А

Продолжение разд. 6.1			
Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,8	–
Коэффициент полезного действия	η	80	%
Частота	f	50	Гц
Частота вращения индуктора	n	1500	об/мин

Активное сопротивление фазы обмотки якоря $R_a = 1$ Ом.

6.2. Номинальные величины электромашиного возбуждителя синхронной машины

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$P_{\text{ном}}$	246	Вт
Напряжение возбуждения	U_B	22	В
Ток возбуждения	I_B	11,2	А
Частота вращения якоря	n	1500	об/мин

6.3. Номинальные величины машины постоянного тока

(используется в качестве приводного двигателя или нагрузочного генератора в процессе исследования синхронной машины)

Наименование	Обозначение	Численное значение		Единица измерения
		первый стенд	второй и третий стенды	
Мощность	$P_{\text{ном}}$	6,8	4,2	кВт
Напряжение	$U_{\text{ном}}$	115	110	В
Ток обмотки якоря	$I_{a.\text{ном}}$	59	45,8	А
Частота вращения якоря	n	1460	1400	об/мин

7. Система относительных единиц

В теории электрических машин для упрощения расчетов и сравнения свойств различных машин широко используется система относительных единиц (СОЕ). В СОЕ величины в именованных единицах (ампер, вольт и др.) выражают в долях от одноименных физических величин, называемых базисными величинами. В таблице приведены численные значения базисных величин соответствующих синхронным машинам, исследуемым в лабораторном цикле (трехфазная обмотка якоря соединена по схеме “треугольник”).

Таблица 7.1. Базисные величины в теории синхронных машин

Наименование	Обозначение	Расчетная формула	Численное значение	Единица измерения
Напряжение	U_6	$U_6 = U_{\phi, \text{НОМ}}$	$230/\sqrt{3}=133$	В
Ток в обмотке якоря	I_6	$I_6 = I_{\phi, \text{НОМ}} = I_{\text{Л.НОМ}}/\sqrt{3}$	$19,4/\sqrt{3}=11,2$	А
Мощность	S_6	$S_6 = 3U_6 I_6$	4468,8	В·А
Сопротивление	Z_6	$Z_6 = U_6 / I_6$	11,87	Ом
Ток в обмотке возбуждения	$I_{в.6}$	$I_{в.6} = I_{в.0}$	5,7	А
Частота вращения якоря	n_6	$n_6 = n_{\text{НОМ}} = 60f_1/p$	1500	об/мин
Момент	M_6	$M_6 = 9,55S_6/n_6$	28,45	Н·м

Примечание.

1. В Прил. 1 (с. 278) приведена Pascal-программа “Расчет экспериментальных значений величин в системе относительных единиц”;

2. За базисный ток возбуждения принят ток $I_{в.6} = I_{в.0}$, при котором, при $n = n_{\text{НОМ}} = 1500$ об/мин и холостом ходе, в обмотке якоря генератора индуцируется номинальное (базисное) напряжение U_6 (см. Работа №1, разд. 4.2, п. 5, с. 94).

Ток в относительных единицах (о. е.) выразится отношением $I_a^* = I_a / I_6$, напряжение $U^* = U / U_6$, электродвижущая сила $E_0^* = E_0 / U_6$ и т. д. (относительная величина отмечается звездочкой “*”).

8. РАБОТА № 1

ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО НА АВТОНОМНУЮ СЕТЬ

Оглавление

1. Цель работы	66
2. Программа работы	66
3. Основы теории	67
3.1. Магнитное поле при установившемся режиме и реакция якоря синхронной машины	67
3.1.1 Определение понятия “реакция якоря”	67
3.1.2. Магнитная несимметрия индуктора явнополюсной синхронной машины	71
3.1.3. Электрическая несимметрия индуктора синхронной машины	72
3.1.4. Существо метода двух реакций	72
3.1.5. Влияние реакции якоря при активной нагрузке (R)	72
3.1.6. Влияние реакции якоря при индуктивной нагрузке (L) ...	73
3.1.7. Влияние реакции якоря при емкостной нагрузке (C)	74
3.1.8. Влияние реакции якоря при активно-индуктивной нагрузке ($R-L$)	75
3.2. Векторные диаграммы напряжений синхронных генераторов при симметричной нагрузке	78
3.2.1. Явнополюсная машина	79
3.2.2. Неявнополюсная машина	81
3.3. Характеристики синхронного генератора, работающего на автономную сеть	82
3.3.1. Классификация характеристик	82
3.3.2. Характеристика холостого хода	83
3.3.3. Нагрузочная индукционная характеристика	84
3.3.4. Внешняя характеристика	85
3.3.5. Регулировочная характеристика	86
3.3.6. Характеристика короткого замыкания	87
3.3.7. Отношение короткого замыкания (о. к. з.)	89

3.3.8. Построение треугольника Потье. Реактивное сопротивление Потье	90
3.3.9. Векторная диаграмма э. м. д. с. (диаграмма Потье)	92
4. Экспериментальное исследование	94
4.1. Пуск приводного двигателя	94
4.2. Характеристика холостого хода	94
4.3. Нагрузочная индукционная характеристика	95
4.4. Внешние характеристики	98
4.4.1. Внешняя характеристика для <i>понижения</i> напряжения ($\cos \varphi = 1$)	98
4.4.2. Внешняя характеристика для <i>повышения</i> напряжения ($\cos \varphi = 1$)	98
4.4.3. Внешняя характеристика для <i>понижения / повышения</i> напряжения ($\cos \varphi = 0,7$)	99
4.5. Регулировочные характеристики	100
4.5.1. Регулировочная характеристика при $\cos \varphi = 1$	100
4.5.2. Регулировочная характеристика при $\cos \varphi = 0,7$	101
4.6. Опыты короткого замыкания	101
4.6.1. Характеристики короткого замыкания	101
4.6.2. Отношение короткого замыкания (о. к. з.)	103
5. Содержание и оформление отчета	105
6. Контрольные вопросы	106
Приложение 8.	
П8.1. Синхронный тахогенератор	107
П8.2. Индукторные генераторы повышенной частоты	108

Перечень рисунков в 8-м разделе

Рис. 8.1, лист 1. Синхронный генератор в режиме х. х. (а); реакция якоря СГ при активной нагрузке (б)	68
Рис. 8.1, лист 2. Реакция якоря СГ: при индуктивной нагрузке (а); при емкостной нагрузке (б)	69
Рис. 8.1, лист 3. Реакция якоря СГ при активно-индуктивной нагрузке	70
Рис. 8.2. Векторная диаграмма напряжений синхронного генератора: явнополюсного (а), неявнополюсного (б)	80
Рис. 8.3. Характеристики синхронного генератора: холостого хода, нагрузочная индукционная, установившегося трехфазного к. з.	83

Рис. 8.4. Характеристики синхронного генератора: внешние (<i>a</i>), регулировочные (<i>b</i>) .	84
Рис. 8.5. Характеристики установившегося короткого замыкания синхронного генератора (<i>a</i>); векторная диаграмма при установившемся трехфазном коротком замыкании генератора (<i>b</i>)	88
Рис. 8.6. Построение треугольника Потье	91
Рис. 8.7. Построение векторной диаграммы э. м. д. с. (диаграмма Потье)	92
Рис. 8.8. Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	96
Рис. 8.9. Схема лабораторной установки для исследования синхронного генератора при автономной работе	97
Рис. 8.10. Схема лабораторной установки для проведения опыта установившегося короткого замыкания синхронного генератора: трехфазного (<i>a</i>), двухфазного (<i>b</i>), однофазного (<i>в</i>)	102
Рис. П8.1. Принцип устройства индукторного синхронного генератора	109
Рис. П8.2. Электромагнитная схема индукторного генератора при частотах 3 000 Гц и более	110
Рис. П8.3. Высокочастотный трехфазный индукторный синхронный возбудитель; мощность 2,7 МВ·А	111
Рис. П8.4. Ротор высокочастотного трехфазного индукторного синхронного генератора – возбудителя	112
Рис. П8.5. Лобовые части обмоток статора и ротор индукторного синхронного возбудителя	112
Рис. П8.6. Высокочастотный трехфазный индукторный синхронный возбудитель. Мощность 2,7 МВ·А. Слева показан подвозбудитель	113
Рис. П8.7. Высокочастотный трехфазный индукторный синхронный возбудитель типа ВГТ-2500-500	113

Перечень таблиц в 8-м разделе

Табл. 8.1. Классификация характеристик синхронного генератора	82
Табл. 8.2. Нормальные характеристики холостого хода	84
Табл. 8.3. Измерение и расчёт характеристики холостого хода	95
Табл. 8.4. Измерение и расчёт нагрузочной индукционной характеристики	95
Табл. 8.5а. Измерение и расчёт внешней характеристики ($\cos \varphi = 1$)	99
Табл. 8.5б. Измерение и расчёт внешней характеристики ($\cos \varphi = 0,7$)	100
Табл. 8.6. Измерение и расчёт регулировочной характеристики	101
Табл. 8.7. Измерение и расчёт характеристик короткого замыкания	103
Табл. 8.8. Значение отношения короткого замыкания (о. к. з.)	104

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством, принципом действия и основами теории синхронного генератора, оценить влияние характера *автономной* нагрузки на характеристики генератора, овладеть методикой графо-аналитического исследования характеристик синхронного генератора.

2. Программа работы

2.1. Ознакомиться с устройством синхронного генератора (СГ).

2.2. Собрать на лабораторном стенде схему испытаний СГ и при отключенной нагрузке снять характеристику холостого хода

$$E_0 = f(I_B) \text{ при } n = n_{\text{ном.}}$$

2.3. Снять нагрузочную индукционную характеристику

$$U = f(I_B) \text{ при } I_a = I_{a.\text{ном}}, \cos \varphi \approx 0 \text{ (нагрузка практически индуктивная).}$$

2.4. Провести опыты и получить данные для построения внешних характеристик $U = f(I_a)$ при токе возбуждения $I_B = \text{const}$, $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,7$ для режимов *повышения* и *понижения* напряжения.

2.5. Снять регулировочные характеристики $I_B = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, $\cos \varphi \approx 1$ и $\cos \varphi \approx 0,7$.

2.6. Провести опыты одно-, двух- и трехфазного установившегося короткого замыкания и получить данные для построения характеристик.

2.7. По данным опытов (пп. 2.2...2.6) построить характеристики генератора в относительных единицах (см. разд. 7, с. 62).

2.8. На основании характеристик холостого хода, индукционной нагрузочной и трехфазного короткого замыкания построить треугольник Потье, определить величину индуктивного сопротивления рассеяния $X_{\sigma a}$ и МДС продольной реакции якоря F_{ad} .

2.9. Построить в относительных единицах векторную диаграмму Потье (диаграмма э. м. д. с.) для тока якоря $I_a = I_{a.\text{ном}}$ и $\cos \varphi \approx 0,7$. Пользуясь ею определить величину повышения напряжения при сбросе нагрузки и сравнить ее с экспериментальным значением, полученным при снятии внешней характеристики.

2.10. Определить отношение короткого замыкания (о. к. з.) синхронного генератора при его *ненасыщенном* и *насыщенном* состоянии.

3. Основы теории

3.1. Магнитное поле при установившемся режиме и реакция якоря синхронной машины

3.1.1. Определение понятия “реакция якоря”

При холостом ходе синхронной машины в обмотке возбуждения протекает постоянный ток I_B (обмотка подключена к возбудителю) и создается поле возбуждения Φ_B . Поле неподвижно относительно индуктора (ротора), так как он является, по существу, электромагнитом постоянного тока. При вращении индуктора приводным двигателем со скоростью n поле возбуждения пересекает с этой же скоростью проводники трехфазной обмотки якоря (статора) и индуцирует в ней трехфазную ЭДС e_0 . Для наглядности на рис. 8.1, лист 1,а каждая фаза обмотки изображена в виде одного витка с полным шагом ($A-X$, $B-Y$, $C-Z$), буквами N_B и S_B обозначены полюсы поля возбуждения, а магнитные линии этого поля изображены синим цветом. Очевидно, что при положении индуктора, зафиксированном на рис. 8.1, лист 1,а (момент времени $t_1 = 0$ с), максимальное значение ЭДС будет в активных проводниках фазы $A-X$:

$$e_{0A} = E_{0m} = B_{B.m}lv, \quad (8.1)$$

где l – длина активного проводника; v – постоянная скорость перемещения проводника относительно магнитного поля возбуждения; $B_{B.m}$ – наибольшее значение магнитной индукции поля возбуждения, которое имеет место над полюсами N_B и S_B . Направление ЭДС e_0 в фазах обмотки якоря определяется по правилу правой руки [5, с. 27].

Частота ЭДС e_0 в обмотке якоря $f = p \cdot n$, Гц. Скорость n , соответствующая частоте сети $f = 50$ Гц, называется синхронной (термин 37, с. 18). Величина ЭДС e_0 регулируется током возбуждения I_B , а ее частота – приводным двигателем.

При подключении нагрузки к обмотке якоря трехфазный ток частоты f , протекающий в ней, создает собственное магнитное поле (поле якоря), вращающееся со скоростью $n_1 = f/p = n$, об/с. Таким образом, индуктор, поле

возбуждения и поле якоря вращаются в установившемся режиме работы машины с одной и той же синхронной скоростью n , и, следовательно, взаимно неподвижны.

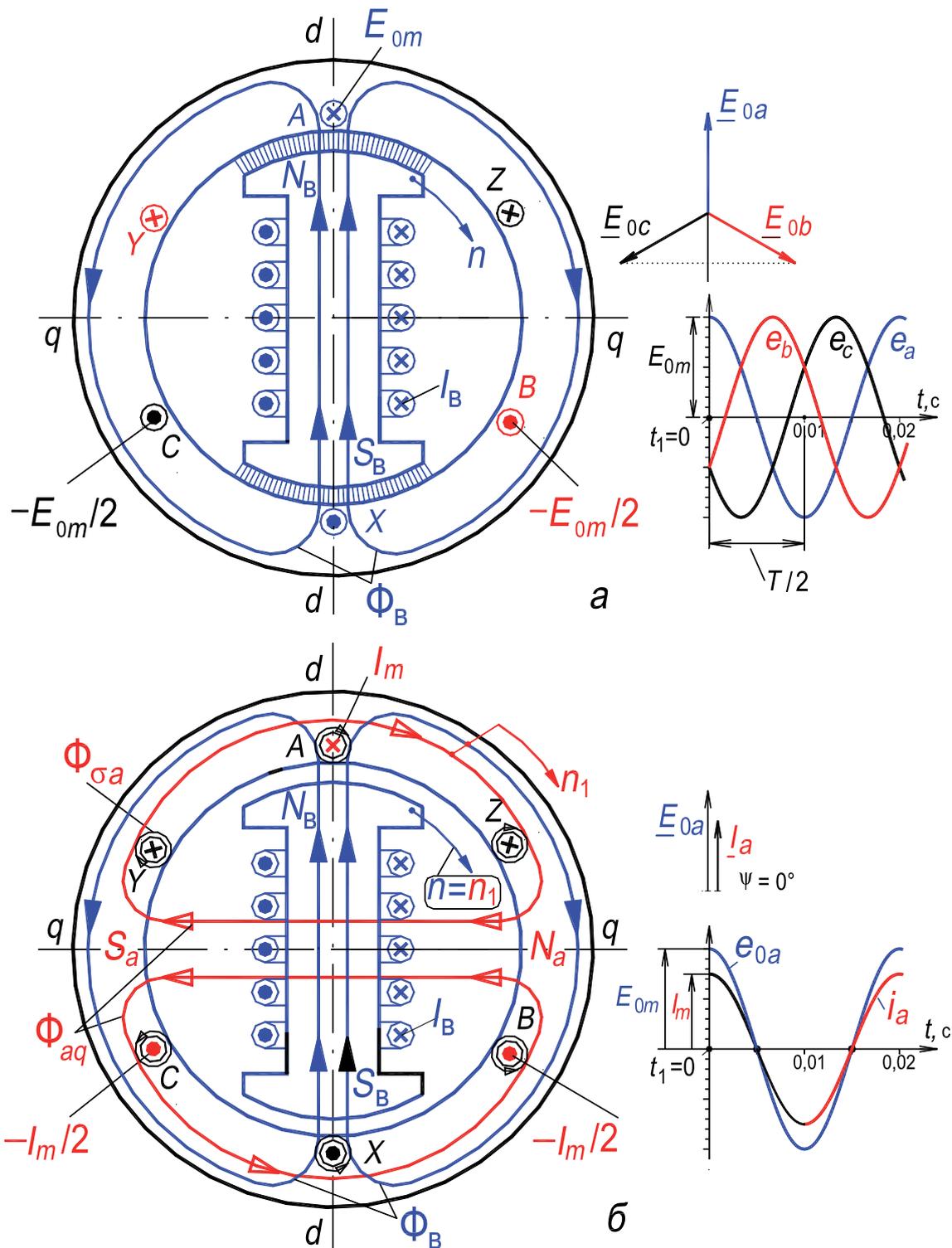


Рис. 8.1, лист 1. Синхронный генератор в режиме х. х. (а) реакция якоря СГ при активной нагрузке (б)

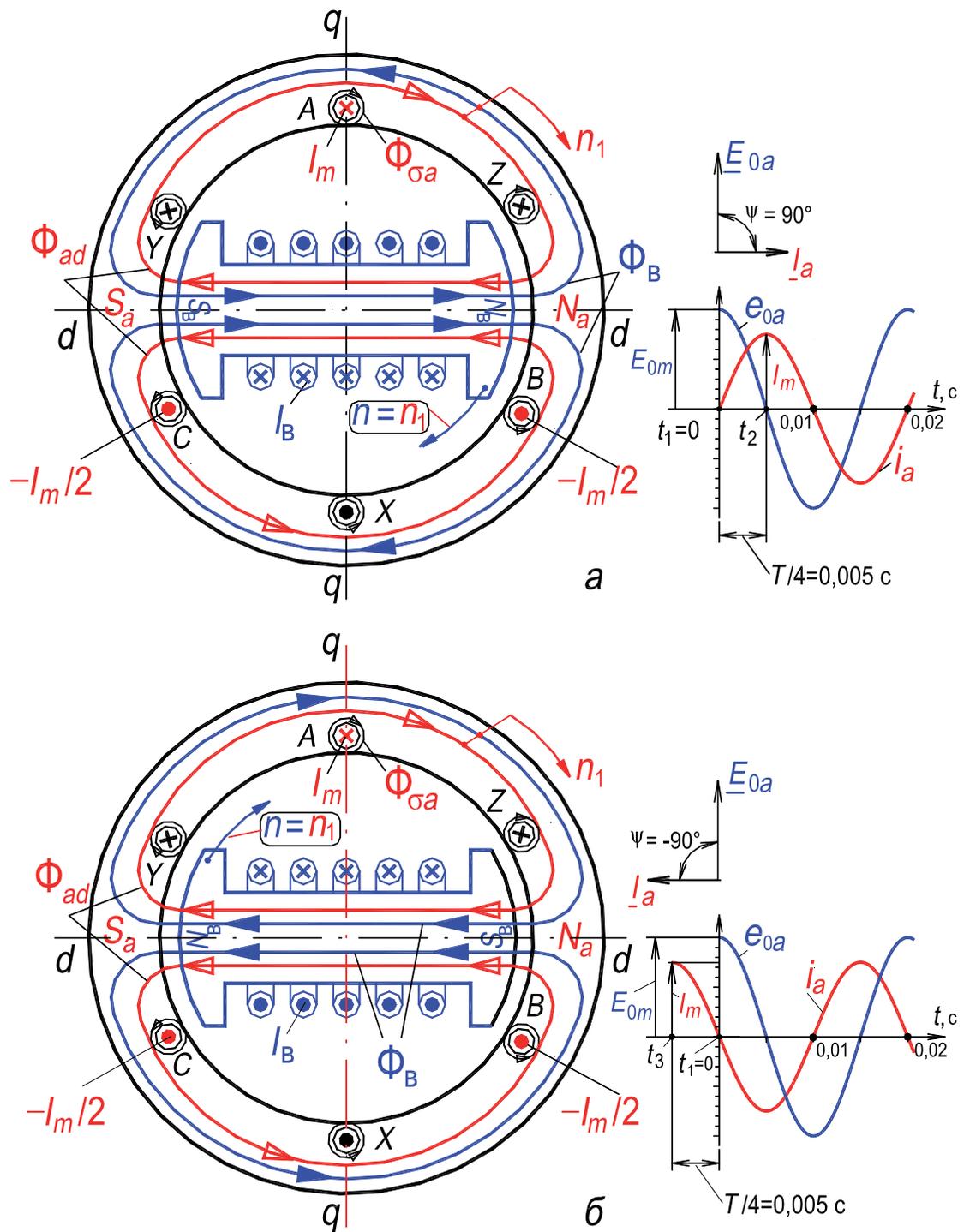


Рис. 8.1, лист 2. Реакция якоря СГ:
 при индуктивной нагрузке (а); при емкостной нагрузке (б)

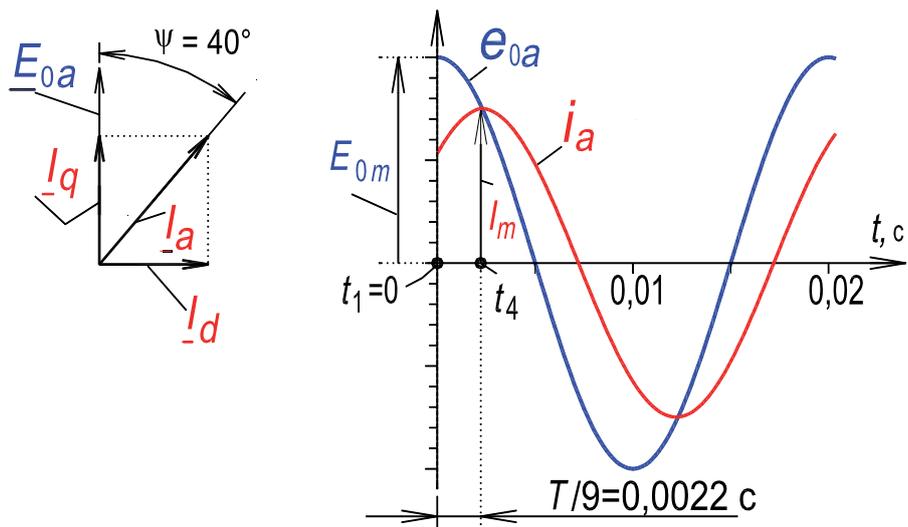
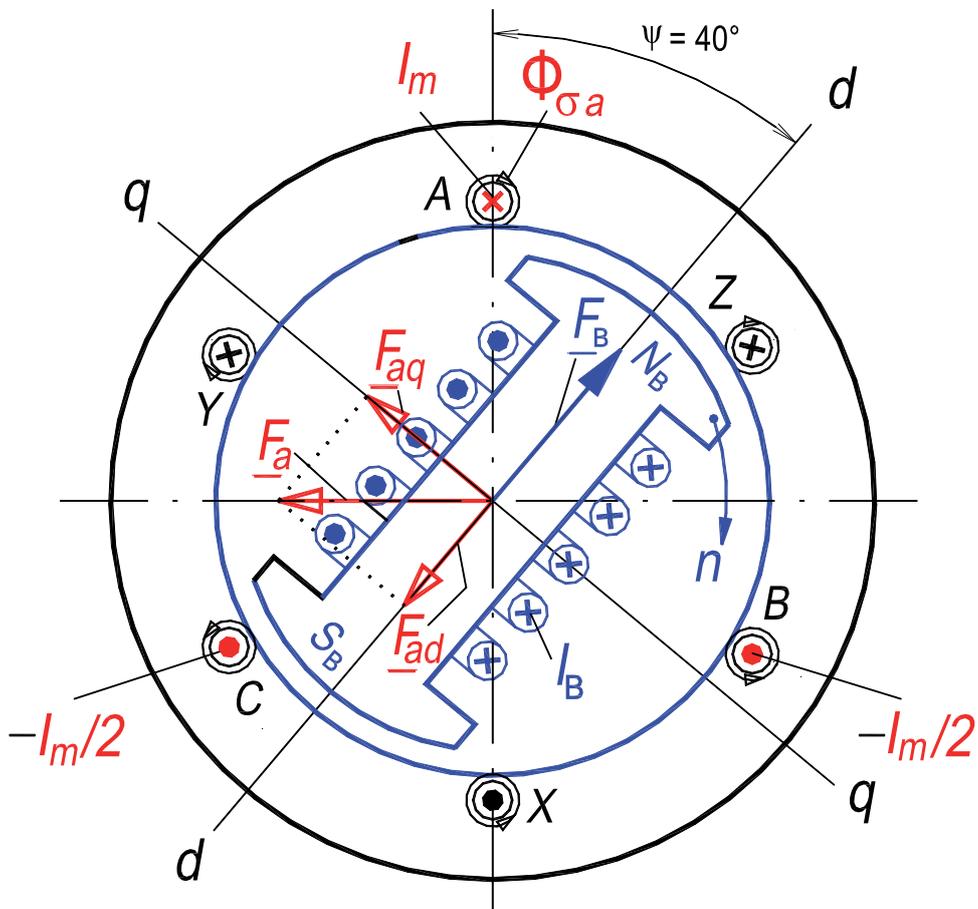


Рис. 8.1, лист 3. Реакция якоря СГ при активно-индуктивной нагрузке

В зависимости от характера нагрузки (R , $R-L$, $R-C$), подключенной к обмотке якоря, поле якоря по-разному будет влиять на поле возбуждения. Влияние поля якоря на поле возбуждения называется *реакцией якоря* (термин 17, с. 15).

Необходимо подчеркнуть, что реально в синхронной машине при нагрузке существует *единое результирующее магнитное поле*, которое создается совместным действием магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и якоря, причем величина этого поля зависит также от насыщения магнитопровода. Раздельное рассмотрение поля возбуждения и поля якоря возможно только при ненасыщенном магнитопроводе. Магнитопровод синхронной машины находится в состоянии насыщения, соответствующего “колону” кривой намагничивания. Однако для наглядности и удобства представления и анализа будем рассматривать эти поля отдельно.

Реакция якоря синхронной машины оказывает значительное влияние на характеристики и поведение синхронной машины как при установившихся, так и при переходных режимах работы [1, 2].

3.1.2. Магнитная несимметрия индуктора явнополюсной синхронной машины

Индуктор явнополюсной машины имеет *магнитную несимметрию*, так как из-за большого междуполюсного пространства магнитное сопротивление $R_{\text{мг.}q}$ потоку, действующему по направлению поперечной оси q , т. е. по оси междуполюсного пространства, значительно больше магнитного сопротивления $R_{\text{мг.}d}$ потоку, действующему по продольной оси d , $R_{\text{мг.}d} < R_{\text{мг.}q}$ (см. рис. 4.2,а, с. 29). Ось d совпадает с осью катушек обмотки возбуждения. Поэтому неизменная по значению МДС F_a обмотки якоря при ее действии по продольной оси d создает большой магнитный поток Φ_{ad} (см. рис. 8.1, лист 2), а при действии по поперечной оси q – меньший магнитный поток Φ_{aq} (рис. 8.1, лист 1,б), т. е. $\Phi_{ad} > \Phi_{aq}$. Отметим, что воображаемые оси d и q жестко связаны с ротором, неподвижны относительно него и вращаются с той же скоростью, что и ротор. Количество пар этих осей равно числу пар полюсов p .

Очевидно, что в неявнополюсной машине $R_{\text{мг.}d} \approx R_{\text{мг.}q}$, так как немагнитные зазоры δ_d и δ_q между статором и ротором по осям d и q практически равны (рис. 4.2,б, с. 29).

3.1.3. Электрическая несимметрия индуктора синхронной машины

Роторы как явнополюсной, так и неявнополюсной машины имеют также электрическую несимметрию, так как их обмотки возбуждения расположены только по продольной оси d , т. е. создают поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$, действующий только по оси d , и сами сцепляются только с потоком якоря Φ_{ad} , действующим по этой же оси (рис. 8.1, листы 2 и 3). Электрическая несимметрия индукторов синхронных машин существенным образом проявляется при несимметричных и переходных режимах их работы.

3.1.4. Существо метода двух реакций

Ввиду несимметричного устройства индуктора возникает необходимость рассматривать действие реакции якоря по продольной d и поперечной q осям в отдельности. Метод такого рассмотрения впервые был предложен французским электротехником А. Блонделем в 1895 г. и называется *методом* или *теорией двух реакций*. Этот метод, главным образом применительно к переходным процессам синхронной машины, был впоследствии значительно развит в трудах американских и отечественных ученых.

Метод двух реакций основан на принципе наложения, при котором предполагается, что магнитные потоки, действующие по поперечной оси q , не влияют на значение потоков, действующих по продольной оси d , и наоборот. Вследствие определенного насыщения участков магнитной цепи это предположение не вполне правильно. Однако учет влияния насыщения сложен [6, 7], а определенные коррективы могут быть внесены дополнительно.

Далее рассмотрим влияние реакции якоря при установившейся симметричной нагрузке различного характера, подключенной к обмотке якоря. Предположим, для удобства анализа, что нагрузка чисто активная (R), индуктивная (L) или емкостная (C). Затем рассмотрим влияние реакции якоря при реальной смешанной активно-индуктивной нагрузкой ($R-L$), которая наиболее часто встречается на практике.

3.1.5. Влияние реакции якоря при активной нагрузке (R)

Для наглядности анализируем двухполюсную трехфазную синхронную машину, $p = 1$, (рис. 8.1, лист 1,б) и считаем, что она работает в режиме генератора. Получаемые результаты нетрудно распространить также на двигательный режим работы.

Так как к обмотке якоря подключена активная R -нагрузка, то ток и ЭДС в обмотке якоря совпадают по фазе ($\psi = 0^\circ$) и, следовательно, в момент времени $t_1 = 0$ с, ток в фазе $A-X$, также как и ЭДС, максимален, $i_{aA} = I_m$. Поэтому знаками “ \times ” и “ \cdot ” в фазах обмотки якоря на рис. 8.1, лист 1,б показано направление не только ЭДС e_0 , но и тока i_a . В соответствии с направлением активного тока в фазах обмотки якоря *поле якоря будет действовать по поперечной оси q* . Силовые линии поля якоря Φ_{aq} **изображены линией красного цвета**. Поле возбуждения Φ_B *всегда действует только по оси d* (силовые линии поля возбуждения Φ_B **изображены линией синего цвета**). Как следует из рисунка, при активной R -нагрузке поле якоря (**полюсы N_a и S_a**) и поле возбуждения (полюсы N_B и S_B) смещены на 90 электрических градусов (так как $p = 1$, то 1° эл. = 1° геом.). Таким образом, *при активной нагрузке реакция якоря является поперечной* (термин 19, с. 15).

Поперечная реакция якоря вызывает искажение кривой поля в воздушном зазоре, практически не изменяя его по величине. Кроме того, вращающееся поле Φ_{aq} поперечной реакции якоря индуцирует ЭДС e_{aq} в обмотке якоря.

Такой характер поля реакции якоря при $\psi = 0^\circ$ сохраняется при любом положении вращающегося ротора (а не только при положении, зафиксированном на рис. 8.1, лист 1,б), так как ротор и поле реакции якоря вращаются синхронно.

3.1.6. Влияние реакции якоря при индуктивной нагрузке (L)

Так как к обмотке якоря подключена индуктивная L -нагрузка и активным сопротивлением обмотки пренебрегаем, то ток в обмотке якоря отстает от ЭДС по фазе на угол $\psi = 90^\circ$ и, следовательно, в момент времени $t_1 = 0$ с, ЭДС в фазе $A-X$ максимальна, $e_{0A} = E_{0m}$, а ток в ней равен нулю $i_{aA} = 0$ (рис. 8.1, лист 2,а).

Максимум тока в фазе $A-X$ наступит по сравнению со случаем, представленным на рис. 8.1, лист 1,б, на *четверть периода* ($T = 0,02$ с) *позже*, т. е. через время $t_2 = 0,005$ с. За это время ротор повернется по направлению вращения (синхронная частота вращения $n = 50$ об/с) на *четверть оборота* и займет положение, показанное на рис. 8.1, лист 2,а. В этом нетрудно убедиться на основании решения пропорции:

за 1 с ротор совершает 50 оборотов,

а за 0,005 с – x оборотов.

Откуда $x = 0,25$ об/с.

Токи фаз на рис. 8.1, лист 2,*а* имеют такое же направление, как и на рис. 8.1, лист 1,*б*, вследствие чего и ориентация магнитного потока якоря в пространстве является такой же. Но в этом случае поле якоря Φ_{ad} замыкается уже по продольной оси d (а не по оси q , как при активной R -нагрузке). Таким образом, *при индуктивной нагрузке реакция якоря является продольной* (термин 18, с. 15) *и размагничивающей*, так как поле возбуждения Φ_B (полюсы N_B и S_B) и поле якоря Φ_{ad} (полюсы N_a и S_a) направлены *навстречу* друг другу.

Продольная реакция якоря Φ_{ad} при индуктивной нагрузке уменьшает результирующее поле, обусловленное совместным действием магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и якоря. Кроме того, вращающееся поле Φ_{ad} продольной реакции якоря индуцирует ЭДС e_{ad} в обмотке якоря.

Такой характер поля реакции якоря при $\psi = 90^\circ$ сохраняется при любом положении вращающегося ротора (а не только при положении, зафиксированном на рис. 8.1, лист 2,*а*), так как ротор и поле реакции якоря вращаются синхронно.

3.1.7. Влияние реакции якоря при емкостной нагрузке (C)

Так как к обмотке якоря подключена емкостная C -нагрузка и активным сопротивлением обмотки пренебрегаем, то ток в обмотке якоря опережает ЭДС по фазе на угол $\psi = -90^\circ$ и, следовательно, в момент времени $t_1 = 0$ с ЭДС в фазе $A-X$ максимальна, $e_{0A} = E_{0m}$, а ток в ней равен нулю, $i_{aA} = 0$ (рис. 8.1, лист 2,*б*).

Максимум тока в фазе $A-X$ имел место по сравнению со случаем, представленным на рис. 8.1, лист 1,*б*, на *четверть периода раньше*, $t_1 - t_2 = -0,005$ с. В этот момент времени (t_3) ротор занимал положение, повернутое против направления его вращения на *четверть оборота* (рис. 8.1, лист 2,*б*).

Токи фаз на рис. 8.1, лист 2,*б* имеют такое же направление, как и на рис. 8.1, лист 1,*б* и на рис. 8.1, лист 2,*а*, вследствие чего и ориентация магнитного потока якоря в пространстве остается без изменений. В этом

случае поле якоря Φ_{ad} замыкается также по продольной оси d (как и при индуктивной L -нагрузке). При емкостной нагрузке реакция якоря является также продольной (как и при индуктивной), но намагничивающей, так как поле возбуждения Φ_B (полюсы N_B и S_B) и поле якоря Φ_{ad} (полюсы S_a и N_a) направлены согласно.

Продольная реакция якоря Φ_{ad} при емкостной нагрузке увеличивает результирующее поле, обусловленное совместным действием магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и якоря. Кроме того, вращающееся поле Φ_{ad} продольной реакции якоря индуцирует ЭДС e_{ad} в обмотке якоря.

Такой характер поля реакции якоря при $\psi = -90^\circ$ сохраняется при любом положении вращающегося ротора (а не только при положении, зафиксированном на рис. 8.1, лист 2,б), так как ротор и поле реакции якоря вращаются синхронно.

3.1.8. Влияние реакции якоря при активно индуктивной нагрузке ($R-L$)

Так как к обмотке якоря подключена активно-индуктивная нагрузка, то ток в обмотке якоря может отставать от ЭДС e_0 по фазе на угол $0 < \psi < +90^\circ$. Конкретное значение угла ψ зависит от соотношения между активной и реактивной составляющими сопротивления нагрузки. Примем для определенности угол $\psi = +40^\circ$. В момент времени $t_1 = 0$ с ЭДС в фазе $A-X$ максимальна, $e_{0A} = E_{0m}$, а мгновенное значение тока i_{aA} в ней меньше максимального (рис. 8.1, лист 3).

Максимум тока в фазе $A-X$ наступит по сравнению со случаем, представленным на рис. 8.1, лист 1,б, на $1/9$ часть периода позже, т. е. через время $t_4 = 0,0022$ с. За это время ротор повернется по направлению вращения на $1/9$ часть оборота и займет положение, показанное на рис. 8.1, лист 3.

Токи фаз на рис. 8.1, лист 3 имеют такое же направление, как и на рис. 8.1, лист 2, вследствие чего и ориентация магнитного потока якоря в пространстве является такой же. Но в этом случае поле якоря Φ_a и создавшая его МДС якоря F_a замыкаются уже не по продольной оси d , а по некоторой радиальной оси, которая расположена между осями d и q .

Очевидно следующее. При изменении активно-индуктивной нагрузки будет изменяться и угол ψ в пределах $0 < \psi < +90^\circ$, а следовательно, и положение ротора. Поэтому при различных значениях угла ψ поле якоря Φ_a и создавшая его МДС якоря F_a будут замыкаться по различным радиальным осям, расположенным между осями d и q . Следовательно, будет изменяться магнитное сопротивление $R_{\text{МГ}}$ полю якоря от минимального значения до максимального, $R_{\text{МГ}.d} < R_{\text{МГ}} < R_{\text{МГ}.q}$. Это создает сложности при анализе явнополюсной синхронной машины, так как в связи с изменением этого сопротивления будут изменяться все электрические и магнитные величины, относящиеся к якорю: магнитное поле якоря; ЭДС, индуцируемая этим полем в обмотке якоря; ток обмотки якоря; индуктивное сопротивление обмотки якоря и др. Для устранения сложностей анализа явнополюсной синхронной машины и разработана теория двух реакций, в соответствии с которой все электрические и магнитные величины относящиеся к якорю, рассматривают в осях d и q (система координат d, q), взаимно смещенных на 90° эл. В связи с этим определяют проекции на оси d и q величин, относящихся к якорю.

На рис. 8.1, лист 3 показаны проекции тока якоря I_a и проекции МДС якоря F_a , которые в общем случае, когда $0 < \psi < +90^\circ$, определяются по выражениям:

$$I_d = I_a \sin \psi; \quad I_q = I_a \cos \psi; \quad (8.2)$$

$$F_{ad} = F_a \sin \psi; \quad F_{aq} = F_a \cos \psi, \quad (8.3)$$

где I_d – продольная составляющая тока или продольный ток якоря, он создает продольную МДС F_{ad} реакции якоря; I_q – поперечная составляющая тока или поперечный ток якоря, он создает поперечную МДС F_{aq} реакции якоря.

Справедливы следующие логические цепочки:

$$I_d \rightarrow F_{ad} \rightarrow \Phi_{ad} \rightarrow \underline{E}_{ad} = -j\underline{I}_d X_{ad}; \quad (8.4)$$

$$I_q \rightarrow F_{aq} \rightarrow \Phi_{aq} \rightarrow \underline{E}_{aq} = -j\underline{I}_q X_{aq}, \quad (8.5)$$

где Φ_{ad} – основное поле обмотки якоря, замыкающееся в теле ротора вдоль оси d , и индуцирующее в этой обмотке ЭДС продольной реакции якоря e_{ad} ;

Φ_{aq} – основное поле обмотки якоря, замыкающееся в теле ротора вдоль оси q , и индуцирующее в этой обмотке ЭДС поперечной реакции якоря e_{aq} ; X_{ad} – продольное индуктивное сопротивление обмотки якоря продольному току I_d ; X_{aq} – поперечное индуктивное сопротивление обмотки якоря поперечному току I_q .

Итак, при активно-индуктивной нагрузке реакция якоря имеет две составляющие: продольную размагничивающую Φ_{ad} , которая уменьшает результирующее поле; поперечную составляющую Φ_{aq} , которая вызывает искажение кривой результирующего поля в воздушном зазоре. Вращающееся поле Φ_{ad} продольной реакции якоря индуцирует ЭДС e_{ad} в обмотке якоря, а вращающееся поле Φ_{aq} поперечной реакции якоря – ЭДС e_{aq} .

Удобство анализа явнополюсной синхронной машины в осях d и q заключается в том, что при любом соотношении между активной и индуктивной составляющими смешанной R – L -нагрузки, составляющие поля якоря Φ_{ad} и Φ_{aq} будут замыкаться в установившемся режиме работы машины по путям с *неизменным* магнитным сопротивлением, соответственно, $R_{\text{мг.}d} = \text{const}$ и $R_{\text{мг.}q} = \text{const}$. Подчеркнем, что $R_{\text{мг.}d} < R_{\text{мг.}q}$, так как различны длины немагнитных зазоров вдоль осей d и q , $\delta_d < \delta_q$ (см. рис. 4.2,*а* и рис. 8.1, лист 3). Следовательно, и все проекции величин, относящихся к обмотке якоря, также будут неизменными.

В явнополюсной синхронной машине $X_{ad} > X_{aq}$. Чем сильнее реакция якоря, тем больше X_{ad} и X_{aq} и тем меньше запас статической устойчивости при работе машины (Работа № 3, разд. 3.1.4.1,*б*, с. 172,сл.). Значения X_{ad} и X_{aq} для современных синхронных машин, выраженные в относительных единицах, приведены в Работе № 2, Прил. 9.1, с. 153.

Величины X_{ad} и X_{aq} обратно пропорциональны величине воздушного зазора вдоль осей d и q . Для ограничения влияния реакции якоря желательно, чтобы значения X_{ad} и X_{aq} не превосходили определенных пределов. Поэтому величину зазора δ в синхронных машинах приходится брать больше, чем это необходимо по механическим условиям.

Необходимо, однако, иметь в виду, что увеличение δ требует усиления обмотки возбуждения, что связано с увеличением расхода обмоточного провода, а в ряде случаев, в связи с затруднениями в размещении обмотки возбуждения, требуется также некоторое увеличение габаритов машины.

Поэтому уменьшение X_{ad} и X_{aq} ведет к удорожанию машины.

Стремление к увеличению мощности машин при заданных габаритах привело к применению более интенсивных способов охлаждения (внутреннее водородное и водяное охлаждение обмоток) и к увеличению линейных нагрузок A в несколько раз [от $A = (5,0 \dots 6,5) \cdot 10^4$ А/м в машинах с воздушным охлаждением до $A = (15 \dots 25) \cdot 10^4$ А/м] (термин 40, с.19). В таких машинах для ограничения величин X_{ad} и X_{aq} необходимо значительно увеличивать δ (см. табл. 4.1, с. 44).

В неявнополюсной синхронной машине зазор по различным радиальным осям практически неизменен (см. рис. 4.2,б, с. 29), поэтому нет необходимости рассматривать электрические и магнитные величины якоря в осях d и q .

3.2. Векторные диаграммы напряжений синхронных генераторов при симметричной нагрузке

Одним из инструментов анализа синхронных машин являются векторные диаграммы. При помощи векторных диаграмм можно определить ток возбуждения (МДС обмотки возбуждения), необходимый для обеспечения заданного режима работы (разд. 3.3.9, с. 92), падение напряжения при нагрузке, повышение напряжения при сбросе нагрузки, а также угол $\theta_{вр}$ между векторами ЭДС E_0 в обмотке статора от поля ротора и напряжения U . Оперировав углом $\theta_{вр}$, проводят анализ параллельной работы синхронных генераторов (Работа № 3, разд. 3.1.4, с. 166).

Далее приводятся векторные диаграммы при симметричной нагрузке трехфазного синхронного генератора; это позволяет рассматривать лишь одну фазу, так как явления во всех фазах аналогичны, но протекают с соответствующим сдвигом во времени.

Распространенным способом отображения векторных диаграмм является их построение в соответствии с уравнениями равновесия напряжений (ЭДС). Это справедливо и для синхронных машин, и для трансформаторов и для асинхронных машин [3, с. 27; 4, с. 116].

3.2.1. Явнополюсная машина

Напряжение фазы обмотки генератора U равно ЭДС E_0 , индуцируемой магнитным потоком возбуждения Φ_B , минус падение напряжения в индуктивных сопротивлениях реакции якоря X_{ad} и X_{aq} , индуктивном сопротивлении рассеяния якоря $X_{\sigma a}$ и в активном сопротивлении якоря R_a . В соответствии с этим записывается уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jX_{ad}\underline{I}_d - jX_{aq}\underline{I}_q - jX_{\sigma a}\underline{I}_a - R_a\underline{I}_a = E_{\delta} - jX_{\sigma a}\underline{I}_a - R_a\underline{I}_a, \quad (8.6)$$

где $\underline{E}_{\delta} = \underline{E}_0 - jX_{aq}\underline{I}_q - jX_{ad}\underline{I}_d$ – ЭДС в фазе обмотки якоря от результирующего потока в зазоре Φ_{δ} .

При исследовании режимов работы синхронной машины в энергетических системах обычно пользуются диаграммой, построенной в соответствии со следующим форматом представления уравнения (8.6):

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R_a\underline{I}_a + jX_{\sigma a}\underline{I}_a + jX_{aq}\underline{I}_q + jX_{ad}\underline{I}_d = \underline{U} + R_a\underline{I}_a + jX_q\underline{I}_q + jX_d\underline{I}_d, \quad (8.7)$$

где $X_d = X_{\sigma a} + X_{ad}$; $X_q = X_{\sigma a} + X_{aq}$ – сопротивления фазы обмотки якоря явнополюсной машины в установившемся режиме, их физическая природа рассмотрена в Работе № 2, разд. 3.1, с. 118.

Векторная диаграмма, соответствующая уравнению (8.7), представлена на рис. 8.2,а. Эта диаграмма и уравнение (8.6) читаются так: ЭДС E_0 , индуцируемая магнитным потоком возбуждения Φ_B , равна напряжению U на зажимах обмотки якоря генератора плюс падение напряжения на сопротивлениях обмотки якоря. Магнитные потоки обмотки возбуждения и результирующий представлены на диаграмме пространственными векторами $\overline{\Phi}_B$ и $\overline{\Phi}_P$ [1, рис. 5.5, с. 245].

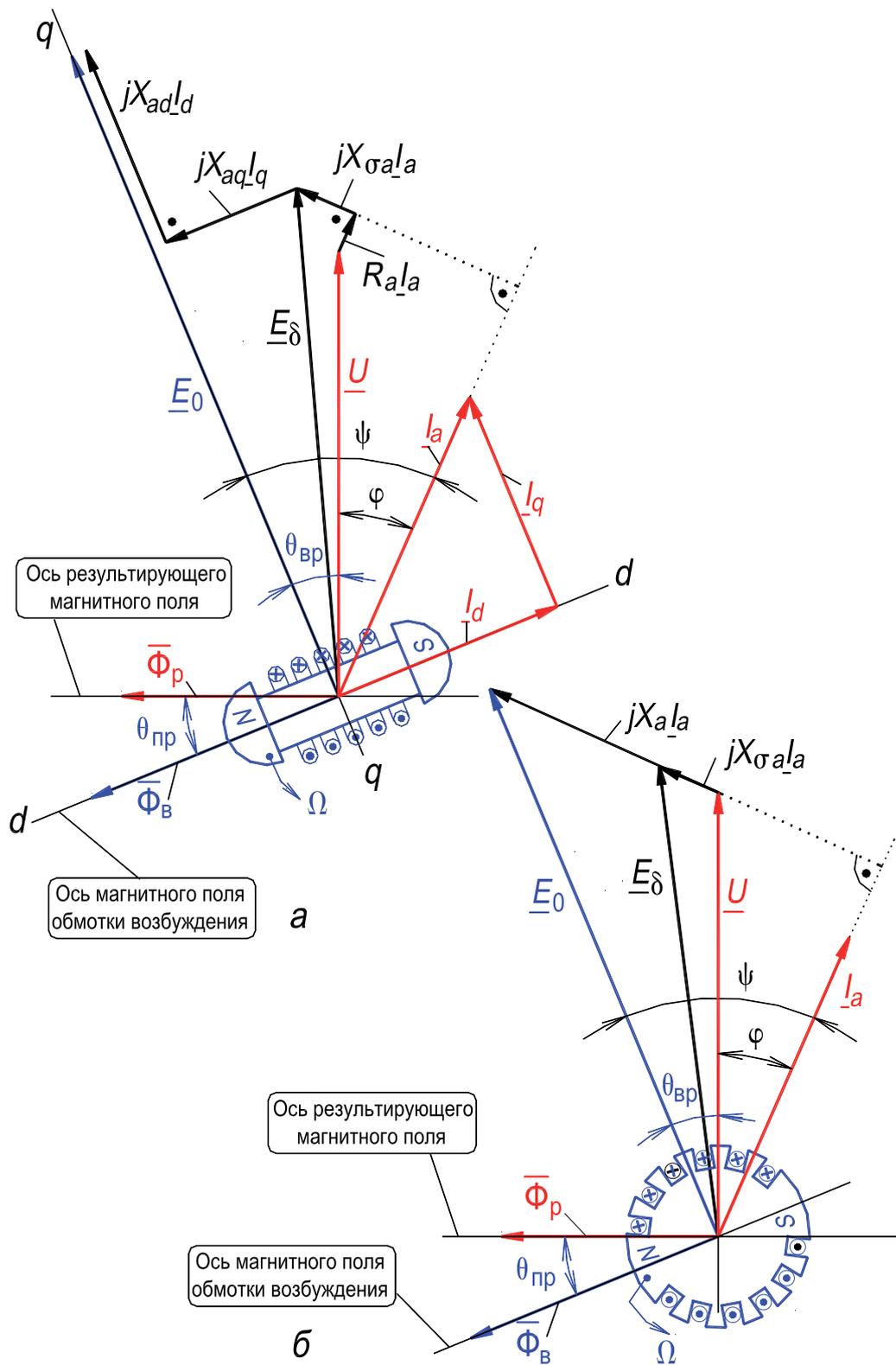


Рис. 8.2. Векторная диаграмма напряжений синхронного генератора: явноплюсного (а), неявноплюсного (б)

В случае, показанном на рис. 8.2,а, генератор имеет смешанную активно-индуктивную нагрузку, когда угол сдвига фаз φ между током обмотки якоря I_a и напряжением U больше нуля, $\varphi > 0$. Кроме того, $\psi > 0$, $I_d > 0$ и продольная реакция якоря является размагничивающей.

Угол между временными векторами \underline{E}_0 и \underline{U} называется *углом нагрузки* (временным) и обозначается символом $\theta_{вр}$ (термин 45, с. 19). В генераторном режиме работы (рис. 8.2) ЭДС \underline{E}_0 всегда опережает \underline{U} и угол $\theta_{вр}$ при этом считается положительным. Название этого угла происходит оттого, что значение $\theta_{вр}$ зависит от нагрузки генератора:

$$P = mUI_a \cos \varphi, \quad (8.8)$$

где P – активная мощность генератора; $m = 3$ – число фаз обмотки якоря.

Действительно, из диаграммы рис. 8.2,а видно, что, например, при $U = \text{const}$, $I_a = \text{const}$ и при уменьшении абсолютной величины φ составляющая тока якоря I_q увеличивается, соответственно чему увеличиваются также $\underline{E}_{aq} = -jX_{aq}I_q$ и $\theta_{вр}$.

Угол θ имеет не только временное, но и пространственное толкование. Как видно из диаграмм рис. 8.2, пространственный угол $\theta_{пр}$ – это угол между пространственными векторами поля возбуждения $\overline{\Phi}_в$ и результирующего поля $\overline{\Phi}_р$ (термин 45, с. 19). Заметим, что вектор $\overline{\Phi}_в$ совпадает с осью d , а также с осью катушек обмотки возбуждения. Если число пар полюсов машины $p = 1$, то временной и пространственный углы равны, $\theta_{вр} = \theta_{пр}$. Если $p > 1$, то $\theta_{вр} = p\theta_{пр}$.

3.2.2. Неявнополюсная машина

В этом случае $X_{ad} = X_{aq}$ и $X_d = X_q = X_c$, поэтому нет необходимости раскладывать ток якоря I_a на составляющие I_d и I_q . Уравнение (8.6) для неявнополюсной машины записывается в виде:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R_a \underline{I}_a + jX_{\sigma a} \underline{I}_a + jX_a \underline{I}_a = \underline{U} + R_a \underline{I}_a + jX_c \underline{I}_a, \quad (8.9)$$

где $X_c = X_{\sigma a} + X_a$ – сопротивление фазы обмотки якоря неявнополюсной машины в установившемся режиме, его физическая природа рассмотрена в Работе № 2, разд. 3.1, с. 118.

Уравнению (8.9) соответствует диаграмма, представленная на рис. 8.2,б.

Векторные диаграммы рис. 8.2 справедливы для любого установившегося режима работы генератора, если в каждом случае пользоваться значениями параметров X_{ad} , X_{aq} или X_d , X_q , соответствующими реальному состоянию насыщения магнитной цепи в рассматриваемом режиме работы.

3.3. Характеристики синхронного генератора, работающего на автономную сеть

Электрические и магнитные свойства синхронных генераторов отображаются их характеристиками, представляемыми в форме зависимости между двумя величинами, обуславливающими определенные стороны рабочего процесса машины.

3.3.1. Классификация характеристик

Работа генератора, работающего на автономную сеть, анализируется на основе пяти характеристик (табл. 8.1)

Таблица 8.1. Классификация характеристик синхронного генератора

№ пп	Наименование	Обозначение	Параметр
1	Характеристика холостого хода	$E_0 = f(I_B)$	$I_a = 0$
2	Характеристика короткого хода	$I_a = f(I_B)$	$U = 0$
3	Нагрузочная <i>индукционная</i> характеристика	$U = f(I_B)$	$I_a = \text{const}$
4	Внешняя характеристика	$U = f(I_a)$	$I_B = \text{const}$
5	Регулировочная характеристика	$I_B = f(I_a)$	$U = \text{const}$

Примечание. Все характеристики снимают при постоянных значениях скорости вращения ротора $n_{\text{ном}} = \text{const}$ и частоте $f = \text{const}$. При снятии характеристик 3, 4 и 5 поддерживается также постоянным значение коэффициента мощности, $\cos \varphi = \text{const}$.

Для сопоставления свойств машин с различными номинальными данными принято представлять характеристики в относительных единицах (разд. 7, с. 62; Работа № 2, Прил. 9.1, с. 153). Они дают наглядное представление о ряде основных свойств генераторов. В Прил. 1 (с. 278,сл.) приведены Pascal-программа

“Расчет экспериментальных значений величин в системе относительных единиц”, пример расчёта и геометрическая интерпретация результатов расчёта.

3.3.2. Характеристика холостого хода

Характеристика (термин 32, с. 17) по своему виду определяется магнитными свойствами машины. В некотором масштабе она повторяет магнитную характеристику (термин 31, с. 17). В связи с явлением гистерезиса характеристика х. х. имеет форму петли. Практически за характеристику х. х. принимают среднюю линию петли (рис. 8.3). Остаточная ЭДС E_r , имеющая место в обмотке якоря при нулевом значении тока возбуждения, $I_B = 0$, обусловлена потоком остаточного магнетизма сердечников полюсов индуктора.

Характеристика х. х. многократно используется при анализе генератора (разд. 3.3.7, с. 89, сл.). Наряду с реальной криволинейной характеристикой х. х. рассматриваются также спрямленные характеристики х. х. (рис. 8.3).

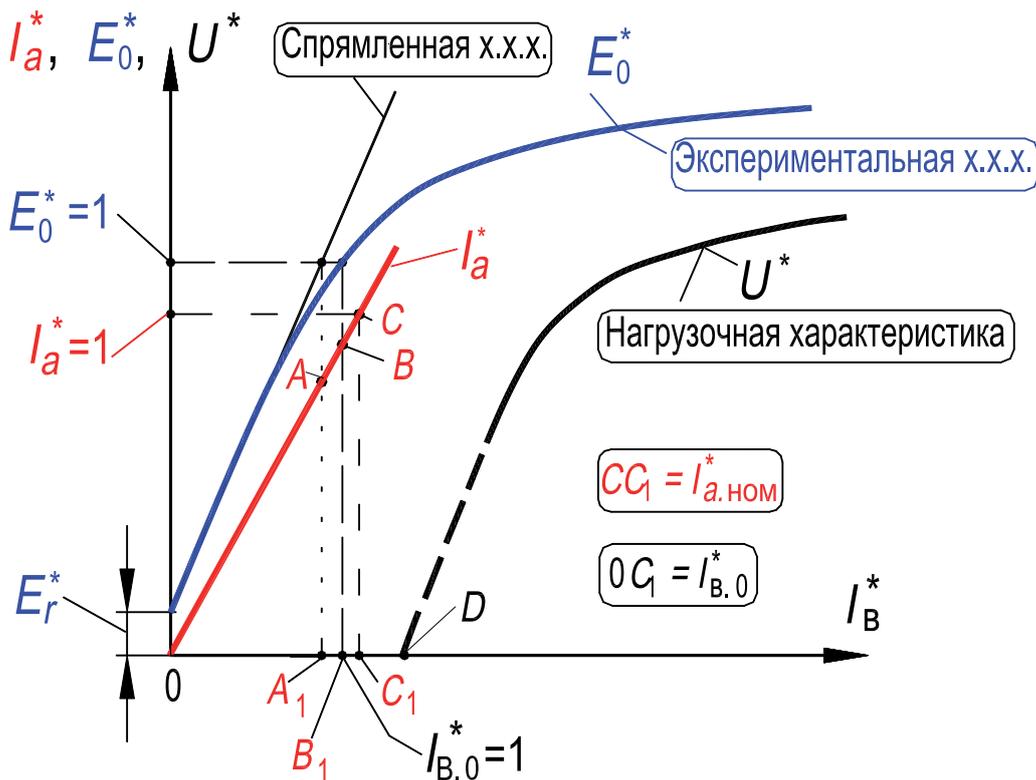


Рис. 8.3. Характеристики синхронного генератора:

холостого хода $E_0^* = f(I_B^*)$; нагрузочная индукционная $U^* = f(I_B^*)$;

установившегося трехфазного к. з. $I_a^* = f(I_B^*)$;

(величины представлены в относительных единицах, см. разд. 7, с. 62)

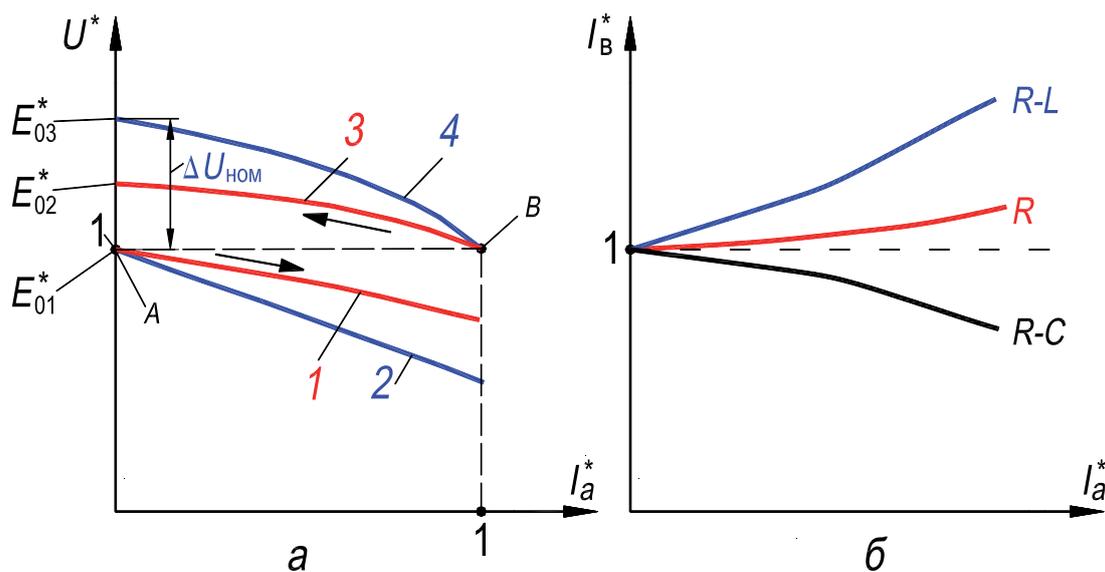


Рис. 8.4. Характеристики синхронного генератора: внешние (а), регулировочные (б)

Характеристику холостого хода отдельной машины принято сопоставлять с *нормальной характеристикой холостого хода*, являющейся усредненной по данным большого количества реальных характеристик генераторов. В табл. 8.2 приведены нормальные характеристики холостого хода турбогенератора и гидрогенератора, представленные в *относительных* единицах.

Таблица 8.2. Нормальные характеристики холостого хода

I_B^*		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Турбогенератор	E_0^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
Гидрогенератор	E_0^*	0,53	1,0	1,23	1,3	—	—	—

Характеристика холостого хода отдельной машины не должна заметно отличаться от *нормальной* характеристики.

3.3.3. Нагрузочная индукционная характеристика

Характеристика отражает связь между напряжением генератора и током возбуждения $U = f(I_B)$ при постоянной величине тока нагрузки $I_a = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ и постоянной частоте вращения $n = \text{const}$. Практическое значение имеет нагрузочная характеристика, снятая при *индуктивной* нагрузке. При подключении нагрузки к обмотке якоря генератора ток I_a , протекаю-

ций в этой обмотке, создает свой магнитный поток Φ_a . Воздействие магнитодвижущей силы обмотки якоря F_a на магнитное поле Φ_B генератора, создаваемое обмоткой возбуждения, называется *реакцией якоря* (термин 17, с. 15). Влияние реакции якоря зависит от характера нагрузки (см. с. 72...78).

Нагрузочная *индукционная* характеристика $U = f(I_B)$ располагается ниже характеристики холостого хода (рис. 8.3) вследствие двух причин: 1) падение напряжения, 2) размагничивающее действие реакции якоря при индуктивной нагрузке (разд. 3.1.6, с. 73). В точке D напряжение обмотки якоря равно нулю, эта точка соответствует трехфазному короткому замыканию генератора.

Располагая характеристиками холостого хода и индукционной нагрузочной, снятой при токе $I_a = I_{ном}$, можно определить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря $X_{\sigma a}^*$ и величину магнитодвижущей силы продольной реакции якоря F_{ad} в масштабе тока возбуждения (разд. 3.3.8, с. 90, сл.).

3.3.4. Внешняя характеристика

Характеристика отражает зависимость напряжения на нагрузке от тока в ней $U = f(I_a)$ при постоянных значениях $\cos \varphi$, I_B и n . Внешняя характеристика определяется выражением (8.6). Величина изменения напряжения зависит от влияния реакции якоря на ЭДС E_δ и падения напряжения в обмотке якоря.

Если исходным режимом является режим холостого хода $U^* = E_{01}^* = 1,0$, $I_a^* = 0$ (точка A на рис. 8.4, *а*, *внешние характеристики для понижения напряжения*, кривые 1 и 2), то с увеличением тока нагрузки увеличивается действие реакции якоря и величина падения напряжения. В результате этого напряжение на нагрузке меняется. При чисто активной нагрузке реакция якоря генератора поперечная, направленная поперек оси полюсов ротора и оказывающая в основном искажающее действие на магнитное поле, а при активно-индуктивной нагрузке – поперечно-продольная. В последнем случае продольная составляющая реакции якоря Φ_{ad} , как уже отмечалось, направлена навстречу полю полюсов Φ_B (оказывает размагничивающее действие) и уменьшает магнитный поток машины Φ_δ , что приво-

дит к уменьшению E_δ . Поэтому внешняя характеристика при активно-индуктивной нагрузке (рис. 8.4,а, кривая 2) располагается ниже характеристики при активной нагрузке (кривая 1).

В случае, если исходным режимом является режим номинальной нагрузки, $I_a^* = 1,0$, $U^* = 1,0$ (точка В на рис. 8.4,а, *внешние характеристики для повышения напряжения*, кривые 3 и 4), то с уменьшением тока нагрузки до нуля при активной нагрузке напряжение возрастает за счет уменьшения действия составляющей поперечной реакции якоря и падения напряжения (кривая 3). При активно-индуктивной нагрузке уменьшается еще и продольная размагничивающая составляющая, и, следовательно, напряжение возрастает в большей степени (кривая 4).

На основе внешней характеристики может быть определено изменение напряжения ΔU генератора при переходе от номинальной нагрузки (точка В на рис. 8.4,а) к холостому ходу. Изменение напряжения можно определить из выражения:

$$\Delta U_{\text{ном.}\%} = 100(E_0 - U_{\text{ном}})/U_{\text{ном}}, \quad (8.10)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение генератора при номинальной нагрузке ($U^* = 1$); E_0 – ЭДС генератора при холостом ходе и возбуждении, соответствующем номинальной нагрузке.

Значение $\Delta U_{\text{ном.}\%}$ действующими стандартами не регламентируется и составляет 25...35 %.

3.3.5. Регулировочная характеристика

Эта характеристика – зависимость $I_B = f(I_a)$, которая снимается при неизменных значениях U , $\cos \varphi$ и n . Характеристика показывает, как надо регулировать ток возбуждения I_B , чтобы при увеличении тока нагрузки I_a напряжение U оставалось постоянным. При увеличении тока I_a при активно-индуктивной R – L -нагрузке для компенсации падения напряжения и размагничивающего действия реакции якоря необходимо увеличивать ток возбуждения. При активно-индуктивной нагрузке регулировочная характеристика проходит выше, чем при чисто активной R -нагрузке (рис. 8.4,б). При активно-емкостной R – C -нагрузке регулировочная характеристика проходит ниже, чем при чисто активной нагрузке.

3.3.6. Характеристика короткого замыкания

При коротком замыкании трехфазного синхронного генератора возможны симметричные и несимметричные режимы. При симметричном режиме все три фазы обмотки якоря замкнуты накоротко. Возможны следующие *несимметричные* короткие замыкания обмотки якоря: однофазное к. з. на нейтраль; двухфазное к. з. между двумя линейными выводами; двухфазное к. з. на нейтраль (рис. 8.10, с. 102).

Рассмотрим *симметричное трехфазное к. з.* Зависимость $I_{a,3} = f(I_B)$, при $n = \text{const}$, показывает связь между установившимся током $I_{a,3}$ трехфазного короткого замыкания и током возбуждения I_B . Уравнение равновесия напряжений при трехфазном симметричном к. з. записывается на основе уравнения (8.6)

$$0 = \underline{E}_0 - R_a \underline{I}_d - jX_{\sigma a} \underline{I}_d - jX_{ad} \underline{I}_d = \underline{E}_\delta - R_a \underline{I}_d - jX_{\sigma a} \underline{I}_d. \quad (8.11)$$

Так как обмотка якоря обладает значительной индуктивностью, а активное сопротивление ее мало, то ток якоря $I_{a,3}$ отстает от ЭДС E_0 на угол ψ практически равный 90° , т. е. он имеет только продольную составляющую I_d , а поперечная составляющая почти I_q равна нулю. Поэтому при таком к. з. реакция якоря является чисто размагничивающей и магнитная система не насыщена, а зависимость $I_{a,3} = f(I_B)$ линейна (рис. 8.5,а).

На рис. 8.5,б представлена векторная диаграмма синхронного генератора при трехфазном симметричном к. з., иллюстрирующая, что потоки Φ_B и Φ_{ad} действуют по оси d навстречу и взаимно компенсируют друг друга. При таком к. з. в магнитной системе имеет место, по существу, только поток рассеяния $\Phi_{\sigma a}$.

Сильное действие реакции якоря обуславливает небольшую величину тока установившегося трехфазного короткого замыкания. Этот ток сравним с номинальным током синхронного генератора и может быть даже меньше его.

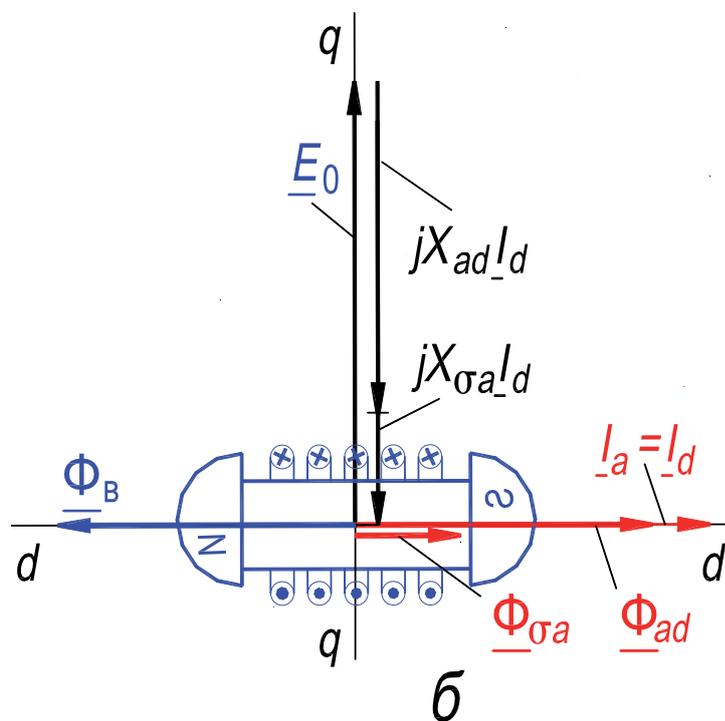
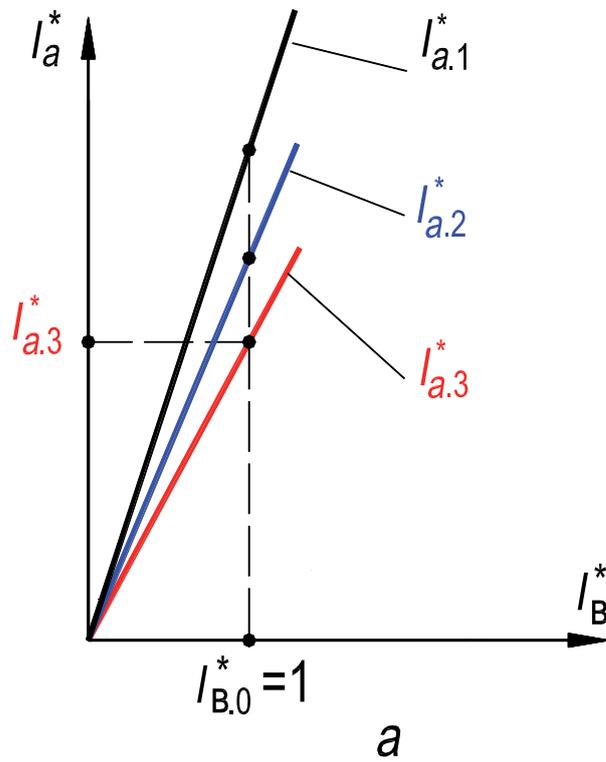


Рис. 8.5. Характеристики установившегося короткого замыкания синхронного генератора (а); векторная диаграмма при установившемся трехфазном коротком замыкании генератора (б)

Если пренебречь значением R_d , то на основе уравнения (8.11) получаем выражение для определения полного индуктивного сопротивления обмотки якоря в установившемся режиме:

$$X_d = E_0 / I_d. \quad (8.12)$$

Ток установившегося трехфазного симметричного к. з. $I_{a.3} = I_d = E_0 / X_d$ практически не зависит от скорости вращения n индуктора и от частоты f напряжения и тока обмотки якоря, так как *отношение* E_0 / X_d остается постоянным при изменениях реальных значений n и f .

При несимметричных к. з. токи установившегося короткого замыкания будут больше, чем при симметричном трехфазном к. з. (при одном и том же значении тока возбуждения), так как в размагничивающем действии реакции якоря при несимметричных к. з. участвует меньшее число фаз, чем при симметричном к. з. (рис. 8.5,а).

3.3.7. Отношение короткого замыкания

Отношение тока возбуждения $I_{в.0}$ синхронной машины, соответствующего ее номинальному напряжению $U_{ном}$ при холостом ходе, к току возбуждения $I_{в.к}$, соответствующего ее номинальному току $I_{ном}$ в обмотке якоря при трехфазном коротком замыкании, называется *отношением короткого замыкания* (о. к. з.) (термин 43, с. 19).

$$\text{о. к. з.} = I_{в.0} / I_{в.к} = 0B_1 / 0C_1. \quad (8.13)$$

Так как треугольники $0BB_1$ и $0CC_1$ подобны (см. рис. 8.3), то отношение (8.13) можно переписать как отношение соответствующих токов обмотки якоря:

$$\text{о. к. з.} = I_{a.3} / I_{ном} = BB_1 / CC_1, \quad (8.14)$$

где $I_{a.3}$ – значение установившегося тока в обмотке якоря при симметричном к. з., который соответствует току возбуждения $I_{в.0}$.

Отношение к. з., определенное согласно (8.14) соответствует насыщенному состоянию магнитной системы. Возможно определить о. к. з. при ненасыщенном магнитопроводе (разд. 4.6.2, с. 103).

Величина о. к. з., как и величина X_d , определяет предельное значение нагрузки, которую способен нести генератор при установившемся режиме работы, причем, чем больше о. к. з., тем больше предельная нагрузка (Работа № 3, формула (10.4), с. 171).

Поэтому о. к. з. является важным параметром синхронных машин. Диапазон значений о. к. з. у крупных синхронных генераторов приведен ниже:

	Турбогенераторы	Гидрогенераторы
Значение о. к. з.	0,4...1,0	0,8...1,8

Значение о. к. з. тем больше, чем больше зазор δ между статором и ротором. Поэтому машины с бóльшим о. к. з. дороже.

3.3.8. Построение треугольника Потье. Реактивное сопротивление Потье

Для определения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки якоря $X_{\sigma a}^*$, обусловленного магнитными потоками рассеяния, и величины продольной составляющей реакции якоря F_{ad} строится треугольник короткого замыкания (треугольник Потье). Порядок построения приведен на рис. 8.6.

Сначала в одинаковом масштабе строятся характеристика холостого хода и индукционная нагрузочная, снятая при токе нагрузки $I_a^* = 1,0$. Ток возбуждения $I_{в.к}^*$, равный отрезку OA (см. рис. 8.6), находится по характеристике трехфазного к. з. для тока $I_{a.з}^* = 1,0$ (см. рис. 8.5,а). Из точки $U^* = 1,0$ на оси ординат проводится линия параллельно оси абсцисс до пересечения с нагрузочной характеристикой (точка A'). Из точки A' откладывается отрезок $A'O'$ (равный отрезку AO) и из точки O' проводится линия, параллельная начальному участку характеристики холостого хода до пересечения с ней (точка B). Из точки B опускается перпендикуляр на отрезок $A'O'$ (точка C). Соединив точки B и A' , получают треугольник Потье ($\Delta A'BC$). Сторона BC треугольника, выраженная в данном случае в относительных единицах, пропорциональна падению напряжения на сопротивлении рассеяния $X_{\sigma a}^*$ обмотки якоря. Величина сопротивления $X_{\sigma a}^*$ может быть найдена как:

$$X_{\sigma a}^* = BC / (1,1...1,3) I_a^*. \quad (8.15)$$

Так как нагрузочная характеристика снимается при $I_a^* = 1,0$, то:

$$X_{\sigma a}^* = BC / (1,1...1,3). \quad (8.16)$$

Отношение BC/I_a^* (8.15) называется *реактивным сопротивлением Потье* и обозначается как X_p^* . Сопротивление Потье X_p^* больше реального значения $X_{\sigma a}^*$ примерно в 1,1...1,3 раза, так как X_p^* , найденное графическим построением, соответствует начальному участку характеристики x , т. е. ненасыщенному состоянию магнитопровода (см. рис. 8.6). Значение же $X_{\sigma a}^*$ соответствует насыщению при номинальном напряжении.

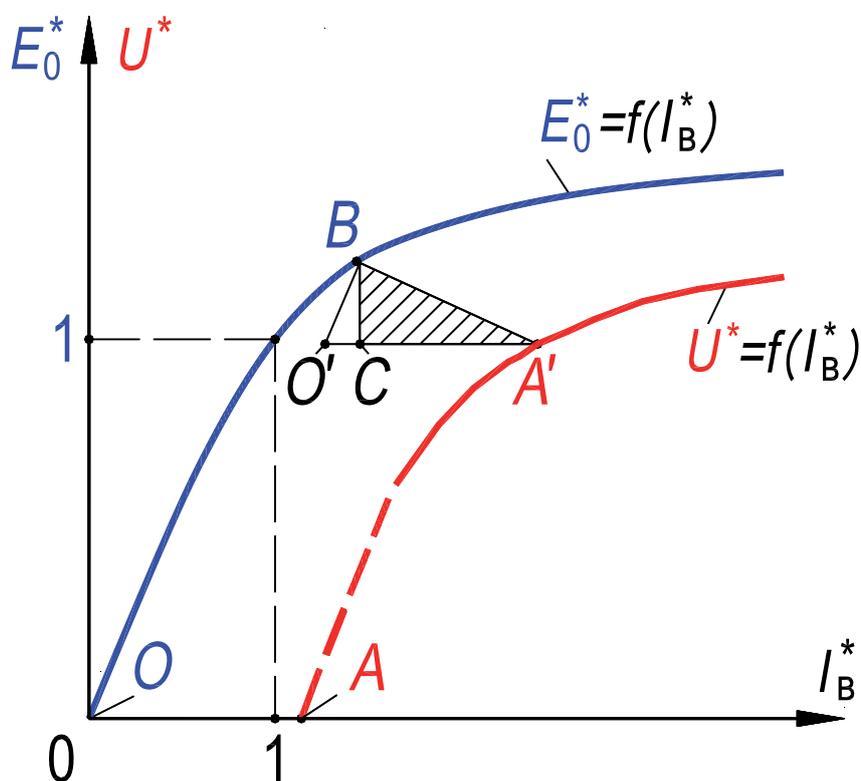


Рис. 8.6. Построение треугольника Потье

Сторона $A'C$ треугольника в масштабе тока возбуждения соответствует продольной реакции якоря от тока нагрузки, при котором снималась нагрузочная характеристика.

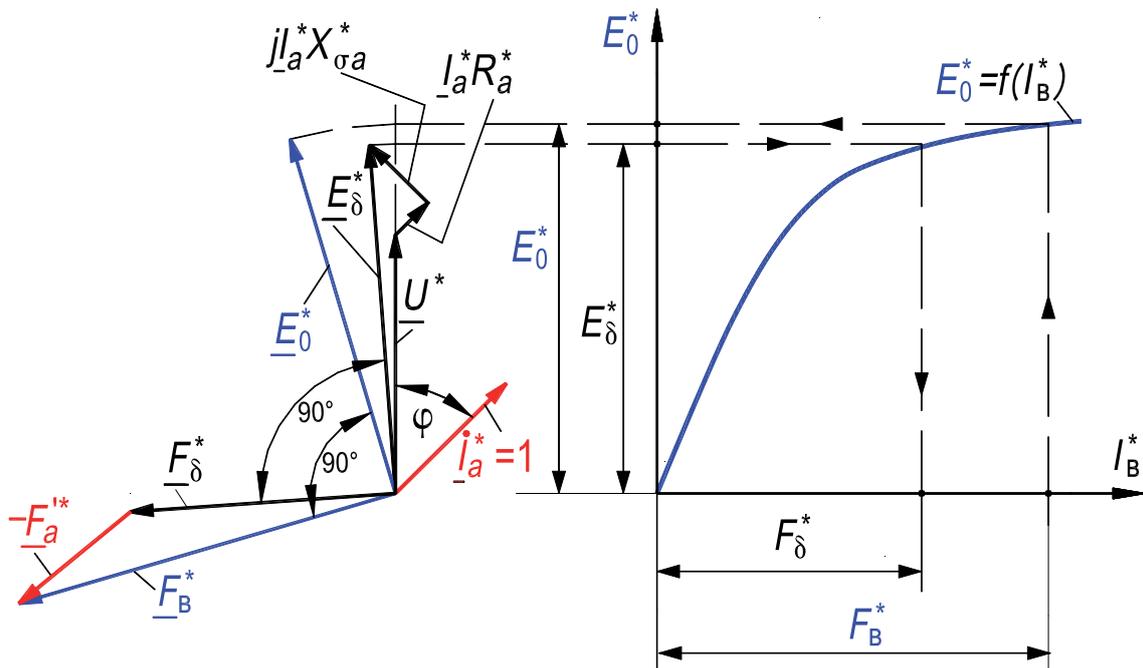


Рис. 8.7. Построение векторной диаграммы э. м. д. с. (диаграмма Потье)

3.3.9. Векторная диаграмма э. м. д. с. (диаграмма Потье)

Диаграмма позволяет определить значение тока возбуждения, нужного для обеспечения заданного режима работы ($U, I_a, \cos \varphi$) с учетом насыщения магнитопровода, а также косвенным путем получать внешние и регулировочные характеристики генератора. Она строится для насыщенных неявнополюсных машин (т. е. не учитывает различия значений магнитных проводимостей по продольной d и поперечной q осям ротора). Однако при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi \leq 0,8$ эта диаграмма может быть построена и для явнополюсных машин, так как в этом случае поле реакции якоря не выходит из зоны полюса. На рис. 8.7 показано построение диаграммы Потье для режима *номинальной* нагрузки.

Порядок построения диаграммы следующий. На комплексной плоскости, в относительных единицах, откладываются векторы напряжения и тока исходного режима $\underline{U}^*, \underline{I}_a^*$, с учетом характера нагрузки (угол φ). По векторному уравнению, записанному на основе (8.6):

$$\underline{E}_\delta^* = \underline{U}^* + jX_{\sigma a}^* \underline{I}_a^* + R_a^* \underline{I}_a^*, \quad (8.17)$$

определяется величина ЭДС \underline{E}_δ^* , индуцированной результирующим магнитным потоком Φ_δ^* .

Величина сопротивления R_a^* определяется по паспортным данным генератора (разд. 6, с. 61):

$$R_a^* = R_a / Z_6, \quad (8.18)$$

а значение сопротивление $X_{\sigma a}^*$ – по (8.15); Z_6 – базисное сопротивление (см. разд. 7, с. 62).

После нахождения \underline{E}_δ^* , по характеристике холостого хода определяется величина результирующей магнитодвижущей силы \underline{F}_δ^* , которая и создает в машине результирующий магнитный поток Φ_δ^* . Вектор \underline{F}_δ^* опережает \underline{E}_δ^* на 90° . Для определения величины ЭДС холостого хода \underline{E}_0^* и её направления сначала строится треугольник магнитодвижущих сил:

$$\underline{F}_\delta^* = \underline{F}_B^* + \underline{F}_a'^*, \quad (8.19)$$

откуда имеем

$$\underline{F}_B^* = \underline{F}_\delta^* - \underline{F}_a'^*. \quad (8.20)$$

Зная величину и направление вектора \underline{F}_δ^* , прибавляем к нему вектор $(-\underline{F}_a'^*)$. Величина последнего определяется из треугольника Потье (отрезок $A'C$), а по направлению вектор $\underline{F}_a'^*$ совпадает с вектором тока I_a^* .

По характеристике холостого хода, откладывая на оси абсцисс величину \underline{F}_B^* , получают величину \underline{E}_0^* , которую откладывают на векторной диаграмме в сторону отставания от вектора \underline{F}_B^* на 90° .

4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке, в состав которой входят *явнополюсный* синхронный генератор (СГ) с возбудителем GE и приводной двигатель – двигатель постоянного тока параллельного возбуждения M (см. фотографии установки на рис. В1,..., В3, с. 11, 12).

Значения номинальных данных – см. разд. 6, с. 60, сл.

Собрать схему включения приводного двигателя M (рис. 8.8).

Собрать схему для испытания синхронного генератора при его работе на автономную нагрузку (рис. 8.9).

4.1. Пуск приводного двигателя

Пуск двигателя осуществить следующим образом.

1. Установить пусковой реостат $RR_{п.д}$ в положение “Пуск” (*введен*);
2. Установить реостат $RR_{в}$ в цепи возбуждения в положение “Выведен”;
3. Включить автомат $QF1$ (на схему подано напряжение 110 В);
4. В процессе разгона двигателя *плавно и медленно* перевести пусковой реостат $RR_{п.д}$ в положение “Работа” (*выведен*);
5. Реостатом $RR_{в}$ установить частоту вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин. В процессе выполнения всех опытов поддерживать это значение постоянным, регулируя момент приводного двигателя M реостатом $RR_{в}$.

Внимание. *Перед отключением* двигателя от сети необходимо пусковой реостат $RR_{п.д}$ *всегда устанавливать* в положение “Пуск”.

4.2. Характеристика холостого хода (см. разд. 3.3.2, с. 83)

Снятие характеристики $x. x. E_0 = f(I_B)$ осуществить следующим образом.

1. Выключатели $QS1$ и $QS2$ перевести в положение “Откл” (нагрузка отключена);
2. Запустить приводной двигатель M (см. выше разд. 4.1);
3. Регулировать ток I_B ($PA2$) реостатом $RR_{в.в}$ в диапазоне изменения ЭДС E_0 от 0 до $(1,2...1,3)U_{ф.ном}$ с шагом $\Delta E_0 \approx 20$ В ($PV1$).
4. Записать в табл. 8.3 показания приборов $PV1$ ($E_0 = U$) и $PA2$ (I_B) при каждом дискретном значении ЭДС E_0 .
5. По данным опыта построить зависимость $E_0 = f(I_B)$ и определить на ней значение тока возбуждения I_{B0} , соответствующее номинальному напряжению обмотки якоря генератора $U_{ф.ном} = 133$ В (см. разд. 7, прим. 2, с. 62).

6. Рассчитать и построить характеристику $x. x.$ в относительных единицах (о. е.), $E_0^* = f(I_B^*)$ /см. разд. 7, с. 62/. Результаты расчёта записать в табл. 8.3.

Таблица 8.3. Измерение и расчёт характеристики холостого хода

E_0	В								
I_B	А								
E_0^*	о. е.								
I_B^*	о. е.								

4.3. Нагрузочная индукционная характеристика (н. и. х.) (см. разд. 3.3.3, с. 84)

Снятие и. н. х. $U = f(I_B)$ осуществить следующим образом.

1. Выключатель $QS2$ перевести в положение “Вкл”, а $QS1$ – в “Откл”;

2. Реостатом $RR_{B,B}$ установить ток возбуждения $I_B \approx 14$ А ($PA2$);

3. Реактором LR_{HT} установить ток нагрузки $I_{L,НОМ} = 19,4$ А ($PA1$);

4. Реостатом $RR_{B,B}$ уменьшать ток I_B с шагом $\Delta I_B \approx 2$ А и, поддерживая реактором LR_{HT} неизменное значение тока нагрузки $I_{L,НОМ}$, измерять значение напряжения U (PVI) обмотки якоря. В процессе опыта реостатом RR_B поддерживать частоту вращения $n_{НОМ} = 1500$ об/мин. Опыт проводить до тех пор пока возможно обеспечить условие $I_{L,НОМ} = \text{const}$.

5. Записать в табл. 8.4 показания приборов PVI (U) и $PA2$ (I_B) при каждом дискретном значении тока возбуждения генератора I_B .

6. По данным опыта построить зависимость в тех же осях координат, что и характеристику $x. x.$ Координаты точки D на зависимости $U = f(I_B)$ (см. рис. 8.3, с. 83) определить по характеристике трехфазного к. з. генератора (см. табл. 8.7, с. 103).

7. Рассчитать и построить нагрузочную индукционную характеристику в относительных единицах, $U^* = f(I_B^*)$ в тех же осях координат, что и характеристику $x. x.$ /см. разд. 7, с. 62/. Результаты расчёта записать в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Измерение и расчёт нагрузочной индукционной характеристики

U	В								
I_B	А								
U^*	о. е.								
I_B^*	о. е.								

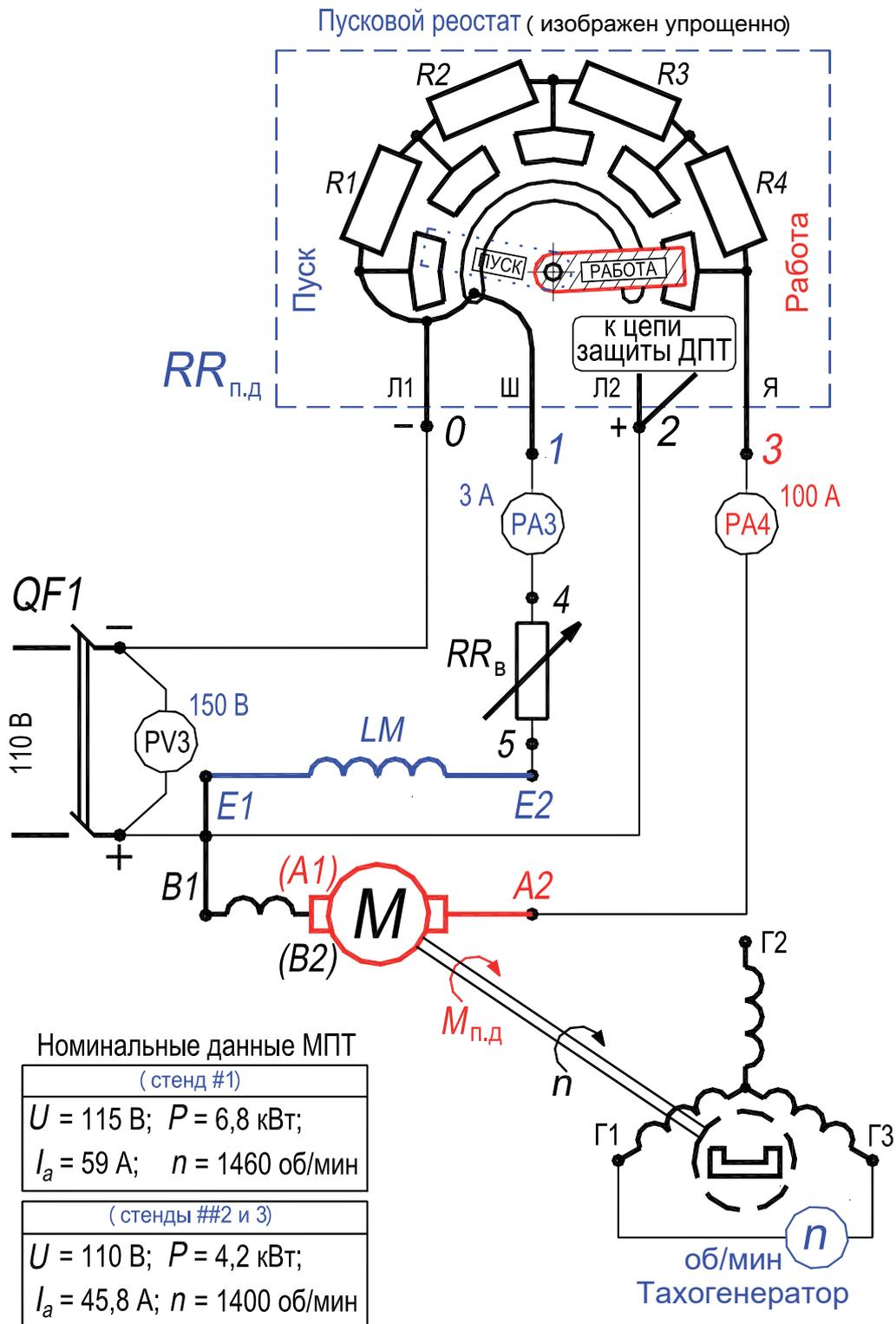


Рис. 8.8. Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения;

схему собрать для выполнения Работ №№ 1, 2 и 3

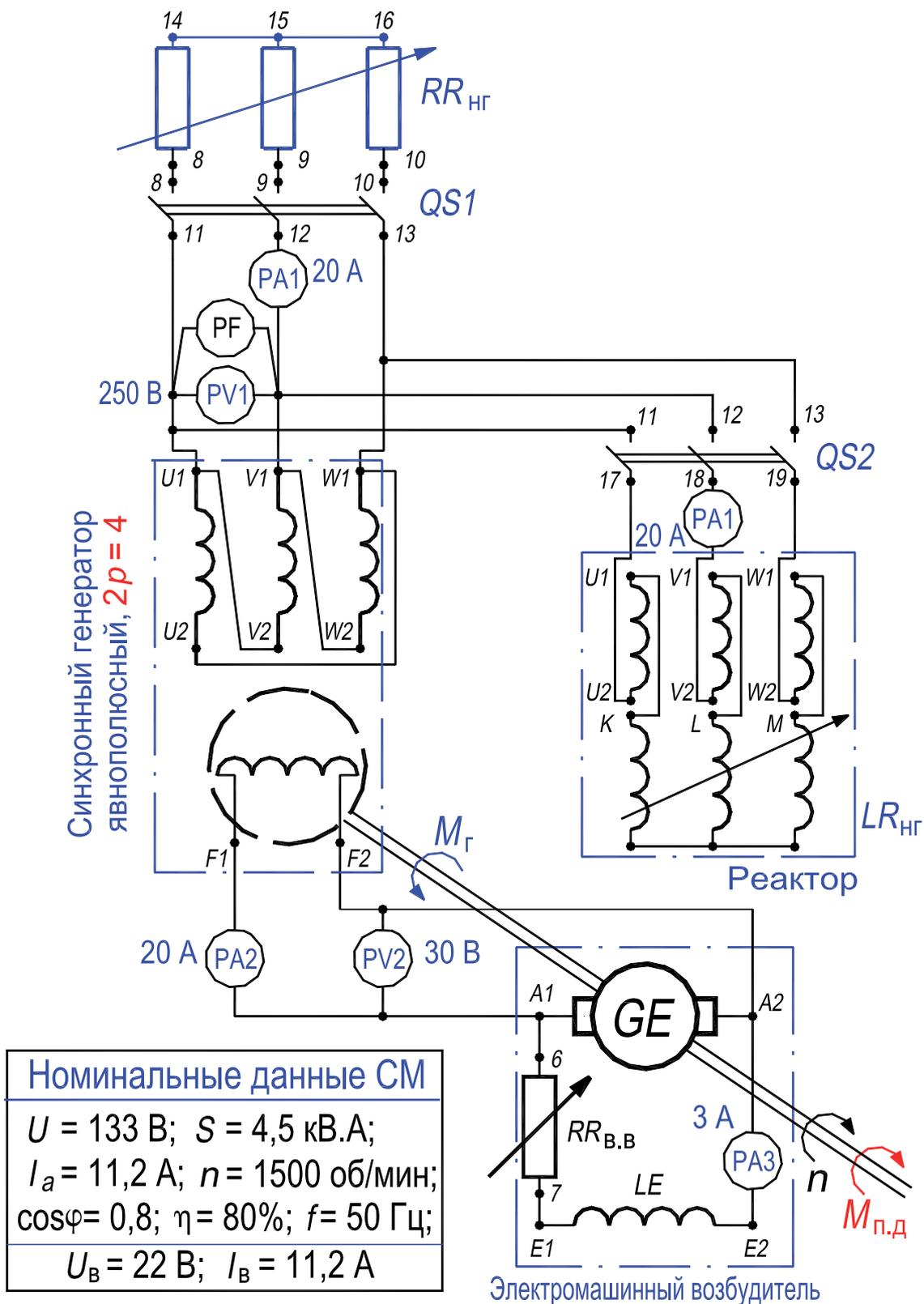


Рис. 8.9. Схема лабораторной установки для исследования синхронного генератора при автономной работе

4.4. Внешняя характеристика (см. разд. 3.3.4, с. 85)

Внешнюю характеристику $U = f(I_a)$ снимают для *понижения* и *повышения* напряжения U обмотки якоря СГ для двух значений коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,7$.

4.4.1. Внешняя характеристика для понижения напряжения ($\cos \varphi = 1$)

Снятие внешней характеристики для *понижения* напряжения U при $\cos \varphi = 1$ осуществить следующим образом.

1. Выключатели $QS1$ и $QS2$ перевести в положение “Откл” (холостой ход СГ);

2. Реостатом $RR_{в.в}$ установить напряжение U (PVI) обмотки якоря, соответствующее номинальному значению тока возбуждения $I_{в.ном} = 11,2$ А;

3. Установить выключатель $QS1$ в положение “Вкл” (подключена активная нагрузка $RR_{нг}$);

4. Реостатом $RR_{нг}$ увеличивать ток нагрузки I_a в диапазоне от 0 до 19,4 А. В процессе опыта реостатом $RR_{в}$ поддерживать *неизменной* синхронную частоту вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин, а реостатом $RR_{в.в}$ *неизменное* значение тока возбуждения $I_{в.ном} = 11,2$ А.

5. Записать в табл. 8.5а показания приборов PVI (U) и PAI (I_a) при каждом дискретном значении тока нагрузки I_a .

6. По данным опыта построить зависимость $U = f(I_a)$.

7. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для *понижения* напряжения U при $\cos \varphi = 1$ в относительных единицах, $U^* = f(I_a^*)$ /см. разд. 7, с. 62/. Результаты расчёта записать в табл. 8.5а.

4.4.2. Внешняя характеристика для повышения напряжения ($\cos \varphi = 1$)

Снятие внешней характеристики для *повышения* напряжения U при $\cos \varphi = 1$ осуществить следующим образом.

1. Выключатель $QS2$ перевести в положение “Откл”;

2. Выключатель $QS1$ перевести в положение “Вкл” (подключена активная нагрузка $RR_{нг}$);

3. Реостатами $RR_{в.в}$ и $RR_{нг}$ установить номинальную нагрузку СГ (напряжение $U = 133$ В, ток нагрузки $I_a = 19,4$ А);

4. Реостатом $RR_{нг}$ уменьшать ток нагрузки I_a пределах от 19,4 А до 0. В процессе опыта реостатом RR_B поддерживать *неизменной* синхронную частоту вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин, а реостатом $RR_{в.в}$ неизменное значение тока возбуждения $I_{в.ном} = 11,2$ А.

5. Записать в табл. 8.5а показания приборов PVI (U) и PAI (I_a) при каждом дискретном значении тока нагрузки I_a .

6. По данным опыта построить зависимость $U = f(I_a)$.

7. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для *повышения* напряжения U при $\cos \varphi = 1$ в относительных единицах, $U^* = f(I_a^*)$ /см. разд. 7, с. 62/. Результаты расчёта записать в табл. 8.5а.

Таблица 8.5а. Измерение и расчёт внешней характеристики ($\cos \varphi = 1$)

Понижение напряжения	U	В							
	I_a	А							
	U^*	о. е.							
	I_a^*	о. е.							
Повышение напряжения	U	В							
	I_a	А							
	U^*	о. е.							
	I_a^*	о. е.							

4.4.3. Внешняя характеристика для понижения / повышения напряжения ($\cos \varphi = 0,7$)

Снятие внешней характеристики для *понижения / повышения* напряжения U при $\cos \varphi = 0,7$ осуществлять в той же последовательности, что и при $\cos \varphi = 1$. Отличия состоят в следующем.

1. Оба выключателя $QS2$ и $QS1$ установить в положение “Вкл” (подключена активно-индуктивная нагрузка: реостат $RR_{нг}$ и реактор $LR_{нг}$).

2. Реостатом $RR_{нг}$ изменять значение активного тока, а реактором $LR_{нг}$ – значение реактивного тока таким образом, чтобы *активный и реактивный токи* (соответственно левый и правый амперметры PAI) *были взаимно равны при каждом измерении*. Предельное значение активного и реактивного тока нагрузки не должно превышать 14 А. Величину результирующего (линейного) тока получить умножением значения одного из этих токов на $\sqrt{2}$.

3. Записать в табл. 8.5б показания приборов *PVI* и *PAI* в именованных и относительных единицах при каждом дискретном значении тока нагрузки I_a .

Таблица 8.5б. Измерение и расчёт внешней характеристики ($\cos \varphi = 0,7$)

Понижение напряжения	U	В							
	I_a	А							
	U^*	о. е.							
	I_a^*	о. е.							
Повышение напряжения	U	В							
	I_a	А							
	U^*	о. е.							
	I_a^*	о. е.							

4.5. Регулировочная характеристика (см. разд. 3.3.5, с. 86)

Регулировочную характеристику $I_B = f(I_a)$ снимают при $U = \text{const}$ для двух значений коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,7$.

4.5.1. Регулировочная характеристика при $\cos \varphi = 1$

Снятие характеристики при $\cos \varphi = 1$ осуществить следующим образом.

1. Выключатели *QS1* и *QS2* перевести в положение “Откл” (холостой ход СГ);

2. Реостатом $RR_{B,B}$ установить номинальное напряжение обмотки якоря $U_{ф.ном} = U_{л.ном} = 133$ В (*PVI*);

3. Установить выключатель *QS1* в положение “Вкл” (подключена активная нагрузка);

4. Реостатом $RR_{нг}$ увеличивать ток нагрузки I_a (*PAI*) в диапазоне от 0 до 19,4 А. В процессе опыта реостатом RR_B поддерживать неизменной синхронную частоту вращения 1500 об/мин, а реостатом $RR_{B,B}$ неизменное напряжение 133 В (*PVI*).

5. Записать в табл. 8.6 показания приборов *PA2* (I_B) и *PA1* (I_a) при каждом дискретном значении тока нагрузки I_a .

6. По данным опыта построить зависимость $I_B = f(I_a)$ при $\cos \varphi = 1$.

7. Рассчитать и построить *регулирующую* характеристику при $\cos \varphi = 1$ в относительных единицах, $I_B^* = f(I_a^*)$ /см. разд. 7, с. 62/. Результаты расчёта записать в табл. 8.6.

Таблица 8.6. Измерение и расчёт регулировочной характеристики

$\cos \varphi = 1$	I_B	А							
	I_a	А							
	I_B^*	о. е.							
	I_a^*	о. е.							
$\cos \varphi = 0,7$	I_B	А							
	I_a	А							
	I_B^*	о. е.							
	I_a^*	о. е.							

4.5.2. Регулирующая характеристика при $\cos \varphi = 0,7$

1. Регулирующую характеристику $I_B = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ для $\cos \varphi = 0,7$ снимать так же, как и для $\cos \varphi = 1$.

2. Для установления значения $\cos \varphi = 0,7$ использовать тот же прием, что и при снятии внешних характеристик (см. выше разд. 4.4.3, пункты 1 и 2).

3. Записать в табл. 8.6 показания приборов $PA1$ (I_a) и $PA2$ (I_B) в измеренных и относительных единицах при каждом дискретном значении тока нагрузки I_a .

4. По данным опыта построить зависимость $I_B = f(I_a)$ при $\cos \varphi = 0,7$.

4.6. Опыты короткого замыкания (см. разд. 3.3.6, с. 87, сл.)

4.6.1. Характеристики короткого замыкания

Собрать схемы для снятия характеристик короткого замыкания $I_a = f(I_B)$ (рис. 8.10, а, б, в, соответственно трех-, двух- и однофазное к. з. обмотки якоря).

Снятие характеристик осуществить следующим образом.

1. Выполнить пуск приводного двигателя M (см. выше разд. 4.1 и рис. 8.8);

2. Реостатом $RR_{B,B}$ увеличивать ток I_B ($PA2$), начиная от значения 0 А, и фиксировать значения тока короткого замыкания I_a ($PA1$) при трехфазном к. з. обмотки якоря (затем при двухфазном и далее при однофазном к.з.).

При проведении опытов необходимо ограничить значение тока в обмотке якоря величиной $I_{a.ном} = 19,4 \text{ A}$; реостатом $RR_{В.В}$ поддерживать частоту вращения примерно равной $n_{ном} = 1500 \text{ об/мин}$.

Синхронный генератор

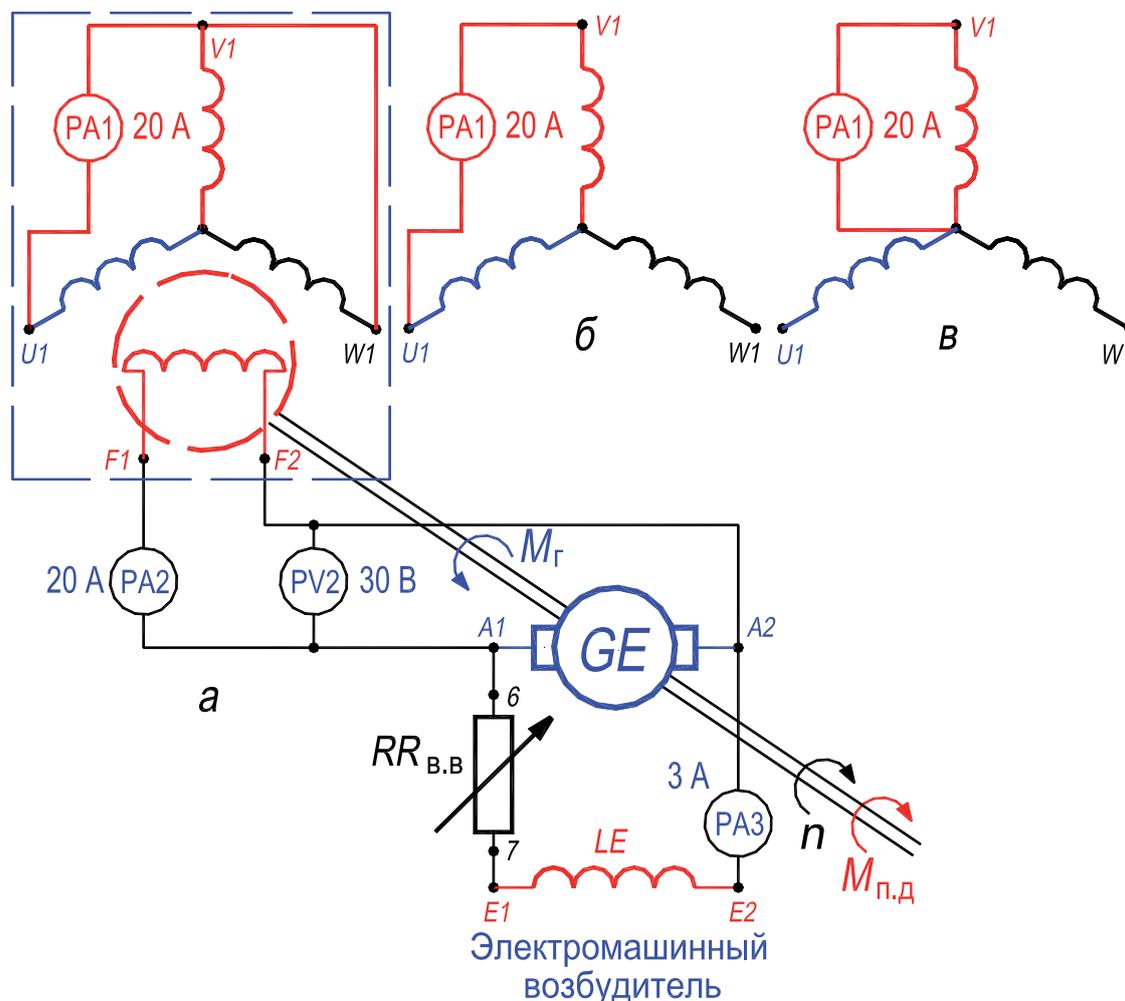


Рис. 8.10. Схема лабораторной установки для проведения опыта установившегося короткого замыкания синхронного генератора: трехфазного (а), двухфазного (б), однофазного (в)

3. Записать в табл. 8.7 показания приборов $PA1$ (I_a) и $PA2$ (I_B) при трех-, двух- и однофазном к. з. для каждого дискретного значения тока возбуждения I_B

4. По данным опыта построить зависимости $I_a = f(I_B)$ при трех-, двух- и однофазном к. з.

5. Рассчитать и построить характеристики короткого замыкания в относительных единицах, $I_a^* = f(I_B^*)$ /см. разд. 7, с. 62/. Результаты расчёта записать в табл. 8.7.

Таблица 8.7. Измерение и расчёт характеристик короткого замыкания

Трёхфазное к. з.	I_{a3}	А							
	I_B	А							
	I_{a3}^*	о. е.							
	I_B^*	о. е.							
Двухфазное к. з.	I_{a2}	А							
	I_B	А							
	I_{a2}^*	о. е.							
	I_B^*	о. е.							
Однофазное к. з.	I_{a1}	А							
	I_B	А							
	I_{a1}^*	о. е.							
	I_B^*	о. е.							

4.6.2. Отношение короткого замыкания (о. к. з.) (см. разд. 3.3.7, с. 89)

Пользуясь характеристикой трёхфазного короткого замыкания $I_{a3} = f(I_B)$, определить отношение короткого замыкания (термин 43, с. 19), по следующему отношению:

$$\text{о. к. з.} = I_{a3}/I_{a.\text{ном}},$$

где I_{a3} – ток трёхфазного к. з. (отрезок BB_1 на рис. 8.3, с. 83), определить по характеристике трёхфазного к. з. при токе возбуждения $I_{B0}^* = 1,0$. Последний находится по характеристике холостого хода (отрезок OB_1 на рис. 8.3, с. 83) и соответствует ЭДС $E_0^* = 1,0$.

Если I_{B0}^* определить по экспериментальной характеристике холостого хода (см. разд. 3.3.2, с. 83; рис. 8.3), то о. к. з. будет соответствовать *насыщенному* состоянию магнитной системы СТ:

$$\text{о. к. з.}_s = BB_1/CC_1 = OB_1/OC_1,$$

а если I_{B0}^* определить по спрямленной характеристике холостого хода – то ненасыщенному состоянию:

$$\text{о. к. з.} = AA_1/CC_1 = OA_1/OA_1.$$

Результаты расчёта о. к. з. занести в табл. 8.8.

Таблица 8.8. Значение отношения короткого замыкания (о. к. з.)

Состояние магнитной системы генератора	о. к. з. _с	о. к. з.
Насыщенное		–
<i>Ненасыщенное</i>	–	

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 66).
4. Номинальные данные СГ и возбудителя (разд. 6, с. 60 и 61).
5. Номинальные данные двигателя постоянного тока (разд. 6.3, с. 61).
6. Схемы испытаний, рис. 8.8, 8.9 и 8.10.
7. Результаты опытов и расчетов, представленные в таблицах 8.3...8.8; ниже каждой таблицы приводятся формулы для расчета величин и соответствующие таблице графические зависимости (см. ниже пп. 8.1 – 8.10) */по усмотрению преподавателя большинство характеристик может быть представлено только в системе относительных единиц/*.

8. Экспериментальные и расчетные графические зависимости:

- 8.1. $E_0 = f(I_B)$ – характеристика х. х. в именованных единицах (и. е.);
- 8.2. $E_0^* = f(I_B^*)$ – характеристика х. х. в относительных единицах (о. е.);
- 8.3. $U = f(I_B)$ – нагрузочная индукционная характеристика в и. е.;
- 8.4. $U^* = f(I_B^*)$ – нагрузочная индукционная характеристика в о. е.;
- 8.5. $U = f(I_a)$ – внешние характеристики (и. е.);
- 8.6. $U^* = f(I_a^*)$ – внешние характеристики (о. е.);
- 8.7. $I_B = f(I_a)$ – регулировочные характеристики (и. е.);
- 8.8. $I_B^* = f(I_a^*)$ – регулировочные характеристики (о. е.);
- 8.9. $I_a = f(I_B)$ – характеристики трех-, двух- и однофазного к. з. (и. е.);
- 8.10. $I_a^* = f(I_B^*)$ – характеристики трех-, двух- и однофазного к. з. (о. е.);

9. Построение треугольника и векторной диаграммы Потье. Определение величины индуктивного сопротивления рассеяния $X_{\sigma a}$ и м. д. с. продольной реакции якоря F_{ad} (см. разд. 3.3.8 и 3.3.9, с. 90, сл.; рис. 8.6 и 8.7).

10. Определение относительного изменения напряжения синхронного генератора $\Delta U, \%$ (см. разд. 3.3.4, с. 85, сл. и рис. 8.4, а).

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Синхронные машины подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Каковы особенности конструкции СГ с явнополюсной и неявнополюсной магнитной системой?
2. Что такое реакция якоря СГ, от чего зависит характер реакции якоря?
3. Может ли с ростом тока нагрузки увеличиваться напряжение СГ?
4. Объяснить вид внешних и регулировочных характеристик СГ. Как влияет характер нагрузки на их вид?
5. Почему величина тока установившегося однофазного к. з. обмотки якоря больше тока трехфазного к. з. при одном и том же значении тока возбуждения I_B ?
6. Как изменится диаграмма Потье, если ток нагрузки уменьшить в два раза?
7. Как изменится диаграмма Потье, если уменьшить ток I_B ?
8. Как, пользуясь диаграммой Потье, получить регулировочную характеристику?
9. Как изменится о. к. з., если увеличить воздушный зазор СГ?
10. Объяснить порядок построения треугольника Потье?

П8.1. Синхронный тахогенератор

Синхронный тахогенератор – это информационная электрическая машина (термины 51, 52 и 53, с. 20 и 21), представляющая собой генератор с *постоянными магнитами* или *независимого возбуждения*, частота f и выходное напряжение которого пропорциональны частоте вращения ротора n .

Одним из назначений тахогенератора ТГ является измерение скорости вращения вала n , т. е. он используется как указатель скорости.

К достоинствам ТГ с постоянными магнитами относится то, что ему не нужен источник энергии для возбуждения и изменение температуры мало влияет на его выходную характеристику. Постоянные магниты изготавливают из магнитных сплавов, обладающих большой стабильностью.

Синхронный ТГ имеет простое устройство. В пазы сердечника статора, набираемого из листовой электротехнической стали, уложена трехфазная или однофазная обмотка. Ротор – постоянный магнит, выполнен в виде диска с полюсами чередующейся полярности. Синхронный ТГ показан на рис. 8.8 (с. 96). Его вал сочленен с валом двигателя постоянного тока, скорость которого необходимо измерять. К обмотке якоря подсоединен вольтметр, шкала которого проградуирована в оборотах в минуту.

При вращении ротора в фазе обмотки статора ТГ индуцируется ЭДС:

$$E = 4,44fw\Phi_{\text{в}}k_0 = c_e n,$$

которая пропорциональна скорости вращения n , так как $f = pn$. Обмоточный коэффициент k_0 , число пар полюсов p , число витков фазы обмотки w – величины постоянные, магнитный поток принимаем неизменным. Функцией скорости вращения ротора синхронного тахогенератора является не только величина индуцируемой ЭДС E , но и ее частота f . Это недостаток синхронного ТГ, так как при его работе будет изменяться как индуктивное сопротивление обмоток самого тахогенератора, так и реактивная составляющая сопротивления нагрузки. При таких условиях выходная характеристика $E = f(n)$ не может быть линейной. Это затрудняет использование синхронного ТГ в устройствах автоматики, несмотря на простоту конструкции и отсутствие скользящего контакта, являющегося источником радиопомех.

Широкое распространение синхронный ТГ получил в качестве индикаторного тахометра для непосредственного измерения скорости вращения различных механизмов. Наряду с синхронными тахогенераторами, также используются тахогенераторы постоянного тока (термин 55, с. 21) [5, с. 79, сл.] и асинхронные ТГ (термин 54) [4, с. 253, сл.].

П8.2. Индукторные генераторы повышенной частоты

В ряде случаев, например при дуговой сварке, поверхностной закалке, в гироскопических и радиолокационных установках, возникает потребность в источниках переменного тока, частота которых измеряется сотнями и тысячами герц. Так как в синхронном генераторе частота равна $f_1 = p \cdot n / 60$, ее повышение возможно только за счет увеличения скорости вращения n и числа пар полюсов p . Увеличение скорости вращения свыше $n = 3\,000$ об/мин (максимальной скорости вращения при $f_1 = 50$ Гц) сопряжено с возрастанием центробежных усилий в роторе и требует уменьшения его диаметра. Это требование находится в противоречии с возможностью увеличения числа пар полюсов и приводит к значительному уменьшению полюсного деления τ . При малых значениях τ возникают затруднения в размещении обмотки переменного тока в пазах статора.

По этой причине синхронные генераторы повышенных частот имеют электромагнитные схемы, отличные от схем обычных синхронных машин.

Далее рассмотрен принцип устройства наиболее распространенных машин повышенной частоты, называемых индукторными генераторами, которые широко используются для генерирования переменного тока с частотой от 400 до 30 000 Гц,

В индукторных генераторах наиболее распространенных типов в отличие от обычных синхронных генераторов магнитный поток в течение периода T не меняет своего знака, т. е. не изменяется синусоидально в пределах от $+\Phi_m$ до $-\Phi_m$, а лишь испытывает колебания от Φ_{\max} до Φ_{\min} (рис. П8.1, а, б).

С точки зрения наведения ЭДС это равносильно синусоидальному изменению магнитного потока с амплитудой $\Phi_m = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / 2$.

Схема устройства одного из типов индукторных синхронных генераторов показана на рис. П8.1, в. На статоре в пазах размещаются обмотка 1 переменного тока и обмотка 2 возбуждения. Активная часть ротора выполнена шихтованной из ферромагнитного материала и не имеет обмотки. На ее внешней поверхности располагаются зубцы. При вращении ротора происходят пульсации магнитного потока в зубцах статора (рис. П8.1, б, в), в результате чего в обмотке статора наводится ЭДС с частотой пульсаций $f_1 = Z_2 n / 60$, где Z_2 – число зубцов ротора; n – скорость вращения ротора, об/мин. Обмотки 1, рас-

положенные на отдельных зубцах статора, могут соединяться по разным схемам и образовывать систему с различным числом фаз в зависимости от числа и шага зубцов ротора.

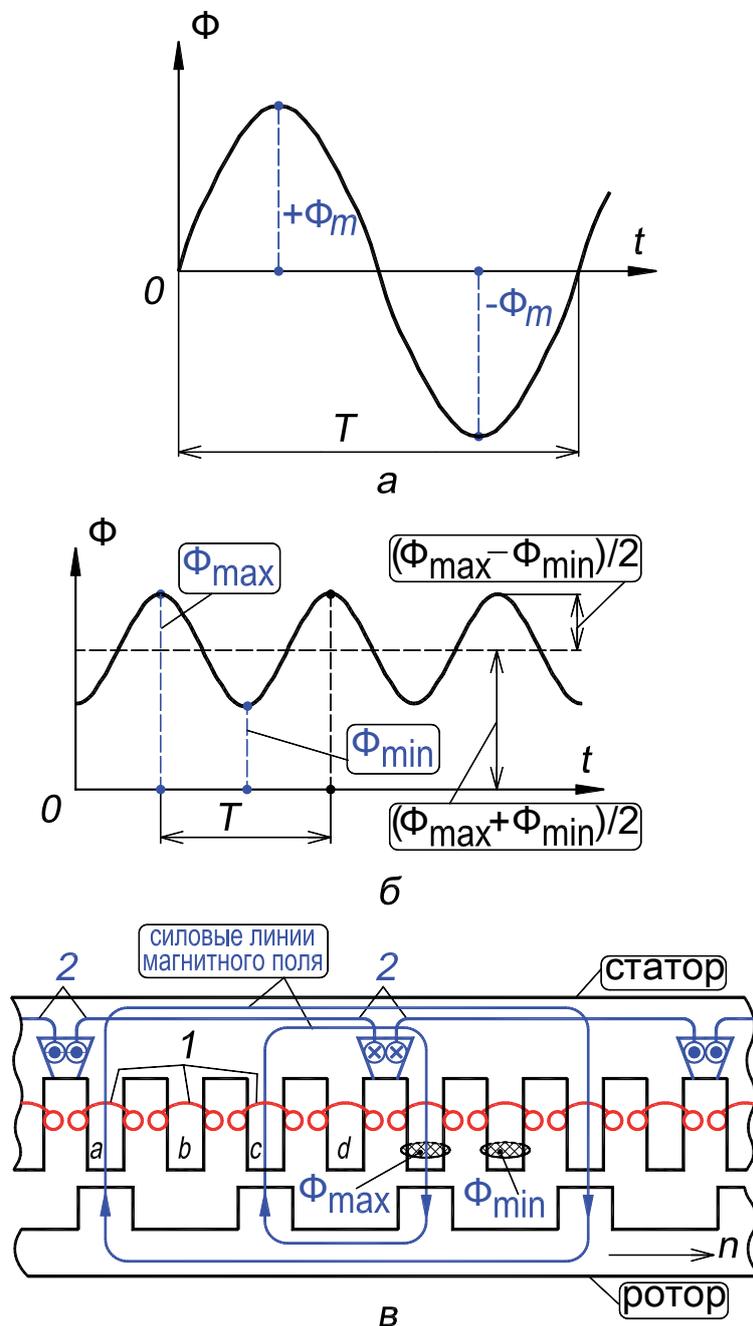


Рис. П8.1. Принцип устройства индукторного синхронного генератора:

a – изменение магнитного потока во времени в обычной синхронной машине;
б – то же в индукторной машине; *в* – схема устройства индукторного генератора

При вращении ротора пульсаций *суммарного* магнитного потока в пределах четырех зубцовых делений статора практически не происходит,

так как увеличение потока в двух зубцах (a и c) компенсируется уменьшением потока в двух других зубцах (b и d). Поэтому в обмотке возбуждения 2 не наводится переменной ЭДС

При нагрузке в индукторном генераторе проявляется реакция якоря, аналогично тому как это имеет место в обычной синхронной машине. Отстающий реактивный ток нагрузки создает размагничивающую реакцию якоря, опережающий ток – намагничивающую реакцию якоря. Поэтому векторная диаграмма индукторного генератора идентична векторной диаграмме обычного генератора, хотя связь индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток с индуктивными параметрами векторной диаграммы в индукторных генераторах получается иной.

При частотах порядка 3 000 Гц и более находят применение индукторные генераторы, электромагнитная схема которых показана на рис. П8.2. В таких машинах на статоре и роторе с двух сторон воздушного зазора имеются зубцы с относительно малым шагом. Рабочая обмотка 1 и обмотка возбуждения 2 размещаются на статоре в больших пазах. Зубцовые деления малых пазов на статоре и роторе одинаковы.

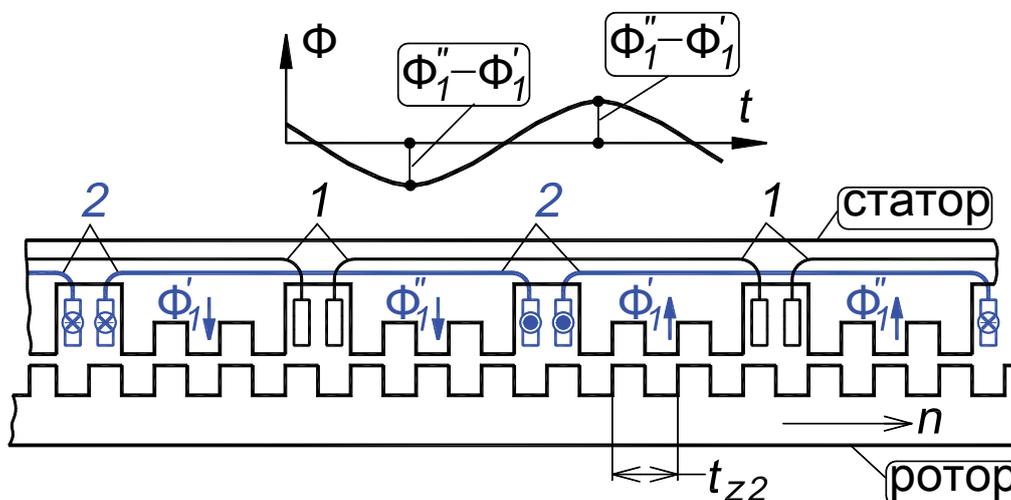


Рис. П8.2. Электромагнитная схема индукторного генератора при частотах 3 000 Гц и более

Как видно на рис. П8.2, магнитный поток, сцепленный с каждой секцией обмотки 1 переменного тока, состоит из двух частей: Φ'_1 и Φ''_1 . Потокосцепление с секцией, обусловленное этими потоками, пропорционально их разности ($\Phi''_1 - \Phi'_1$), причем в рассматриваемом положении ротора ($\Phi''_1 > \Phi'_1$) так как в зоне потока Φ''_1 магнитная проводимость воздушного зазора

больше. При повороте ротора на половину зубцового шага t_{22} поток Φ_1'' станет меньше потока Φ_1' и разность $(\Phi_1'' - \Phi_1')$ изменит свой знак на обратный.

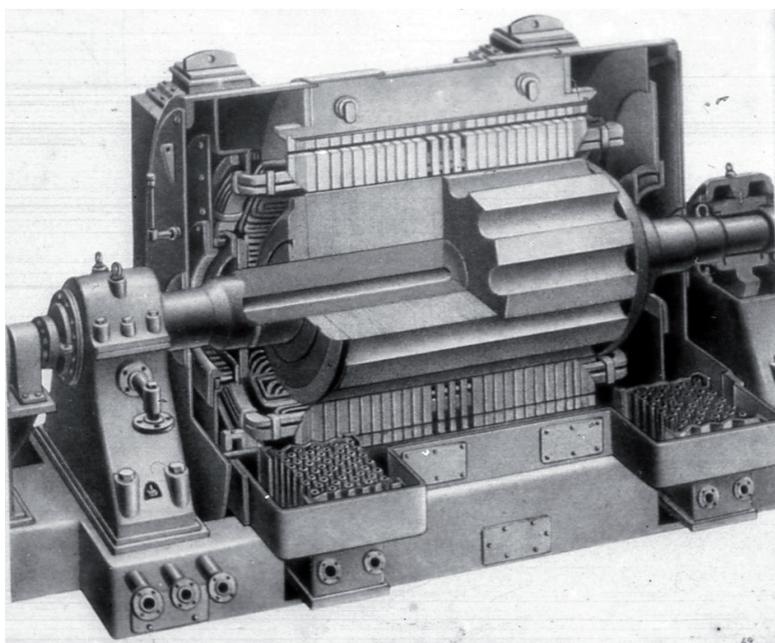
Недостатком обоих видов рассмотренных выше индукторных машин является неполное использование магнитных потоков машины в процессе наведения ЭДС. Это приводит к увеличению габаритов машины.

Достоинством индукторных генераторов является отсутствие движущихся контактов в цепи возбуждения, поэтому индукторные машины могут быть отнесены к классу бесконтактных электрических машин.

Индукторные генераторы с электромагнитной схемой, подобной схеме на рис. П8.1, имеют обычно полюсное деление $\tau > 10$ мм, при меньших полюсных делениях чаще используются генераторы, аналогичные показанному на рис. П8.2.

Высокочастотные генераторы индукторного типа применяются в качестве вспомогательного генератора для возбуждения крупных синхронных генераторов в системах возбуждения с полупроводниковыми выпрямителями (рис. П8.3, ..., П8.7) /см. разд. 5.6, с. 58, сл./.

Индукторный генератор не имеет обмотки на роторе (рис. П8.4), что повышает его надежность в эксплуатации. Повышенная частота (500 Гц) позволяет уменьшить габариты и повысить быстродействие системы возбуждения.



**Рис. П8.3. Высокочастотный трехфазный индукторный синхронный возбудитель.
Мощность 2,7 МВ·А**

В системе возбуждения с использованием полупроводниковых выпрямителей с валом турбогенератора сочленяется индукторный генератор, напряжение которого выпрямляется и подводится к обмотке ротора турбогенератора.

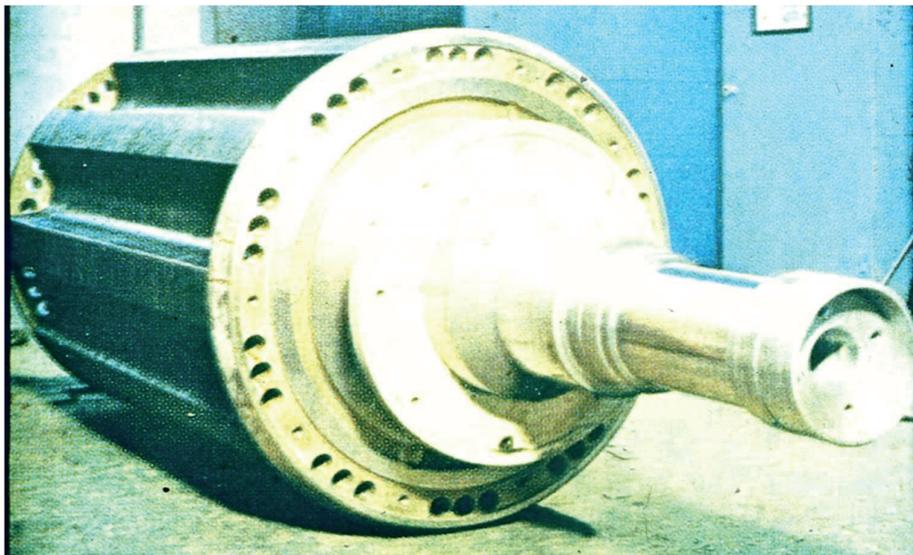


Рис. П8.4. Ротор высокочастотного трехфазного индукторного синхронного возбудителя

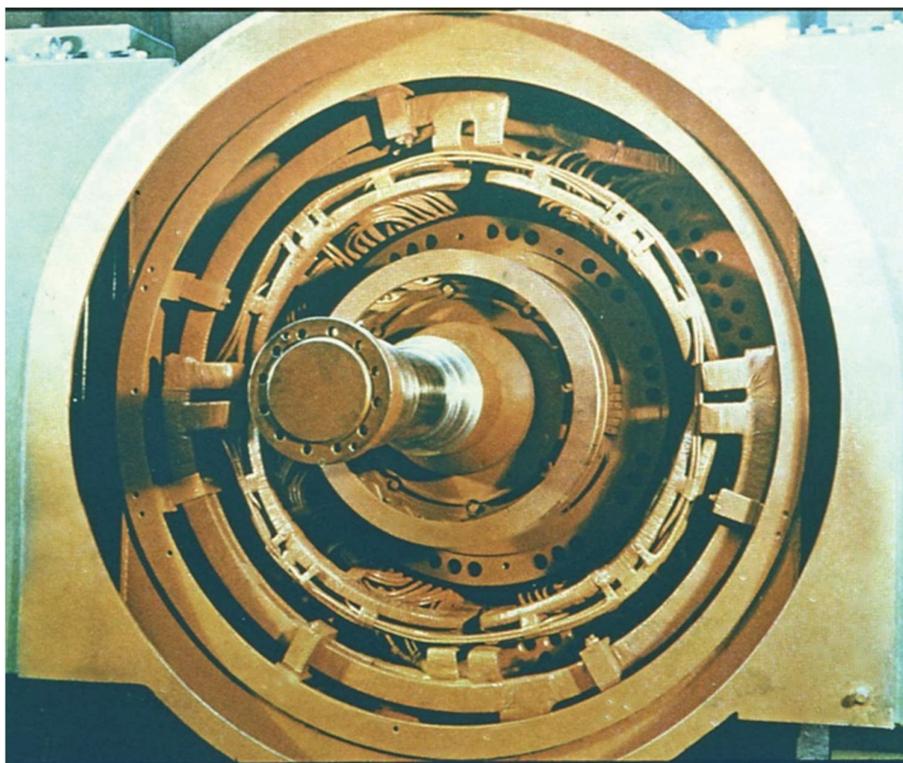
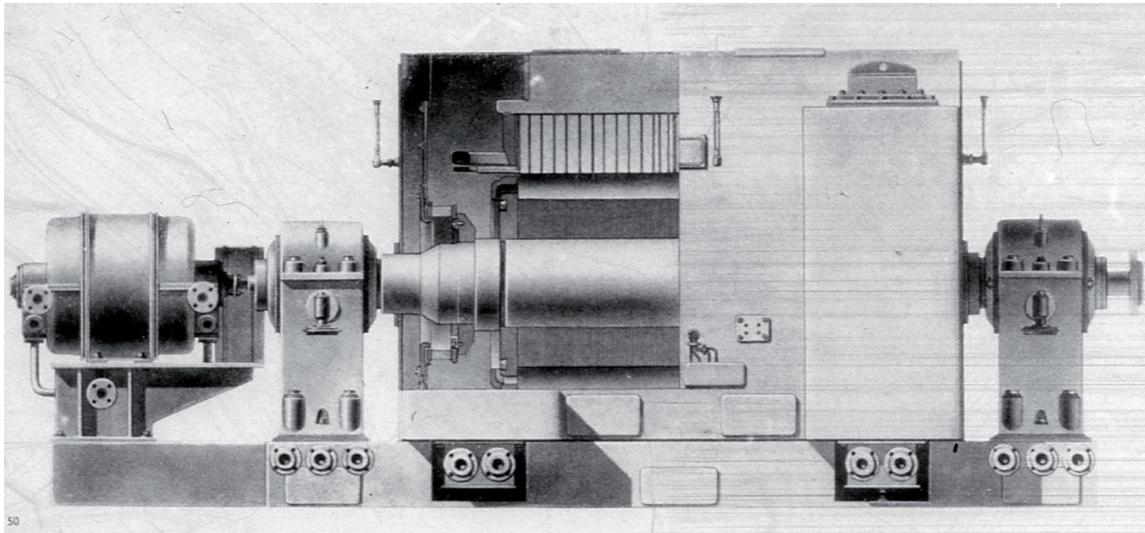
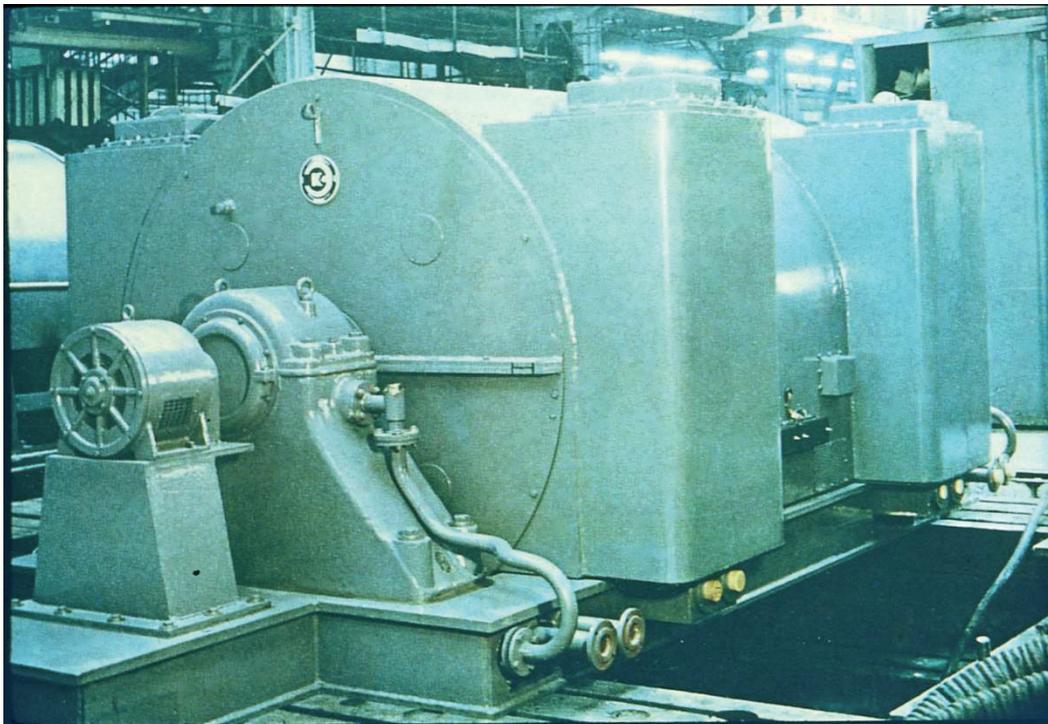


Рис. П8.5. Лобовые части обмоток статора и ротор индукторного синхронного возбудителя



**Рис. П8.6. Высокочастотный трехфазный индукторный синхронный возбудитель.
Мощность 2,7 МВ·А, слева показан подвозбудитель**



**Рис. П8.7. Высокочастотный трехфазный индукторный
синхронный возбудитель типа ВГТ-2500-500**

9. РАБОТА № 2

ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Оглавление

1. Цель работы	117
2. Программа работы	117
3. Основы теории	118
3.1. Физическая природа сопротивлений обмотки якоря X_d и X_q	118
3.1.1. Метод скольжения определения величин сопротивлений X_d и X_q	120
3.2. Переходный процесс в синхронном генераторе при трехфазном коротком замыкании	121
3.2.1. Особенности процесса	121
3.2.2. Электромагнитные процессы в цепи статора	122
3.2.2.1. Изменение периодической составляющей тока статора	122
3.2.2.2. Изменение апериодической составляющей тока статора	127
3.2.2.3. Изменение результирующего тока обмотки статора	129
3.2.3. Электромагнитные процессы в цепях ротора	129
3.2.4. Электромагнитные моменты синхронного генератора при коротком замыкании	131
3.2.5. Статический метод определения величин сопротивлений X''_d и X''_q	134
3.3. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов ..	134
3.3.1. Причины несимметричных режимов	134
3.3.2. Действие симметричных составляющих токов в синхронной машине и параметры прямой, обратной и нулевой последовательности	135
3.3.2.1. Токи и сопротивления прямой последовательности	135
3.3.2.2. Токи и сопротивления обратной последовательности	136
а) Опытное определение сопротивлений обратной последовательности	137

3.3.2.3. Токи и сопротивления нулевой последовательности	138
а) Опытное определение сопротивлений нулевой последовательности	138
3.3.3. Работа синхронных генераторов при несимметричной нагрузке	139
3.3.3.1. Потери энергии и нагрев ротора	139
3.3.3.2. Вибрация	140
3.3.3.3. Искажение симметрии напряжений	140
3.3.3.4. Высшие гармоники токов и напряжений	141
3.4. Расчет токов обмотки якоря при к. з.	142
4. Экспериментальное исследование	143
4.1. Пуск приводного двигателя	143
4.2. Синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям (X_d и X_q)	143
4.3. Сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям (X_d'' и X_q'')	147
4.4. Индуктивное сопротивление обмотки якоря X_2 току обратной последовательности	148
4.5. Индуктивное сопротивление обмотки якоря X_0 току нулевой последовательности	149
5. Содержание и оформление отчета	151
6. Контрольные вопросы	152
Приложение 9.	
П9.1. Параметры синхронных машин	153

Перечень рисунков в 9-м разделе

Рис. 9.1. Распределение магнитного поля тока I_a обмотки якоря при установившейся трехфазной симметричной нагрузке индуктивного (a) и активного (b) характера	119
Рис. 9.2, лист 1. Распределение поля якоря в процессе трехфазного к. з.: в первые моменты, когда поле индуцирует токи в обмотках демпферной и возбуждения (a); после затухания тока в демпферной обмотке (b); при установившемся режиме к. з. (b)	124
Рис. 9.2, лист 2. Распределение поля якоря соответствующее: сверхпереходному сопротивлению обмотки якоря X_q'' (a); установившемуся значению сопротивления обмотки якоря X_q (b) ...	125
Рис. 9.3. Изменение во времени сопротивления обмотки якоря по оси d	126
Рис. 9.4. Изменение во времени аperiодического тока обмотки якоря i_a при $X_q'' > X_d''$	129
Рис. 9.5. Изменение во времени тока i_t в одной из фаз обмотки якоря в процессе к. з.	130
Рис. 9.6. Изменение во времени тока i_b обмотки возбуждения в процессе к. з.	131
Рис. 9.7. Изменение во времени тока i_{dd} демпферной обмотки в процессе к. з.	131
Рис. 9.8. Изменение электромагнитного момента генератора	133
Рис. 9.9. К анализу физической природы индуктивного сопротивления X_2	136
Рис. 9.10. Форма кривой тока обмотки якоря при двухфазном к. з.	141
Рис. 9.11, лист 1. Электрическая схема лабораторной установки для определения сопротивлений обмотки якоря: X_d и X_q (a); X_d'' и X_q'' (b)	144
Рис. 9.11, лист 2. Электрическая схема лабораторной установки для определения сопротивлений обмотки якоря: X_2 (a); X_0 (b)	145
Рис. 9.12. К определению насыщенного значения сопротивления $X_{d,s}^*$	147

Перечень таблиц в 9-м разделе

Табл. 9.1. Токи обмотки якоря при к. з.	142
Табл. 9.2. Синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q	146
Табл. 9.3. Сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q ...	148
Табл. 9.4. Индуктивное сопротивление обмотки якоря току обратной последовательности.....	149
Табл. 9.5. Индуктивное сопротивление обмотки якоря току нулевой последовательности	150

1. Цель работы

Ознакомиться с основами теории синхронного генератора при переходных и несимметричных режимах и опытным путем определить индуктивные сопротивления обмотки якоря явнополюсного синхронного генератора.

2. Программа работы

2.1. Определить методом скольжения синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря X_d по продольной оси d и сопротивление X_q по поперечной оси q .

2.2. Определить статическим методом сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря X_d'' по продольной оси d и сопротивление X_q'' по поперечной оси q .

2.3. Определить индуктивное сопротивление обмотки якоря X_2 току обратной последовательности.

2.4. Определить индуктивное сопротивление обмотки якоря X_0 току нулевой последовательности.

2.5. Определить аналитически, в относительных единицах (о. е.), значение ударного тока короткого замыкания.

2.6. Определить аналитически, в относительных единицах, значения установившихся токов одно-, двух- и трехфазного короткого замыкания обмотки якоря при $I_B^* = 1,0$.

3. Основы теории

3.1. Физическая природа сопротивлений обмотки якоря X_d и X_q

Величины индуктивных сопротивлений обмотки якоря току I_a , протекающему в ней, зависят от характера нагрузки. При протекании по обмотке *индуктивного* тока $I_a = I_d$ магнитный поток продольной реакции якоря Φ_{ad} замыкается вдоль оси обмотки возбуждения (ее ось совпадает с продольной осью d , рис. 9.1,а). Поток Φ_{ad} вращается с частотой n_1 синхронно с ротором ($n = n_1$) и индуцирует в обмотке якоря ЭДС самоиндукции:

$$E_{ad} = 4,44fw_a\Phi_{ad.m}k_o, \quad (9.1)$$

где $f = pn_1$ – частота ЭДС; w_a – число витков фазы обмотки якоря; k_o – обмоточный коэффициент; $\Phi_{ad.m}$ – амплитудное значение потока по оси d .

ЭДС E_{ad} можно также представить в виде

$$E_{ad} = X_{ad}I_d, \quad (9.2)$$

где X_{ad} – собственное индуктивное сопротивление обмотки якоря, соответствующее потоку продольной реакции якоря Φ_{ad} при симметричной нагрузке и называемое *индуктивным сопротивлением продольной реакции якоря*.

При протекании по обмотке *активного* тока $I_a = I_q$ магнитный поток поперечной реакции якоря Φ_{aq} замыкается поперек оси обмотки возбуждения (поперечная ось q , рис. 9.1,б). Поток Φ_{aq} вращается с частотой n_1 синхронно с ротором ($n = n_1$) и индуцирует в обмотке якоря ЭДС самоиндукции:

$$E_{aq} = 4,44fw_a\Phi_{aq.m}k_o, \quad (9.3)$$

где $\Phi_{aq.m}$ – амплитудное значение потока по оси q .

ЭДС E_{aq} можно также представить в виде

$$E_{aq} = X_{aq}I_q, \quad (9.4)$$

где X_{aq} – собственное индуктивное сопротивление обмотки якоря, соответствующее потоку поперечной реакции якоря Φ_{aq} при симметричной нагрузке и называемое *индуктивным сопротивлением поперечной реакции якоря*.

Для *явнополюсного* СГ справедливо неравенство $X_{ad} > X_{aq}$. Оно обусловлено тем, что поток продольной реакции якоря Φ_{ad} замыкается по пути с меньшим магнитным сопротивлением, чем поток поперечной реакции Φ_{aq} (рис. 9.1).

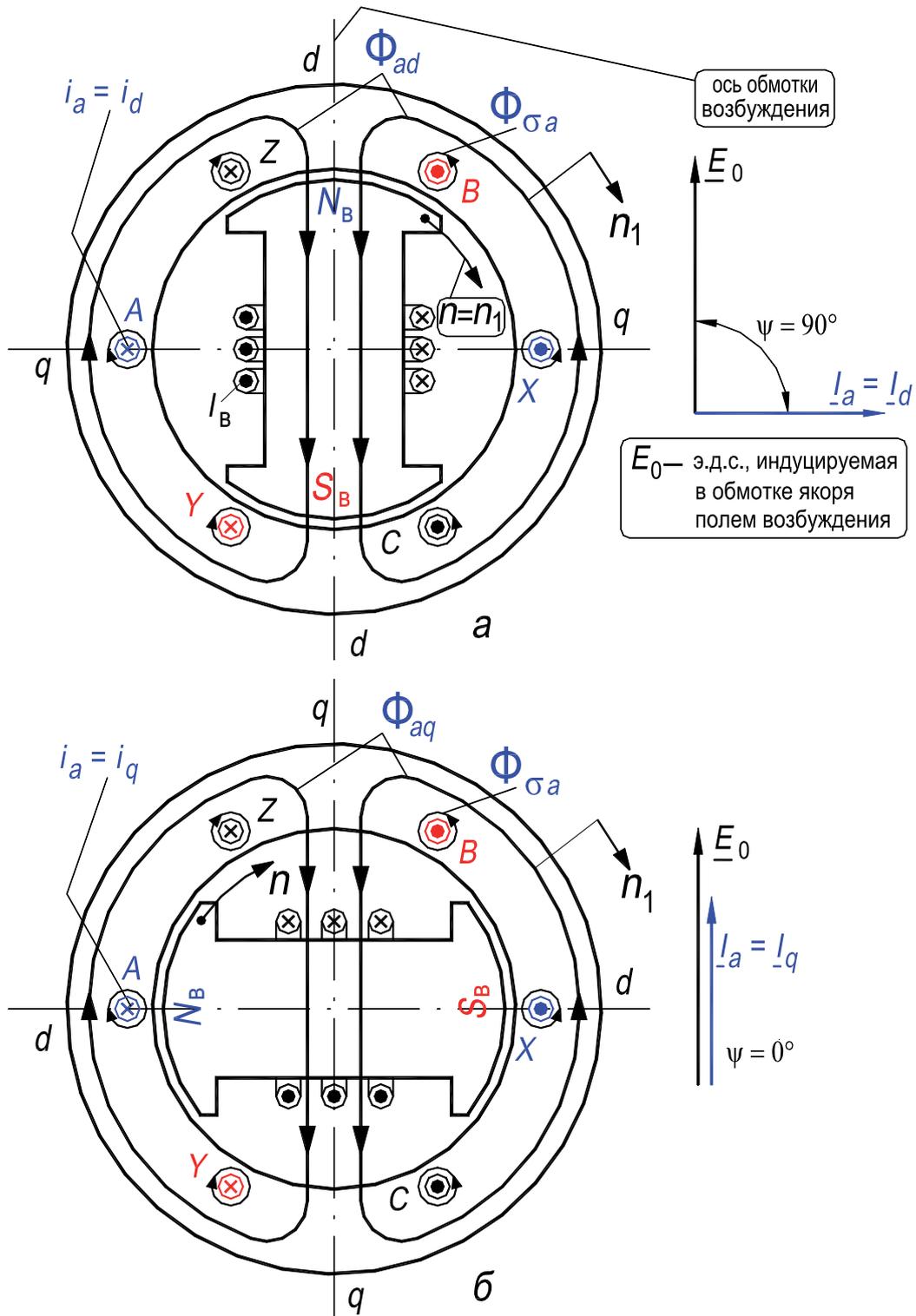


Рис. 9.1. Распределение магнитного поля тока I_a обмотки якоря при установившейся трехфазной симметричной нагрузке индуктивного (а) и активного (б) характера

Для неявнополюсного СГ справедливо соотношение $X_{ad} \approx X_{aq} = X_a$. Это объясняется тем, что магнитное сопротивление потоку реакции якоря Φ_a остается практически неизменным при замыкании потока по различным радиальным осям (рис. 4.2,б, с. 29).

Синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной оси d и поперечной оси q определяются, соответственно, из выражений:

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}, \quad (9.5)$$

$$X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}, \quad (9.6)$$

где $X_{\sigma a}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, обусловленное магнитным потоком рассеяния $\Phi_{\sigma a}$ (см. рис. 9.1).

Для неявнополюсного СГ синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря по любой радиальной оси, определяется равенством

$$X_c = X_a + X_{\sigma a}.$$

Словом “синхронные” подчеркивается, что эти сопротивления соответствуют нормальному установившемуся синхронному режиму работы с симметричной нагрузкой фаз.

Величина сопротивления $X_{\sigma a}$ меньше X_{ad} и X_{aq} .

3.1.1. Метод скольжения определения величин сопротивлений X_d и X_q

Обмотку якоря подсоединяют к трехфазной сети; обмотка, обтекаемая трехфазным током, создает вращающееся магнитное поле. Индуктор вращается приводным двигателем в направлении вращения поля якоря со скоростью близкой к синхронной (*но не равной ей*). В результате этого положение индуктора плавно и медленно изменяется в магнитном поле якоря. Ось магнитного поля якоря будет периодически совпадать то с продольной осью d , то с поперечной осью q индуктора. Вследствие различного магнитного сопротивления полю якоря по этим осям будет изменяться магнитодвижущая сила обмотки якоря, а следовательно, и ток, потребляемый обмоткой якоря из сети. По величине тока обмотки якоря судят о величине сопротивлений X_d и X_q . Минимальное значение тока соответствует большему сопротивлению X_d , а максимальное – меньшему сопротивлению X_q (см. разд. 4.2, с. 143).

3.2. Переходный процесс в синхронном генераторе при трехфазном коротком замыкании

3.2.1. Особенности процесса

Процесс возникает в синхронных машинах при всяких внезапных изменениях режима работы, а также при коммутационных операциях, связанных с включениями и отключениями машины.

Переходные процессы в синхронных машинах могут влиять на их *устойчивость* (термины 29 и 30, с. 17), т. е. на способность автоматически поддерживать синхронное вращение при нарушениях установившегося режима.

Далее будут рассмотрены с физической точки зрения электромагнитные переходные процессы, возникающие в цепях статора и ротора синхронного генератора при внезапных изменениях его нагрузки при постоянной скорости вращения ротора $n = \text{const}$ [1, 6].

Наиболее характерным внезапным изменением нагрузки синхронного генератора является *трехфазное короткое замыкание* на его зажимах (Работа № 1, рис. 8.10,а, с. 102) *при холостом ходе*, когда токи в обмотках статора за короткий период времени возрастают от *нулевого* значения до значений, во много раз превосходящих номинальный ток машины.

Принимаем, что продолжительность переходного электромагнитного процесса невелика и скорость вращения ротора за время нарастания токов в обмотках статора не успевает измениться, и остается практически постоянной.

Аналогичные переходные процессы могут возникнуть также в синхронном двигателе и компенсаторе, если при вращении без нагрузки и при отсутствии реактивного тока в статоре вблизи зажимов произойдет трехфазное замыкание. Машина в этом случае перейдет в режим короткозамкнутого генератора, вращаясь за счет запасенной ее ротором кинетической энергии.

В цепях короткозамкнутых обмоток статора активные сопротивления малы по сравнению с индуктивными, поэтому токи короткого замыкания могут рассматриваться в первом приближении как чисто реактивные, отстающие от ЭДС обмоток на угол $\sim 90^\circ$, т. е. *периодический ток в обмотке якоря имеет только продольную составляющую I_d* (рис. 9.1,а).

Рассмотрим электромагнитные процессы, которые будут происходить в отдельных цепях статора и ротора машины при коротком замыкании.

3.2.2. Электромагнитные процессы в цепи статора

3.2.2.1. Изменение периодической составляющей тока статора

Токи в фазах статора будут иметь, как и в случае короткого замыкания трансформатора, периодическую I_d и аperiodическую I_a составляющие (периодическая составляющая $I_q \approx 0$). Значение аperiodической составляющей зависит от момента начала короткого замыкания, так как сумма периодической и аperiodической составляющих в каждой фазе при $t = 0$ (это момент начала к. з.) должна быть равна нулю, $i_d + i_a = 0$ (короткому замыканию предшествует холостой ход).

Периодические составляющие (i_d) токов в фазах статора создают *вращающееся* синхронно с ротором магнитное поле. *Аperiodические* составляющие (i_a) создают *неподвижное* в пространстве поле.

Возникновение двух магнитных полей, ранее (при холостом ходе) не существовавших в машине, вызывает в соответствии с законом Ленца реакцию всех замкнутых контуров машины, сцепленных с этими полями (к этим контурам, прежде всего, относятся демпферная обмотка и обмотка возбуждения, а также массивные части ротора). В них возникают токи, противодействующие образованию новых магнитных полей в машине (это поля обмотки якоря, которых не было при холостом ходе СГ, т. е. при $t < 0$).

Возникновение вращающегося поля статора (оно создано периодическим током i_d), неподвижного относительно ротора, вызывает: 1) в демпферной обмотке, 2) в обмотке возбуждения и 3) во всех других замкнутых контурах ротора *аperiodические* токи реакции, которые из-за наличия потерь в обмотках постепенно затухают. Эти токи обусловлены тем, что амплитуда вращающегося поля статора постепенно уменьшается. Аperiodические токи в цепях ротора создают магнитные поля, *неподвижные* относительно ротора и вращающиеся вместе с ним и, следовательно, неподвижные относительно вращающегося поля статора.

Аperiodический ток статора i_a , возникающий при переходном процессе, создает *неподвижное* в пространстве магнитное поле статора, которое наводит в демпферной обмотке и обмотке возбуждения ротора *периодические* токи с частотой f , которые постепенно затухают по мере затухания аperiodических токов в фазах статора.

Рассмотрим индуктивные параметры обмотки якоря синхронной машины в процессе короткого замыкания. При установившемся трехфазном к. з. обмотка статора имеет индуктивное сопротивление $X_d = X_{\sigma a} + X_{ad}^1$ (рис. 9.1,а и рис. 9.2, лист 1,в). В первые моменты короткого замыкания из-за размагничивающего действия токов, возникающих в демпферной обмотке (i_{dd}), в обмотке возбуждения (i_b) и в других замкнутых контурах ротора, индуктивное сопротивление обмотки статора резко снижается до значения $X''_d \ll X_d$ (рис. 9.2, лист 1,а). Это обусловлено тем, что поля рассеяния обмоток ротора ($\Phi_{\sigma dd}$ и $\Phi_{\sigma b}$), созданных этими токами, вытесняют поле якоря из тела ротора в околороторное пространство, т. е. на путь с большим магнитным сопротивлением. Поле якоря уменьшается (до значения Φ''_{ad}) и, соответственно, резко снижается до значения X''_d индуктивное сопротивление обмотки статора.

В дальнейшем для упрощения анализа будем считать, что на роторе имеются только два замкнутых контура: 1) демпферная обмотка и 2) обмотка возбуждения. Все другие контуры, например массивные части ротора, будем условно объединять с демпферной обмоткой. При этих условиях процесс короткого замыкания синхронной машины будет аналогичен переходу трехобмоточного трансформатора от режима х. х. к режиму к. з. двух его вторичных обмоток.

В первые моменты короткого замыкания индуктивное сопротивление обмотки статора, отнесенное к одной фазе, можно считать равным X''_d (рис. 9.2, лист 1,а). Это сопротивление называют обычно *сверхпереходным* индуктивным сопротивлением обмотки статора. В дальнейшем, по мере того как затухают токи в демпферной обмотке и обмотке возбуждения, магнитное поле статора начинает всё больше проникать в тело ротора в зоне его обмоток. Ток в демпферной обмотке i_{dd} затухает быстрее, чем ток i_b в обмотке возбуждения. Поэтому поле статора вначале проникает в тело ротора в зоне демпферной обмотки (рис. 9.2, лист 1,б). В пределе, если бы ток в демпферной обмотке стал равным нулю (это равносильно размыканию демпферной обмотки), индуктивное сопротивление обмотки статора было бы равно X'_d . Это сопротивление называют обычно *переходным* индуктивным сопротивлением обмотки статора.

¹ В дальнейшем переходный процесс будет рассматриваться применительно к явнополусной машине

В конце переходного процесса, когда все наводимые в контурах ротора токи затухают, индуктивное сопротивление обмотки статора становится равным значению $X_d = X_{\sigma a} + X_{ad}$ (рис. 9.2, лист 1, б). Сопротивление X_d – это синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси в установившемся режиме.

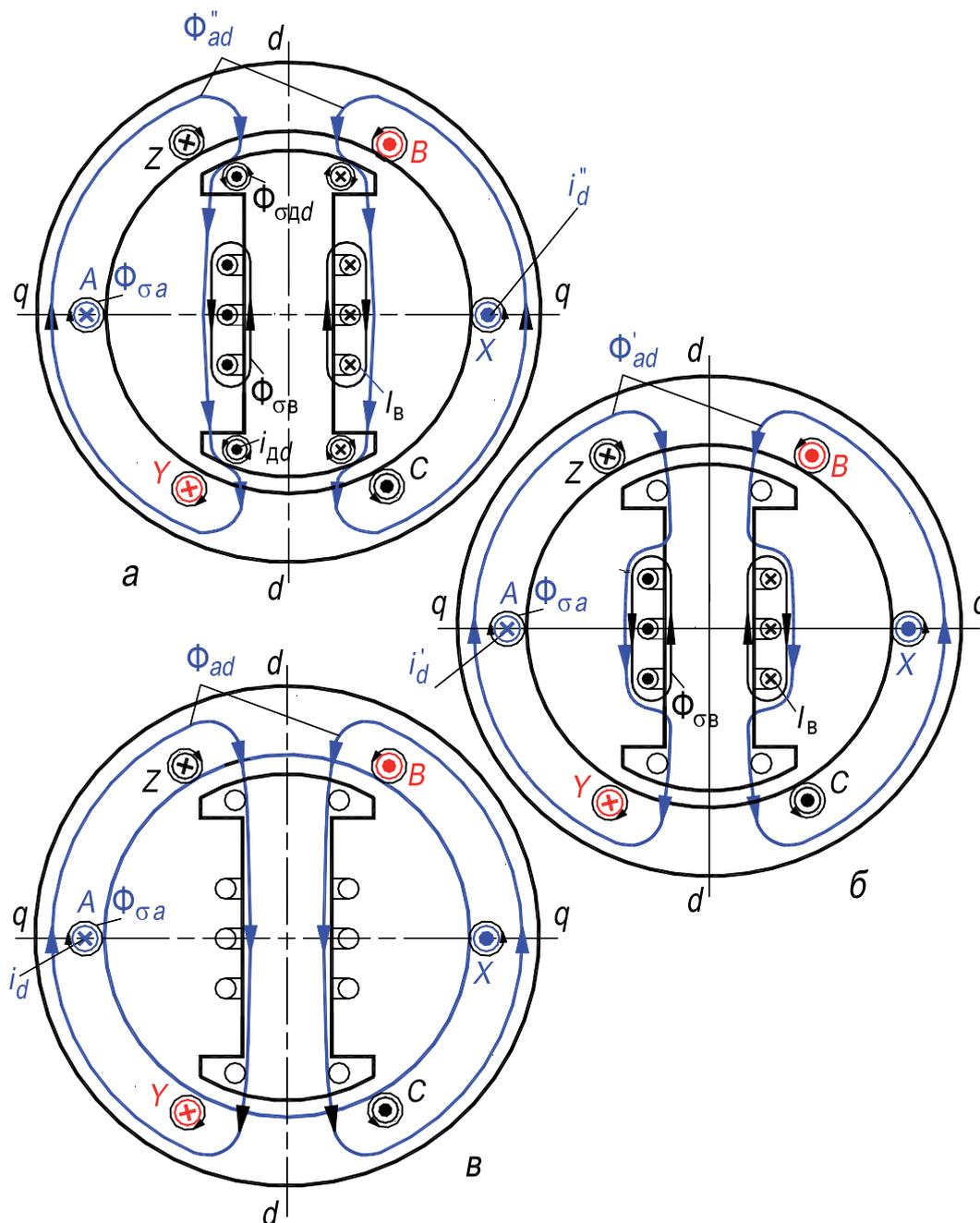


Рис. 9.2, лист 1. Распределение поля якоря в процессе трехфазного к. з.:
 в первые моменты, когда поле индуцирует токи в обмотках демпферной и возбуждения (а);
 после затухания тока в демпферной обмотке (б); при установившемся режиме к. з. (в)

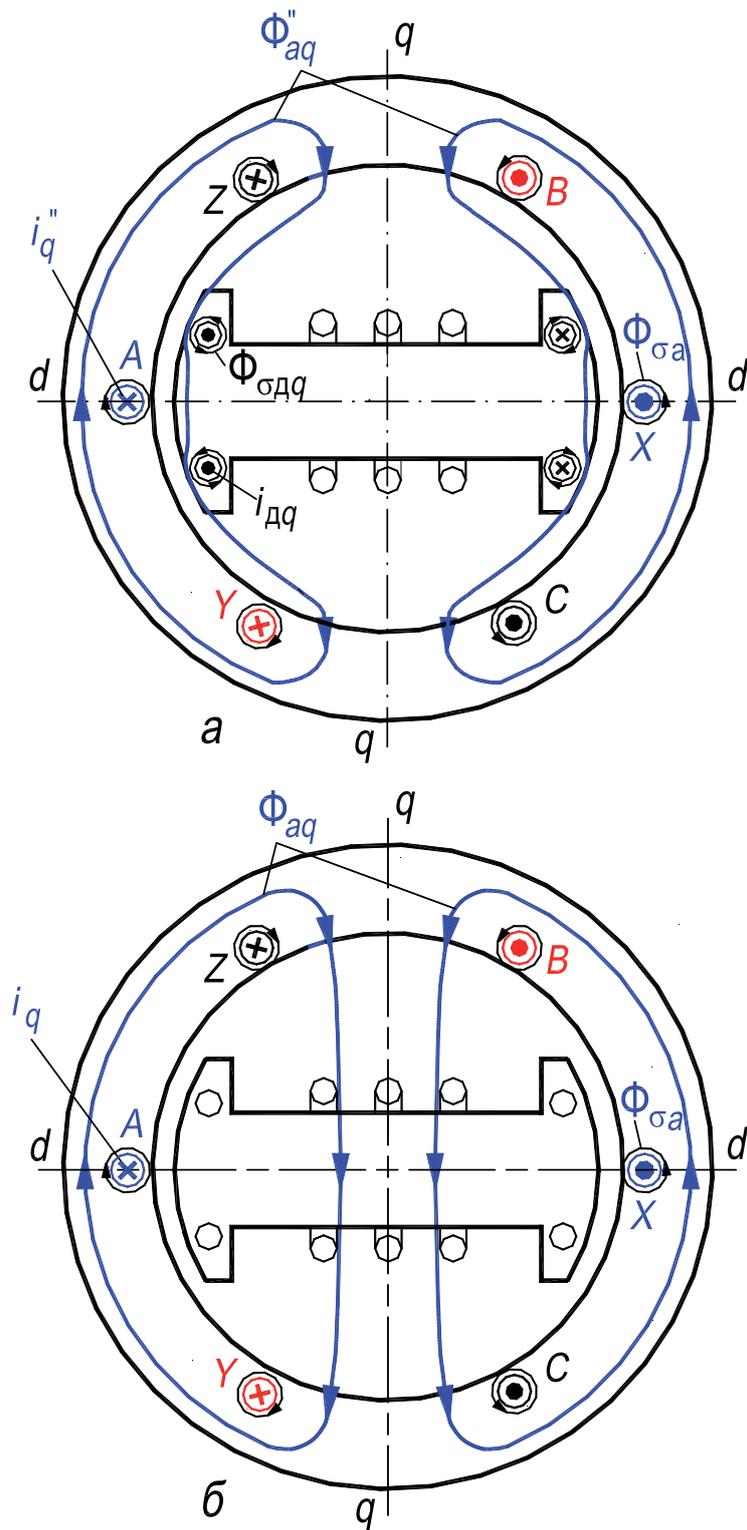


Рис. 9.2, лист 2. Распределение поля якоря соответствующее:
 сверхпереходному сопротивлению обмотки якоря X_q'' (а);
 установившемуся значению сопротивления обмотки якоря X_q (б)

В соответствии с постепенным изменением индуктивного сопротивления обмотки статора в процессе перехода тока короткого замыкания от его начального сверхпереходного значения к установившемуся амплитуда периодической составляющей тока постепенно будет уменьшаться, от максимального значения, равного $\sqrt{2}E_0/X''_d$, до минимального установившегося, равного $\sqrt{2}E_0/X_d$. Этот процесс аналитически может быть выражен в следующей форме (активная составляющая тока к. з. пренебрежимо мала и поэтому не учитывается):

$$i_d = -\sqrt{2}E_0 \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (9.7)$$

или в более краткой записи:

$$i_d = -\frac{\sqrt{2}E_0}{X_d(t)} \cos(\omega t + \alpha_0), \quad (9.8)$$

где угол α_0 определяется моментом начала короткого замыкания, когда $t = 0$. Меняющееся во времени сопротивление $X_d(t)$ обмотки статора представлено графически на рис. 9.3.

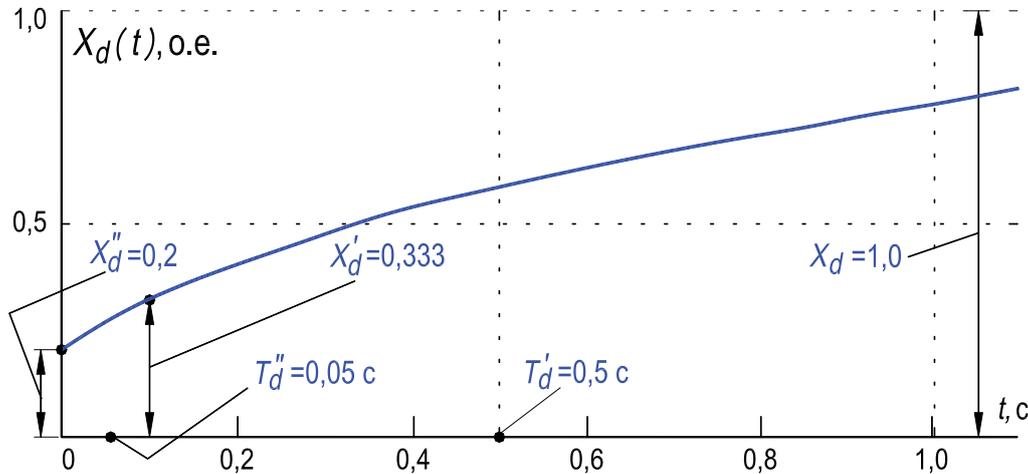


Рис. 9.3. Изменение во времени сопротивления обмотки якоря по оси d

Постоянная времени T''_d сверхпереходного процесса зависит от скорости затухания токов в демпферной обмотке, причем

$$T''_d = \frac{X''_{dd}}{2\pi f R_{dd}}, \quad (9.9)$$

где X''_{dd} — приведенное к статору индуктивное сопротивление по продольной оси демпферной обмотки при наличии замкнутых накоротко обмотки

статора (через сеть) и обмотки ротора; R_{dd} — приведенное к статору активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси.

Постоянная времени переходного процесса равна

$$T_d' = \frac{X_B'}{2\pi f R_B}, \quad (9.10)$$

где X_B' — приведенное к статору индуктивное сопротивление обмотки возбуждения при наличии замкнутой накоротко (через сеть) обмотки статора; R_B — приведенное к статору активное сопротивление обмотки возбуждения.

Значения постоянных времени *сверх*переходного и переходного процессов приведены в Прил. 9.1, с. 153.

3.2.2.2. Изменение апериодической составляющей тока статора

В начальный момент ($t = 0$) апериодическая составляющая i_a тока будет равна и обратна по знаку периодической составляющей (это объясняется тем, что в моменты времени $t < 0$ и $t = 0$ ток в фазах обмотки статора равен нулю):

$$i_a = -i_d = \frac{\sqrt{2}E_0}{X_d''},$$

поэтому в фазах A , B и C она будет иметь в общем случае разные значения.

Постоянная времени процесса затухания апериодического тока равна

$$T_a'' = \frac{X_a''}{2\pi f R_a}, \quad (9.11)$$

где X_a'' — индуктивное сопротивление фазы статора, обусловленное магнитным полем апериодического тока; это сопротивление приближенно можно принять

$$X_a'' \approx (X_d'' + X_q'')/2 \approx X_2, \quad (9.12)$$

поскольку ротор, вращаясь в поле, созданном апериодическим током, периодически меняет положение своей продольной оси d по отношению к оси

поля якоря и реагирует на это поле аналогично тому, как он реагирует на поле обратной последовательности².

В равенстве (9.12) X''_q – “сверхпереходное” индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси; X_2 – индуктивное синхронное сопротивление обратной последовательности (см. разд. 3.3.2.2, с. 136).

Сопротивление X''_q по аналогии с сопротивлением X''_d иллюстрирует рис. 9.2, лист 2,а. На этом рисунке поле обмотки якоря (Φ''_{aq}), действующее по оси q , не индуцирует ЭДС в витках обмотки возбуждения, так как поперечная ось q и ось обмотки возбуждения смещены на 90° .

Сопротивление R_a в равенстве (9.11) обычно бывает меньше активного сопротивления обмотки статора, так как апериодический ток более равномерно распределяется по сечению проводников и создает меньшие добавочные потери.

Апериодическая составляющая i_a тока статора в явнополюсных синхронных машинах в процессе затухания испытывает периодические колебания. Это обусловлено тем, что магнитное поле, созданное током i_a , пульсирует с частотой $2f$ при вращении явнополюсного ротора из-за различной магнитной проводимости ротора по продольной d и поперечной q осям. При этих условиях ток i_a , стремясь поддержать неизменным потокосцепление, испытывает колебания и изменяется во времени в явнополюсных машинах так, как показано на рис. 9.4:

$$i_a = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left[\left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) \cos \alpha_0 + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \cos(2\omega t + \alpha_0) \right] e^{-t/T''_a}. \quad (9.13)$$

В неявнополюсных машинах и машинах, у которых $X''_d \approx X''_q$, пульсации апериодического тока практически отсутствуют и ток равен

$$i_a = \frac{\sqrt{2} E_0}{X''_d} \cos \alpha_0 e^{-t/T''_a}. \quad (9.14)$$

² Отличие заключается в том, что по отношению к полю обратной последовательности ротор вращается с двойной синхронной скоростью, а по отношению к апериодически затухающему полю – с синхронной скоростью

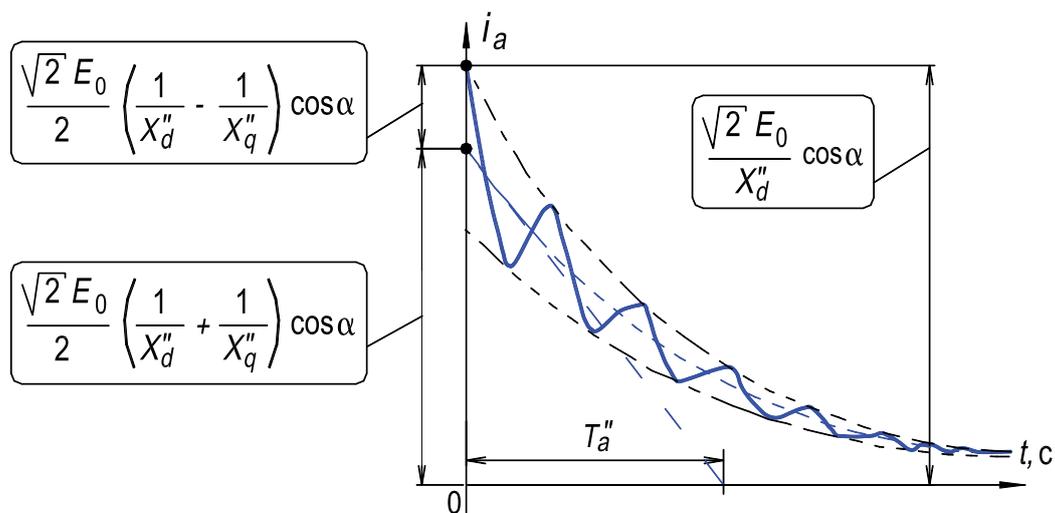


Рис. 9.4. Изменение во времени аperiodического тока обмотки якоря i_a при $X_q'' > X_d''$

3.2.2.3. Изменение результирующего тока обмотки статора

Результирующий ток в обмотке статора при трехфазном коротком замыкании равен

$$i_t = i_d + i_a, \quad (9.15)$$

причем периодическая и аperiodическая составляющие тока i_d и i_a находятся из равенств (9.7) и (9.13) или (9.14).

В фазе A начало процесса короткого замыкания ($t = 0$) определяется значением начального угла α_0 между осью этой фазы и осью d , в фазах B и C – соответственно углами $(\alpha_0 - 2\pi/3)$ и $(\alpha_0 - 4\pi/3)$.

На рис. 9.5 показано изменение тока i_t в процессе трехфазного короткого замыкания *неявно*полюсного синхронного генератора.

3.2.3. Электромагнитные процессы в цепях ротора

В роторе имеются две замкнутые цепи: обмотка возбуждения и демпферная обмотка, которые совместно противодействуют, в соответствии с законом Ленца, изменению магнитного поля статора (это поле имеет место при коротком замыкании, но оно отсутствовало при холостом ходе).

Считаем, что перед началом короткого замыкания (т. е. при холостом ходе генератора) в обмотке возбуждения проходил ток i_{B0} . По мере нарастания (*изменения*) магнитного поля статора ток в обмотке возбуждения будет

меняться, реагируя на все изменения магнитного поля статора. Аналогичные процессы будут происходить в демпферной обмотке, с тем отличием, что ее начальный ток равен нулю.

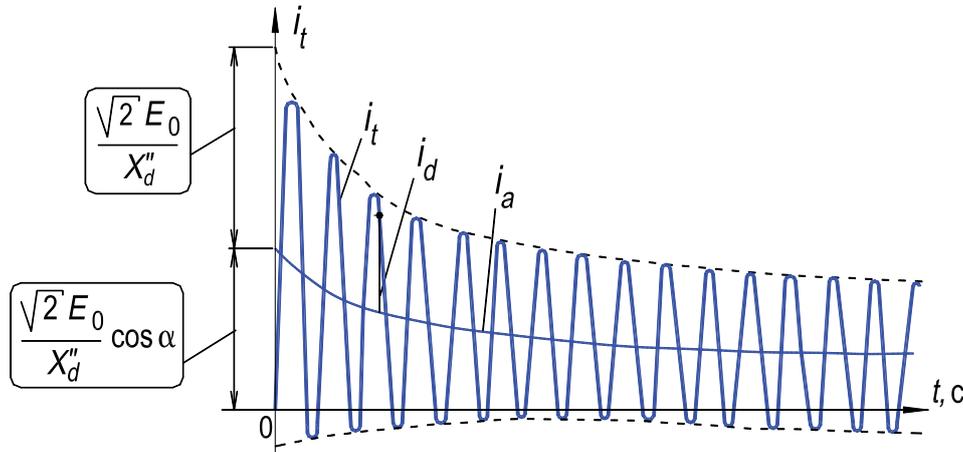


Рис. 9.5. Изменение во времени тока i_t в одной из фаз обмотки якоря в процессе к. з.

В общем случае ток i_B в обмотке возбуждения будет равен

$$i_B = i_{B0} + i'_B e^{-t/T'_d} + i''_B e^{-t/T''_d} - (i'_B + i''_B) e^{-t/T''_a} \cos \omega t \quad (9.16)$$

и аналогично ток в демпферной обмотке по продольной оси

$$i_{dd} = i'_{dd} e^{-t/T'_d} + i''_{dd} e^{-t/T''_d} - (i'_{dd} + i''_{dd}) e^{-t/T''_a} \cos \omega t. \quad (9.17)$$

Токи i'_B и i'_{dd} обусловлены переходным процессом в обмотке статора, токи i''_B и i''_{dd} – сверхпереходным процессом, а токи, пропорциональные $\cos \omega t$, – наличием в статоре затухающего аperiodического тока i_a . В выражениях (9.16) и (9.17) не учтено взаимное влияние двух контуров ротора.

На рис. 9.6 показано изменение тока i_B в процессе трехфазного короткого замыкания. Кривая a , соответствующая аperiodической составляющей тока, проходит через максимум, что обусловлено постепенным затуханием токов в демпферной обмотке.

Ток i_{dd} в демпферной обмотке в процессе короткого замыкания статора в общем случае при сделанных выше допущениях определяется равенством (9.17). Изменение тока i_{dd} в процессе короткого замыкания показано на рис. 9.7.

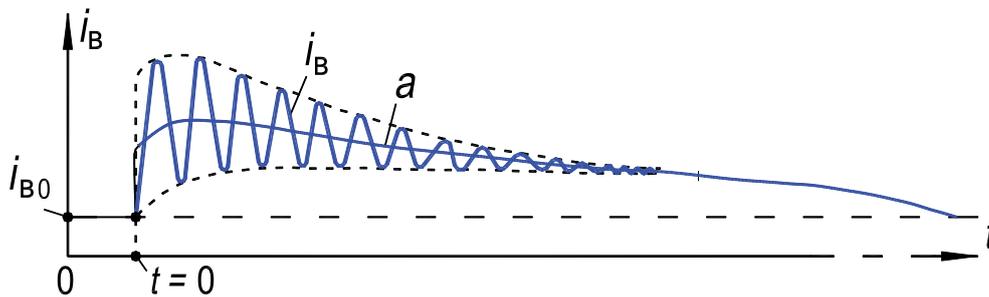


Рис. 9.6. Изменение во времени тока i_B обмотки возбуждения в процессе к. з.

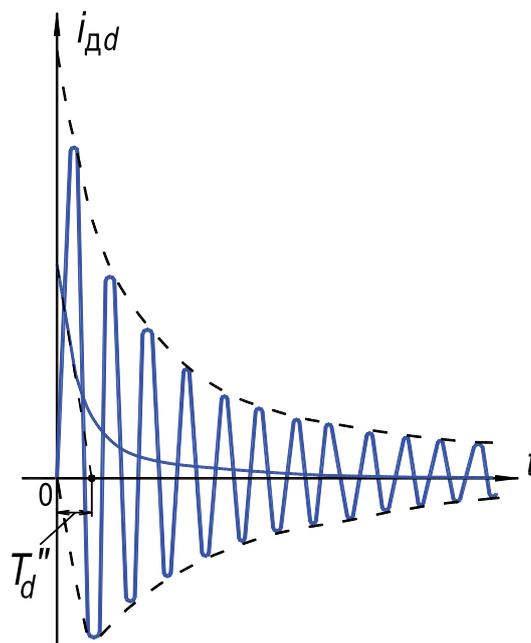


Рис. 9.7. Изменение во времени тока i_{Dd} демпферной обмотки в процессе к. з.

При коротком замыкании возникают также небольшие токи i_{dq} в поперечной оси q *полной* демпферной обмотки (см. рис. 4.3, листы 1 и 2, а, с. 30, сл.), обусловленные поперечным магнитным полем Φ''_{aq} статора ($R_a \neq 0$). Однако это поле мало, и потому токами i_{dq} обычно пренебрегают.

3.2.4. Электромагнитные моменты синхронного генератора при коротком замыкании

При коротком замыкании в результате электромагнитного взаимодействия токов статора и ротора создаются вращающие моменты. Значения этих моментов, имеющих *периодический* характер, достаточно велики и их необходимо учитывать при механических расчетах машины и выборе ее конструкции.

При установившемся процессе короткого замыкания через обмотку статора проходит индуктивный ток i_d (активной составляющей тока якоря можно пренебречь и ток i_d отстает от ЭДС E_0 на $\sim 90^\circ$, рис. 9.1,а), поэтому *электромагнитный* момент генератора практически *равен нулю*. При переходном процессе *апериодические* составляющие токов i_a в фазах статора, затухающие с постоянной времени T''_a и создающие неподвижное в пространстве магнитное поле, взаимодействуют с токами i_B обмотки возбуждения и i_{dd} демпферной обмотки. Эти токи, как видно из равенств (9.16) и (9.17), имеют составляющие, пропорциональные $\exp(-t/T'_d)$ и $\exp(-t/T''_d)$.

Поэтому момент синхронного генератора в процессе трехфазного короткого замыкания может быть принят равным

$$M = \left(M_a + M'_a e^{-t/T'_d} + M''_a e^{-t/T''_d} \right) e^{-t/T''_a} \sin \omega t. \quad (9.18)$$

Момент M при вращении ротора изменяется по гармоническому закону пропорционально $\sin \omega t$, причем

$$M_a = \frac{mE_0^2}{\Omega X_d}; \quad (9.19)$$

$$M'_a = \frac{mE_0^2}{\Omega} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right); \quad (9.20)$$

$$M''_a = \frac{mE_0^2}{\Omega} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right). \quad (9.21)$$

Изменение вращающего момента M во времени показано на рис. 9.8. В явнополюсных синхронных генераторах в дополнение к моменту M возникает дополнительно небольшой реактивный момент M_p , меняющийся во времени с частотой 2ω и обусловленный стремлением ротора ориентироваться по оси поля, созданного апериодическим током i_a . Этот дополнительный реактивный момент можно принять равным

$$M_p = \frac{mE_0^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{X''_q} - \frac{1}{X''_d} \right) e^{-2t/T''_a} \sin 2\omega t. \quad (9.22)$$

Так как сопротивления X''_d и X''_q мало отличаются друг от друга, вращающий момент M_p обычно мал и его можно не учитывать.

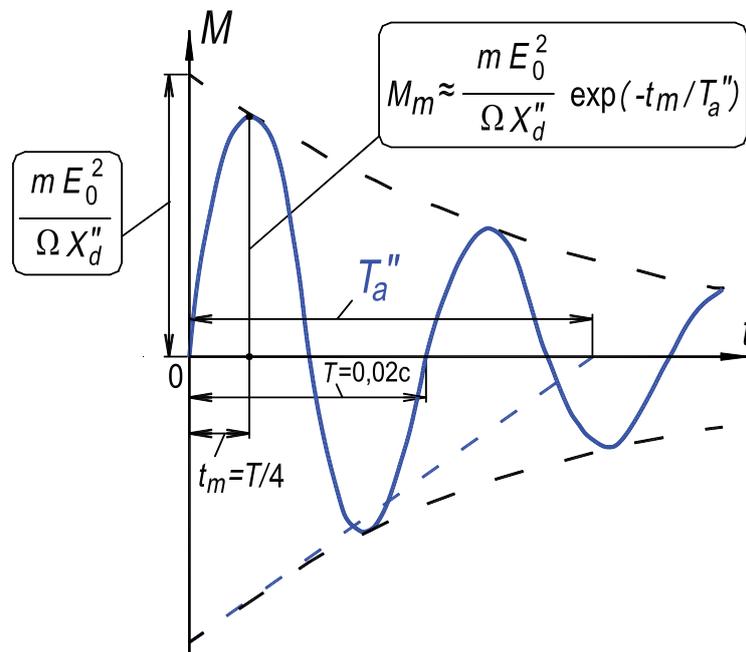


Рис. 9.8. Изменение электромагнитного момента генератора с демпферной обмоткой в процессе к. з.

Как видно из рис. 9.8, максимальный вращающий момент в процессе короткого замыкания равен

$$M_m \approx \frac{m E_0^2}{\Omega X_d''} e^{-t_m / T_a''}, \quad (9.23)$$

причем $t_m \approx T/4$ (при частоте $f = 50$ Гц период $T = 0,02$ с).

Этот момент может в 5...10 раз превышать номинальный момент генератора.

Выше был рассмотрен процесс к. з. в общем случае, когда ротор, помимо обмотки возбуждения, имел демпферную обмотку. На практике довольно широко применяются синхронные машины, у которых функцию демпферной обмотки выполняет массивное тело ротора (турбогенераторы и турбодвигатели) или массивные полюсы. Переходные процессы в таких машинах протекают приблизительно так же, как и при наличии явно выраженной демпферной обмотки. Очевидно, что демпфирующий эффект массивного тела ротора и массивных полюсов проявляется обычно слабее, чем у роторов с демпферной обмоткой.

Синхронные машины относительно небольшой мощности могут быть выполнены без демпферной обмотки и массивных полюсов (именно такая машина исследуется в Работы №№1, 2, 3 и 4; см. разд. 6, с. 60,сл.).

Рассмотренные выше переходные электромагнитные процессы, возникающие в синхронной машине при изменении режима ее работы, определяются рядом параметров (сопротивлений обмоток и постоянных времени). Для возможности количественного анализа переходных процессов в Прил. 9.1, с. 153 приведены примерные значения этих параметров.

Параметры неявно- и явнополюсных машин колеблются в сравнительно широких пределах (см. Прил. 9.1, с. 153). Это объясняется большим диапазоном номинальных мощностей и скоростей вращения.

3.2.5. Статический метод определения величин сопротивлений X''_d и X''_q

К двум фазам обмотки якоря подводят переменное напряжение. Протекающий по обмоткам ток создает *пульсирующее, неподвижное в пространстве*, поле. Индуктор *вручную* устанавливают вдоль или поперек оси поля якоря. При положении индуктора вдоль оси поля (ось поля якоря и ось d совпадают) величина тока обмотки якоря больше, чем при положении ротора поперек оси поля (ось поля якоря и ось q совпадают в пространстве), т. е. $X''_d < X''_q$ (такое отношение справедливо для явнополюсных синхронных машин без демпферной обмотки) /см. разд. 4.3, с. 147/.

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси X''_q примерно равняется X''_d (см. Прил. 9.1, с. 153).

3.3. Несимметричные режимы работы синхронных генераторов

3.3.1. Причины несимметричных режимов

На практике встречаются случаи, когда мощные однофазные потребители нарушают симметричную нагрузку фаз обмотки якоря синхронных генераторов (тяговые подстанции железных дорог, электрифицируемых на переменном токе, и т. д.). Еще более часто, хотя и кратковременно, несимметричная нагрузка фаз генераторов возникает при несимметричных коротких замыканиях в электрических сетях: при однофазном коротком замыкании – между линейным и нейтральным проводами (см. рис. 8.10,в, с. 102), при двухфазном коротком замыкании – между двумя линейными проводами

(см. рис. 8.10,б и рис. 9.11, лист 2,а, с. 145) и при двухфазном коротком замыкании на нейтраль – между двумя линейными и нейтральным проводами. Роль нейтрального провода в сетях высокого напряжения играет земля, так как нейтральные точки в таких сетях обычно заземляются.

Хотя несимметричные короткие замыкания существуют кратковременно, так как поврежденные участки сетей отключаются релейной защитой, они оказывают сильное влияние на работу генераторов и сети в целом. При внезапных несимметричных коротких замыканиях возникают также переходные процессы, однако далее для выявления главных особенностей явлений рассмотрим *установившиеся* несимметричные режимы работы.

Общим методом исследования несимметричных режимов является *метод симметричных составляющих*, при котором несимметричная система токов раскладывается на симметричные составляющие и действие последних учитывается по отдельности. Рассмотрим действие токов разных последовательностей в трехфазной синхронной машине предполагая, что магнитная система *не* насыщена (в этом случае применим метод симметричных составляющих) [2].

3.3.2. Действие симметричных составляющих токов в синхронной машине и параметры прямой, обратной и нулевой последовательности

3.3.2.1. Токи и сопротивления прямой последовательности

При симметричной нагрузке синхронного генератора существуют только токи прямой последовательности. Поэтому изложенное в Работе № 1, разд. 3 (с. 67) и в Работе № 2, разд. 3.1 (с. 118) относится к работе синхронных машин с токами прямой последовательности и рассмотренные там синхронные сопротивления X_d и X_q являются сопротивлениями синхронной машины для токов прямой последовательности.

Наиболее существенной особенностью нормального режима работы синхронной машины с токами прямой последовательности является то, что ротор вращается *синхронно* с полем токов прямой последовательности или полем реакции якоря и поэтому это поле не индуцирует в цепях индуктора никаких токов. По этой причине сопротивления X_d и X_q велики.

Пользуясь терминологией теории асинхронных машин [4], можно сказать, что скольжение s ротора синхронной машины относительно магнитного поля токов прямой последовательности статора (якоря) равно нулю, $s = 0$.

Составляющими сопротивлений X_d и X_q являются индуктивное сопротивление рассеяния $X_{\sigma a}$ и индуктивные сопротивления от основной гармонике поля в воздушном зазоре соответственно X_{ad} и X_{aq} (см. разд. 3.1, с. 118).

3.3.2.2. Токи и сопротивления обратной последовательности

Допустим, что обмотка якоря синхронной машины питается напряжением обратной последовательности U_2 . Возникающие при этом токи обратной последовательности создают магнитное поле Φ_2 обратной последовательности. Это поле вращается по отношению к статору с синхронной скоростью n_2 в обратном направлении, а по отношению к ротору (он вращается с синхронной скоростью n в прямом направлении) – с удвоенной синхронной скоростью, $n_2 + n = 2n_1$. На рис. 9.9 поле Φ_2 условно показано в виде пары полюсов $N_2 - S_2$ (пара полюсов $N_1 - S_1$ условно отображает поле якоря прямой последовательности). Относительно поля обратной последовательности скольжение ротора $s_2 = 2$ и в обмотках возбуждения (1), демпферной (2) и в массивных частях ротора индуцируются вторичные токи удвоенной частоты $2f$, которые вызывают соответствующие потери и нагрев ротора.

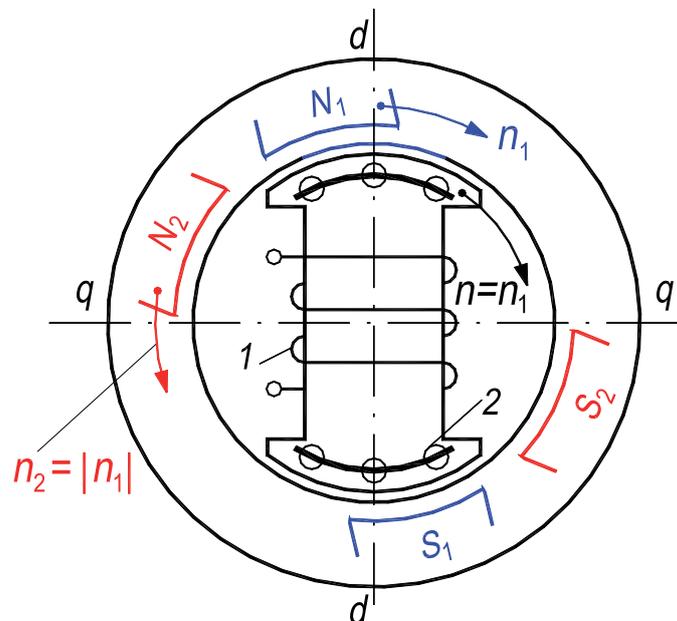


Рис. 9.9. К анализу физической природы индуктивного сопротивления X_2

Эти токи, протекающие в обмотках возбуждения и демпферной, создают свои поля, которые согласно закону Ленца в пределах тела ротора направлены навстречу обратному полю якоря. Поэтому обратное поле Φ_2 вытесняется из тела ротора в околороторное пространство, то есть в воздушный зазор и, следовательно, замыкается по пути с большим магнитным сопротивлением. При наличии демпферной обмотки величина индуктивного сопротивления X_2 обмотки якоря, обусловленного полем Φ_2 , для токов обратной последовательности сравнительно невелика и близка к величине X_d'' .

Полное сопротивление обратной последовательности Z_2 обмотки якоря равно отношению основных гармоник напряжения и тока обратной последовательности:

$$\underline{Z}_2 = \underline{U}_2 / \underline{I}_2 = R_2 + jX_2. \quad (9.24)$$

Обычно R_2 значительно меньше X_2 и $Z_2 \approx X_2$, что обусловлено и значительным значением скольжения $s_2 = 2$. При наличии демпферной обмотки составляющие сопротивления Z_2 по осям d и q , соответственно Z_{d2} и Z_{q2} , равны

$$Z_{d2} \approx X''_d; \quad Z_{q2} \approx X''_q, \quad (9.25)$$

а при их отсутствии

$$Z_{d2} \approx X'_d; \quad Z_{q2} \approx X_q. \quad (9.26)$$

Можно принять, что при наличии демпферной обмотки [см. равенство (9.12), с. 127]

$$Z_2 \approx X_2 = (X''_d + X''_q)/2, \quad (9.27)$$

а при их отсутствии

$$Z_2 \approx X_2 = (X'_d + X_q)/2 \quad (9.28)$$

Вследствие экранирующего влияния вторичных токов сопротивление X_2 значительно меньше X_d и X_q (см. Прил. 9.1, с. 153).

а) Опытное определение сопротивлений обратной последовательности

Сопротивления Z_2 , X_2 и R_2 можно определить по измеренным значениям U_2 , I_2 и потребляемой активной мощности P_2 , если, например, обмотку

якоря синхронной машины подключить к источнику с симметричной системой напряжений и вращать ротор *против* поля с синхронной скоростью. Во избежание перегрева ротора необходимо, чтобы $I_2 = (0, 2 \dots 0, 25) I_{a.\text{ном}}$.

Величина X_2 может быть также получена из *опыта двухфазного короткого замыкания* (см. разд. 4.4, с. 148). При двухфазном коротком замыкании между симметричными составляющими токов и напряжений обратной последовательности, током к. з. и напряжением генератора имеются определенные зависимости. Поэтому, измеряя напряжение на *незамкнутой* фазе и ток короткого замыкания можно определить по закону Ома сопротивление обратной последовательности генератора обмотки якоря.

3.3.2.3. Токи и сопротивления нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности обмотки статора I_0 (*совпадающие по фазе*) создают в воздушном зазоре только пульсирующие (*неподвижные в пространстве*) поля гармоник $\nu = 3, 9, 15 \dots$, а *основная* гармоника поля нулевой последовательности будет отсутствовать. Эти гармоники поля индукцируют в обмотках возбуждения и демпферной токи, которые относительно невелики.

Сопротивление нулевой последовательности:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0. \quad (9.29)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности X_0 ввиду отсутствия поля основной гармоники относительно невелико (см. Прил. 9.1, с. 153) и определяется полями пазового и лобового рассеяния обмотки статора и указанными выше гармониками поля в зазоре. Активное сопротивление нулевой последовательности R_0 в результате потерь, вызываемых гармониками поля в роторе, несколько больше активного сопротивления обмотки статора R_a , но разность $R_0 - R_a$ невелика и поэтому можно принять, что $R_0 \approx R_a$. Вращающий момент, создаваемый токами I_0 , практически равен нулю.

а) Опытное определение сопротивлений нулевой последовательности

В фазах обмотки якоря, соединенной по схеме U_n , при *несимметричной* нагрузке могут протекать токи нулевой последовательности, которые

создают магнитное поле Φ_0 нулевой последовательности. Это поле невелико, примерно соответствует величине поля рассеяния $\Phi_{\sigma a}$, и обуславливает индуктивное сопротивление X_0 обмотки якоря для токов нулевой последовательности.

Сопротивления Z_0 , R_0 и X_0 можно определить опытным путем (см. разд. 4.5, с. 149). Для этого по фазам обмотки якоря, соединенным в открытый треугольник, пропускают однофазный ток и величину сопротивления определяют по закону Ома (рис. 9.11, лист 2, б, с. 145).

3.3.3. Работа синхронных генераторов при несимметричной нагрузке

Обмотка статора синхронных генераторов обычно включается в звезду, причем *нейтральная точка в малых машинах изолирована, а в крупных машинах с целью выполнения релейной защиты от замыканий на землю заземляется через большое сопротивление*. Поэтому токи нулевой последовательности либо отсутствуют, либо весьма невелики.

В силу этого при несимметричной нагрузке синхронных генераторов, кроме токов прямой последовательности, практически существуют только токи обратной последовательности. Последние вызывают в машине ряд нежелательных явлений и делают режим работы машины тяжелым.

3.3.3.1. Потери энергии и нагрев ротора

Токи двойной частоты, индуцируемые в роторе магнитным полем статора обратной последовательности, вызывают в роторе потери и его нагрев, а также уменьшение КПД. Токи, индуцируемые обратным полем в демпферной обмотке явнополюсных машин и в массивном роторе турбогенераторов, могут быть весьма значительными, а активные сопротивления этим токам под влиянием поверхностного эффекта будут большими.

Поэтому при значительной несимметрии нагрузки возникает чрезмерный и опасный нагрев демпферной обмотки и массивных роторов.

Высокая температура тела ротора турбогенератора вызывает опасные деформации ротора и вероятность повреждения изоляции обмотки возбуждения. Нагрев демпферной обмотки явнополюсной машины мало влияет на температуру обмотки возбуждения ввиду удаленности этих обмоток друг

от друга и лучших условий охлаждения обмотки возбуждения явнополусных машин.

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

3.3.3.2. Вибрация

В результате взаимодействия потока возбуждения (ротора) и потока обратной последовательности статора, а также поля прямой последовательности статора и поля токов двойной частоты ротора при несимметричной нагрузке на ротор и статор действуют знакопеременные вращающие моменты и тангенциальные силы, пульсирующие с частотой $2f$.

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

3.3.3.3. Искажение симметрии напряжений

Токи обратной последовательности вызывают в фазах обмотки статора падения напряжения $Z_2 I_2$, векторы которых ориентированы относительно напряжений прямой последовательности в разных фазах по-разному.

В результате этого симметрия напряжений генератора искажается, и напряжения более загруженных фаз будут меньше. Это ухудшает условия работы приемников, в особенности асинхронных и синхронных двигателей [4, с. 221];

В машинах с демпферной обмоткой и массивными роторами или полюсами Z_2 меньше, вследствие чего и искажение симметрии напряжений у них меньше. Физически это объясняется тем, что в таких машинах поток обратной последовательности статора в значительной степени заглушается токами, индуцируемыми в роторе, и поэтому этот поток индуцирует в фазах обмотки статора меньшие ЭДС.

3.3.3.4. Высшие гармоники токов и напряжений

При несимметричных коротких замыканиях возможно сильное искажение формы кривой тока обмотки якоря за счет возникновения третьей гармоники тока изменяющейся с частотой $3f$. В качестве примера на рис. 9.10 представлена форма кривой тока обмотки якоря при двухфазном коротком замыкании.

Высшие гармоники тока могут вызвать опасные резонансные явления, если в цепях обмоток статора имеются емкости (например, емкость длинных линий передачи и пр.).

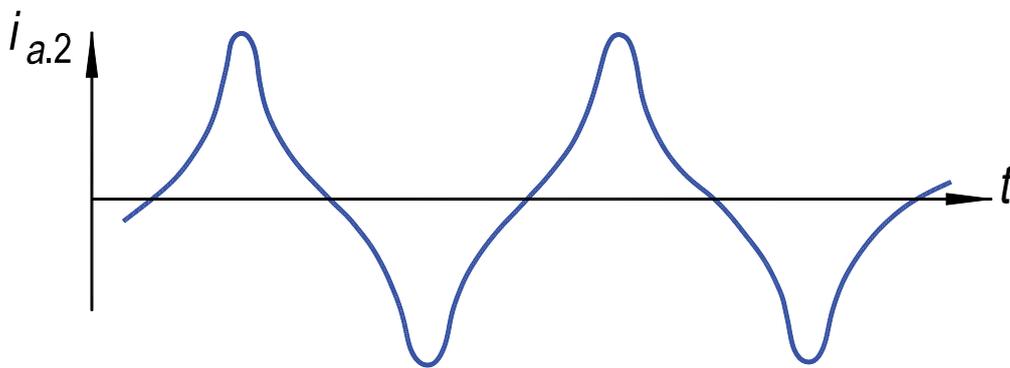


Рис. 9.10. Форма кривой тока обмотки якоря при двухфазном к. з.

В результате резонанса напряжений на зажимах обмотки статора возникают напряжения повышенных частот, которые могут превысить номинальные напряжения во много раз и повредить изоляцию машины. *Это является одной из причин того, что гидрогенераторы, работающие на длинные линии передачи, обычно снабжаются демпферной обмоткой.* Наличие демпферной обмотки улучшает форму кривой тока якоря, приближая ее к синусоидальной и опасность указанных перенапряжений исчезает.

Допустимая несимметрия нагрузки ограничивается, прежде всего, необходимостью предотвращения опасного нагрева ротора, а также вибрации машины.

Согласно ГОСТ, допускается длительная работа турбо- и гидрогенераторов с несимметричной нагрузкой, если токи фаз не превышают номинальных значений и разность токов в фазах не превышает 10 % номинального тока фазы.

3.4. Расчет токов обмотки якоря при к. з.

Зная сопротивления обмотки якоря, можно определить токи как в нормальном режиме работы, так и в аварийных режимах, при коротких замыканиях.

Так, наибольшее мгновенное значение тока трехфазного к. з. (*ударный ток к. з.*) определяется как

$$i_{уд}^* = 1,8\sqrt{2} \cdot 1,05 / X_d''^* \quad (9.30)$$

Величину *установившегося* тока одно-, двух- и трехфазного короткого замыкания можно определить соответственно из выражений:

$$I_{a.1}^* = 3E_0^* / (X_d^* + X_2^* + X_0^*); \quad (9.31)$$

$$I_{a.2}^* = \sqrt{3}E_0^* / (X_d^* + X_2^*); \quad (9.32)$$

$$I_{a.3}^* = E_0^* / X_d^*. \quad (9.33)$$

Значения сопротивлений X_d^* , $X_d''^*$, X_2^* , X_0^* – см. далее табл. 9.2 – 9.5. Значение ЭДС E_0^* определяется по спрямленной характеристике холостого хода для заданного тока возбуждения (следует воспользоваться опытными данными, полученными при выполнении Работы № 1, разд. 4.2, с. 94 и рис. 8.3, с. 83).

Для получения абсолютного значения токов, ток в относительных единицах умножают на номинальный фазный ток, $I_{ф.ном} = 11,2$ А (см. разд. 6, с. 60).

Абсолютные и относительные значения токов $i_{уд}$, $I_{a.1}$, $I_{a.2}$, $I_{a.3}$ занести в табл. 9.1).

Таблица 9.1. Токи обмотки якоря при к. з.

$i_{уд}$		$I_{a.1}$		$I_{a.2}$		$I_{a.3}$	
о. е.	А	о. е.	А	о. е.	А	о. е.	А

4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке, в состав которой входят *явнополюсный* синхронный генератор (СГ) с возбудителем GE , приводной двигатель постоянного тока параллельного возбуждения M [5, с. 82] и индукционный регулятор [4, с. 292] (см. фотографии установки на рис. В1,..., В3, с. 11, 12).

Значения номинальных данных – см. разд. 6, с. 60, сл.

Собрать схему включения приводного двигателя M (см. Работу № 1, с. 96).

Собрать схему испытаний синхронного генератора (рис. 9.11, лист 1, а).

4.1. Пуск приводного двигателя

Пуск двигателя осуществить следующим образом.

1. Установить пусковой реостат $RR_{п.д}$ в положение “Пуск” (*введен*);
2. Установить реостат RR_B в цепи возбуждения в положение “Выведен”;
3. Включить автомат $QF1$ (на схему подано напряжение 110 В / $PV3$ /);
4. В процессе разгона двигателя *плавно* и *медленно* перевести пусковой реостат $RR_{п.д}$ в положение “Работа” (*выведен*);

5. Реостатом RR_B установить частоту вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин. В процессе выполнения всех опытов поддерживать это значение постоянным, регулируя момент приводного двигателя M реостатом RR_B .

Внимание. *Перед отключением* двигателя от сети необходимо пусковой реостат $RR_{п.д}$ *снова установить* в положение “Пуск”.

4.2. Синхронные индуктивные сопротивления

обмотки якоря по продольной и поперечной осям (X_d и X_q)

Определение сопротивлений X_d и X_q (схема опыта – рис. 9.11, лист 1, а) осуществить следующим образом (см. разд. 3.1 и 3.1.1, с. 118, сл.).

1. Включить автомат $QF2$ и установить индукционным регулятором (термин 49, с. 20) напряжение такой величины ($PV4$), чтобы ток в обмотке якоря ($PA5$) составил примерно $0,25I_{ф.ном}$ ($I_{ф.ном} = 11,2$ А);

2. Реостатом RR_B установить частоту вращения индуктора генератора *близкую* к синхронной (но *не равную* ей). Индуктор и поле якоря должны вращаться *в одном направлении*. Об этом свидетельствует *равное нулю* показание вольтметра $PV1$, подключенного к обмотке возбуждения генератора. Если же индуктор и поле якоря вращаются навстречу друг другу, то показание вольтметра

не равно нулю, и необходимо изменить чередование фаз напряжения, подводимого к обмотке якоря (отключив предварительно автомат $QF2$).

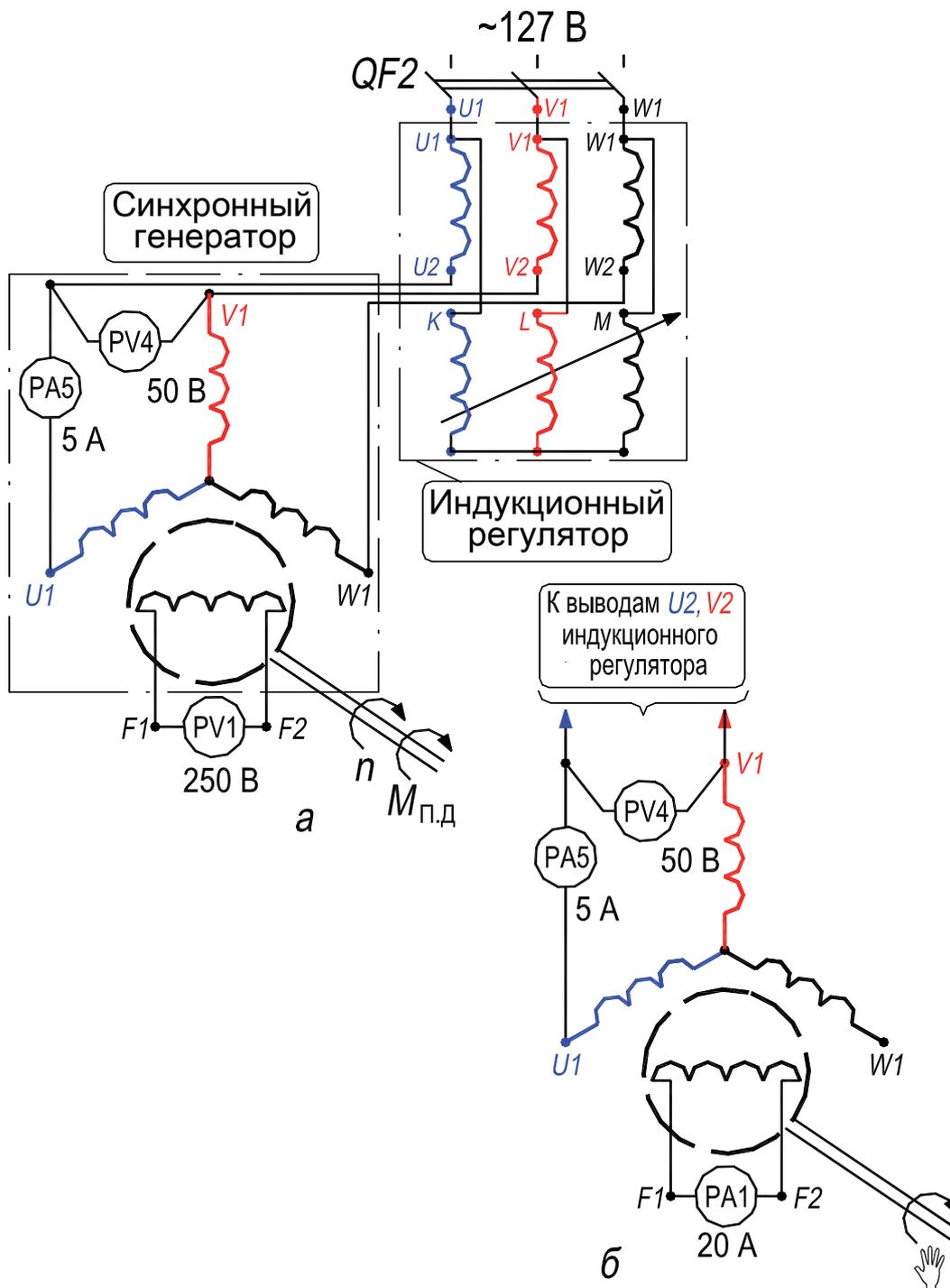


Рис. 9.11, лист 1. Электрическая схема лабораторной установки для определения сопротивлений обмотки якоря: X_d и X_q (а); X_d'' и X_q'' (б).

Примечание. При выполнении Работы № 2 заменить на стенде панели $PA1$ и $PV1$ на панели $PA5$ и $PV4$; см. рис. 8.9 на с. 97

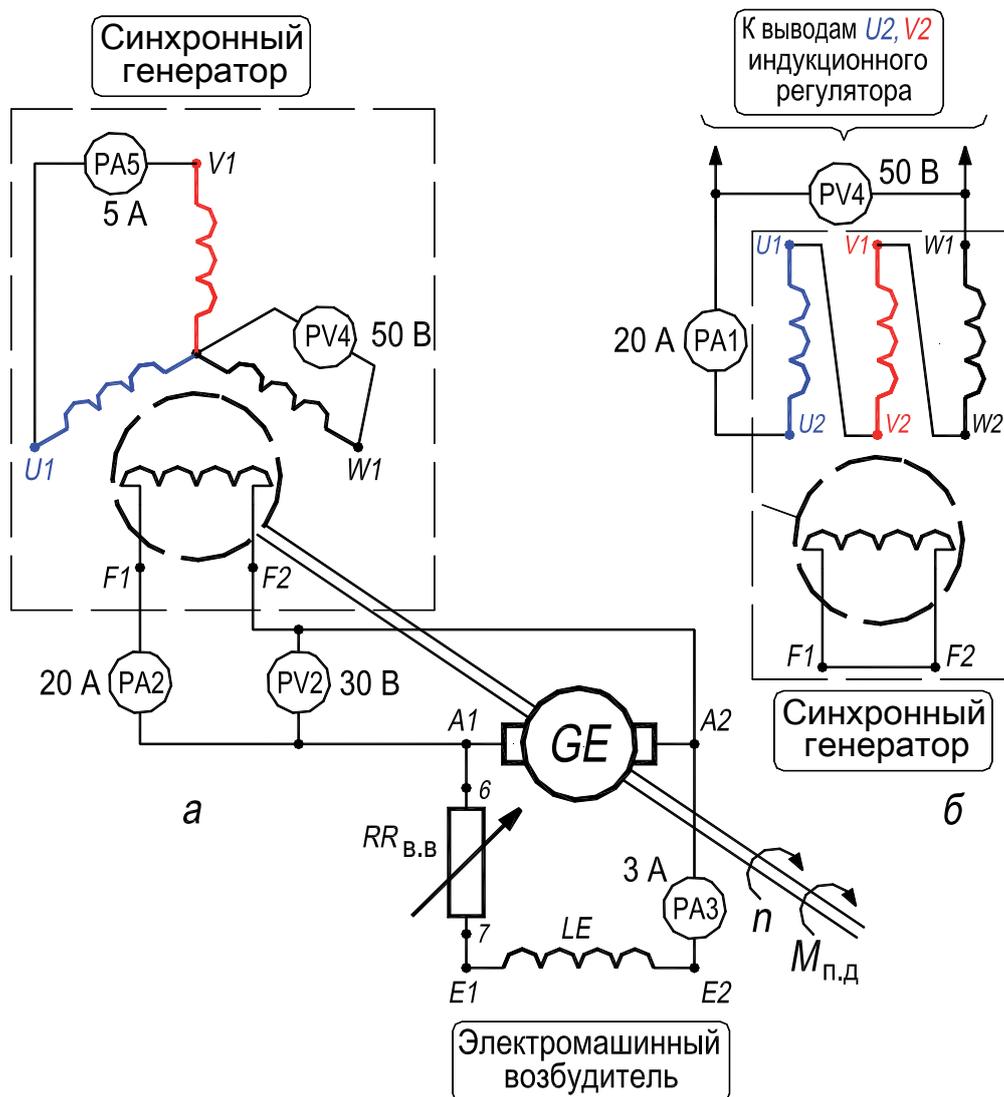


Рис. 9.11, лист 2. Электрическая схема лабораторной установки для определения сопротивлений обмотки якоря: X_2 (а); X_0 (б)

При соблюдении указанных условий будет *медленно* изменяться *взаимное* положение индуктора и поля якоря и, следовательно, оно будет замыкаться то вдоль оси d , то вдоль оси q . Поэтому будет изменяться и величина тока якоря от минимального значения ($PA5$), соответствующего сопротивлению обмотки якоря X_d , до максимального ($PA5$), соответствующего сопротивлению X_q . Одновременно с изменением тока изменяется величина напряжения на выходе индукционного регулятора ($PV4$), что обусловлено изменением падения напряжения;

3. Посредством реостата RR_B необходимо достичь медленного колебания стрелок приборов $PA5$ и $PV4$ и максимальной амплитуды этих колебаний;

4. Величины токов ($PA5$) и напряжений ($PV4$) записать в табл. 9.2, строка 1.

5. Несколько изменить индукционным регулятором напряжение ($PV4$) и провести опыт еще раз (см. пункты 1–4). Записать данные в строку 2 табл. 9.2.

Внимание. После проведения опыта приводной двигатель автоматом $QF1$ отключить от питающей сети.

Таблица 9.2. Синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q

№ опыта	Поле якоря замыкается в теле индуктора вдоль оси d						Поле якоря замыкается в теле индуктора вдоль оси q				
	I_{\min}	U_{\max}	X_d	$X_{d.cп}$	X_d^*	$X_{d.s}^*$	I_{\max}	U_{\min}	X_q	$X_{q.cп}$	X_q^*
	А	В	Ом	Ом	о.е.	о.е.	А	В	Ом	Ом	о.е.
1											
2											

Величины сопротивлений определить по следующим выражениям:

$$X_d \approx U_{\max} / \sqrt{3} I_{\min}; \quad X_{d.cп} = (X_{d1} + X_{d2}) / 2; \quad X_d^* = X_{d.cп} / Z_6; \quad (9.34)$$

$$X_q \approx U_{\min} / \sqrt{3} I_{\max}; \quad X_{q.cп} = (X_{q1} + X_{q2}) / 2; \quad X_q^* = X_{q.cп} / Z_6. \quad (9.35)$$

Примечание. Значение Z_6 – см. разд. 7, с. 62.

При определении X_d и X_q по формулам (9.34) и (9.35) не учтено активное сопротивление обмотки якоря R_a .

Полученные значения X_d и X_q соответствуют ненасыщенному состоянию машины, при котором

$$X_q \approx 0,6 X_d. \quad (9.36)$$

С увеличением насыщения величина X_d уменьшается. Для насыщенного состояния величина $X_{d.s}$ может быть определена по характеристикам холостого хода $E_0^* = f(I_B^*)$ и нагрузочной $U^* = f(I_B^*)$ (необходимо воспользоваться опытными данными, полученными при выполнении Работы № 1, см. пункты 4.2 и 4.3, с. 94, сл.).

Синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря $X_{d.s}$ по продольной оси определить с учетом насыщения из выражения (9.37) /см. рис. 9.12/

$$X_{d.s}^* = AB/I_a^*, \text{ о. е.}, \quad (9.37)$$

где I_a^* – относительное значение тока обмотки якоря, при котором снималась нагрузочная характеристика.

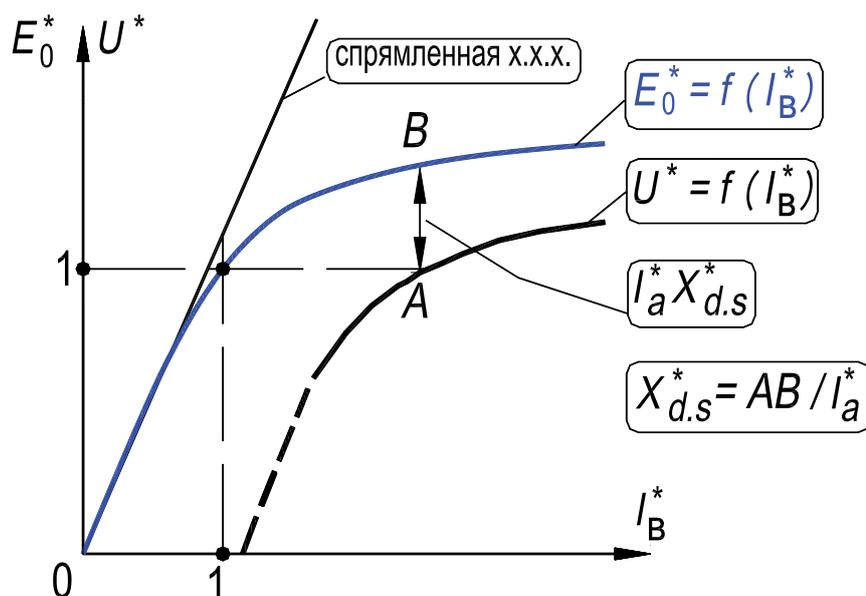


Рис. 9.12. К определению насыщенного значения сопротивления $X_{d.s}^*$

4.3. Сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям (X_d'' и X_q'')

Собрать схему, приведенную на рис. 9.11, лист 1,б. В процессе опыта приводной двигатель должен быть отключен от питающей сети (автомат QF1).

Определение сопротивлений X_d'' и X_q'' осуществить следующим образом (см. разд. 3.2.2.1, с. 122,сл. и разд. 3.2.5, с. 134).

1. Снять защитный кожух, закрывающий муфту, соединяющую валы генератора и двигателя;

2. Включить автомат QF2 и индукционным регулятором установить напряжение (PV4) на обмотке якоря генератора примерно равным $0,1 U_{л.ном}$ ($U_{л.ном} = 133 \text{ В}$);

3. Поворачивая вручную индуктор, установить его в положение,

при котором ток обмотки якоря ($PA5$) будет *минимальным* (при этом ток в цепи обмотки возбуждения ($PA1$) равен нулю). Занести показания приборов $PA5$ и $PV4$ в табл. 9.3;

4. Поворачивая *вручную* индуктор далее, установить его в положение, при котором ток обмотки якоря ($PA5$) будет *максимальным* (при этом ток в цепи обмотки возбуждения ($PA1$) имеет наибольшее действующее значение). Занести показания приборов $PA5$ и $PV4$ в табл. 9.3, строка 1

5. Несколько изменить индукционным регулятором напряжение ($PV4$) и провести опыт еще раз (см. пункты 1–4). Записать данные в строку 2 табл. 9.3.

Таблица 9.3. Сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q

№ опыта	Поле якоря замыкается вне индуктора в направлении оси q					Поле якоря замыкается вне индуктора в направлении оси d				
	I_{\min}	U_{\max}	X_q''	$X_{q,\text{cp}}''$	$X_q''^*$	I_{\max}	U_{\min}	X_d''	$X_{d,\text{cp}}''$	$X_d''^*$
	А	В	Ом	Ом	о. е.	А	В	Ом	Ом	о. е.
1										
2										

Величины сопротивлений определить по выражениям:

$$X_q'' \approx U_{\max} / 2I_{\min}; \quad X_{q,\text{cp}}'' = (X_{q1}'' + X_{q2}'') / 2; \quad X_q''^* = X_q'' / Z_{\zeta 6}; \quad (9.38)$$

$$X_d'' \approx U_{\min} / 2I_{\max}; \quad X_{d,\text{cp}}'' = (X_{d1}'' + X_{d2}'') / 2; \quad X_d''^* = X_d'' / Z_{\zeta 6}. \quad (9.39)$$

При определении X_d'' и X_q'' по формулам (9.38) и (9.39) не учтено активное сопротивление обмотки якоря.

4.4. Индуктивное сопротивление обмотки якоря току обратной последовательности (X_2)

Собрать схему, приведенную на рис. 9.11, лист 2,а.

Определение сопротивлений X_2 осуществить следующим образом (см. разд. 3.3.2.2, с. 136,сл.).

1. Осуществить пуск приводного двигателя. Реостатом RR_B установить синхронную частоту вращения $n_{\text{НОМ}} = 1500$ об/мин;

2. Реостатом $RR_{B,B}$ установить ток ($PA5$) двухфазного короткого замыкания $I_{a,2}$ примерно равным $0,3I_{\text{ф.НОМ}}$ ($I_{\text{ф.НОМ}} = 11,2$ А);

3. Занести показания приборов $PA5$ и PVI в табл. 9.4, строка 1.

4. Несколько изменить реостатом $RR_{B,B}$ ток в обмотке якоря ($PA5$) и провести опыт еще раз (см. пункты 1 – 3). Записать данные в строку 2 табл. 9.4.

Внимание. После проведения опыта приводной двигатель отключить автоматом QFI от питающей сети.

Величину сопротивления обратной последовательности X_2 определить по выражениям (9.40).

Таблица 9.4. Индуктивное сопротивление обмотки якоря току обратной последовательности

№ опыта	$I_{a,2}$	U	X_2	$X_{2,\text{ср}}$	X_2^*
	А	В	Ом	Ом	о. е.
1					
2					

$$X_2 \approx (\sqrt{3}U) / 2I_{a,2}; \quad X_{2,\text{ср}} = (X_{2(1)} + X_{2(2)}) / 2; \quad X_2^* = X_{2,\text{ср}} / Z_6, \quad (9.40)$$

где $U/2$ – напряжение обратной последовательности; $I_{a,2}/\sqrt{3}$ – ток обратной последовательности.

При определении X_2 по формулам (9.40) не учтено активное сопротивление обмотки якоря току обратной последовательности (R_2).

4.5. Индуктивное сопротивление обмотки якоря току нулевой последовательности (X_0)

Собрать схему, приведенную на рис. 9.11, лист 2,б. В процессе опыта *приводной двигатель должен быть отключен* от питающей сети (автомат QFI).

Определение сопротивлений X_0 осуществить следующим образом (см. разд. 3.3.2.3, с. 138, сл.).

1. Индукционным регулятором установить ток в обмотке якоря близкий к номинальному (PAI), $I_{ф.ном} = 11,2$ А;
2. Занести показания приборов $PV4$ и PAI в табл. 9.5, строка 1;
3. Несколько изменив индукционным регулятором ток в обмотке якоря (PAI), провести опыт еще раз (см. пункты 1 и 2). Записать данные в строку 2 табл. 9.5.

Таблица 9.5. Индуктивное сопротивление обмотки якоря току нулевой последовательности

№ опыта	U	I_a	X_0	$X_{0.ср}$	X_0^*
	В	А	Ом	Ом	о. е.
1					
2					

Величину сопротивления нулевой последовательности определить по выражениям (9.41):

$$X_0 = U/3I_a; \quad X_{0.ср} = (X_{0(1)} + X_{0(2)})/2; \quad X_0^* = X_{0.ср}/Z_0. \quad (9.41)$$

При определении X_0 по формулам (9.41) не учтено активное сопротивление обмотки якоря току нулевой последовательности R_0 .

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 117).
4. Номинальные данные синхронной машины и возбудителя (разд. 6, с. 60 и 61).
5. Номинальные данные двигателя постоянного тока (разд. 6.3, с. 61).
6. Схемы испытаний, рис. 9.11, листы 1 и 2.
7. Результаты опытов и расчетов, представленные в таблицах 9.1...9.5; ниже каждой таблицы привести формулы для расчета величин;
8. Ниже таблицы 9.2 и соответствующих ей формул (9.34) - (9.37), привести график, представленный на рис. 9.12. График построить по данным, полученными при выполнении Работы № 1, см. пункты 4.2 и 4.3, с. 94,сл.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Синхронные машины подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое синхронное индуктивное сопротивление. Какие составляющие в него входят?
2. Почему явнополусные синхронные машины характеризуются двумя синхронными сопротивлениями обмотки якоря X_d и X_q , а неявнополусные машины – одним синхронным сопротивлением обмотки якоря X_c ?
3. В каком соотношении и почему находятся сопротивления обмотки якоря X_d и X_q явнополусного синхронного генератора?
4. Почему для неявнополусного синхронного генератора справедливо примерное равенство синхронных индуктивных сопротивлений обмотки якоря по осям d и q , $X_d \approx X_q$?
5. Что такое сверхпереходное (или переходное) индуктивное сопротивление обмотки якоря? Каков его физический смысл ?
6. Объяснить физический смысл сверхпереходных индуктивных сопротивлений X_d'' и X_q'' обмотки якоря, соответственно, по осям d и q . Как определить эти сопротивления опытным путем?
7. Объяснить физический смысл сопротивления обмотки якоря для тока обратной последовательности X_2 . Как определить его опытным путем?
8. Каков физический смысл сопротивления обмотки якоря для тока нулевой последовательности X_0 . Как определить его опытным путем?

Приложение 9

П9.1. Параметры синхронных машин

Параметр	Турбогенераторы	Явнополюсные генераторы и двигатели		Синхронные компенсаторы
		с демпферной обмоткой	без демпферной обмотки	
Продольное индуктивное сопротивление реакции якоря X_{ad}	1,1 – 2,5	0,5 – 1,5	0,5 – 1,5	1,4 – 2,3
Поперечное индуктивное сопротивление реакции якоря X_{aq}	1,1 – 2,5	0,3 – 0,9	0,3 – 0,9	0,8 – 1,3
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря $X_{\sigma a}$	0,08 – 0,25	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	0,1 – 0,2
Активное сопротивление обмотки якоря R_a	0,002 – 0,008	0,002 – 0,02	0,002 – 0,02	0,002 – 0,02
Продольное синхронное индуктивное сопротивление X_d	1,2 – 2,75	0,6 – 1,8	0,6 – 1,8	1,5 – 2,5
Поперечное синхронное индуктивное сопротивление X_q	1,2 – 2,75	0,4 – 1,2	0,4 – 1,2	0,9 – 1,5
Продольное переходное индуктивное сопротивление X'_d	0,2 – 0,4	0,2 – 0,5	0,2 – 0,5	0,3 – 0,6
Продольное сверхпереходное индуктивное сопротивление X''_d	0,12 – 0,3	0,15 – 0,35	–	0,15 – 0,35
Поперечное сверхпереходное индуктивное сопротивление X''_q	0,12 – 0,3	0,15 – 0,35	–	0,15 – 0,35
Индуктивное сопротивление обратной последовательности X_2	0,12 – 0,3	0,15 – 0,35	0,3 – 0,8	0,15 – 0,35
Активное сопротивление обратной последовательности R_2	0,02 – 0,05	0,015 – 0,025	0,02 – 0,05	0,02 – 0,07
Индуктивное сопротивление нулевой последовательности X_0	0,02 – 0,1	0,02 – 0,2	0,04 – 0,25	0,02 – 0,2
Активное сопротивление нулевой последовательности R_0	0,002 – 0,01	0,002 – 0,02	0,002 – 0,02	0,002 – 0,02
Переходная постоянная времени T'_d , с	0,4 – 1,6	0,6 – 3,0	0,6 – 3,0	0,8 – 3,0
Сверхпереходная постоянная времени T''_d , с	0,03 – 0,15	0,02 – 0,08	–	0,02 – 0,08
Постоянная времени апериодического тока якоря T_a , с	0,04 – 0,4	0,03 – 0,4	0,1 – 0,5	0,1 – 0,5

Примечание. Значения сопротивлений приведены в относительных единицах (см. разд. 7, с. 62)

10. РАБОТА № 3

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Оглавление

1. Цель работы	157
2. Программа работы	157
3. Основы теории	158
3.1. Работа многофазной синхронной машины параллельно с другими синхронными машинами на общую сеть б. б. м. ...	158
3.1.1. Общие положения	158
3.1.2. Основные особенности синхронного генератора при параллельной работе с сетью б. б. м.	159
3.1.2.1. Влияние частоты вращения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м.	159
3.1.2.2. Влияние возбуждения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м.	161
3.1.3. Условия включения генератора на параллельную работу с сетью б. б. м.	162
3.1.3.1. Способы обеспечения контроля условий синхронизации генератора с сетью б. б. м.	163
3.1.4. Режимы работы синхронного генератора параллельно с сетью б. б. м.	166
3.1.4.1. Работа генератора в режиме угловой характеристики	167
а) Регулирование активной мощности	172
б) Анализ <i>статической устойчивости</i> генератора .	172
3.1.4.2. Работа генератора в режиме V-образной характеристики	175
а) V-образная характеристика при холостом ходе генератора	176
б) V-образная характеристика при постоянной активной нагрузке генератора ..	179
3.2. Параллельная работа синхронных генераторов на сеть ограниченной мощности	180

4. Экспериментальное исследование	181
4.1. Пуск приводного двигателя	181
4.2. Включение СГ на параллельную работу с сетью б. б. м. методом <i>точной</i> синхронизации	181
4.3. Включение СГ на параллельную работу с сетью б. б. м. методом <i>самосинхронизации</i>	183
4.4. Параллельная работа генератора с сетью б. б. м. при постоянстве активной мощности и изменении возбуждения. Снятие V-образных характеристик	184
5. Содержание и оформление отчета	186
6. Контрольные вопросы	187
Приложение 10.	
Колебания и динамическая устойчивость синхронной машины ..	188
П10.1. Определение понятия “динамическая устойчивость”	188
П10.2. Физическая сущность колебаний (качаний) ротора синхронных машин	188
П10.3. Динамическая устойчивость синхронной машины. Правило площадей	194

Перечень рисунков в 10-м разделе

Рис. б. н. Схема производства, передачи, распределения и потребления (преобразования) электрической энергии	157
Рис. 10.1. Синхронный генератор включен на параллельную работу с сетью бесконечно большой мощности (б. б. м.)	160
Рис. 10.2. Влияние частоты вращения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м.	161
Рис. 10.3. Влияние возбуждения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м. ($P_{с.г} = 0$) (см. рис. 10.9): <i>a</i> – недовозбуждение; <i>б</i> – нормальное возбуждение; <i>в</i> – перевозбуждение	162
Рис. 10.4. Включение синхронного генератора на параллельную работу с сетью б. б. м.: <i>a</i> – схема на “потухание огня”; <i>б</i> – схема на “вращение огня”	164
Рис. 10.5. Векторная диаграмма напряжений синхронного генератора: <i>явнополюсного (а), неявнополюсного (б)</i>	168
Рис. 10.6. Угловые характеристики синхронной машины: <i>a</i> – при непрерывном изменении угла θ ; <i>б</i> – <i>явнополюсного</i> генератора; <i>в</i> – <i>неявнополюсного</i> генератора	170
Рис. 10.7. Статическая угловая характеристика неявнополюсного СГ: <i>к анализу статической устойчивости</i>	173

Рис. 10.8. V-образные характеристики синхронного генератора	177
Рис. 10.9. Семейство векторных диаграмм для построения V-образной характеристики генератора при $P_{с.г} = \text{const} (> 0)$ (см. рис. 10.3): a – недовозбуждение, b – нормальное возбуждение, v – перевозбуждение ...	178
Рис. 10.10. Схема лабораторной установки для исследования синхронного генератора при работе в сети бесконечно большой мощности	182
Рис. П10.1. Колебания вектора \underline{E}_0 в процессе качания ротора синхронного генератора ..	189
Рис. П10.2. Колебания угловой скорости вращения ротора Ω и угла θ синхронного генератора при скачкообразном изменении момента приводного двигателя на величину ΔM	190
Рис. П10.3. Векторная диаграмма синхронного генератора в переходном режиме	195
Рис. П10.4. Динамическая угловая характеристика генератора в переходном режиме	195
Рис. П10.5. Статическая (1) и динамическая (2) угловые характеристики явнополусного СГ: к анализу динамической устойчивости	197
Рис. П10.6. Колебания угловой скорости вращения ротора Ω и угла θ синхронного генератора	197
Рис. П10.7. Изменение угла нагрузки при выпадении синхронной машины из синхронизма в процессе колебаний	200

Таблица в 10-м разделе

Таблица 10.1. V-образные характеристики синхронного генератора	185
--	-----

1. Цель работы

Изучить основы теории синхронной машины, работающей параллельно с сетью *бесконечно большой мощности* (б. б. м.), способы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью б. б. м. и освоить практическое включение генератора при точной синхронизации. Уяснить процессы регулирования активной и реактивной мощности генератора и получение экспериментальных V-образных характеристик.

2. Программа работы

2.1. Включить генератор на параллельную работу с сетью методом *точной синхронизации* (термин 21, с. 16).

2.2. Включить генератор на параллельную работу с сетью методом *грубой синхронизации* (термин 23, с. 16).

2.3. Провести опыты и получить данные для построения V-образных характеристик генератора $I_a = f(I_B)$ при $U = U_{ном}$ для $P^* = 0; 0,25; 0,5$.

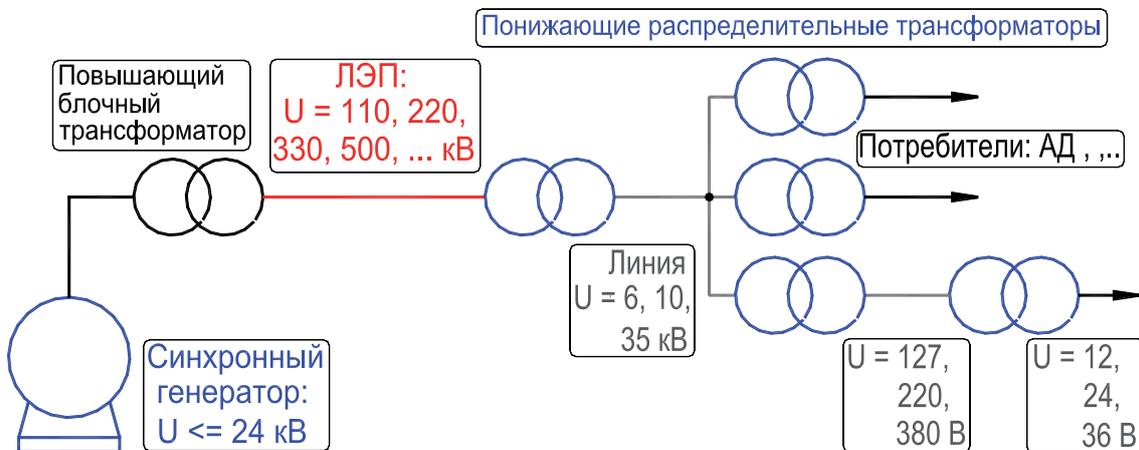


Схема производства, передачи, распределения и потребления (преобразования) электрической энергии (изображение упрощённое)

3. Основы теории

3.1. Работа многофазной синхронной машины параллельно с другими синхронными машинами на общую сеть

3.1.1. Общие положения

На электрических станциях устанавливается, как правило, несколько синхронных генераторов (СГ), которые работают параллельно на общую сеть. Это обеспечивает увеличение общей мощности станции, как источника электрической энергии, при ограниченной мощности каждого генератора; позволяет более гибко следовать за графиком нагрузки и повысить надежность электроснабжения потребителей. В свою очередь, электростанции объединяются на параллельную работу в мощные энергосистемы, а последние в энергообъединения и в единую энергосистему страны. Таким образом, для синхронных генераторов, установленных на электростанциях, типичным является режим работы на сеть бесконечно большой мощности (сеть б. б. м.), по сравнению с которой мощность генератора относительно мала. Будем считать, что напряжение U_c и частота f_c сети б. б. м. являются постоянными и не зависят от режима работы отдельного генератора.

Необходимо обеспечить совместную *устойчивую параллельную работу* большого количества синхронных машин различных номинальных мощностей, установленных на разных станциях, на общую мощную электрическую сеть большой протяженности [1, 2].

Первой характерной особенностью синхронной машины является жесткая связь между частотой f генерируемого тока и скоростью вращения Ω ротора. Поэтому обязательным условием для длительной устойчивой совместной работы ряда синхронных машин на общую сеть при наличии единой частоты f_c во всей системе является строго синхронное вращение их, $\Omega = \Omega_s$. Это удастся достигнуть только в результате автоматического поддержания синхронности вращения самими машинами (см. далее разд. 3.1.2.1, с. 159) и применения в цепях их возбуждения быстродействующих регулирующих устройств (разд. 5, с. 54).

3.1.2. Основные особенности синхронного генератора при параллельной работе с сетью б. б. м.

При совместной работе большого числа синхронных машин на общую сеть мощность одной машины по сравнению с суммарной мощностью всех остальных машин обычно не бывает большой. Это означает, что изменение режима работы рассматриваемой машины не может практически повлиять на изменение напряжения U_c или частоты f_c системы в целом. Поэтому при анализе параллельной работы синхронного генератора с сетью б. б. м. принимаем $U_c = \text{const}, f_c = \text{const}$.

При параллельной работе синхронной машины с сетью б. б. м. напряжение U на ее зажимах жестко задано режимом всей сети и не зависит от тока возбуждения, тока нагрузки и мощности самой машины, $U = \text{const}$. Это является *второй* характерной особенностью параллельной работы синхронной машины с сетью бесконечно большой мощности.

3.1.2.1. Влияние частоты вращения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м.

Допустим, что трехфазный синхронный генератор СГ, вращаясь с синхронной скоростью $\Omega = \Omega_s$, присоединен к сети б. б. м. (рис. 10.1). Считаем также, что ЭДС $\underline{E}_0 = \underline{U}$ генератора в каждой фазе равна по амплитуде напряжению \underline{U}_c сети, но сдвинута по отношению к нему на 180° (рис. 10.2,б). В этом случае в контурах каждой фазы машины сумма ЭДС будет равна нулю, и потому ток в обмотке статора проходить не будет.

Если по каким-либо причинам вращающий момент приводного двигателя (ПД) возрастет, то ротор генератора получит ускорение и вектор \underline{E}_0 в комплексной плоскости начнет соответственно перемещаться быстрее ($\omega > \omega_c$), приближаясь по фазе к вектору $\underline{U}_c = -\underline{U}$ (рис. 10.2,в). При этих условиях в контуре каждой фазы машины возникнет ЭДС $\Delta \underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{U}_c$, и будет проходить ток \underline{I}_a , который будет отставать от ЭДС $\Delta \underline{E}$ на угол $\pi/2$ (активное сопротивление фазы $R_a \approx 0$). Угол ψ в этом случае будет небольшим, и генератор начнет отдавать в сеть активную мощность $mE_0I_a \cos \psi$, возникнет электромагнитный момент генератора. Он является тормозным, действует навстречу моменту приводного двигателя, т. е. препятствует дальнейшему

ускорению вращения ротора и приведет к восстановлению равенства угловых скоростей $\Omega = \Omega_s$.

В случае если произойдет торможение ротора синхронной машины ($\Omega < \Omega_s$), ЭДС ΔE изменит свою фазу (рис. 10.2,а) и ток I_a будет сдвинут относительно ЭДС E_0 на угол ψ , близкий к 180° . При этих условиях мощность $mE_0I_a\cos\psi$ станет отрицательной ($\cos\psi < 0$), синхронная машина будет потреблять активную мощность, т. е. перейдет в двигательный режим, направление электромагнитного момента изменится, и ротор начнет ускоряться. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока снова не восстановится равенство угловых скоростей, $\Omega = \Omega_s$.

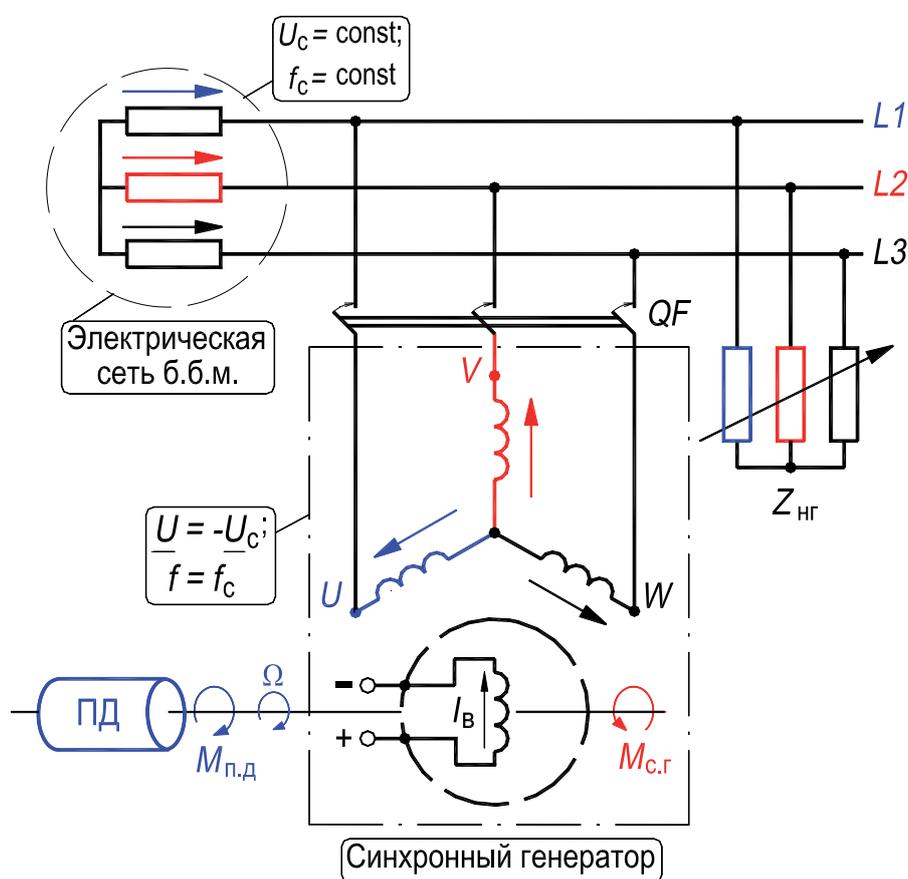


Рис. 10.1. Синхронный генератор включен на параллельную работу с сетью бесконечно большой мощности (б. б. м.) (сеть б. б. м. изображена условно)

Таким образом, синхронная машина, работая параллельно с сетью б. б. м., автоматически стремится поддерживать синхронную скорость своего вращения.

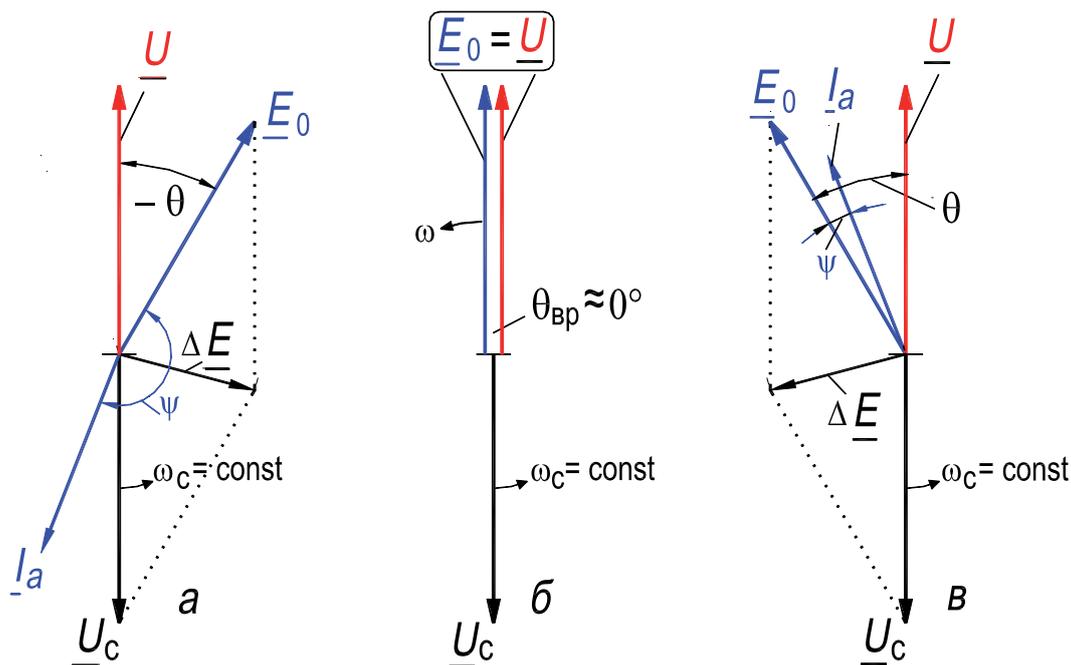


Рис. 10.2. Влияние частоты вращения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м.:

$a - \omega < (\omega_c = \text{const}); \quad б - \omega = (\omega_c = \text{const}); \quad B - \omega > (\omega_c = \text{const})$

Это свойство синхронной машины не может проявляться безгранично. При очень больших ускоряющих или тормозящих моментах машина “выпадает из синхронизма” (термин 26, с. 16). Однако значения этих критических моментов достаточно велики, и потому способность синхронных машин автоматически поддерживать синхронизм до определенной нагрузки при параллельной работе является ценным свойством их, широко используемым на практике.

3.1.2.2. Влияние возбуждения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м.

Допустим, что при параллельной работе синхронной машины с сетью б. б. м. в режиме холостого хода при $\underline{E}_0 = \underline{U}$ (рис. 10.3,б) ее возбуждение будет увеличено. В этом случае ЭДС E_0 станет больше напряжения машины U и поэтому $\Delta \underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{U}_c$ будет совпадать по фазе с \underline{U} (рис. 10.3,в). При этих условиях в обмотке статора под действием ЭДС $\Delta \underline{E}$ возникнет реактивный ток \underline{I}_a , отстающий от напряжения машины U . Этот ток создаст размагничивающую реакцию якоря, противодействующую увеличению магнитного поля возбуждения. Обратный процесс возникнет при снижении тока возбуждения (рис. 10.3,а). В этом случае ЭДС $\Delta \underline{E}$ обусловит ток \underline{I}_a опережающий напряжение машины U .

Поэтому в машине возникнет намагничивающая реакция якоря, противодействующая снижению возбуждения и обеспечивающая постоянство заданного напряжения \underline{U} на зажимах машины, $\underline{U} = -\underline{U}_c$.

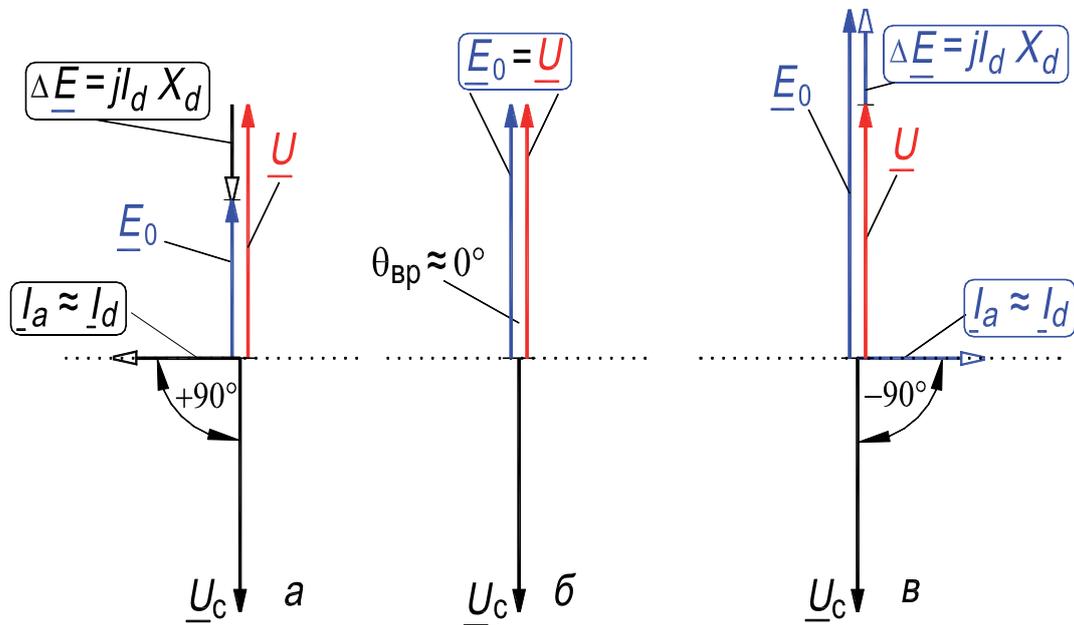


Рис. 10.3. Влияние возбуждения генератора на его работу параллельно с сетью б. б. м. ($P_{с.г} = 0$):

a – недовозбуждение; *б* – нормальное возбуждение; *в* - перевозбуждение

Итак, синхронная машина, работающая параллельно с сетью б. б. м., противодействует не только ускорению или замедлению вращения ротора, но и изменению возбуждения, поскольку напряжение \underline{U} на её зажимах жестко задано. В этом и состоят основные особенности синхронного генератора при параллельной работе с сетью б. б. м.

3.1.3. Условия включения генератора на параллельную работу с сетью б. б. м.

При включении синхронной машины на сеть для параллельной работы необходимо соблюдать следующие условия:

1. Синхронная машина в момент присоединения ее к сети должна вращаться со строго синхронной скоростью Ω_s , при которой частота f машины точно совпадает с частотой сети f_c , $f = f_c$ (или $\omega = \omega_c$).

2. В момент присоединения к сети, напряжение машины \underline{U} в каждой фазе должно быть равно соответствующему фазному напряжению сети \underline{U}_c ,

взятому с обратным знаком: $[\underline{U} = \underline{E}_0] = -\underline{U}_c$; при этом предполагается, что напряжения сети и машины синусоидальны.

Непосредственно после подключения к сети, при соблюдении указанных условий, генератор находится в режиме холостого хода, т. е. в обмотке якоря ток не протекает и уравнение равновесия напряжений генератора (8.6) (или 8.9) /Работа №1, с. 79 и 81/ записывается в виде $\underline{U} = \underline{E}_0$.

Если условия 1 и 2 не выполнены, то происходит бросок уравнительного тока, который будет протекать по контуру “сеть б. б. м. – обмотка якоря СГ” и может вызвать как нарушение нормальной работы сети, так и повреждение включаемого генератора и его приводного двигателя.

Условия 1 и 2 очевидны, однако *точное* соблюдение их представляет практические трудности. Поэтому в эксплуатационных условиях ограничиваются лишь приближенным соблюдением их, используя свойства синхронной машины к *самосинхронизации* (термин 22, с. 16) после присоединения ее к сети.

Процесс обеспечения выполнения этих условий и подключения синхронной машины к сети называется *синхронизацией машины с сетью б. б. м.* (термин 20, с. 15), а условия 1 и 2 – условиями синхронизации.

3.1.3.1. Способы обеспечения контроля условий синхронизации генератора с сетью б. б. м.

Существует следующие способы, позволяющие установить, что условия 1 и 2 выполнены и что в этот момент можно осуществить присоединение синхронной машины к сети:

- а) посредством лампового синхроскопа;
- б) посредством электромагнитного синхроскопа;
- в) посредством приборов автоматической синхронизации;
- г) способ *грубой* синхронизации (термины 22 и 23, с. 16).

Простейшим из них является способ с использованием светового лампового индикатора-синхроскопа (а) в сочетании с вольтметром и тахогенератором (ТГ) /см. с. 107/. Одна из схем такого устройства показана на рис. 10.4,а. Синхронизация включаемой машины с сетью производится в следующем порядке.

Регулируя скорость вращения двигателя (ПД) вращающего генератор, доводят ее до синхронной скорости с точностью, которую допускает тахогенератор ТГ. Затем на обмотку возбуждения генератор подают напряжение

Далее, наблюдая синхроскоп PS , дополнительно регулируют скорость вращения двигателя, добиваясь того, чтобы все три лампы синхроскопа одновременно потухали, и чтобы интервал времени между последовательными потуханиями был не менее $3 \dots 5$ с (рис. 10.4,а, лампы включены по схеме “потухания огня”). В этом случае в середине периода потухания ламп будет наступать *синхронизм* (термин 24, с. 16), и машина в этот момент должна присоединиться к сети посредством QF . Для лучшего обнаружения момента перехода напряжения (на лампах синхроскопа) через нулевое значение может быть использован нулевой вольтметр PV . Рассмотренный способ относится к *точной синхронизации* (термин 21, с.16) Если момент включения выбран не совсем точно, машина все же после некоторого колебательного процесса обычно втягивается в синхронизм в силу своей способности к *самосинхронизации*.

Ламповый синхроскоп можно включать также по схеме, показанной на рис. 10.4,б (лампы включены по схеме “вращения огня”). В этом случае при синхронизме в фазе U лампа 1 потухает, а лампы 2 и 3 горят с одинаковой яркостью, т. е. с накалом, соответствующим линейному напряжению $U_{л2} = U_{л3}$.

Помимо ламповых синхроскопов, используемых главным образом в лабораторных устройствах, применяют также более совершенные электромагнитные синхроскопы (б) различных конструкций. Стрелка синхроскопа, направление вращения которой зависит от разности частот сети f_c и подключаемой машины f , позволяет более точно и просто установить момент синхронизма. Такой синхроскоп в сочетании с нулевым вольтметром и двойным частотомером, показывающим на отдельных шкалах частоты сети и машины, существенно облегчает процесс синхронизации.

На электрических станциях широко используются автоматические приборы синхронизации (в), осуществляющие процесс включения генератора без непосредственного участия обслуживающего персонала. Такие автоматические устройства не всегда могут обеспечить быстрое включение машины, так как в процессе синхронизации может меняться режим работы сети, особенно в случае каких-либо аварий в системе.

В крупных энергетических системах для более быстрой ликвидации аварийных режимов получило применение присоединение синхронных генераторов к сети по методу *грубой* синхронизации (г). Этот метод обеспечивает более быстрое включение машины, однако он связан с кратковременным переходным процессом, при котором имеет место значительное увеличение тока в сети и обмотках присоединяемой машины.

При *грубой* синхронизации невозбужденный генератор с обмоткой ротора, замкнутой на активное сопротивление, приводится во вращение первичным двигателем и при достижении скорости, близкой к синхронной ($\Omega \approx 0,95\Omega_s$), подключается к сети без какой-либо синхронизации³. Машина начинает работать в режиме асинхронного двигателя, поскольку на роторе, помимо обмотки возбуждения, замкнутой на активное сопротивление, имеется обычно короткозамкнутая демпферная обмотка. Вслед за этим обмотку возбуждения присоединяют к источнику постоянного тока, активное сопротивление отключают, и машина *втягивается в синхронизм* (термины 22 и 25, с. 16). Подключение синхронной машины к сети по методу *грубой* синхронизации может быть автоматизировано.

3.1.4. Режимы работы синхронного генератора параллельно с сетью б. б. м.

При работе синхронного генератора параллельно с сетью б. б. м. наиболее часто реализуются два режима:

1) первый режим характеризуется изменением (*регулирунием*) активной мощности генератора при постоянном возбуждении и исследуется с помощью *угловой характеристики* (термин 34, с. 18);

2) второй режим характеризуется изменением возбуждения (*регулирунием реактивной мощности*) при постоянстве активной мощности генератора и исследуется с помощью *V-образной характеристики* (термин 35, с. 18).

³ В качестве активного сопротивления используется сопротивление для гашения поля (см. разд. 5.5, с. 57)

3.1.4.1. Работа генератора в режиме угловой характеристики

Под угловой характеристикой $P = f(\theta_{\text{вр}})$ понимается зависимость активной мощности P синхронной машины от угла сдвига $\theta_{\text{вр}}$ между напряжением \underline{U} на выводах обмотки якоря и ее электродвижущей силой \underline{E}_0 при неизменных значениях: напряжения \underline{U} на выводах обмотки якоря, частоты f тока в ней и тока возбуждения $I_{\text{в}}$.

Напомним, что угол θ имеет не только временное ($\theta_{\text{вр}}$), но и пространственное ($\theta_{\text{пр}}$) толкование. Мощность синхронной машины P зависит от угла $\theta_{\text{вр}}$ между векторами ЭДС \underline{E}_0 и напряжения \underline{U} машины (см. в Работе №1 разд. 3.2.1, с. 79, сл.). Изучение этой зависимости (*угловой характеристики*) позволяет выяснить ряд важных свойств синхронной машины.

Математическое выражение для угловой характеристики выводится на основе векторных диаграмм, представленных на рис. 10.5,а (для явнополюсного генератора) и на рис. 10.5,б (для неявнополюсного) (см. в Работе №1 разд. 3.2, с. 78). Если принять активное сопротивление обмотки якоря равным нулю, $R_a = 0$, то искомое математическое выражение угловой характеристики активной мощности явнополюсного СГ записывается в виде (вывод не приводится) [1]:

$$P = \frac{mUE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (10.1)$$

Для неявнополюсного генератора выражение для угловой характеристики активной мощности записывается с учетом равенства $X_d = X_q = X_c$:

$$P = \frac{mUE_0}{X_c} \sin \theta. \quad (10.2)$$

Согласно этим равенствам $P = f(E_0, U, \theta, X_d, X_q)$. Электромагнитный момент $M = P/2\pi n$ пропорционален мощности P , и поэтому зависимость момента имеет подобный же вид.

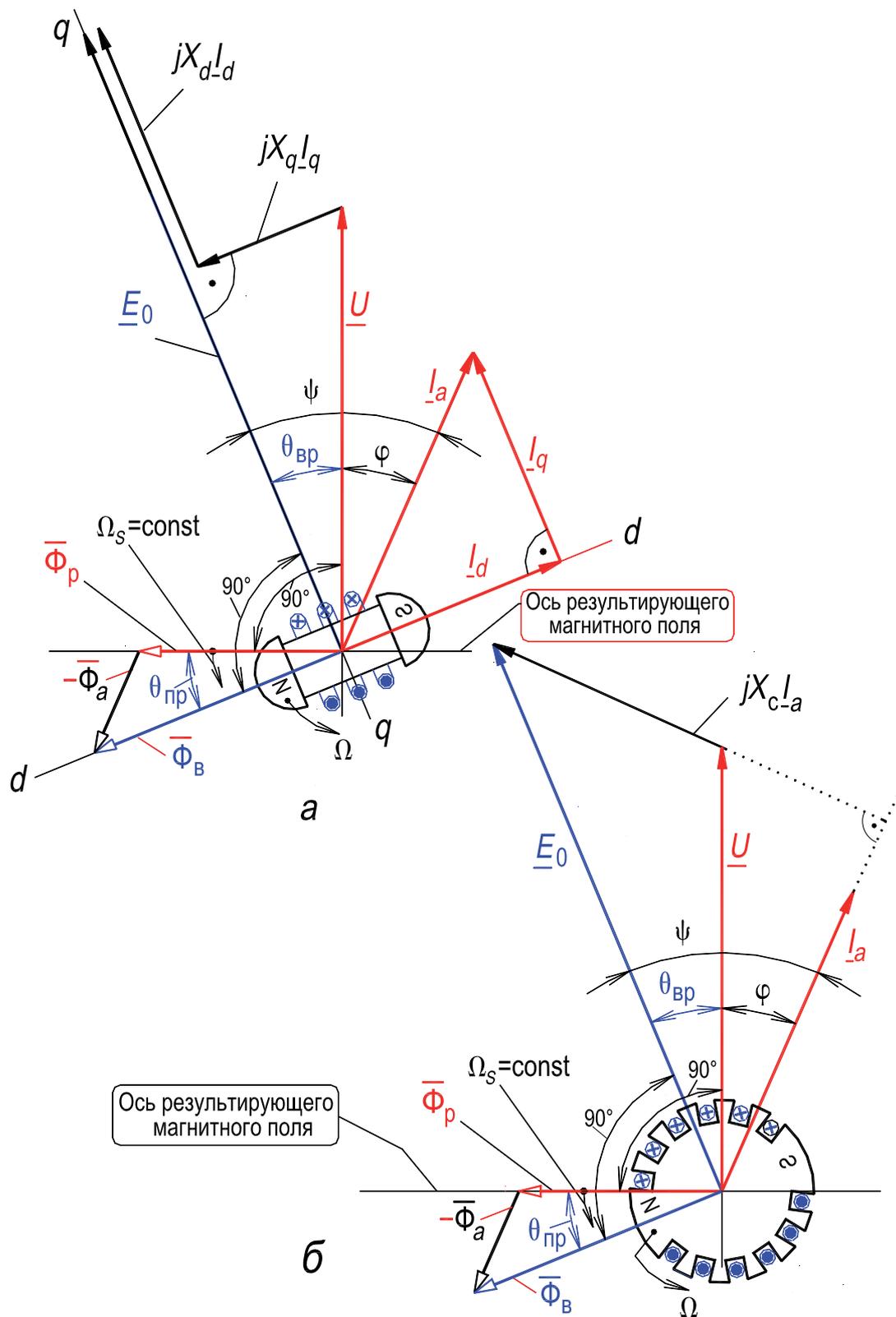


Рис. 10.5. Векторная диаграмма напряжений синхронного генератора: явнуполюсного (а), неявнуполюсного (б)

Зависимость $P = f(\theta)$, согласно равенству (10.2), представляет собой синусоиду (рис. 10.6,*a*). Половольны $P > 0$ соответствуют генераторному режиму работы (СГ) и полуволны $P < 0$ – двигательному (СД). Как следует из рис. 10.6,*a*, при непрерывном изменении угла θ синхронная машина попеременно переходит из генераторного режима работы в двигательный и обратно (т. е. не происходит процесс *однонаправленного* преобразования энергии). Такое изменение θ означает, что ротор машины вращается *несинхронно* – несколько быстрее или несколько медленнее поля реакции якоря. Зависимость $P = f(\theta)$ на рис. 10.6 при этом действительно только при *бесконечно медленном* изменении угла θ , когда в результате *несинхронного* вращения ротора в цепях индуктора не индуцируется никаких токов. Угловые характеристики, рассматриваемые при этом условии, называются *статическими* (в реальной ситуации имеем *динамические* угловые характеристики, см. Прил. 10, с. 188).

Изменение угла θ на 2π означает, что ротор провернулся относительно поля статора на два полюса (на два полюсных деления). Режим работы машины при этом, как это ясно из физических соображений, равенств (10.1), (10.2) и рис. 10.6,*a*, не изменяется. Поэтому достаточно рассмотреть угловую характеристику в пределах $-\pi \leq \theta \leq \pi$. Диапазон $-\pi \leq \theta \leq 0$ соответствует двигательному режиму, а диапазон $0 \leq \theta \leq \pi$ – генераторному. Так как полупериоды синусоидальной кривой симметричны, то свойства машины в двигательном и генераторном режимах аналогичны. Далее рассматривается режим генератора.

На рис. 10.6 показаны статические угловые характеристики активной мощности *явно-* (*б*) и *неявно* полюсных (*в*) синхронных генераторов от угла θ при работе на сеть б. б. м. Как видно из векторных диаграмм (рис. 10.5), временной угол $\theta_{вр}$ в двухполюсной машине можно рассматривать так же, как пространственный угол $\theta_{пр}$ между вектором поля возбуждения $\overline{\Phi}_в$ (т. е. осью *d*), создающего ЭДС E_0 , и вектором *резльтирующего* поля $\overline{\Phi}_р$, создающего ЭДС, равную U . При числе полюсов $2p$ пространственный угол меньше временного в p раз ($\theta_{пр} = \theta_{вр}/p$), а при $p = 1$ эти углы равны. Зависимости рис. 10.6 построены по формулам (10.1) и (10.2).

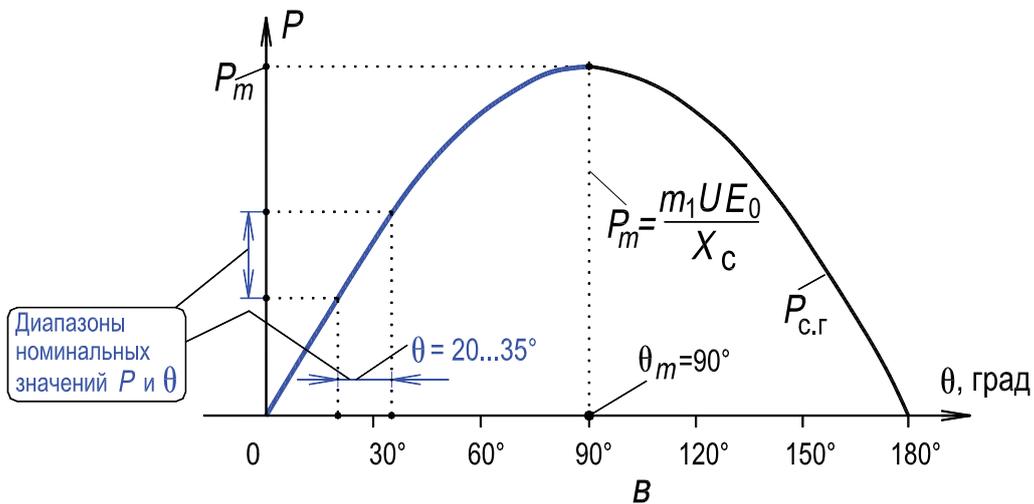
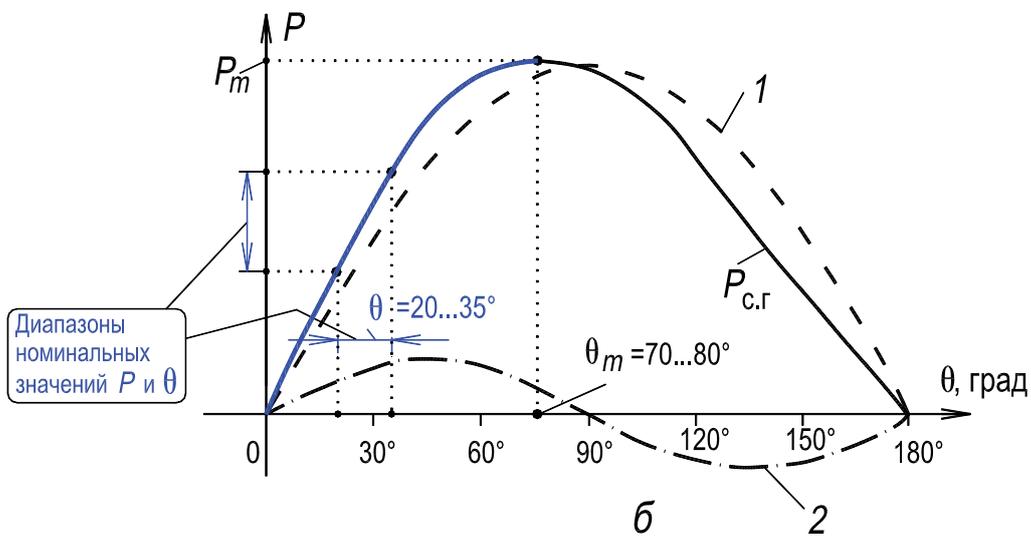
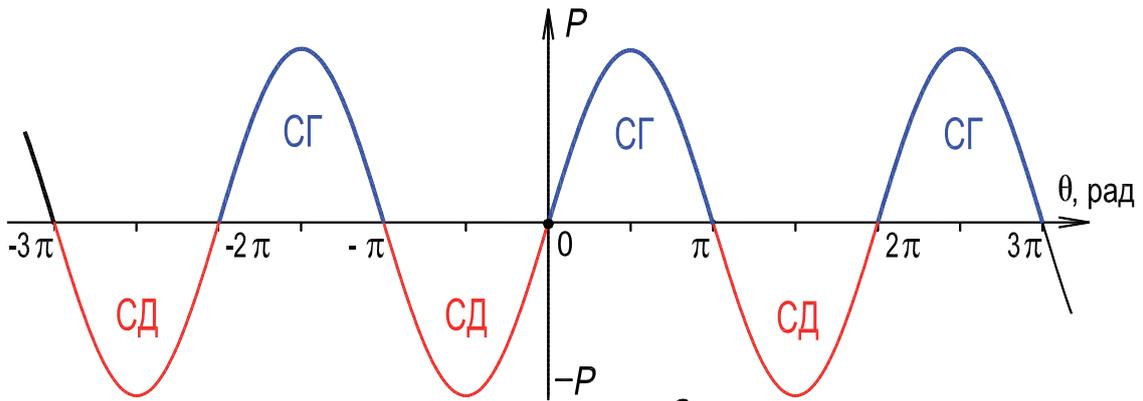


Рис. 10.6. Угловые характеристики синхронной машины:

a – при непрерывном изменении угла θ ; *б* – явнополюсного генератора;

в – неявнополюсного генератора

Для *явнополюсных* синхронных машин в отличие от *неявнополюсных* характерным является наличие в активной мощности составляющей, зависящей

от $\sin 2\theta$. Эта составляющая (кривая 2 на рис. 10.6,б) обусловлена наличием в явнополюсной машине магнитного вращающего момента M_p из-за стремления ротора ориентироваться по оси *результатирующего* магнитного поля (см. рис. 10.5). Этот момент существует даже при отсутствии тока возбуждения ($I_B = 0$), когда $E_0 = 0$. В этом случае первое слагаемое в уравнении (10.1) (и кривая 1 на рис. 10.6,б) отсутствует:

$$M_p = \frac{1}{2\pi n} \left[\frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]. \quad (10.3)$$

У невозбужденной явнополюсной машины электромагнитный момент M_p развивается исключительно вследствие действия поля реакции якоря при наличии неравномерности воздушного зазора ($X_d \neq X_q$) и называется поэтому *реактивным* (термин 48, с. 20; термин 3, с. 13). В неявнополюсной машине этой составляющей момента нет ($X_d \approx X_q$).

Максимальная активная мощность P_m в явнополюсной машине может быть определена из условия $dP/d\theta = 0$. Этому условию соответствует угол $\theta = \theta_m$. Обычно для явнополюсной машины $\theta_m = 70 \dots 80^\circ$ (рис. 10.6,б). В неявнополюсной машине мощности P_m соответствует угол $\theta_m = 90^\circ$ (рис. 10.6,в) и

$$P_m = \frac{mUE_0}{X_c}. \quad (10.4)$$

Как видно из равенства (10.4), P_m тем больше, чем больше E_0 или ток возбуждения машины I_B , чем больше U и чем меньше X_c . По этой причине с целью уменьшения X_c (и увеличения P_m) в синхронных машинах зазор выполняется больше, чем в асинхронных машинах. Однако с увеличением зазора возрастает и стоимость машины.

Таким образом, при параллельной работе синхронного генератора с сетью б. б. м. при увеличении вращающего момента первичного двигателя активная мощность генератора, отдаваемая в сеть при неизменном возбуждении, может возрастать только до определенного предела P_m . При дальнейшем увеличении вращающего момента первичного двигателя и $I_B = \text{const}$ синхронный генератор не может повышать своей мощности, *создаваемый им противодействию-*

ющий момент становится меньше вращающего момента двигателя, ротор генератора начинает ускоряться под действием избыточного момента первичного двигателя и машина выпадает из синхронизма (термин 26, с. 16).

а) Регулирование активной мощности

Активная мощность P генератора зависит от угла нагрузки $\theta_{\text{пр}}$ (термин 45, с.19). Это угол между векторами поля возбуждения $\overline{\Phi}_B$ (т. е. осью d , жестко связанной с ротором) и вектором результирующего поля $\overline{\Phi}_p$ (рис. 10.5). Как можно изменить величину угла нагрузки $\theta_{\text{пр}}$ и, следовательно, мощность P ? Так как генератор работает в сети б. б. м., то положение вектора $\overline{\Phi}_p$ изменить невозможно, поскольку он вращается в пространстве с неизменной синхронной скоростью $n_s = f/p$, заданной частотой сети $f = f_c = \text{const}$. Изменить угол $\theta_{\text{пр}}$ возможно за счет изменения положения вектора $\overline{\Phi}_B$ (т. е. за счет изменения положения ротора). Положение же ротора можно изменить только за счет изменения момента (мощности) приводного двигателя.

Вывод. Для изменения (увеличения / уменьшения) активной мощности, вырабатываемой синхронным генератором, необходимо соответствующим образом изменить момент (мощность) приводного двигателя.

б) Анализ статической устойчивости генератора

Угловая характеристика активной мощности $P = f(\theta)$ имеет важное практическое значение, во-первых, для оценки статической устойчивости (термин 29, с. 17) и, во-вторых, для оценки степени перегружаемости [см. далее (10.7), с. 175] синхронной машины при параллельной работе ее с сетью б. б. м.

Определим область и критерий статической устойчивости синхронной машины. В установившемся режиме работы генератора механическая мощность $P_{\text{п.д}}$, развиваемая первичным двигателем, равна электрической мощности P , отдаваемой генератором в сеть, т. е. $P_{\text{п.д}} = P$. При этом под $P_{\text{п.д}}$ понимается мощность первичного двигателя за вычетом механических и магнитных потерь в генераторе (при $R_a = 0$ электрические потери в обмотке якоря равны нулю). Мощность $P_{\text{п.д}}$ не зависит от угла θ и поэтому изображена на рис. 10.7 горизонтальной прямой, которая пересекается с характеристикой электрической активной мощности $P = f(\theta)$ в точках 1 и 2.

В этих точках $P_{п.д} = P$, и, следовательно, обе они могли бы соответствовать нормальному установившемуся режиму работы. Однако *статически устойчивой* является работа только в точке 1.

Режим работы определенной установки называется *статически устойчивым*, если при наличии весьма небольших кратковременных возмущений режима работы (небольшое изменение U , $P_{п.д}$, I_B и т. д.) изменения режима работы (значения θ , P и т. д.) также будут небольшими и по прекращении действия этих возмущений *восстановится прежний установившийся режим работы*.

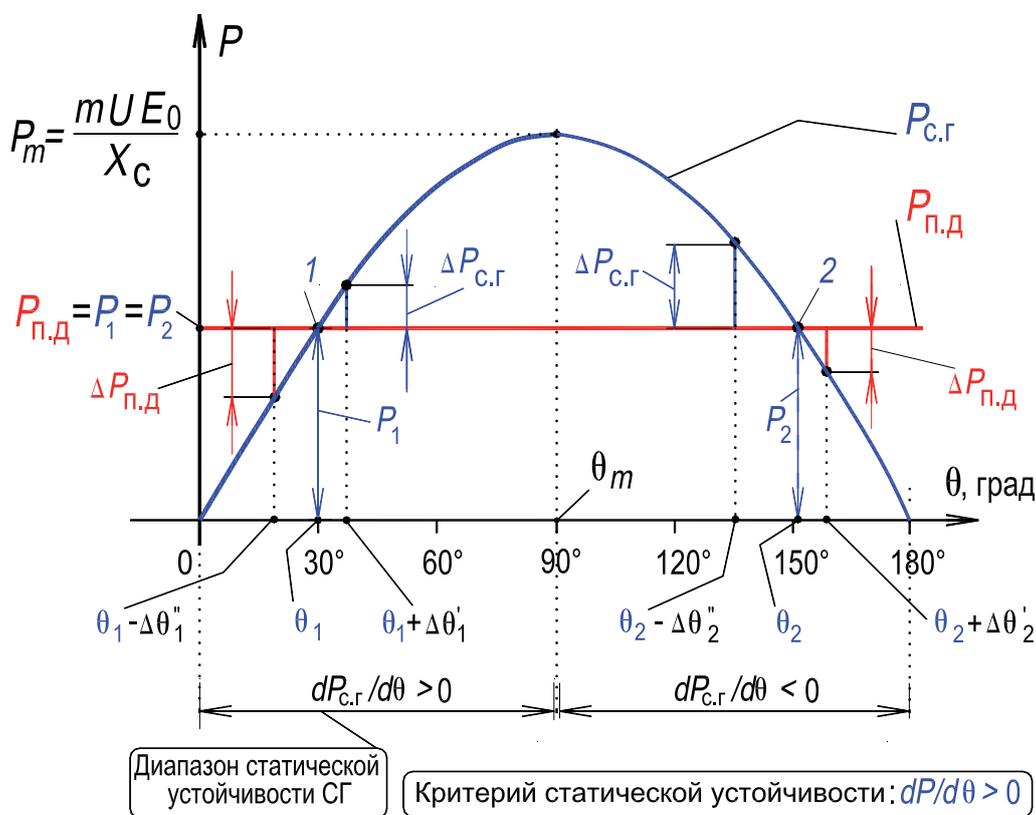


Рис. 10.7. Статическая угловая характеристика неявнополюсного СГ:
к анализу статической устойчивости

Действительно, если при работе в точке 1 рис. 10.7 в результате небольшого случайного проходящего возмущения угол θ *увеличится* на $\Delta\theta'_1$, то электрическая мощность генератора превысит мощность первичного двигателя на $\Delta P_{с.г}$. Вследствие этого на валу будет действовать избыточный тормозной электромагнитный момент:

$$\Delta M_{с.г} = \Delta P_{с.г} / \Omega, \quad (10.5)$$

и ротор генератора будет притормаживаться. Угол θ будет уменьшаться, и восстановится устойчивый установившийся режим работы в точке 1, т. е. равенство $P_{п.д} = P$. Если при работе в точке 1 угол θ в результате случайного кратковременного возмущения уменьшится на $\Delta\theta''_1$, то мощность первичного двигателя превысит электрическую мощность генератора на $\Delta P_{п.д}$. Вследствие этого на валу будет действовать избыточный момент приводного двигателя $\Delta M_{п.д}$ и ротор генератора будет ускоряться. Угол θ будет увеличиваться, и восстановится устойчивый установившийся режим работы в точке 1.

Если же при работе в точке 2 рис. 10.7 угол θ увеличится на $\Delta\theta'_2$, то избыточной будет мощность приводного двигателя $\Delta P_{п.д}$, ротор будет ускоряться, угол θ возрастет еще больше и т. д. В результате генератор *выпадет из синхронизма* (термин 2б, с. 16) или при благоприятных условиях перейдет в устойчивый режим работы на последующих положительных полуволнах кривой рис. 10.6,а после “проскальзывания” ротора на четное число полюсных делений. Если же при работе в точке 2 угол θ уменьшится на $\Delta\theta''_2$, то вследствие нарушения баланса мощностей этот угол будет уменьшаться и далее, пока этот баланс не восстановится в точке 1.

Таким образом, работа *неявнополюсного генератора статически устойчива в области $0 < \theta < 90^\circ$ и неустойчива в области $90^\circ < \theta < 180^\circ$. У явнополюсного генератора статически устойчивая область находится в диапазоне $0 < \theta < \theta_m$. Для неявнополюсного генератора $\theta_m = 90^\circ$, для явнополюсного – $\theta_m = 70...80^\circ$.*

Критерий статически устойчивой работы синхронного генератора параллельно с сетью б. б. м. – это положительный знак производной:

$$dP/d\theta > 0, \quad (10.6)$$

который имеет место в диапазоне изменения угла θ , $0 < \theta < \theta_m$. На угловых характеристиках (рис. 10.6,б,в и 10.7) статически устойчивый участок выделен утолщенной линией.

Пределом статической устойчивости является максимальное значение активной мощности P_m , которую развивает генератор при угле θ_m . Если мощность приводного двигателя $P_{п.д}$ станет больше максимальной

мощности генератора P_m , то ротор будет ускоряться и генератор выпадет из синхронизма, его ротор будет вращаться асинхронно, с некоторым скольжением s относительно поля статора (поля реакции якоря). Подобный асинхронный режим является ненормальным и недопустим, так как он опасен для синхронной машины и нарушает нормальную работу сети, машин и механизмов, соединенных с ней. Поэтому при эксплуатации синхронных машин необходимо заботиться о том, чтобы их устойчивая синхронная работа была в достаточной степени обеспечена.

При работе синхронные машины могут подвергаться кратковременным перегрузкам. Кроме того, вследствие уменьшения напряжения, например, при коротких замыканиях в сети максимальная мощность P_m , которую способна развивать машина, снижается [см. (10.4), с. 171]. Поэтому необходимо, чтобы машина имела достаточный запас мощности, т. е. чтобы значение P_m было достаточно велико.

Отношение максимальной мощности P_m (при $U = U_{\text{ном}}$ и $I_B = I_{B,\text{ном}}$) к номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ синхронного генератора называется *статической перегружаемостью* и обозначается символом $k_{\text{п}}$:

$$k_{\text{п}} = P_m / P_{\text{ном}}. \quad (10.7)$$

На основе равенств (10.2) и (10.4) для неявнополюсной машины *статическая перегружаемость*:

$$k_{\text{п}} = 1 / \sin \theta_{\text{ном}}. \quad (10.8)$$

Величина $k_{\text{п}}$ тем больше, чем меньше угол $\theta_{\text{ном}}$ при номинальной нагрузке. Обычно $\theta_{\text{ном}} = 20 \dots 35^\circ$ (см. рис. 10.6, б, в, а также разд. 5, с. 54, сл.). Значение величины $k_{\text{п}}$ задается стандартами. Для крупных синхронных машин оно должно быть не менее 1,6...1,7.

3.1.4.2. Работа генератора в режиме V-образной характеристики

V-образной характеристикой называется (термин 35, с. 18) зависимость тока в обмотке якоря I_a синхронной машины от тока возбуждения I_B при неизменных значениях активной мощности $P = \text{const}$ и напряжении на выводах обмотки якоря, $U = \text{const}$, $f = \text{const}$. Название характеристики (V-образная) обусловлено ее формой. На основе анализа этой характеристики

отвечают на вопрос: как регулировать реактивную мощность Q синхронного генератора?

В зависимости от величины тока I_B различают три режима СМ:

- а) *недовозбуждение*,
- б) *нормальное возбуждение*,
- в) *перевозбуждение*.

Непосредственно после включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью б. б. м. он находится в режиме нормального возбуждения. При этом он работает на холостом ходу и в обмотке якоря ток не протекает, $I_a = 0$ (см. разд. 3.1.3, с. 162, сл.), а следовательно и *реактивная мощность* $Q = 0$ (также и $P = 0$). Ток возбуждения, соответствующий нормальному возбуждению генератора, обозначается символом $I_{B, \text{норм}}$ и называется током нормального возбуждения. При токе $I_B < I_{B, \text{норм}}$ имеет место *недовозбуждение* и генератор потребляет реактивную мощность из сети. При токе $I_B > I_{B, \text{норм}}$ имеет место *перевозбуждение* и генератор отдает реактивную мощность в сеть (отметим, что *асинхронный генератор не может генерировать реактивную мощность в сеть, что противоречит функции генератора*).

Построить отдельную V-образную характеристику для фиксированного значения $P = \text{const}$ удобно на основе трех векторных диаграмм, соответствующих трем указанным выше режимам возбуждения: *недовозбуждение, нормальное возбуждение, перевозбуждение*. Очевидно, что во всех трех режимах возбуждения результирующий магнитный поток $\bar{\Phi}_p$ генератора остается без изменений, так как неизменно напряжения U генератора, заданное напряжением сети б. б. м., $U_c = \text{const}$.

Изобразим V-образные характеристики (рис. 10.8) и построим диаграммы для случая холостого хода генератора, когда его активная мощность равна нулю, $P = P_x = \text{const} = 0$ (рис. 10.3, с. 162), и для случая, когда генератор вырабатывает некоторую неизменную активную мощность, $P = \text{const}$ (рис. 10.9).

а) V-образная характеристика при холостом ходе генератора

При холостом ходе и нормальном возбуждении генератора ($I_B = I_{B, \text{норм}}$, $I_a = 0$), включенного на параллельную работу с сетью б. б. м., имеет место диаграмма, представленная на рис. 10.3, б (с. 162). Этой диаграмме соответствует точка V-образной характеристики, находящаяся на оси абсцисс (точка *A* на рис. 10.8).

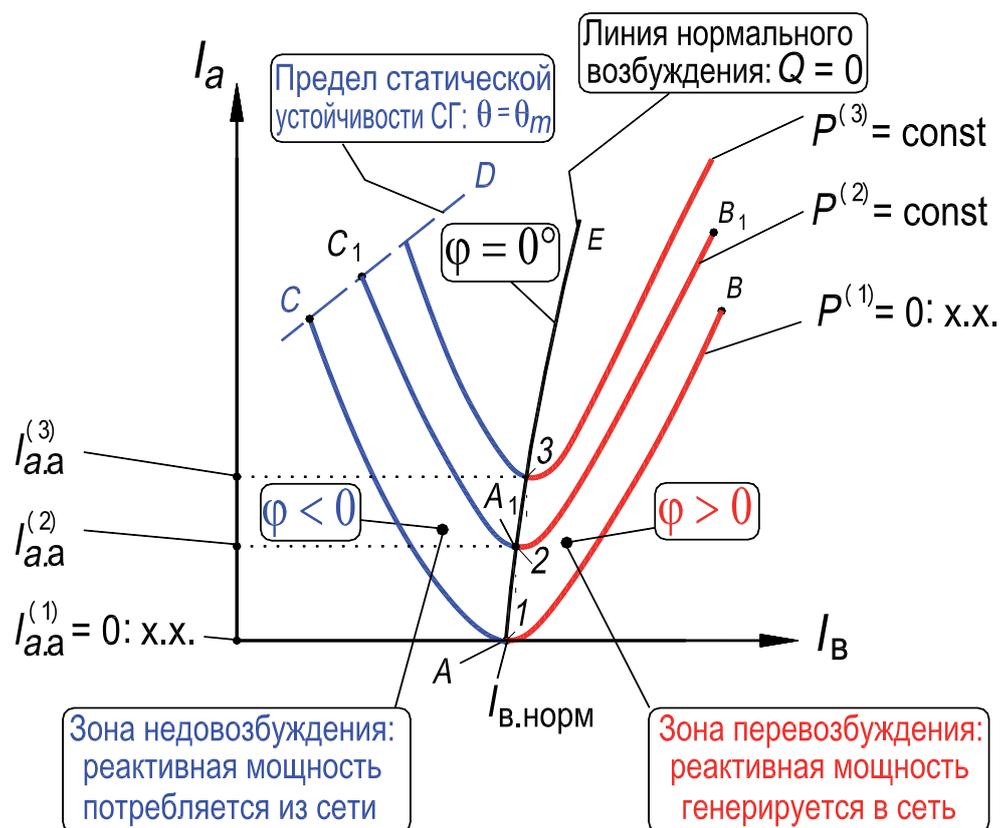


Рис. 10.8. V-образные характеристики синхронного генератора:

фаза φ тока якоря I_a СГ измеряется относительно напряжения генератора U ;
номинальный режим генератора соответствует зоне перевозбуждения

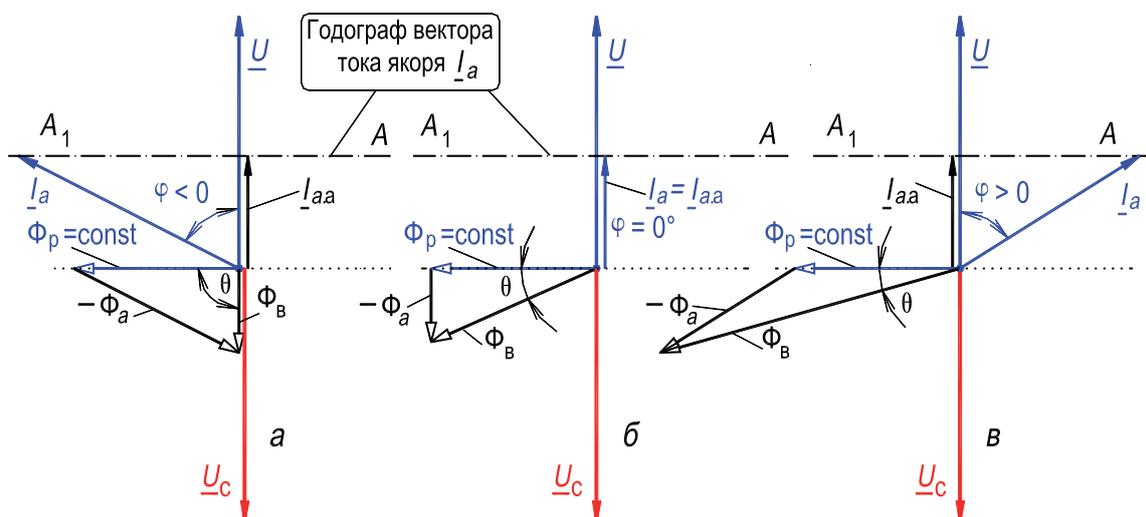


Рис. 10.9. Семейство векторных диаграмм для построения V-образной характеристики генератора при $P_{с.г} = \text{const} (> 0)$:

a – недо возбуждение, $б$ – нормальное возбуждение, $в$ – перевозбуждение
(векторы падения напряжения на сопротивлении обмотки якоря не показаны)

При увеличении тока возбуждения $I_B > I_{B.\text{норм}}$ (*перевозбуждение*) ЭДС E_0 станет больше напряжения машины U и поэтому $\underline{\Delta E} = \underline{E}_0 + \underline{U}_c$ будет совпадать по фазе с \underline{U} (рис. 10.3,в). При этих условиях в обмотке статора под действием ЭДС $\underline{\Delta E}$ возникнет реактивный ток I_a , опережающий напряжение сети U_c на 90° (активное сопротивление обмотки якоря R_a не учитываем). Следовательно, *перевозбужденный* генератор эквивалентен емкости, включенной в сеть, и он генерирует реактивную мощность в сеть, $Q > 0$. Координата одной точки V-образной характеристики (например, это точка B), соответствующей *перевозбуждению*, находится правее и выше точки A на рис. 10.8. При уменьшении тока возбуждения, $I_B < I_{B.\text{норм}}$, (*недовозбуждение*, рис. 10.3,а) ЭДС $\underline{\Delta E}$ и ток якоря I_a изменяют фазу на 180° . В это случае ток I_a отстает от напряжения сети U_c . Следовательно, *недовозбужденный* генератор эквивалентен индуктивности, включенной в сеть, и он потребляет реактивную мощность из сети, $Q < 0$. Координата одной точки V-образной характеристики (например, это точка C), соответствующей *недовозбуждению* находится левее и выше точки A на рис. 10.8. По сравнению с *перевозбуждением* знак и направление реактивной мощности генератора изменились.

При изменении тока возбуждения ток якоря принимает такое значение, которое соответствует и обеспечивает неизменное значение результирующего магнитного потока ($\overline{\Phi}_p = \text{const}$) генератора при его работе в сети б. б. м. Отметим также, что ток якоря I_a на векторных диаграммах рис. 10.3 чисто реактивный, $I_a = I_{a.p}$, а активная составляющая тока якоря отсутствует, $I_{a.a} = 0$.

Таким образом, получается V-образная характеристика при холостом ходе генератора. Линии AB соответствует *перевозбуждение* и неизменное значение коэффициента мощности генератора $\cos 90^\circ$, равное 0, а линии AC – *недовозбуждение* и $\cos(-90^\circ)$ равен 0. Отметим, что в *генераторе* фазу φ тока якоря I_a принято измерять относительно напряжения на обмотке якоря U .

В разделе 3.1.2.2 /с. 161,сл./ на основе векторных диаграмм (рис. 10.3) рассмотрено действие реакции якоря при изменении возбуждения.

б) V-образная характеристика при постоянной активной нагрузке генератора

Условие постоянства активной мощности $P = mUI_a \cos \varphi = \text{const}$ выполняется, если неизменна активная составляющая $I_{a.a} = \text{const}$ полного тока якоря I_a . То есть активная составляющая $I_{a.a}$, для данной V-образной характеристики, рассматриваемой при $P = \text{const}$, остается постоянной при изменении тока возбуждения I_B . Реактивная же составляющая тока якоря $I_{a.p}$ будет изменяться. Это означает, что годографом вектора полного тока якоря I_a будет прямая линия, перпендикулярная вектору напряжения генератора U , так как только в этом случае активная составляющая неизменна, $I_{a.a} = \text{const}$ (на рис. 10.9 годограф – это пунктирная линия A_1A).

Рис. 10.9,б соответствует *нормальному* возбуждению генератора при $P = \text{const}$, рис. 10.9,а – *недовозбуждению*, а рис. 10.9,в – *перевозбуждению*. Очевидно, что V-образная характеристика, построенная на основе диаграмм рис. 10.9 (линия $C_1A_1B_1$ на рис. 10.8), будет находиться выше V-образной характеристики (линия CAB), построенной на основе диаграмм рис. 10.3, на величину отрезка соответствующего активной составляющей тока якоря $I_{a.a}$. На рис. 10.9,а показан предельный случай *недовозбуждения неявнополюсного* генератора, ему соответствует значение угла $\theta = 90^\circ$. При дальнейшем уменьшении тока возбуждения угол θ станет больше 90° ($\theta > \theta_m$), т. е. генератор перейдет в зону статически неустойчивой работы (см. разд. 3.1.4.1,б и рис. 10.7, с. 172,сл.). Таким образом, при перемещении вдоль характеристики от точки C_1 к точке A_1 и далее к точке B_1 угол θ уменьшается, т. е. при увеличении тока возбуждения статическая устойчивость и статическая перегружаемость $k_{\text{п}}$ [см. равенства (10.7) и (10.8), с. 175] увеличиваются. Это естественно, так как при увеличении I_B растет ЭДС E_0 и, следовательно, возрастают максимальная мощность генератора P_m [см. выражение (10.4), с. 171] и ординаты угловых характеристик (рис. 10.6 и 10.7).

На рис. 10.8 показана еще одна характеристика при большем фиксированном значении активной мощности генератора, она расположена выше линии $C_1A_1B_1$. На рис. 10.8 линия CD соответствует пределу статической устойчивости. Линии AE соответствуют: значение коэффициента мощности генератора $\cos 0^\circ = 1$; значение реактивной составляющей полного тока

якоря равно нулю, $I_{a,p} = 0$; значение реактивной мощности генератора также равно нулю, $Q = 0$. В точках минимума каждой V-образной характеристике имеет место только активный ток в обмотке якоря, $I_a = I_{a.a}$.

Номинальным возбуждением синхронного генератора является *перевозбуждение*, при этом генератор выдает реактивную мощность в сеть, которая необходима трансформаторам и асинхронным двигателям для создания соответственно пульсирующего и вращающегося магнитного поля. Согласно ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 номинальный коэффициент мощности генератора $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (при отстающем токе). Имеется в виду, что при *перевозбуждении* ток якоря отстает от напряжения генератора U (но опережает напряжение сети U_c , см. рис. 10.9,в).

На рис. 10.8 линии AC , AE и AB являются, по существу, регулировочными характеристиками (см. в Работе №1 рис. 8.4,б, с. 84 и разд. 4.5, с. 100).

3.2. Параллельная работа генераторов на сеть ограниченной мощности

При параллельной работе генератора с сетью б. б. м. *изменение его вращающего момента*, или *тока возбуждения* практически не влияло на режим работы сети.

Иные процессы имеют место при параллельной работе двух генераторов *одинаковой* или *соизмеримой* мощности на общую сеть *ограниченной* мощности.

Если нагрузка сети ограниченной мощности *неизменна*, то увеличение мощности одного генератора должно сопровождаться соответствующим уменьшением мощности другого. В противном случае будет иметь место изменение частоты и напряжения в сети. Таким образом, перераспределение активной мощности между генераторами должно сопровождаться *одновременным согласованным* изменением вращающих моментов двух первичных двигателей. При отключении одного из генераторов необходимо предварительно всю нагрузку перевести на другой генератор. Такая же взаимная согласованность требуется в изменении токов возбуждения обеих машин при перераспределении между ними реактивной мощности, отдаваемой в сеть.

Если генераторы одинаковой мощности установлены на одной станции, то целесообразно, чтобы их коэффициенты мощности были равны, так как при этом снижаются общие электрические потери в цепях возбуждения.

4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке, в состав которой входят синхронный генератор (СГ) с возбудителем GE (рис. 10.10) и приводной двигатель – двигатель постоянного тока параллельного возбуждения M [5, с. 82] (см. фотографии установки на рис. В1,..., В3, с. 11, 12).

Значения номинальных данных – см. разд. 6, с. 60, сл.

Электрической сетью бесконечно большой мощности (б. б. м.) является сеть с трехфазным напряжением $U_c = 127$ В. Частота напряжения сети $f_c = 50$ Гц.

Между сетью и зажимами обмотки якоря генератора включен ламповый синхроскоп PS . Синхроскоп выполнен на трех лампах накаливания HL , которые могут быть включены по схеме на “погасание огня” (рис. 10.10 и 10.4,а) или по схеме на “вращение огня” (рис. 10.4,б).

Собрать схему включения приводного двигателя M (см. Работу № 1, с. 96).

Собрать схему испытаний синхронного генератора при его работе в сети б. б. м. (рис. 10.10).

4.1. Пуск приводного двигателя

Пуск двигателя осуществить следующим образом.

1. Установить пусковой реостат $RR_{п.д}$ в положение “Пуск” (*введен*);
2. Установить реостат RR_B в цепи возбуждения в положение “Выведен”;
3. Включить автомат $QF1$ (на схему подано напряжение 110 В /PV3/);
4. В процессе разгона двигателя *плавно и медленно* перевести пусковой реостат $RR_{п.д}$ в положение “Работа” (*выведен*);

5. Реостатом RR_B установить частоту вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин. В процессе выполнения всех опытов поддерживать это значение постоянным, регулируя момент приводного двигателя M реостатом RR_B .

Внимание. *Перед отключением* двигателя от сети необходимо пусковой реостат $RR_{п.д}$ *снова установить* в положение “Пуск”.

4.2. Включение СГ на параллельную работу с сетью б. б. м. методом точной синхронизации (разд. 3.1.3.1, с. 163)

1. Установить выключатель QSI в положение “Откл”;
2. Включить автомат $QF2$ (*приборы PVI и PF фиксируют значения напряжения и частоты сети*);

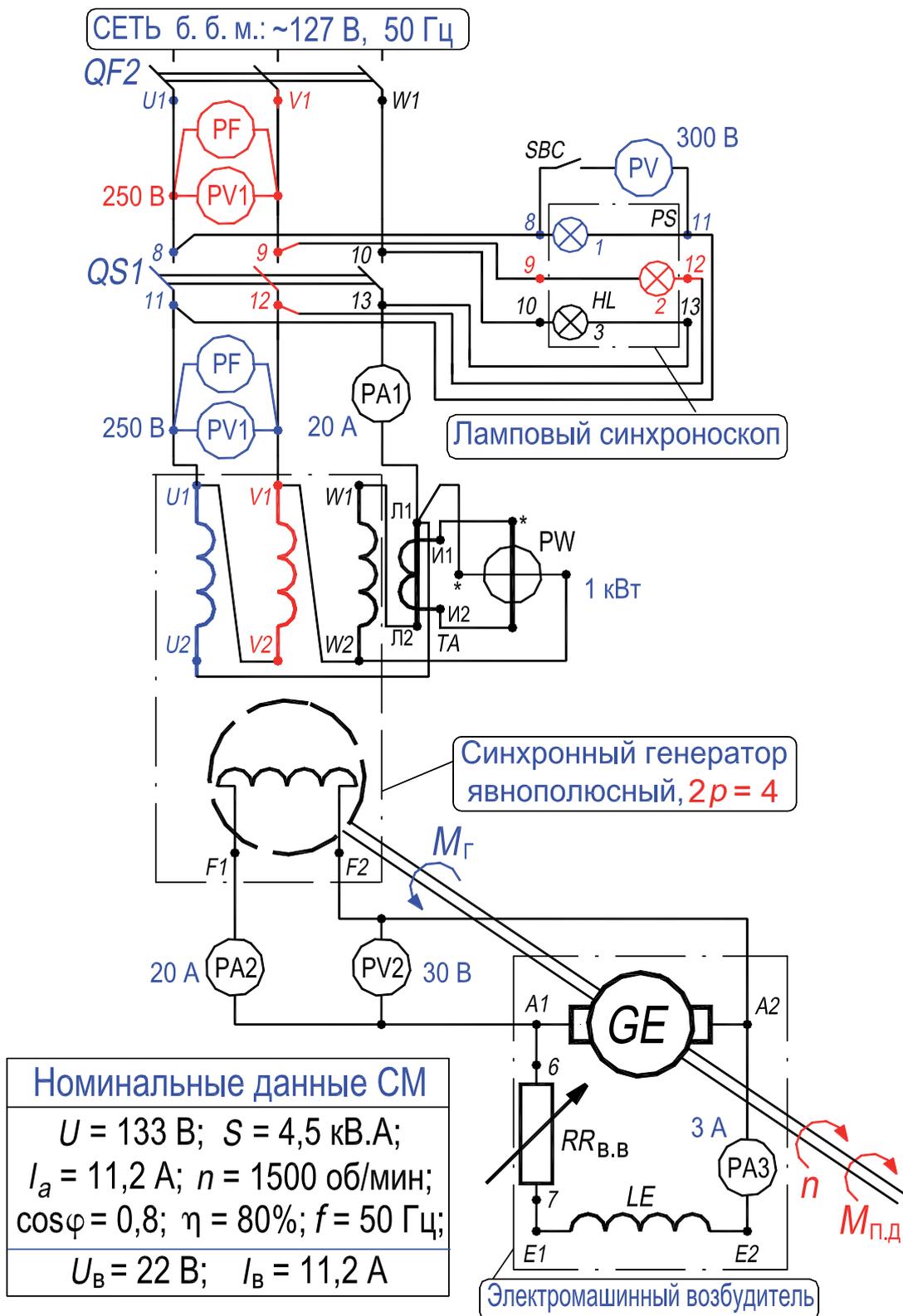


Рис. 10.10. Схема лабораторной установки для исследования синхронного генератора при работе в сети бесконечно большой мощности.

Схему включения приводного двигателя, см. в Работе № 1 рис. 8.8, с. 96

3. Реостатом $RR_{в.в}$ установить ток возбуждения ($PA2$), при котором напряжение генератора будет равно напряжению сети (сравнить показания двух вольтметров $PV1$);

4. Реостатом $RR_{в}$ установить частоту вращения индуктора, при которой частота напряжения генератора равна частоте напряжения сети (сравнить показания двух частотомеров PF);

5. По синхроскопу PS (три лампы HL) осуществить контроль за процессом синхронизации генератора с сетью б. б. м.

При достижении частоты загорания/потухания ламп HL 10...15 раз в минуту нажать на кнопку SBC и в момент нулевого показания вольтметра PV установить выключатель QSI в положение “Вкл” – “Параллельная работа СГ с сетью б. б. м.”. Синхронный генератор *входит в синхронизм* (термины 24 и 25, с. 16).

4.3. Включение СГ на параллельную работу с сетью б. б. м. методом *грубой синхронизации* (разд. 3.1.3.1, с. 163)

1. Установить выключатель QSI в положение “Откл”;

2. Отключить автомат $QF2$;

3. Полностью ввести реостат $RR_{в.в}$ в цепи возбуждения возбудителя (СГ *невозбужден*);

4. Реостатом $RR_{в}$ в цепи возбуждения приводного двигателя установить частоту вращения индуктора примерно равной 0, $95n_{ном} = 1425$ об/мин;

5. Установить выключатель QSI в положение “Вкл”;

6. Включить автомат $QF2$;

7. Установить реостатом $RR_{в.в}$ номинальный ток возбуждения (11,2 А). Генератор возбуждается и *входит в синхронизм*.

Так как генератор *явнополюсный*, то он может войти в синхронизм за счет действия синхронного реактивного момента M_p до возбуждения [см. выражение (10.3), с. 171].

Непосредственно после включения синхронного генератора в сеть он находится в режиме холостого хода. Ток в обмотке якоря СГ равен нулю, $I_a = 0$ А.

Изменение *активной* мощности (PW), отдаваемой генератором в сеть, обеспечить изменением момента приводного двигателя. Момент регулировать реостатом RR_B в цепи возбуждения двигателя (см. Работа № 1, рис. 8.8, с. 96).

Изменение *реактивной* мощности, отдаваемой генератором в сеть (или потребляемой из сети), обеспечить изменением тока возбуждения генератора ($PA2$). Этот ток регулируется реостатом $RR_{B.V}$ в цепи возбуждения возбудителя (рис. 10.10).

4.4. Параллельная работа генератора с сетью б. б. м. при постоянстве активной мощности и изменении возбуждения. Снятие V-образных характеристик (см. разд. 3.1.4.2 на с. 175, сл.)

V-образной характеристикой называется (термин 35, с. 18) зависимость тока в обмотке якоря I_a синхронного генератора от тока возбуждения I_B при неизменных значениях активной мощности $P = \text{const}$ и напряжении на выводах обмотки якоря, $U = \text{const}, f = \text{const}$.

Снятие семейства характеристик при различных значениях $P = \text{const}$ (эти значения задаются преподавателем) осуществить следующим образом.

1. Установить реостатом RR_B в цепи возбуждения двигателя заданное преподавателем значение активной мощности синхронного генератора, $P = \text{const}$. Первую характеристику снять при холостом ходе генератора, $P = 0$ Вт;

2. Изменять реостатом $RR_{B.V}$ ток I_B в цепи возбуждения генератора от минимального значения до максимального. При этих значениях тока I_B ток в обмотке якоря I_a не должен превышать номинальное значение, $I_a = I_{\text{Л.НОМ}} = 19,4$ А. Показания приборов $PA1$ (I_a) и $PA2$ (I_B) занести в табл. 10.1.

Следует иметь в виду, что при снижении тока возбуждения синхронного генератора до значений меньших ограниченных пунктирной линией CD он *выпадает из синхронизма* (эта линия соответствует пределу *статической устойчивости*, см. рис. 10.8, с. 177; термины 26 и 29, с. 16, сл.)

3. В процессе опыта фиксировать точку с координатами $\{I_{a.a}, I_{B.\text{норм}}\}$, где $I_{a.a}$ – минимальный (активный) ток в обмотке якоря генератора, $I_{B.\text{норм}}$ – соответствующий ему ток в обмотке возбуждения СГ. В этой точке генератор *нормально* возбужден, он не вырабатывает реактивную мощность, $Q = 0$ вар (это точка A на рис. 10.8).

4. В диапазоне значений тока возбуждения $I_B < I_{B, \text{норм}}$ генератор *недо-возбужден* (фиксировать три точки), он потребляет реактивную мощность из сети (см. линию AC на рис. 10.8).

5. В диапазоне $I_B > I_{B, \text{норм}}$ генератор *перевозбужден* (фиксировать три точки), он генерирует реактивную мощность в сеть (см. линию AB на рис. 10.8).

6. Снять еще две V-образные характеристики при значении активной мощности синхронного генератора $P^* = 0,25; 0,5$. Заданное значение активной мощности поддерживается реостатом RR_B в цепи возбуждения двигателя.

Таблица 10.1. V-образные характеристики синхронного генератора

Возб-ние СГ	$P^* = 0$				$P^* = 0,25$				$P^* = 0,5$			
	I_a	I_B	I_a^*	I_B^*	I_a	I_B	I_a^*	I_B^*	I_a	I_B	I_a^*	I_B^*
	А	А	о. е.	о. е.	А	А	о. е.	о. е.	А	А	о. е.	о. е.
Недо-возб-ние												
Норм-е												
Перевозб-ние												

Для расчета относительных значений тока обмотки якоря I_a^* и тока обмотки возбуждения I_B^* использовать их базисные значения (см. разд. 7, с. 62).

Точки минимума тока якоря на V-образных кривых (на рис. 10.8 они обозначены цифрами 1, 2 и 3) смещены относительно друг друга вдоль оси абсцисс в зону больших значений тока возбуждения. Это смещение обусловлено наличием индуктивного сопротивления рассеяния обмотки якоря. Минимальный ток в обмотке якоря $I^{(2)}_{a.a}$ и $I^{(3)}_{a.a}$, соответствующий точкам 2 и 3, содержит только активную составляющую, а коэффициент мощности генератора в этих точках $\cos \varphi = 1,0$.

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 157).
4. Номинальные данные СГ и возбудителя (разд. 6, с. 60 и 61).
5. Номинальные данные двигателя постоянного тока (разд. 6.3, с. 61).
6. Схемы испытаний, рис. 8.8, с. 96 и рис. 10.10, с. 182.
7. Результаты опыта, представленные в таблице 10.1; ниже таблицы приводится экспериментальная графическая зависимость $I_a = f(I_B) - V$ -характеристика синхронного генератора при его работе в сети бесконечно большой мощности.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Синхронные машины подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Перечислить и объяснить условия включения синхронного генератора на параллельную работу методом точной синхронизации.
2. Каким образом определяется совпадение порядка следования фаз генератора и сети по ламповому синхроскопу?
3. Как регулируется частота вращения синхронного генератора в лабораторной установке?
4. Как изменить напряжение синхронного генератора до включения его на параллельную работу?
5. Каким образом регулируется нагрузка генератора по активной и реактивной мощности?
6. Пояснить опыты по снятию V-образных характеристик синхронного генератора.
7. Каков характер реакции якоря в СГ при различных режимах возбуждения?
8. Почему точка V-образных характеристик, соответствующая минимуму тока, при увеличении активной нагрузки генератора смещается в зону больших значений тока возбуждения?

Колебания и динамическая устойчивость синхронных машин

П10.1. Определение понятия “динамическая устойчивость”

Динамическая устойчивость – это способность синхронной машины оставаться в синхронизме при *резких* изменениях нагрузки и параметров сети. В отличие от понятия *статической устойчивости* (термин 29, с. 17), когда процессы преобразования энергии происходят в *установившемся* режиме, динамическая устойчивость – способность машины оставаться в синхронизме в *переходных* режимах.

Под *динамической устойчивостью* синхронной машины понимается (термин 30, с. 17) ее способность сохранять синхронный режим параллельной работы с сетью при *больших и резких* возмущениях режима ее работы (короткие замыкания в сети и пр.). Устойчивость работы при этих условиях зависит как от величины возмущения и его длительности, так и от параметров машины, значения ее предшествующей нагрузки и прочих условий. В большинстве случаев при таких возмущениях *возникают колебания (качания) ротора с большой амплитудой*. Нередко возникающий при таких возмущениях режим работы является неустойчивым и машина выпадает из синхронизма (термин 26, с. 16) [1, 2].

П10.2. Физическая сущность колебаний (качаний) ротора синхронных машин

При колебаниях (качаниях) синхронной машины ее ротор вращается неравномерно и скорость его колеблется с некоторой частотой.

Практический интерес представляет случай, когда машина работает параллельно с мощной сетью б. б. м., частоту f тока которой (машины) можно считать постоянной, заданной частотой сети, $f = f_c = \text{const}$. В этом случае колебания угловой скорости ротора Ω происходят около синхронной угловой скорости Ω_s :

$$\Omega_s = \omega_c / p = 2\pi f_c / p = 2\pi n_s. \quad (\text{П10.1})$$

Одновременно с колебаниями Ω происходят также колебания угла нагрузки θ . Действительно, при $\Omega > \Omega_s$ ротор забегает вперед и угол θ между векторами \underline{E}_0 и \underline{U} при работе в режиме генератора увеличивается (рис. П10.1), а при $\Omega < \Omega_s$ угол θ уменьшается.

Колебания угла θ , в свою очередь, неразрывно связаны, как следует из векторных диаграмм, с колебаниями вектора тока якоря \underline{I}_a и мощности P (см. в Работе №1 рис. 8.2 и разд. 3.2, с. 78, сл.).

Поэтому внешне колебания синхронной машины проявляются в колебаниях стрелок ваттметров и амперметров. Чем больше амплитуда колебаний Ω и θ , тем больше колебания P и \underline{I}_a . Если мощность сети мала, то возникают также колебания напряжения \underline{U} (это наблюдается при выполнении Работы № 4, с. 202).

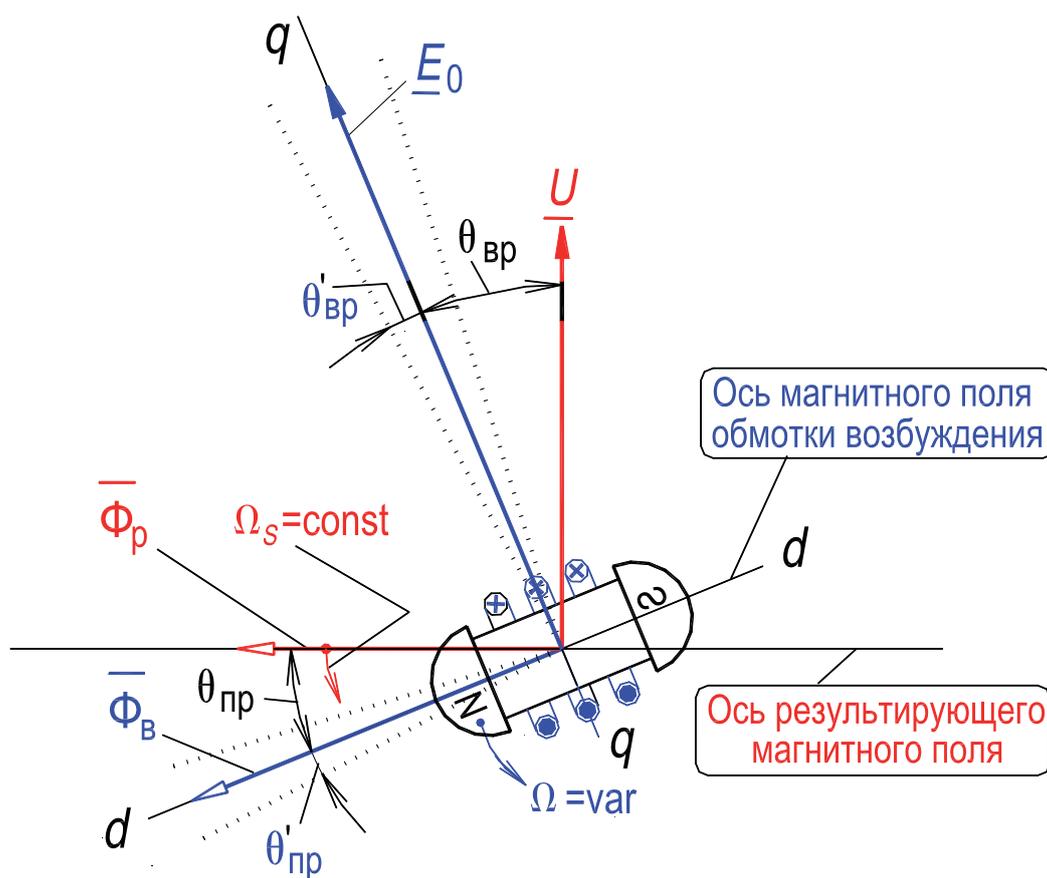


Рис. П10.1. Колебания вектора \underline{E}_0 в процессе качания ротора синхронного генератора

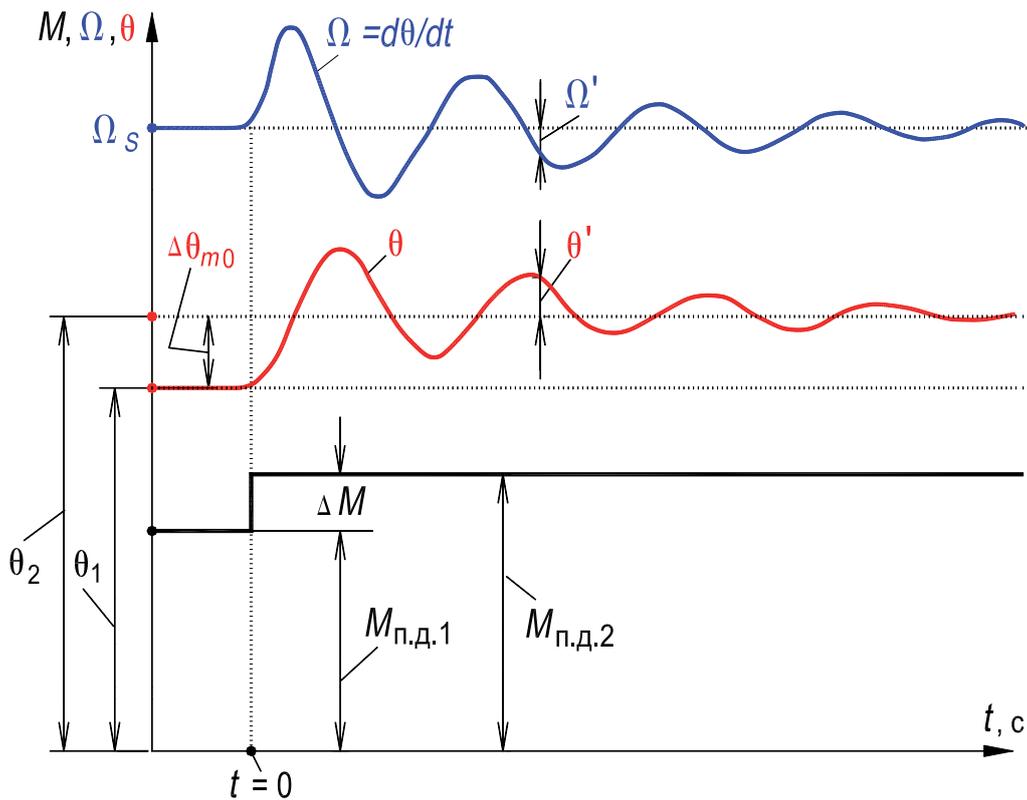


Рис. П10.2. Колебания угловой скорости вращения ротора Ω и угла θ синхронного генератора при скачкообразном изменении момента приводного двигателя на величину ΔM

При всяком изменении нагрузки синхронной машины меняется угол θ между векторами напряжения \underline{U} и ЭДС \underline{E}_0 . Этот угол зависит от положения оси полюсов возбуждения машины (эта ось совпадает с осью d) относительно оси *резльтирующего* магнитного поля (рис. П10.1), поэтому колебания угла θ связаны с механическими колебаниями всей вращающейся роторной системы синхронной машины, поскольку *вектор результирующего магнитного потока* $\overline{\Phi}_p$ (при работе в сети б. б. м.) *вращается со строго постоянной угловой скоростью* Ω_s , соответствующей частоте сети $f_c = \text{const}$ ($n_s = f/p$). Это в одинаковой мере справедливо как для генераторного, так и для двигательного режима работы синхронной машины.

На рис. П10.2 представлены кривые затухающих колебаний Ω , θ . Индекс “1” относится к исходному режиму, до начала колебаний, а индекс “2” – к последующему режиму, после затухания колебаний.

В ряде случаев возникают сильные колебания синхронных машин, которые нарушают их нормальную работу, а также работу энергосистемы в целом.

При колебаниях в синхронных машинах происходят сложные переходные процессы, которые далее рассматриваются преимущественно с физической точки зрения.

Колебания синхронных машин бывают *вынужденные* и *свободные*.

Вынужденные колебания синхронной машины возникают в случаях, когда механический момент на валу непостоянен и содержит пульсирующие составляющие.

Чаще всего это бывает при соединении синхронных машин с поршневыми машинами (например, дизельный первичный двигатель у генератора и поршневой компрессор у двигателя).

Вынужденные колебания становятся особенно сильными, нежелательными и опасными, когда их частота f_v близка к частоте собственных или свободных колебаний f_0 и поэтому возникают резонансные явления, а также когда в общую сеть включено несколько синхронных машин, имеющих вынужденные колебания с одинаковыми или кратными частотами. Например, иногда возникают затруднения при параллельной работе синхронных дизель-генераторов, первичными двигателями которых являются дизели.

Для уменьшения вынужденных колебаний дизель-генераторы, а часто также двигатели поршневых компрессоров снабжаются маховиками. Маховики иногда присоединяются непосредственно к роторному колесу синхронной машины или ротор машины выполняется с повышенным маховым моментом (большой диаметр и масса). Дизель-генераторы имеют для уменьшения колебаний также демпферные (успокоительные) обмотки.

Свободные колебания присущи самой природе синхронной машины, так как она при параллельной работе с сетью или другими синхронными машинами представляет собой колебательную систему.

Такие колебания возникают при любых внезапных или резких нарушениях или изменениях режима работы синхронной машины (наброс или сброс нагрузки, падение напряжения на зажимах, изменение тока возбуждения

и пр.). Изображенные на рис. П10.2 колебания возникают, например, при внезапном увеличении вращающего момента первичного двигателя от значения $M_{п.д.1}$ до значения $M_{п.д.2}$ на величину ΔM . В этом случае угол нагрузки генератора возрастает от θ_1 до θ_2 и этот переход совершается путем колебаний с начальной амплитудой колебаний угла нагрузки, равной $\Delta\theta_{m0} = \theta_2 - \theta_1$.

Предположим, что вращающий момент, приложенный к валу синхронного генератора со стороны первичного двигателя, резко возрос в момент времени $t = 0$ от значения $M_{п.д.1}$ до значения $M_{п.д.2}$ на величину ΔM и в дальнейшем остался неизменным (рис. П10.2). Угловая скорость ротора Ω , а следовательно, и угол $\theta = \theta_1$ начнут в этом случае возрастать. Такому *возрастанию угловой скорости будут противодействовать синхронизирующий момент, инерция вращающихся частей и другие тормозящие моменты*. Переход угла θ от начального значения θ_1 к конечному значению θ_2 обычно носит характер постепенно затухающих свободных колебаний (рис. П10.2). Угловая скорость ротора при этом также испытывает периодические колебания, с тем лишь отличием, что *конечная* угловая скорость вращения ротора равна *начальной* Ω_s (т. е. синхронной). Периодически изменяющуюся угловую скорость Ω ротора можно рассматривать как сумму постоянной синхронной скорости вращения Ω_s и переменной Ω' , имеющей обычно характер гармонических затухающих колебаний: $\Omega = \Omega_s + \Omega'$.

Свободные колебания присущи многим физическим объектам, причем их природа и характер у разнородных объектов во многом одинаковы и их колебания описываются аналогичными дифференциальными уравнениями [6, с. 117].

Колебания ротора синхронной машины являются механическими. Такие колебания возникают в механических системах, в которых действуют следующие силы: 1) *инерционные силы*, при всяких возмущениях, выводящих эту систему из положения равновесия; 2) *упругие силы*, стремящиеся вернуть колеблющуюся систему в положение равновесия; 3) при колебаниях обычно действует также *успокаивающая, или демпфирующая* сила, которая вызывает затухание колебаний.

Простейшим примером механической колебательной системы является *спиральная пружина с подвешенным к ней грузом*. При нарушении равновесия, например, путем внезапного увеличения или уменьшения массы груза система приходит в колебания, причем амплитуда колебаний равна разности положений груза в конечном и начальном положениях равновесия. *Упругая сила* в данном случае – это сила упругой деформации пружины, *инерционная сила* – сила инерции колеблющегося груза и *успокаивающая (демпфирующая) сила* – сила трения, колеблющегося груза о воздух. Частота колебаний тем больше, чем больше жесткость пружины и чем меньше масса груза [6, с. 117].

При свободных колебаниях синхронной машины действуют аналогичные силы или, вернее, вращающие моменты, поскольку в данном случае происходят колебания вращающегося тела – ротора синхронной машины. *Упругим силам* в данном случае соответствует электромагнитный момент, действующий на ротор и зависящий от угла нагрузки θ (см. разд. 3.1.4.1, с. 167). Деформация магнитного поля в зазоре (то есть изменение картины поля) при изменении угла нагрузки аналогична деформации пружины и вызывает изменение электромагнитного момента. В этом отношении линии магнитной индукции уподобляются упругим нитям, играющим роль пружины. *Инерционным силам* соответствует *инерционный, или динамический, вращающий момент ротора, возникающий при наличии положительного или отрицательного углового ускорения ротора*.

Частота собственных колебаний синхронных машин f_0 обычно составляет 0,5...2,0 Гц.

Успокоение колебаний синхронной машины происходит в основном за счет момента, возникающего в результате того, что при колебаниях ротор попеременно движется то быстрее, то медленнее магнитного поля статора и поэтому в обмотках возбуждения и успокоительной индуцируются токи. Этот успокоительный момент по своей природе вполне идентичен *асинхронному моменту* синхронной машины, стремится восстановить синхронную скорость вращения и заглушить колебания, так как при $\Omega > \Omega_s$ и $s < 0$ он является тормозным, а при $\Omega < \Omega_s$ и $s > 0$ действует в сторону вращения ротора и является ускоряющим [4] (см. разд. 3.5.2, с. 225, сл.).

Эффективным средством успокоения колебаний является применение *полной демпферной (успокоительной) обмотки* (см. рис. 4.3, лист 2,а с. 31 и рис. 4.5, листы 1,б и 2,а, с. 34 и 35), создающей большой успокоительный момент. Основное назначение этой обмотки как раз и заключается в успокоении свободных колебаний, откуда и происходит ее название.

П10.3. Динамическая устойчивость синхронной машины.

Правило площадей

В условиях эксплуатации синхронных генераторов и двигателей могут возникнуть такие *электромеханические* переходные процессы, когда амплитуды колебания угла θ достигают больших значений, при которых машина теряет устойчивость и выпадает из синхронизма (термин 26 на с. 16).

Далее будет приведен приближенный физический анализ процессов, возникающих при больших амплитудах колебания угла θ синхронной машины с целью установления основных *критериев ее динамической устойчивости* при работе в сети б. б. м. Для этой сети характерно постоянство напряжения и частоты: $U_c = \text{const}$, $f_c = \text{const}$.

Так как механические колебания ротора протекают сравнительно *медленно, сверхпереходными и аperiodическими* токами (см. в Работе № 2 разд. 3.2.2, с. 122,сл.) в цепи статора *при анализе динамической устойчивости* синхронной машины можно пренебречь. При этих условиях индуктивные сопротивления обмотки статора по продольной и поперечной осям при колебаниях ротора можно принять соответственно равными X'_d и X_q . Сопротивление X'_d в процессе колебания ротора будет изменяться в соответствии с изменениями тока, наведенного в обмотке возбуждения, но этими изменениями также можно пренебречь (принимаем $X'_d = \text{const}$).

На рис. П10.3 показана векторная диаграмма трехфазного *явнополюсного синхронного генератора в переходном режиме*. Наличие токов, наведенных в обмотке возбуждения, не только снижает индуктивное сопротивление X_d до значения X'_d , но и уменьшает ЭДС E_0 до значения E'_0 , как это видно из сопоставления рис. 10.5,а (с. 168) и рис. П10.3. При этих условиях угловая характеристика машины в переходном режиме может быть выражена по аналогии с равенством (10.1) /с. 167/ в следующем виде:

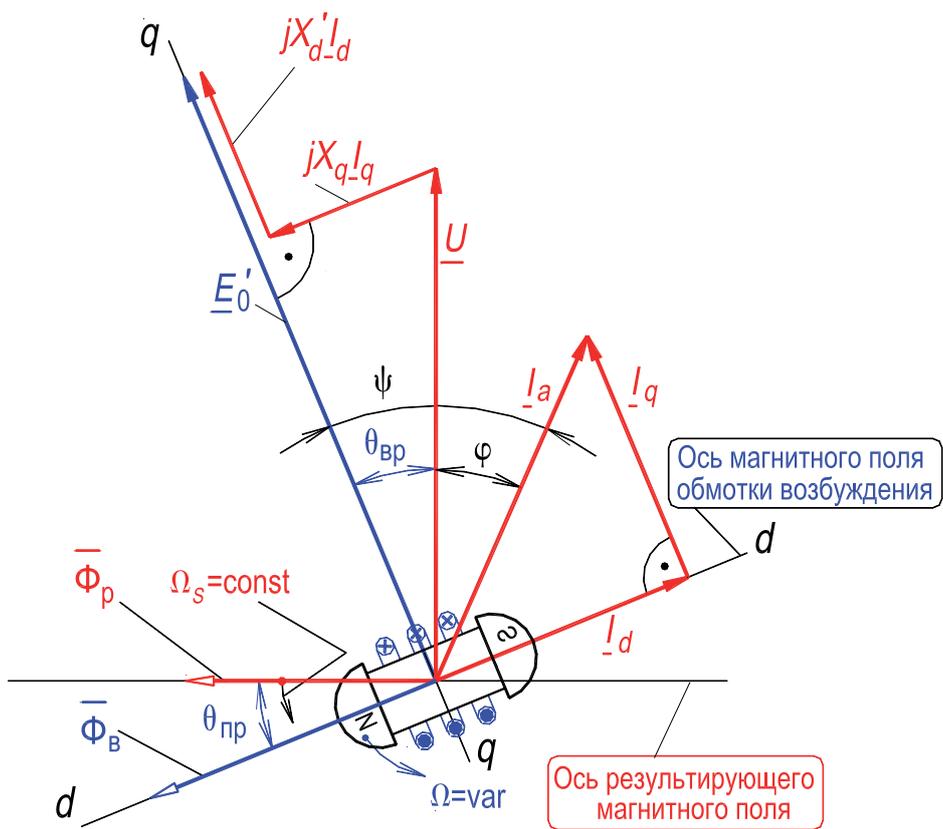


Рис. П10.3. Векторная диаграмма синхронного генератора в переходном режиме

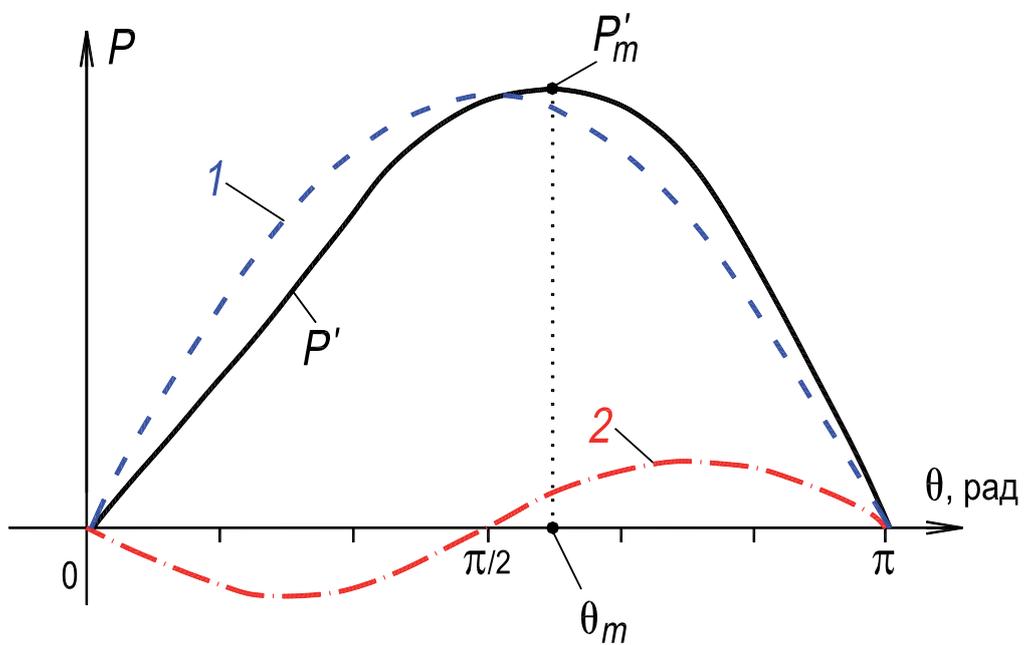


Рис. П10.4. Динамическая угловая характеристика генератора в переходном режиме

$$P' = \frac{mUE_0'}{X_d'} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d'} \right) \sin 2\theta. \quad (\text{П10.2})$$

Так как при обычных условиях $X_q > X_d'$ (см. в Работе №2 Прил. 9.1, с. 153), то второй член равенства (П10.2) при $\sin 2\theta > 0$ получается отрицательным, и угловая характеристика приобретает вид, показанный на рис. П10.4 (сопоставить с рис. 10.6,б, с. 170). Характерным в данном случае является то, что максимум мощности P'_m генератора лежит в области углов $\theta > \pi/2$ и что $P'_m > P_m$, так как $E_0'/X_d' > E_0/X_d$.

Допустим, что в результате какого-нибудь нарушения режима работы, например, короткого замыкания, произошло понижение напряжения сети. В этом случае скорость вращения ротора генератора⁴ начинает возрастать, так как механическая мощность первичного двигателя будет больше электрической мощности, отдаваемой генератором в сеть. Возникает *электро-механический* переходный процесс, при котором угол θ постепенно увеличивается и мощность генератора изменяется в соответствии с равенством (П10.2).

На рис. П10.5 показана динамическая угловая характеристика 2 генератора в переходном режиме, построенная в предположении, что ЭДС E_0' и сопротивление X_d' остаются неизменными в течение всего электро-механического переходного процесса.

Допустим, что до момента понижения напряжения сети генератор работал в режиме, соответствующем точке *c* статической угловой характеристики 1 (изображена пунктирной линией только часть характеристики), причем мощность генератора и первичного двигателя была равна P_c и угол $\theta = \theta_0$. После короткого замыкания мощность, отдаваемая генератором в сеть, сразу снизится до значения P' , соответствующего точке *b* динамической угловой характеристики 2. На валу генератора возникнет при этих условиях избыточная механическая мощность $P_c - P' = bc$, под действием которой скорость вращения ротора и угол θ начинают возрастать (рис. П10.6, 1-й интервал времени). При этом увеличивается кинетическая энергия ротора, возрастая при повороте ротора на угол $d\theta$ на $(P_c - P')d\theta/\Omega_s$.

⁴ Анализ динамической устойчивости проводится для синхронного генератора. Для синхронного двигателя он может быть проведен аналогичным путем

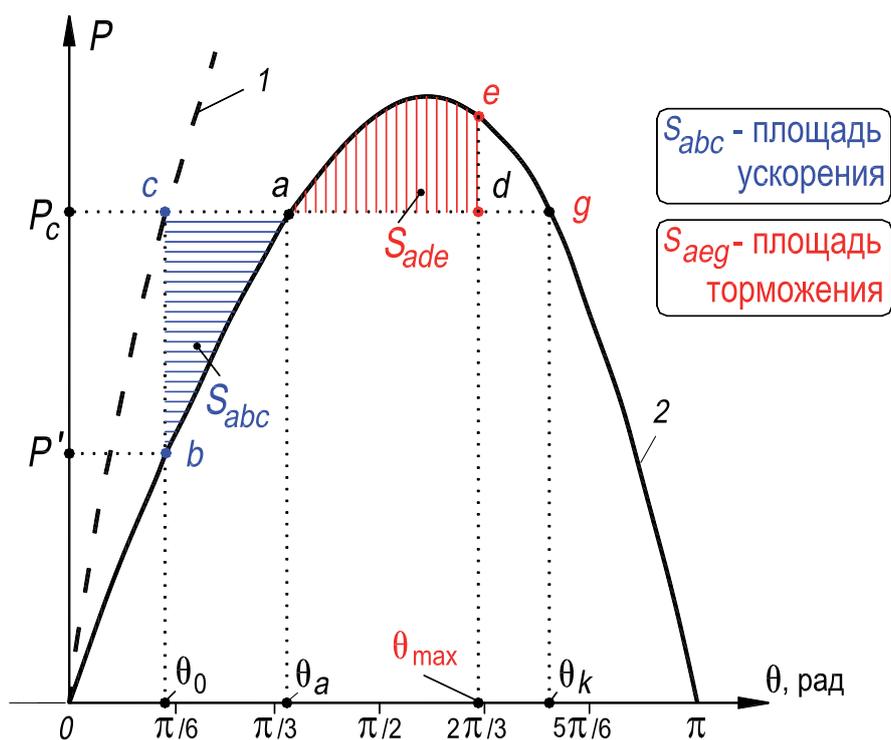


Рис. П10.5. Статическая (1) и динамическая (2) угловые характеристики явноплюсного СГ: к анализу динамической устойчивости;

критерий динамической устойчивости: $S_{aeg} > S_{abc}$

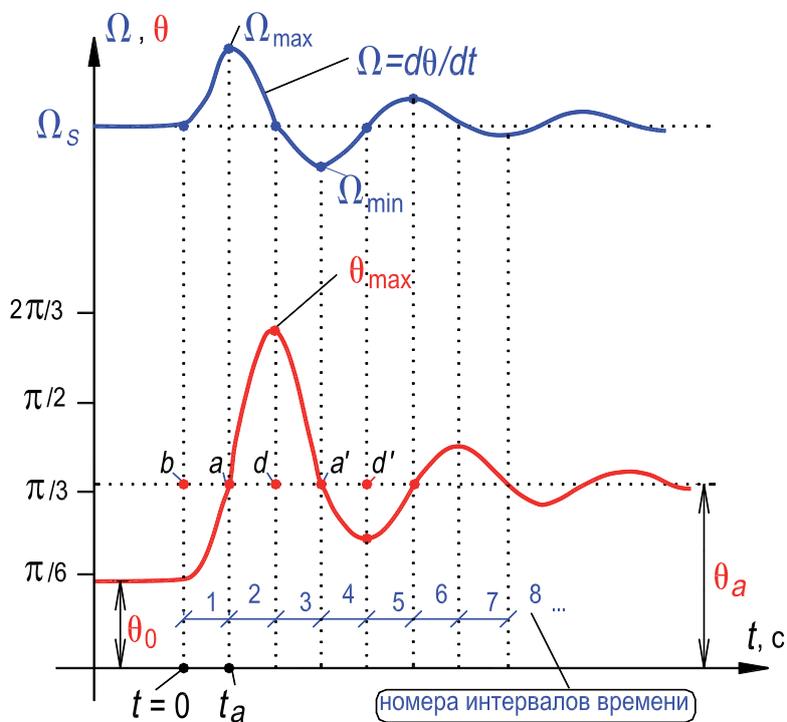


Рис. П10.6. Колебания угловой скорости вращения ротора Ω и угла θ синхронного генератора

Процесс ускорения вращения ротора до скорости Ω_{\max} под действием избыточного момента со стороны первичного двигателя будет продолжаться до тех пор (точка a на рис. П10.6), пока угол θ при $t = t_a$ не достигнет значения $\theta = \theta_a$, при котором $P_c - P' = 0$. Это соответствует точке a динамической угловой характеристики 2 (рис. П10.5). Кинетическая энергия, запасенная ротором в процессе ускорения, будет равна

$$A_y = \int_{\theta_0}^{\theta_a} \frac{P_1 - P'_1}{\Omega} d\theta \approx \frac{1}{\Omega_s} \int_{\theta_0}^{\theta_a} (P_1 - P'_1) d\theta = \frac{S_{abc}}{\Omega_s}, \quad (\text{П10.3})$$

где S_{abc} — площадь криволинейного треугольника abc (Δabc называется треугольником ускорения).

При этом интегрировании делается допущение, что изменение угловой скорости Ω в процессе разбега ротора невелико и ее можно приближенно принять постоянной и равной синхронной скорости Ω_s .

После того как в динамическом процессе мощность, отдаваемая генератором в сеть, достигнет значения $P = P_a$ (точка a на рис. П10.5), угол θ будет продолжать увеличиваться за счет запасенной ротором дополнительной кинетической энергии A_y (рис. П10.6, 2-й интервал времени). Поэтому мощность, отдаваемая генератором в сеть, станет *больше* механической мощности, развиваемой первичным двигателем, и, следовательно, при $\theta > \theta_a$ ротор генератора начинает *тормозиться* и этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока при угле $\theta = \theta_{\max}$ не будет израсходована вся запасенная ротором кинетическая энергия A_y (точка d на рис. П10.5) и угловая скорость ротора не достигнет синхронного значения Ω_s (точка d на рис. П10.6).

Таким образом, угол θ_{\max} определяется из условия $S_{abc} = S_{ade}$, причем кинетическая энергия, преобразованная в процессе торможения ротора в электрическую, равна (Δade называется треугольником торможения):

$$A_m \approx S_{ade} / \Omega_s. \quad (\text{П10.4})$$

В дальнейшем под действием избыточной электрической мощности ed (рис. П10.5), отдаваемой генератором в сеть, будет продолжаться торможение ротора (рис. П10.6, 3-й интервал времени); скорость Ω будет меньше синхронной скорости Ω_s , и когда угол θ снова станет равен θ_a , угловая скорость вращения будет

минимальной, $\Omega = \Omega_{\min}$ (точка a' на рис. П10.6). Вращение ротора со скоростью ниже синхронной приведет к дальнейшему уменьшению угла θ (рис. П10.6, 4-й интервал времени). При $\Omega = \Omega_s$ угол θ пройдет через минимальное значение (точка d' на рис. П10.6) и в дальнейшем при $\Omega > \Omega_s$ начнет возрастать (рис. П10.6, 5-й интервал времени), совершая затухающие колебания вокруг значения $\theta = \theta_a$. Таким образом, резкое снижение напряжения сети в результате короткого замыкания не приведет в данном случае к выпадению генератора из синхронизма. Если *максимально* возможная площадь *торможения* S_{aeg} будет меньше площади *ускорения* S_{abc} , то угол θ в процессе колебания станет больше критического угла θ_k (точка g на рис. П10.5), мощность, отдаваемая генератором в сеть, станет меньше мощности первичного двигателя, ускорение вращения ротора будет продолжаться и генератор выпадет из синхронизма. Таким образом, условие $S_{aeg} > S_{abc}$ можно рассматривать как критерий динамической устойчивости синхронного генератора. Этот критерий не связан непосредственно с критерием статической устойчивости, который определяется значением максимальной ординаты статической угловой характеристики, при котором $dP/d\theta > 0$.

Правило площадей дает возможность ответить на вопрос, останется ли машина в синхронизме. Если *площадь ускорения* S_{abc} , характеризуемая криволинейным треугольником abc , меньше *площади торможения* S_{aeg} (криволинейный треугольник aeg), то машина удержится в синхронизме. Если *площадь торможения* будет меньше *площади ускорения*, машина *выпадает из синхронизма – наступит динамическая неустойчивость*.

Чем больше нагружена машина, т. е. чем больше угол θ , тем меньше площадь торможения и тем меньше вероятность того, что машина удержится в синхронизме. Запас динамической устойчивости больше у машины, работающей с *небольшой* нагрузкой. наброс нагрузки обычно сопровождается уменьшением напряжения, т. е. уменьшением максимального электромагнитного момента [см. выражение (10.4), с. 171]. Чтобы сохранить потокосцепление, форсируют возбуждение. Форсировка возбуждения улучшает динамическую устойчивость (см. разд. 5.3 и 5.4, с. 56). Однако обмотка возбуждения должна иметь небольшую постоянную времени, а возбудитель должен допускать (2...2,5)-кратные форсировки. Быстрому успокоению колебаний ротора машины способствуют демпферная обмотка и автоматическое регулирование возбуждения (см. разд. 5.2, с. 55).

Может случиться также, что кривая 2 на рис. П10.5 будет располагаться настолько низко, что площадь S_{abc} будет больше площади S_{aeg} , находящейся над прямой $P_c = \text{const}$. Тогда площадь торможения S_{aeg} будет недостаточна и в результате ускорения ротора угол θ будет непрерывно расти, машина выпадет из синхронизма и перейдет в возбужденный асинхронный режим работы, когда генераторные режимы будут чередоваться с двигательными (рис. 10.6,а, с. 170). Характер зависимости $\theta = f(t)$ будет иметь вид рис. П10.7.

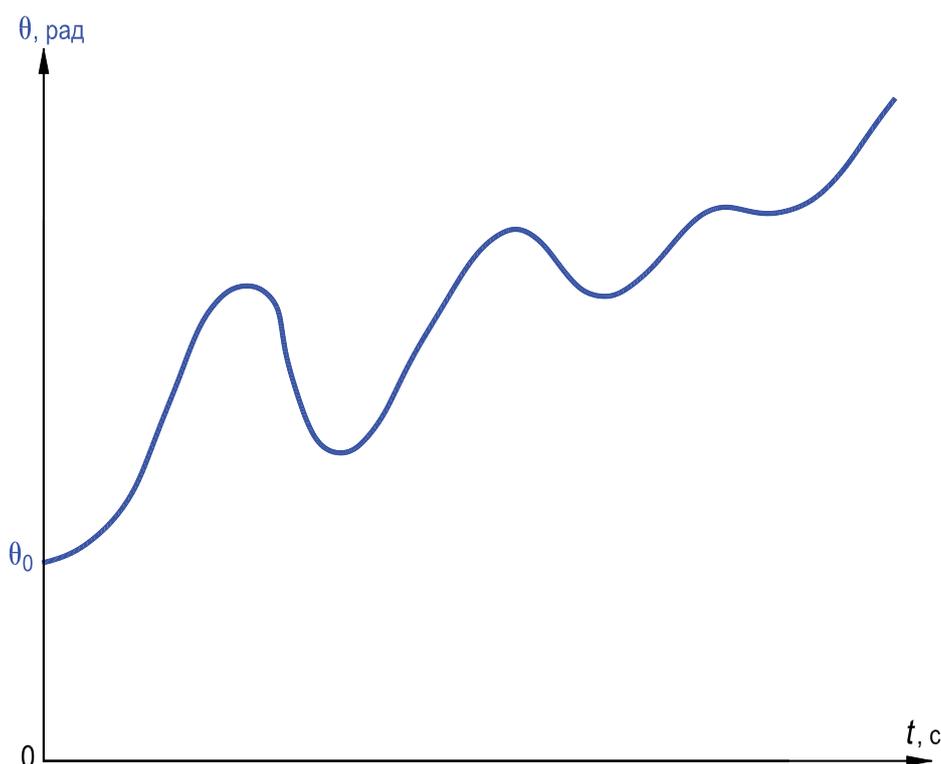


Рис. П10.7. Изменение угла нагрузки при выпадении синхронной машины из синхронизма в процессе колебаний

В основу приведенного анализа было положено допущение, что токи, наведенные в обмотке возбуждения в течение переходного процесса, поддерживают неизменным ее потокосцепление (E'_0). В действительности эти токи постепенно затухают, поэтому рассмотренный выше метод оценки динамической устойчивости является приближенным.

Резкое нарушение режима работы сети часто бывает связано с понижением ее напряжения, а следовательно, и напряжения присоединенной к ней машины, электромагнитная мощность и устойчивость которой при этих условиях снижаются. Поэтому для повышения электромагнитной мощности и устойчивости синхронной машины целесообразно применять автоматическую быстро

отзывчивую систему возбуждения, позволяющую за относительно малое время “форсировать” ток возбуждения и магнитное поле машины путем резкого повышения напряжения на зажимах обмотки возбуждения (см. разд. 5, с. 54, сл.). Это хорошо удастся осуществить при ионной системе возбуждения [1, 2]. При форсировке увеличивается мощность P' и ординаты угловой характеристики $P' = f(\theta)$ соответственно возрастают, поэтому равенства $A_y = A_m$ [см. (П10.3) и (П10.4)] удастся достигнуть при меньших значениях угла θ_{\max} .

В соответствии со стандартами минимально допустимая скорость нарастания напряжения системы возбуждения синхронной машины нормируется (ГОСТ ИЕС 60034-3-2015 и ГОСТ 5616–89). Эта скорость определяется при работе системы возбуждения (возбудителя) без нагрузки как удвоенное приращение напряжения за время, равное 0,5 с, и выражается в долях номинального напряжения возбуждения машины. Номинальная скорость нарастания напряжения возбуждения не должна быть меньше значений, приводимых ниже для разных синхронных машин (см. разд. 5.4, с. 56).

Турбогенераторы и синхронные компенсаторы	2
Гидрогенераторы номинальной мощностью до 4000 кВ·А	1,3
То же свыше 4000 кВ·А	1,5
Другие синхронные машины	0,8

Указанные ГОСТы нормируют также отношение верхнего предела (потолка) напряжения возбуждения (в процессе форсировки) к номинальному напряжению обмотки возбуждения. Это отношение не должно быть меньше значений, приводимых ниже для разных синхронных машин (см. разд. 5.3, с. 56).

Турбогенераторы и синхронные компенсаторы *	2
Гидрогенераторы	1,8
Другие синхронные машины	1,4

* При номинальной мощности 100000 кВт и выше – не менее 1,7.

В некоторых случаях по условиям динамической устойчивости электроэнергетических систем потолок напряжения возбуждения генераторов приходится поднимать выше *трехкратного* значения.

11. РАБОТА № 4

ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Оглавление

1. Цель работы	206
2. Программа работы	206
3. Основы теории	207
3.1. Сравнение синхронных и асинхронных двигателей	207
3.2. Принцип действия синхронного двигателя	209
3.3. Энергетическая диаграмма активной мощности синхронного двигателя	213
3.4. Векторные диаграммы синхронных двигателей	214
3.5. Способы пуска синхронных двигателей	214
3.5.1. Явление Гергеса (Görges) /эффект одноосного включения/	219
3.5.2. Асинхронный и синхронный моменты: сопоставление	225
3.6. Рабочие характеристики синхронного двигателя	226
3.7. Угловые характеристики активной мощности	227
3.8. V-образные характеристики синхронного двигателя	234
4. Экспериментальное исследование	230
4.1. Прямой асинхронный пуск синхронного двигателя	230
4.2. Рабочие характеристики синхронного двигателя	231
4.3. V-образные характеристики	234
5. Содержание и оформление отчета	236
6. Контрольные вопросы	237
Приложение 11.	
П11.1. Синхронный компенсатор	238
П11.2. Синхронные двигатели малой мощности.	
Общие сведения	242
П11.2.1. Микродвигатели с постоянными магнитами	244
П11.2.2. Синхронный реактивный микродвигатель	249
П11.2.3. Тихоходный редукторный двигатель реактивного типа	256
П11.2.4. Гистерезисный синхронный микродвигатель	259
П11.2.5. Синхронно-импульсные шаговые двигатели	264
П11.3. Электромагнитные муфты	272

Перечень рисунков в 11-м разделе

Рис. 11.1. К анализу перехода СМ из режима генератора в режим двигателя: <i>a, б</i> – режим генератора; <i>в, г</i> – холостой ход машины; <i>д, е</i> – режим двигателя. $\vec{\Phi}_В$ и $\vec{\Phi}_Р$ – пространственные векторы полей возбуждения и результирующего ..	211
Рис. 11.2. Энергетическая диаграмма активной мощности синхронного двигателя	213
Рис. 11.3. Векторная диаграмма напряжений синхронного двигателя: <i>a</i> – явнополюсного, <i>б</i> – неявнополюсного	215
Рис. 11.4. Схемы прямого асинхронного пуска синхронного двигателя: <i>a</i> – обмотка возбуждения при разгоне замкнута на сопротивление $R_{П}$; <i>б</i> – обмотка возбуждения замкнута на якорь возбудителя	216
Рис. 11.5. Иллюстрация к процессу асинхронного пуска синхронного двигателя	217
Рис. 11.6, лист 1. К анализу явления Гертеса при асинхронном пуске СД: <i>a</i> – направление вращения ротора и полей СД; <i>б</i> – моменты СД	221
Рис. 11.6, лист 2. Диаграммы скоростей СД соответствующие: составляющим момента $M_{Р}$ в процессе асинхронного пуска (<i>a</i> – $M_{Р} = M_{П}$; <i>б</i> – $M_{а.м.}$; <i>г</i> – $M_{а.г}$; <i>д</i> – $M_{дб} = 0$; <i>е</i> – $M_{а.д}$) и синхронному моменту $M_{с.м} - в$	222
Рис. 11.7. Рабочие характеристики синхронного двигателя	227
Рис. 11.8. Угловые характеристики синхронной машины: <i>a</i> – явнополюсной, <i>б</i> – неявнополюсной	228
Рис. 11.9. V-образные характеристики синхронного двигателя	229
Рис. 11.10. Схема лабораторной установки для исследования синхронного двигателя ...	231
Рис. 11.11. Зависимость КПД генератора постоянного тока от тока якоря	232
Рис. П11.1. Ротор синхронного компенсатора мощностью 30 Мвар, $2p = 6$	239
Рис. П11.2 Два синхронных компенсатора мощностью 60 Мвар на распределительной подстанции	240

Рис. П11.3. Конструктивные схемы синхронных двигателей:	
<i>a</i> – двигатель с возбуждением полюсов постоянным током ($2p = 2$);	
<i>b</i> – двигатель с постоянными магнитами ($2p = 4$);	
<i>в</i> – реактивный двигатель ($2p = 4$)	243
Рис. П11.4. Микродвигатель с постоянными магнитами:	
<i>a</i> – с радиальным расположением магнита 1 и ротора 2;	
<i>b</i> – с аксиальным расположением магнитов 1 и ротора 2	245
Рис. П11.5. Механическая характеристика микродвигателя с постоянными магнитами:	
процесс пуска и перехода из асинхронного режима в синхронный режим ...	247
Рис. П11.6. Различные конструкции роторов синхронных реактивных двигателей	250
Рис. П11.7. К анализу электромагнитных сил, действующих на ротор реактивного двигателя (ротор невозбужденный)	251
Рис. П11.8. Угловая характеристика реактивного двигателя	253
Рис. П11.9. Зависимость электромагнитного момента M от скольжения s :	
<i>a</i> – иллюстрация моментов в процессе пуска и перехода двигателя из асинхронного режима в синхронный режим;	
<i>b</i> – влияние сопротивления $R_{п.к}$ пусковой клетки на моменты $M_{п}$ и $M_{вх}$	255
Рис. П11.10. Схема устройства редукторного двигателя реактивного типа	257
Рис. П11.11. Иллюстрация возникновения гистерезисного момента	259
Рис. П11.12. Механические характеристики гистерезисного двигателя	261
Рис. П11.13. Петля гистерезиса обычной стали (2) и сплава викаллой (1)	261
Рис. П11.14. Устройство гистерезисного синхронного двигателя	262
Рис. П11.15. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя	263
Рис. П11.16. Реактивный шаговый двигатель с одноосным ротором, шаг 60° ;	
импульсы подаются на полюсы последовательно: 1-1, 2-2, 3-3, 1-1, etc.	265
Рис. П11.17. Процесс выполнения одного шага (60°) двигателя от одного устойчивого положения ротора (см. рис. П11.16, <i>a</i>) к другому (рис. П11.16, <i>б</i>);	
распределение силовых линий изображено упрощенно	266
Рис. П11.18. Реактивный шаговый двигатель с двухосным ротором, шаг 30° ;	
импульсы подаются на полюсы последовательно: 1-1, 2-2, 3-3, 1-1, etc.	267
Рис. П11.19. Реактивный шаговый двигатель с двухосным ротором, шаг 15° ;	
импульсы подаются на полюсы последовательно:	
1-1, 1-1 и 2-2, 2-2, 2-2 и 3-3, 3-3, etc.	268
Рис. П11.20. Фотографии шагового двигателя для привода магнитных дисков:	
<i>a</i> – общий вид; <i>b</i> – в разобранном виде	270
Рис. П11.21. Информация по реальным шаговым двигателям, выпускаемым промышленностью	271
Рис. П11.22. Принцип устройства электромагнитной муфты	272

Рис. П11.23. Характеристики моментов электромагнитной муфты; M_c – момент сопротивления ведомого вала при заданной постоянной скорости вращения ведущего вала	273
Рис. П11.24. Схема магнитной систем индукторной муфты со скользящим токоподводом: 1 – индуктор (ведущая часть); 2 – якорь (ведомая часть); 3 – обмотка; 4 – контактное кольцо	275

Перечень таблиц в 11-м разделе

Таблица 11.1. Данные синхронных двигателей	209
Таблица 11.2. Рабочие характеристики синхронного двигателя	233
Таблица 11.3. V-образные характеристики синхронного двигателя	235

1. Цель работы

Изучить основы теории и устройство синхронного двигателя (СД), уяснить принцип действия, образование синхронного и реактивного моментов, порядок асинхронного пуска СД и регулирования реактивной мощности.

2. Программа работы

2.1. Осуществить асинхронный пуск синхронного двигателя.

2.2. Провести опыты и получить данные для построения рабочих характеристик двигателя P_1 , I_a , M , $\cos \varphi$, $\eta = f(P_2)$, при $U_c = U_{\text{ном}}$, $f_c = f_{\text{ном}}$, $I_B = \text{const}$ (термин 36, с. 18).

2.3. Провести опыты и получить данные для построения V-образных характеристик $I_a = f(I_B)$ при $U_c = U_{\text{ном}}$, $f_c = f_{\text{ном}}$ и постоянной нагрузке на валу $P_2 = \text{const}$ (термин 34, с. 18).

3. Основы теории

В двигательном режиме синхронная машина работает в сети бесконечно большой мощности (б. б. м.) параллельно со всеми другими синхронными машинами, включенными в сеть. Сравнительно редко синхронные двигатели работают автономно.

Рассмотрим наиболее характерный режим работы синхронных двигателей при их питании от сети б. б. м. [1, 2].

3.1. Сравнение синхронных и асинхронных двигателей

Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными преимущество, заключающееся в том, что *благодаря возбуждению постоянным током* они могут работать с $\cos \varphi = 1$ и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе с *перевозбуждением* даже отдают реактивную мощность в сеть (см. рис. 10.3 в Работе № 3, с. 162). В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падение напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Максимальный момент (термин 46, с. 20) синхронного двигателя пропорционален напряжению сети U_c в *первой* степени (ниже приводится выражение для момента *неявнополюсного* СД; см. в Работе № 3 формулу (10.4), с. 171):

$$M_m = \frac{1}{\Omega_s} \frac{mE_0 U_c}{X_c} = (2 \dots 2,7) M_{\text{ном}}, \quad (11.1)$$

а у асинхронного двигателя – напряжению сети во *второй* степени (термин 47, с. 20) [4, разд. 3.8.2, с. 126, сл.]:

$$M_m = \frac{1}{\Omega_s} \frac{mU_c^2}{2\sigma \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2} \right]}. \quad (11.2)$$

Поэтому при понижении напряжения сети синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность. Кроме того, использование возможности увеличения тока возбуждения синхронных двигателей позволяет увеличивать надёжность их работы при аварийных понижениях напряжения в сети и улучшать в этих случаях условия работы энергосистемы в целом. Вследствие большого воздушного зазора добавочные потери в стали

и в пусковой обмотке ротора синхронных двигателей меньше, чем у асинхронных, благодаря чему КПД синхронных двигателей обычно выше.

Следует также отметить, что синхронные двигатели допускают регулирование максимального вращающего момента за счет изменения тока возбуждения и, соответственно, ЭДС E_0 [см. выражение (11.1)]. Это является важным преимуществом синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.

С другой стороны, конструкция синхронных двигателей сложнее, чем короткозамкнутых асинхронных двигателей, и, кроме того, синхронные двигатели должны иметь возбудитель или иное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронные двигатели в большинстве случаев дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск и регулирование скорости вращения синхронных двигателей также сложнее, *начальный пусковой момент синхронного двигателя равен нулю* (см. разд. 3.5.2, с. 225).

Тем не менее преимущество синхронных двигателей настолько велико, что при $P_{\text{ном}} > 200 \dots 300$ кВт их целесообразно применять всюду, где не требуется частых пусков и остановок и регулирования скорости вращения (двигатель-генераторы, мощные насосы, вентиляторы, компрессоры, мельницы, дробилки и пр.). Синхронные двигатели с $\cos \varphi_{\text{ном}} = 1$ по своей стоимости и потерям мощности всегда имеют преимущество перед асинхронными двигателями, снабженными конденсаторными батареями для компенсации коэффициента мощности до $\cos \varphi = 1$. При $P_{\text{ном}} > 300$ кВт выгодно использовать синхронные двигатели с $\cos(-\varphi_{\text{ном}}) = 0,9$ и при $P_{\text{ном}} > 1000$ кВт – с $\cos(-\varphi_{\text{ном}}) = 0,8$ (*перевозбуждение*) /см. примечание к табл. 11.1, с. 209/.

Применение синхронных двигателей непрерывно расширяется, и они строятся на мощности до $P_{\text{ном}} = 50$ МВт.

При оценке технико-экономической целесообразности применения синхронных двигателей следует также учитывать, что при снижениях напряжения сети при аварийных процессах подключенные к асинхронным двигателям статические конденсаторы становятся мало эффективными, так как их реактивная мощность снижается пропорционально квадрату

напряжения сети. Это приводит к затягиванию аварийного процесса, а иногда и к дальнейшему снижению напряжения. В противоположность этому *синхронные двигатели при понижениях напряжения сети перевозбуждаются и начинают генерировать в сеть дополнительную реактивную мощность, что содействует более быстрому восстановлению напряжения.*

Синхронные двигатели проектируют обычно таким образом, чтобы при снижении напряжения сети ток возбуждения двигателя мог быть увеличен в 1,5...2 раза в течение нескольких десятков секунд для поддержания *статической устойчивости* (термин 29, с. 17). Такие кратность и продолжительность форсировки возбуждения бывают вполне достаточными в условиях эксплуатации (см. разд. 5, с. 54).

В табл. 11.1 приведены данные некоторых синхронных двигателей отечественного производства.

Таблица 11.1. Данные синхронных двигателей

$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{л.ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos(-\varphi_{\text{ном}})$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{в}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{т}}/M_{\text{ном}}$	Масса, т
640	3000	1000	93,6	0,8	4,6	1,2	0,9	2,1	5,2
2700	6000	1000	96,4	0,8	6,1	1,2	1,4	2,3	13,0
370	3000	600	92,3	0,8	4,8	1,7	0,85	2,2	5,4
6550	6000	600	96,8	0,8	5,5	1,2	1,1	2,3	38,4
175	3000	300	87,5	0,8	4,3	1,6	0,65	2,7	5,1
1970	6000	300	94,4	0,8	4,5	1,0	0,90	2,3	27,0
310	3000	167	88,0	0,8	2,4	0,85	0,35	2,2	9,8
6000	6000	3000	96,7	0,9	8,3	2,4	0,84	2,4	18,8

Примечание. Фазу φ тока якоря I_a синхронного двигателя измеряют относительно напряжения сети U_c , а так как номинальным режимом по возбуждению предусмотрено *перевозбуждение*, то ток якоря опережает напряжение сети и угол φ принимают со знаком “–” (см. далее рис. 11.1,е, с. 211); принятые обозначения: $I_{\text{п}}$ – пусковой ток, $M_{\text{п}}$ – пусковой момент, $M_{\text{в}}$ – входной момент (см. разд. 3.5, с. 214), $M_{\text{т}}$ – максимальный момент.

3.2. Принцип действия синхронного двигателя

Принцип действия основан на образовании синхронного момента за счет *магнитного* взаимодействия вращающегося магнитного поля якоря и поля индуктора *при их взаимной неподвижности* (см. разд. 3.5.2, с. 225).

Электромагнитный момент, развиваемый СД с *неявно*полюсным ротором, равен (см. в Работе №3 формулу (10.2), с. 167):

$$M = \frac{1}{\Omega_s} \frac{mU_c E_0}{X_c} \sin \theta, \quad (11.3)$$

где m – число фаз обмотки якоря; E_0 – ЭДС обмотки якоря, наводимая магнитным потоком индуктора в режиме идеального холостого хода; U_c – напряжение сети, приложенное к обмотке якоря; Ω_s – угловая синхронная частота вращения ротора; X_c – полное синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря; θ – угол между вектором напряжения ($\underline{U} = -\underline{U}_c$) и вектором ЭДС \underline{E}_0 .

Максимальный момент синхронного двигателя – см. формулу (11.1).

Электромагнитный момент развиваемый СД с *явно*полюсным ротором равен

$$M = \frac{mE_0 U_c}{\Omega_s X_d} \sin \theta + \frac{mU_c^2}{2\Omega_s} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta, \quad (11.4)$$

где X_d, X_q – синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и по поперечной осям машины.

В правой части уравнения (11.4) первое слагаемое соответствует синхронному моменту, а второе – синхронному *реактивному моменту* (термин 48, с. 20):

$$M_p = \frac{mU_c^2}{2\Omega_s} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (11.5)$$

Синхронный реактивный момент не зависит от возбуждения. Он обусловлен стремлением магнитного поля замыкаться по пути с минимальным магнитным сопротивлением, то есть вдоль продольной оси d (см. в Работе № 3 формулу (10.3), с. 171). В зависимости от обстоятельств момент M_p может оказывать вредное влияние на работу машины или же может быть использован для получения полезного действия. Например, действие некоторых специальных типов машин полностью основано на действии реактивного момента, а именно: реактивный синхронный двигатель (термин 3, с. 13), шаговый двигатель и др. (см. Прил. 11.2, с. 242,сл.).

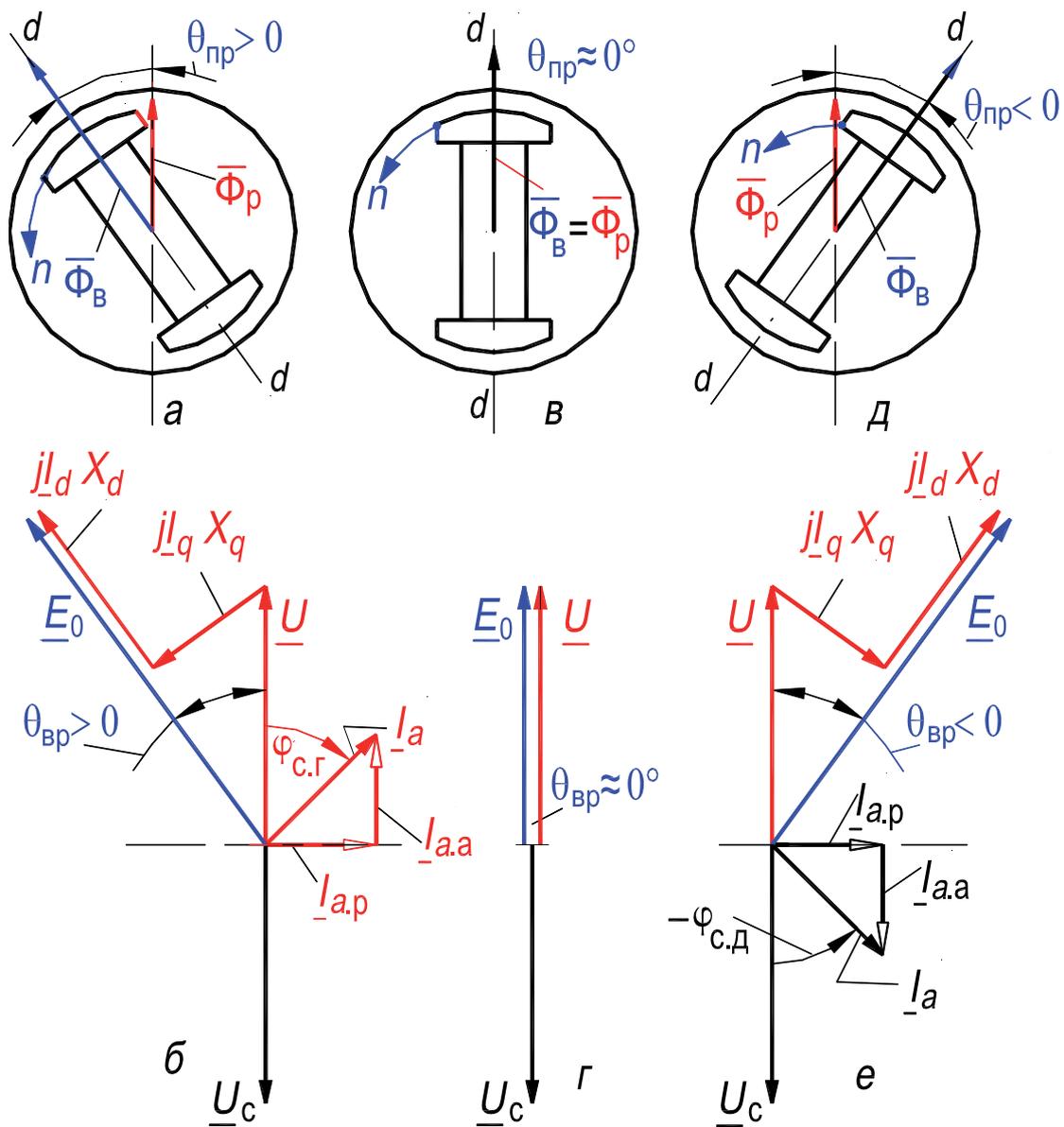


Рис. 11.1. К анализу перехода СМ из режима генератора в режим двигателя:

a, б – режим генератора; *в, г* – холостой ход машины; *д, е* – режим двигателя.

$\bar{\Phi}_в$ и $\bar{\Phi}_р$ – пространственные векторы полей возбуждения и результирующего

Принцип действия синхронного двигателя можно уяснить, рассматривая переход синхронной машины (СМ), после включения ее на параллельную работу с сетью б. б. м., из режима генератора в режим двигателя. На рис. 11.1,г приведена векторная диаграмма, соответствующая режиму х. х. генератора непосредственно после включения его в сеть б. б. м. В этом случае ЭДС E_0 и напряжение U генератора равны напряжению U_c сети, $[E_0 = U] = -U_c$. Знак “-” свидетельствует о том, что по контуру “сеть б. б. м.

– обмотка якоря” напряжения находятся в противофазе. Векторное уравнение явнополюсного СГ записывается в виде

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + j\underline{I}_q X_q + j\underline{I}_d X_d \quad \text{или} \quad (11.6)$$

$$\underline{E}_0 - \underline{U} = j\underline{I}_q X_q + j\underline{I}_d X_d, \quad (11.7)$$

где \underline{I}_d – продольная составляющая тока якоря \underline{I}_a , $\underline{I}_d = \underline{I}_a \sin \psi$; \underline{I}_q – поперечная составляющая тока якоря \underline{I}_a , $\underline{I}_q = \underline{I}_a \cos \psi$; ψ – угол между векторами \underline{E}_0 и \underline{I}_a ; активное сопротивление обмотки якоря R_a принято равным нулю.

Так как в режиме холостого хода разность векторов $\underline{E}_0 - \underline{U} = 0$ (рис. 11.1,з), то ток в обмотке якоря также равен нулю, $\underline{I}_a = 0$. При этом в СГ имеет место только поле возбуждения (см. пространственный вектор магнитного потока $\overline{\Phi}_в = \overline{\Phi}_р$ на рис. 11.1,в). На рис. 11.1,б и 11.1,е приведены векторные диаграммы, построенные согласно уравнению (11.6).

Если к валу ротора приложить внешний момент (момент приводного двигателя), то ротор, ускоряясь, смещается относительно результирующего магнитного поля на угол $\theta_{пр}$ (рис. 11.1,а и 11.1,в). Под действием возникающей при этом разности векторов $\underline{E}_0 - \underline{U}$ в цепи статора будет протекать ток \underline{I}_a , активная составляющая которого $\underline{I}_{a.a}$ совпадает по фазе с вектором \underline{U} (рис. 11.1,б). Синхронная машина в этом случае работает в генераторном режиме, отдавая активную мощность в сеть.

Если к ротору приложить тормозной момент (момент рабочей машины), то ротор, замедляясь, отстанет в пространстве от результирующего магнитного поля на угол $\theta_{пр}$ (рис. 11.1,д и 11.1,в). При этом фаза тока \underline{I}_a изменяется так, что активная составляющая его $\underline{I}_{a.a}$ совпадает по фазе с вектором напряжения сети \underline{U}_c (рис. 11.1,е). Это означает, что если в первом случае активная мощность выдавалась в сеть, то теперь она потребляется из сети и, следовательно, СМ перешла из генераторного в двигательный режим работы.

Отметим, что векторная диаграмма рис. 11.1,б, соответствует перевозбужденному синхронному генератору, а диаграмма рис. 11.1,е – перевозбужденному двигателю. В обоих случаях ток якоря \underline{I}_a опережает напряжение сети \underline{U}_c , машина эквивалентна емкости, включенной в сеть, и реактивная мощность генерируется в сеть.

Из рис. 11.1,б следует, что в генераторном режиме вектор \underline{E}_0 опережает вектор \underline{U} на угол $\theta_{вр}$ и, следовательно, поле возбуждения опережает результирующее поле, то есть ведущим звеном является ротор (рис. 11.1,а). В двигательном режиме вектор \underline{E}_0 отстает от вектора \underline{U} на угол $\theta_{вр}$ (рис. 11.1,е) и, следовательно, результирующее поле опережает поле возбуждения и является ведущим (рис. 11.1,д).

3.3. Энергетическая диаграмма активной мощности синхронного двигателя

Преобразование активной мощности P_1 , потребляемой двигателем из сети, в полезную механическую мощность P_2 на валу, иллюстрирует диаграмма рис. 11.2. Имеется в виду синхронный двигатель нормальной конструкции с вращающимся индуктором и возбудителем на общем валу.

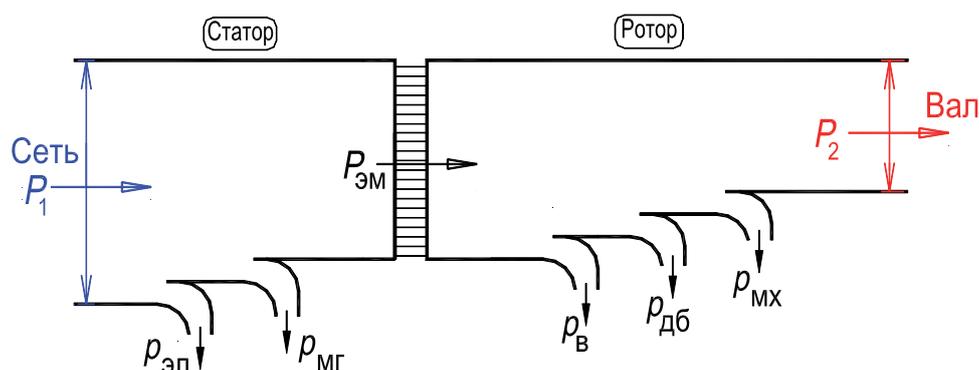


Рис. 11.2. Энергетическая диаграмма активной мощности синхронного двигателя

Приняты обозначения: $p_{эл}$ – электрические потери в обмотке якоря; $p_{мг}$ – основные магнитные потери; $p_{в}$ – потери на возбуждение синхронной машины, включая потери в возбудителе, $p_{дб}$ – добавочные потери от высших гармоник поля в стали статора и ротора; $p_{мх}$ – механические потери. P_1 – потребляемая двигателем из сети электрическая мощность и P_2 – развиваемая на валу механическая мощность. Электромагнитная мощность $P_{эм}$ в режиме двигателя передается с помощью магнитного поля со статора на ротор. Добавочные потери покрываются за счет механической мощности на роторе. Механические потери возбудителя включаются в потери $p_{мх}$.

3.4. Векторные диаграммы синхронных двигателей

Рабочие режимы синхронного двигателя могут быть исследованы так же, как и режимы синхронного генератора, при помощи векторных диаграмм и векторных уравнений. При переходе от генераторного к двигательному режиму изменяется направление активной мощности, а следовательно, меняется на 180° фаза активной составляющей тока статора по отношению к вектору напряжения \underline{U} машины (генератора). В векторной диаграмме двигателя обычно откладывают не вектор напряжения \underline{U} машины, а вектор напряжения сети $\underline{U}_c = -\underline{U}$. При этих условиях активная составляющая тока двигателя совпадает по фазе с напряжением \underline{U}_c сети (рис. 11.1,е); активная составляющая тока генератора совпадает по фазе с напряжением \underline{U} генератора (рис. 11.1,б).

Для неявнополюсного синхронного двигателя справедливо следующее векторное уравнение (см. уравнение (8.9), записанное для генератора, с. 81):

$$\underline{U}_c = -\underline{E}_0 + I_a R_a + j I_a X_{\sigma a} + j I_a X_a = -\underline{E}_0 + I_a R_a + j I_a X_c. \quad (11.8)$$

Аналогично получим для явнополюсного синхронного двигателя [сравнить с уравнениями (8.6) и (8.7), записанными для генератора, с. 79]:

$$\underline{U}_c = -\underline{E}_0 + I_a R_a + j I_a X_{\sigma a} + j I_d X_{ad} + j I_q X_{aq} = -\underline{E}_0 + I_a R_a + j I_q X_q + j I_d X_d. \quad (11.9)$$

Уравнениям (11.8) и (11.9) соответствуют векторные диаграммы на рис. 11.3 (принято, что $R_a = 0$) синхронного двигателя в режиме перевозбуждения. При этом двигатель генерирует реактивную мощность в сеть.

3.5. Способы пуска синхронных двигателей

В подавляющем большинстве случаев применяется *асинхронный пуск* синхронных двигателей.

Различают также *пуск при помощи специального разгонного двигателя с последующей синхронизацией* и *частотный пуск*, при котором синхронный двигатель, питаемый от специального генератора, разгоняется одновременно с последним [2].

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента, так как момент $M_{эм}$ двигателя за один период изменения напряжения дважды изменяет свое направление [меняется знак $\sin \theta$ в формуле (11.3)]. Из-за инерции ротор СД не может за полпериода разогнаться до синхронной

скорости и остается неподвижным. Поэтому процесс пуска СД разбивается на два этапа: сначала двигатель разгоняют до *подсинхронной* скорости (примерно равной $0,95\Omega_{\text{ном}}$), реализуя *асинхронный* метод пуска, а затем в обмотку возбуждения подают ток, после чего двигатель входит в синхронизм (термины 24 и 25, с. 16).

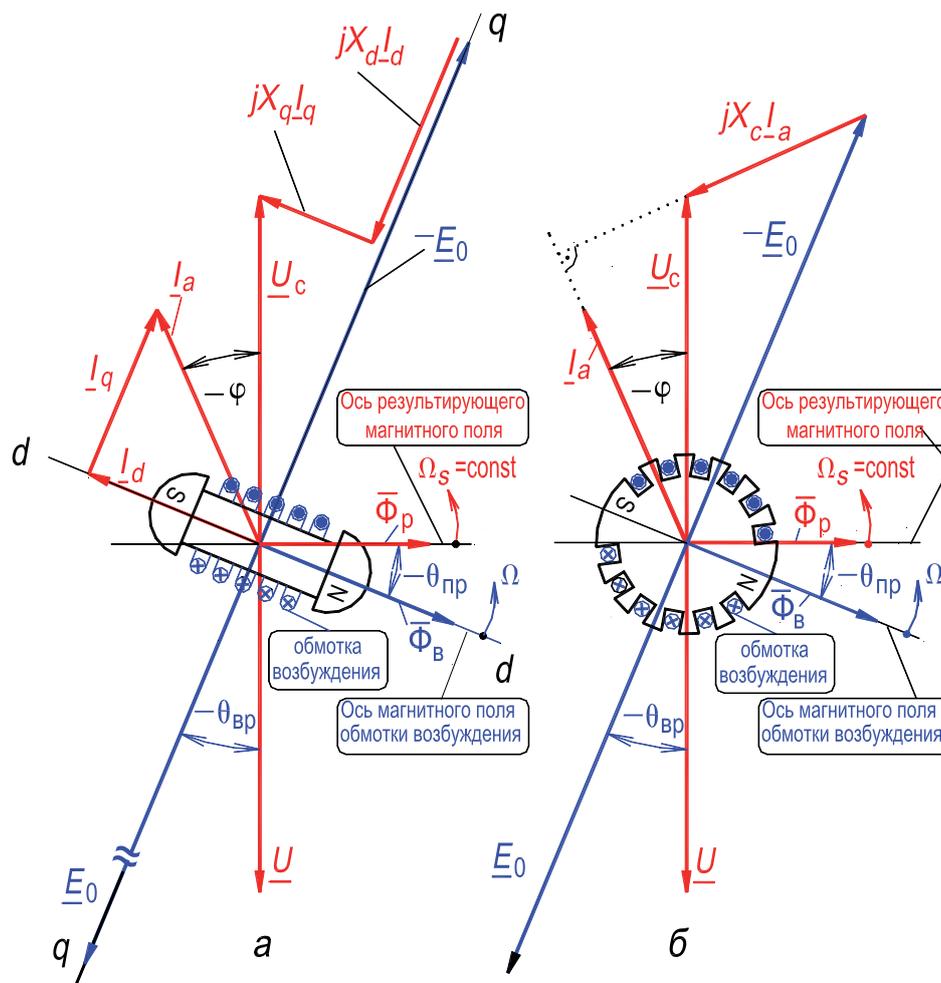


Рис. 11.3. Векторная диаграмма напряжений синхронного двигателя:
a – явнополюсного, *б* – неявнополюсного; (двигатель перевозбужден)

Для осуществления *асинхронного* пуска синхронные двигатели имеют на роторе специально рассчитанные короткозамкнутые *пусковые обмотки* в виде беличьей клетки, размещенной в пазах полюсных наконечников (см. в Работе №1 рис. 4.3, с. 30 и 31). Клетки выполняются из латуни, алюминиевой бронзы или аналогичных сплавов с *повышенным удельным сопротивлением*. В некоторых случаях вместо клетки используются массивные полюсные наконечники, которые на торцах имеют электрические соединения между соседними полюсами при помощи специальных токопроводящих

накладок. При этих условиях с двух торцов ротора образуются короткозамкнутые кольца. Быстроходные синхронные турбодвигатели имеют цилиндрический массивный *неявнополюсный* ротор, внешняя поверхность которого выполняет роль беличьей клетки.

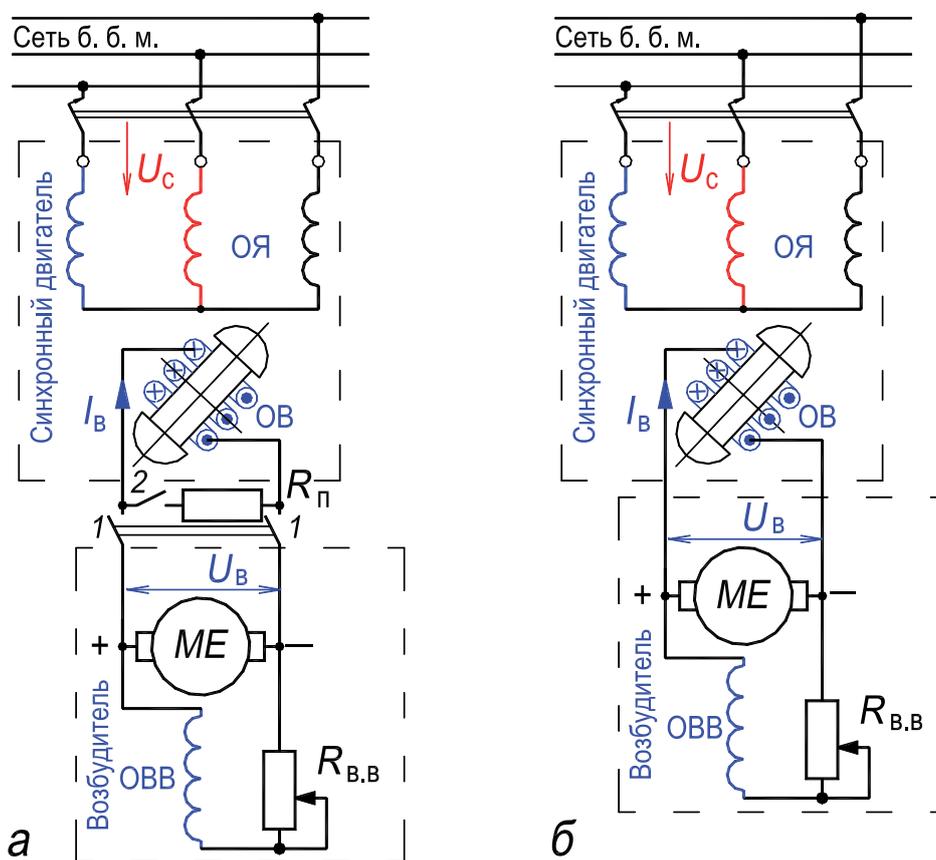


Рис. 11.4. Схемы прямого асинхронного пуска синхронного двигателя:

а – обмотка возбуждения при разгоне замкнута на сопротивление $R_{п}$;

б – обмотка возбуждения замкнута на якорь возбудителя

При прямом пуске в ход обмотка статора подключается непосредственно к сети при полном номинальном напряжении. Только для мощных синхронных двигателей, номинальная мощность которых измеряется тысячами киловатт, в некоторых случаях применяют пуск в ход при пониженном напряжении, подведенном к обмотке статора, с изменением этого напряжения ступенями.

Процесс асинхронного пуска в ход синхронного двигателя можно подразделить на два периода. Первый период пуска. В начале, после присоединения обмотки статора к сети, ротор двигателя ускоряется под действием

асинхронного момента и достигает скорости вращения, при которой скольжение обычно не превосходит $s \approx 0,05$. Обмотка возбуждения в течение всего процесса разбега двигателя должна быть замкнута на активное сопротивление R_{Π} в 10...12 раз превышающее ее собственное сопротивление (рис. 11.4,а, контакты 1 разомкнуты, контакт 2 замкнут). Оставлять обмотку возбуждения разомкнутой не рекомендуется, так как вращающееся поле статора может навести в ней в начальный период пуска значительную ЭДС, способную повредить изоляцию обмотки и небезопасную для эксплуатационного персонала. Замыкание накоротко обмотки возбуждения во многих случаях также нецелесообразно, так как при этом на роторе образуется дополнительный *однофазный замкнутый контур* относительно малого сопротивления, способный создать значительный тормозящий момент после перехода ротора через полусинхронную скорость (рис. 11.5; см. разд. 3.5.1, с. 219) .

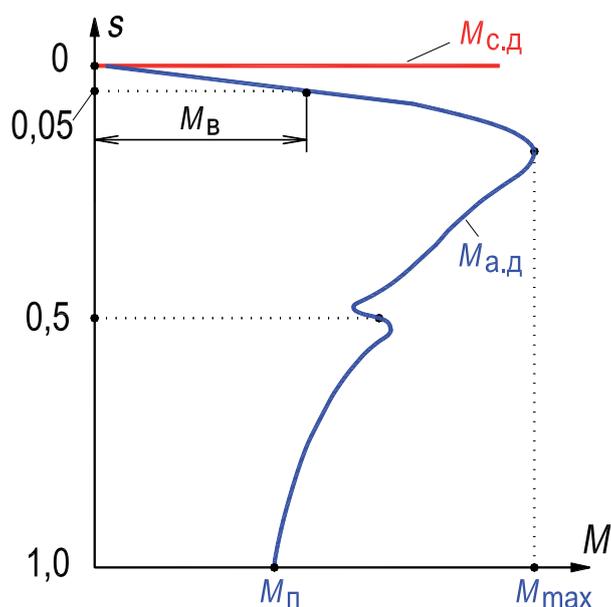


Рис. 11.5. Иллюстрация к процессу асинхронного пуска синхронного двигателя (в первом периоде пуска обмотка возбуждения замкнута на сопротивление R_{Π})

Когда ротор в процессе разбега достигает скольжения $s \approx 0,05$, наступает *второй период пуска* в ход, при котором обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока (рис. 11.4,а, контакт 2 разомкнут, контакты 1 замкнуты). После включения возбуждения на ротор, помимо *асинхронного момента*, пропорционального скольжению $s = d\theta/dt$, и *момента*,

обусловленного силами инерции, пропорционального ds/dt , начинает действовать *синхронный момент*, зависящий от тока возбуждения I_B и угла θ [формулы (11.3) и (11.4)].

Процесс *вхождения двигателя в синхронизм* (термин 25, с. 16) протекает тем быстрее, чем больше синхронный и асинхронный вращающие моменты вблизи $s = 0$. *Синхронный вращающий момент может регулироваться током обмотки возбуждения*. Асинхронный момент зависит от крутизны характеристики моментов вблизи синхронизма. Асинхронный момент M_B при скольжении $s = 0,05$ называют условно *входным моментом*. Поэтому чем выше *входной* вращающий момент двигателя, тем благоприятнее условия для вхождения его в синхронизм (рис. 11.5). Значения входного момента вращения синхронных двигателей обычно нормируются (см. выше табл. 11.1, с. 209).

В дальнейшем синхронное вращение ротора поддерживается за счет *самосинхронизирующей способности* машины (см. в Работе № 3 разд. 3.1.2.1, с. 159).

Для синхронных двигателей обычно применяют следующие варианты *асинхронного пуска*:

1) *прямой пуск* – обмотка статора включается на номинальное напряжение;

2) пуск с *токоограничивающим реактором* – реактор включается между сетью и обмоткой статора или реактор включается вблизи нейтральной точки последовательно с обмоткой статора;

3) пуск через *понижающий автотрансформатор* – к обмотке статора подводится пониженное напряжение по сравнению с номинальным напряжением.

Наибольшее распространение получил прямой асинхронный пуск синхронных двигателей (к обмотке статора подводится номинальное напряжение). На рис. 11.4 показаны две возможные схемы такого пуска. В случае *a* при разгоне двигателя его обмотка возбуждения ОВ замкнута на активное сопротивление R_{II} (контакты 1 разомкнуты, контакт 2 замкнут); после достижения установившегося скольжения $s \approx 0,05$ обмотка возбуждения ОВ присоединяется к источнику постоянного тока (то есть к якорю возбудителя

ME ; контакты 1 замкнуты), сопротивление R_{Γ} отключается (контакт 2 разомкнут) и двигатель автоматически входит в синхронизм. В случае b обмотка возбуждения ОВ синхронного двигателя с самого начала пуска присоединяется к якору возбуждателя ОВ, расположенного на одном валу с двигателем; в процессе разбега двигатель возбуждается и плавно втягивается в синхронизм без применения специальной пусковой автоматики.

Необходимо отметить, что при пуске с *токоограничивающим реактором* и при пуске через *понижающий автотрансформатор* одновременно с уменьшением пускового тока также уменьшается и начальный пусковой момент по сравнению с прямым пуском двигателя при том же напряжении сети U_c .

При пуске в ход синхронных двигателей, так же как и при пуске асинхронных двигателей, приходится уделять особое внимание вопросам нагрева и охлаждения тех частей машины, в которых в процессе пуска возникают повышенные потери.

В современных установках электропривода пуск в ход синхронных двигателей обычно автоматизируется.

3.5.1. Явление Гергеса (Görge's) /эффект одноосного включения/

Рассмотрим более подробно физическую сторону процесса *асинхронного* пуска синхронного двигателя.

Как отмечено выше, обмотка возбуждения двигателя при *асинхронном* пуске должна быть замкнута через разрядное омическое сопротивление, которое примерно в 10 раз больше величины активного сопротивления самой обмотки возбуждения. Если бы обмотка возбуждения при пуске двигателя была разомкнута, то на ее зажимах благодаря большому числу витков обмотки возбуждения могло бы развиться столь большое напряжение, что оно могло бы привести к пробое изоляции и выведению двигателя из строя.

Трехфазный синхронный двигатель с *замкнутой* обмоткой возбуждения *представляет в отношении пуска асинхронный двигатель с трехфазной первичной обмоткой, пусковой обмоткой типа беличья клетка, и однофазной вторичной обмоткой*, каковой является обмотка возбуждения. Последняя создает однофазное *пульсирующее* поле, которое по общему правилу может быть разложено на прямо и обратно бегущее поле относительно ротора [4, разд. 8.3.1, с. 53, сл.].

Обозначив скорость вращающегося поля, созданного обмоткой статора, через n_1 , а скорость вращения ротора через n , запишем выражение для скольжения (термин 39, с.18):

$$s = (n_1 - n)/n_1, \quad (11.10)$$

откуда скорость вращения ротора (рис. 11.6, лист 1,а):

$$n = n_1(1 - s). \quad (11.11)$$

Частота тока в статорной обмотке:

$$f_1 = pn_1. \quad (11.12)$$

Частота тока в роторных обмотках [это пусковая обмотка (беличья клетка) и обмотка возбуждения, замкнутая на сопротивление], называемая частотой скольжения:

$$f_{2s} = p(n_1 - n) \quad (11.13)$$

или учитывая (11.12), запишем

$$f_{2s} = f_1 s. \quad (11.14)$$

Результирующее магнитное поле, созданное обмоткой статора и пусковой обмоткой, взаимодействует с активным током частоты скольжения f_{2s} , протекающим в пусковой обмотке, и создается асинхронный момент $M_{a.m}$ (рис. 11.6, лист 2,б). Изменение этого момента в функции скольжения ротора приведено на рис. 11.6, лист 1,б. То есть этот момент оказывает такое же воздействие на ротор, как в асинхронном двигателе, работающем в нормальном режиме. Асинхронный момент $M_{a.m}$ имеет один и тот же знак, то есть не меняет свое направление в диапазоне скольжений $0 < s \leq 1$. Заметим, что на статор действует такой же момент $M_{a.m}$, но в противоположном направлении. Этот момента уравновешивается действием опор, закрепляющих статор.

Пульсирующее поле, созданное током частоты скольжения f_{2s} , протекающим в обмотке возбуждения, неподвижно относительно ротора, но изменяется во времени также с частотой скольжения f_{2s} . Это поле, как отмечено выше, можно представить в виде двух полей: одно поле (*прямое*), вращающееся в направлении вращения ротора, а другое (*обратное*) – вращающееся против направления вращения ротора (рис. 11.6, лист 1,а).

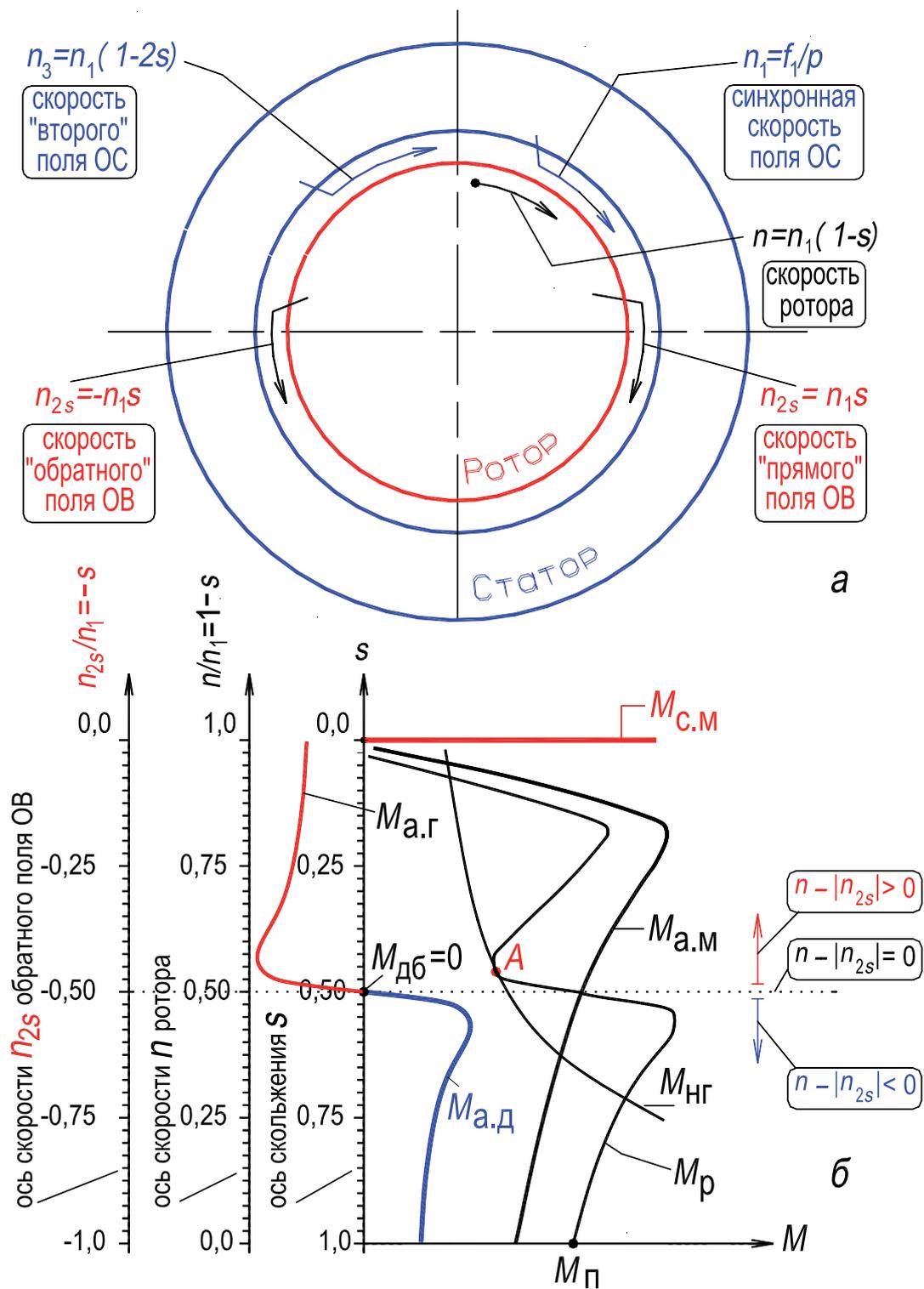


Рис. 11.6, лист 1. К анализу явления Гергеса при асинхронном пуске СД:
 а – направление вращения ротора и полей СД; б – моменты СД

По абсолютной величине скорости прямого и обратного полей относительно ротора составляют:

$$n_{2s} = f_{2s} / p \quad (11.15)$$

или, учитывая (11.14), запишем

$$n_{2s} = n_1 s. \quad (11.16)$$

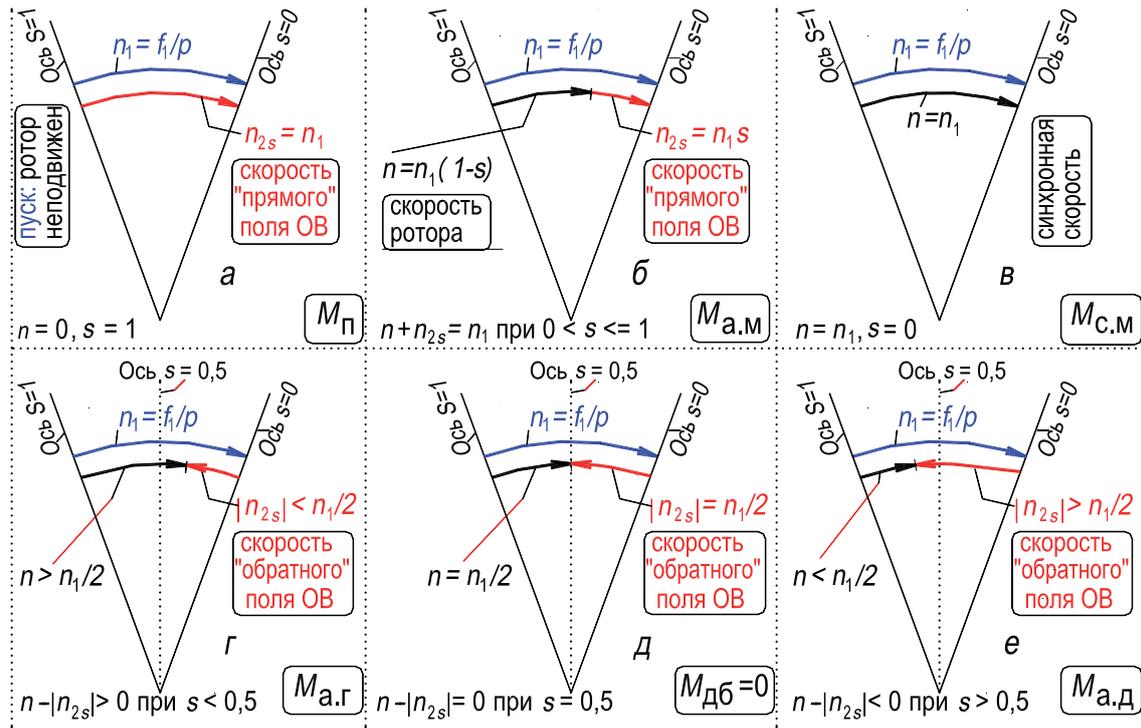


Рис. 11.6, лист 2. Диаграммы скоростей СД соответствующие: составляющим момента M_p в процессе асинхронного пуска

(а – $M_p = M_{п}$; б – $M_{a.m}$; г – $M_{a.g}$; д – $M_{дб} = 0$; е – $M_{a.d}$) и синхронному моменту $M_{c.m}$ (в)

Прямое поле обмотки возбуждения имеет относительно неподвижной статорной обмотки скорость вращения равную

$$n + n_{2s} = n_1(1 - s) + n_1 s = n_1, \quad (11.17)$$

то есть это поле вращается синхронно с полем, созданным статорной обмоткой при всех скоростях вращения ротора n . Поэтому наличие прямого поля, созданного обмоткой возбуждения, приводит к появлению добавочного асинхронного момента, который во всем диапазоне скольжений $0 < s \leq 1$ имеет то же направление что и асинхронный момент $M_{a.m}$ (рис. 11.6, лист 2, б), обусловленный наличием пусковой обмотки на роторе (на рис. 11.6 в кривой момента $M_{a.m}$ учтен этот добавочный асинхронный момент).

Обратное поле обмотки возбуждения имеет относительно неподвижной статорной обмотки скорость вращения:

$$n - n_{2s} = n_1(1 - s) - n_{1s} = n_1(1 - 2s), \quad (11.18)$$

Это обратное поле создает в статорной обмотке ток, имеющий частоту

$$f_3 = p(n - n_{2s}) = pn_1(1 - 2s) = f_1(1 - 2s), \quad (11.19)$$

а ток обусловит создание “второго” поля обмотки статора, вращающегося в пространстве со скоростью (рис. 11.6, лист 1,а):

$$n_3 = pf_1(1 - 2s) = n_1(1 - 2s). \quad (11.20)$$

Заметим, что по отношению к обратному полю, обмотка возбуждения является первичной, а обмотка статора вторичной. Как следует из сопоставления (11.18) и (11.20) обратное поле обмотки возбуждения и “второе” поле статора взаимно неподвижны при любом значении скольжения s . Таким образом, создается результирующее “второе” поле, вращающееся в пространстве со скоростью $n_1(1 - 2s)$. Но величина скорости этого поля не остается неизменной, а зависит от величины s , а именно:

1. Как следует из (11.19) при $s = 0,5$ частота $f_3 = 0$, а скорость вращения обратного поля относительно ротора $n_{2s} = -n_1/2$ (11.16). Другими словами, при скорости вращения ротора, равной половине синхронной скорости поля $+n_1/2$ (11.11), обратное поле неподвижно относительно статорной обмотки и не обуславливает тока в ней, что и отражает равенство $f_3 = 0$. Вывод: при прохождении ротора через половину синхронной скорости обратное поле не индуцирует ток в обмотке статора и поэтому дополнительный асинхронный момент, от обратного поля, отсутствует, $M_{дб} = 0$ (рис. 11.6, лист 1,б и лист 2,д);

2. Если скольжение ротора s будет несколько больше 0,5, то скорость n ротора будет несколько меньше, чем $+n_1/2$ (11.11), а скорость обратного поля n_{2s} относительно ротора будет несколько больше, чем $|n_1/2|$ (11.16). Поэтому обратное поле будет вращаться относительно статора в направлении противоположном ротору. Вывод: в этом случае обратное поле обусловит дополнительный асинхронный момент, действующий на ротор в направлении его (ротора) вращения, то есть имеющий характер двигательного момента $M_{а.д}$ (рис. 11.6, лист 1,б и лист 2,е);

3. Если же скольжение ротора s будет несколько меньше 0,5, то скорость вращения ротора будет несколько выше, чем $+n_1/2$ (11.11), а скорость обратного поля n_{2s} относительно ротора будет несколько меньше, чем $|n_1/2|$ (11.16). Поэтому обратное поле будет вращаться относительно статора в том же направлении, что и ротор. *Вывод*: в этом случае обратное поле обусловит *дополнительный асинхронный момент, действующий на ротор против направления его вращения*, то есть имеющий характер **генераторного момента $M_{а.г}$** (рис. 11.6, лист 1,б и лист 2,г).

Таким образом, дополнительные моменты, рассмотренные в пунктах 1, 2 и 3, носят такой же характер (см. рис. 11.6, лист 1,б), как и момент асинхронной машины в нормальном режиме работы при прохождении ее через синхронизм ($s = 0$).

При *замкнутой накоротко* обмотке возбуждения дополнительный **генераторный момент $M_{а.г}$** , действующий против основного вращающего момента $M_{а.м}$, может быть столь велик, что двигатель может “*застрять*” около половинной скорости, особенно если к его валу приложен достаточно высокий тормозной момент $M_{тг}$. *Токи обмоток будут при этом велики и опасны для двигателя, магнитные потери в роторе будут также велики. Это обусловлено тем, что в зоне полусинхронной скорости ротор перемагничивается с частотой примерно равно $0,5f_1$ [4, разд. П2.2.2, с. 223, сл.].*

Возможность появления указанных дополнительных моментов и “застревания” ротора вблизи полусинхронной скорости впервые была описана Гергесом (Görges) в 1896 г., и само явление получило название явление Гергеса или эффект одноосного включения.

При увеличении добавочного сопротивления $R_{п}$ в цепи обмотки возбуждения (рис. 11.4,а) величина индуцируемого в ней тока снижается и вместе с тем уменьшается влияние указанных дополнительных моментов. Опыт показывает, что при добавочном сопротивлении, десятикратном по величине по отношению к сопротивлению обмотки возбуждения, явление Гергеса настолько ослабляется, что не представляет особой опасности для “застревания” двигателя около скорости $n_1/2$ (рис. 11.5). В то же время это сопротивление предохраняет двигатель от больших напряжений на зажимах обмотки возбуждения при трогании двигателя из неподвижного состояния.

На рис. 11.6, лист 1,б даны кривые основного асинхронного момента $M_{a.m}$, добавочного двигательного момента $M_{a.д}$, **добавочного тормозного момента $M_{a.г}$** и результирующего момента M_p в зависимости от скольжения s , из которых видно, что если при скольжении s несколько меньше 0,5 момент нагрузки $M_{нг} \geq M_p$, двигатель должен “застрять” в точке A (в этой точке момент нагрузки $M_{нг}$ и момент M_p равны). При увеличении добавочного сопротивления в цепи возбуждения добавочный момент $M_{a.г}$ уменьшается и результирующий момент M_p в опасном месте получается больше тормозного момента $M_{нг}$, вследствие чего двигатель должен благополучно развернуться до скорости в зону нормальных малых значений скольжения.

После отключения сопротивления $R_{п}$ и подключения обмотки возбуждения к возбудителю создается поле возбуждения и разноименные полюсы поля якоря и поля возбуждения притягиваются, далее поле якоря, вращаясь с синхронной скоростью n_1 , будет увлекать за собой ротор с этой же синхронной скоростью. Ротор теперь вращается под действием синхронного момента $M_{с.м}$ (рис. 11.6, лист 1,б и лист 2,в), а асинхронный момент при этом равен нулю.

3.5.2. Асинхронный и синхронный моменты: сопоставление

1. Асинхронный момент обусловлен взаимодействием результирующего магнитного поля двигателя с *активной* составляющей тока ротора. Ток ротора, в свою очередь, обусловлен индуктивной связью между полем и обмоткой ротора, которая проявляется *только при перемещении (скольжении) ротора относительно вращающегося поля*.

Если допустить, что ротор самостоятельно разгонится до скорости вращающегося магнитного поля (в этом случае скольжение равно нулю, $s = 0$), то в роторе не будет индуцироваться ЭДС, не будет протекать ток и, следовательно, асинхронный момент будет равен нулю, $M_{a.m} = 0$.

Поэтому *асинхронный момент $M_{a.m}$ возникает только при асинхронной скорости (термин 38, с. 18) вращения ротора (то есть не равной синхронной скорости вращения поля $n_s = f_c/p$)* (см. рис. 11.5).

2. Синхронный момент обусловлен *магнитным* взаимодействием полей обмотки якоря и обмотки возбуждения, которые созданы *отдельными* источниками напряжения переменного и постоянного тока. При одинаковой

скорости вращения этих полей их разноименные полюсы вступают в постоянное магнитное взаимодействие (*притягиваются*), и поле якоря, вращаясь с *синхронной скоростью* (термин 37, с. 18), увлекает за собой ротор с той же скоростью.

Если ротор начнет вращаться с асинхронной скоростью (то есть *выпадет из синхронизма* – термин 26, с. 16), то в результате проскальзывания ротора относительно поля якоря в течение одной половины периода переменного тока *разноименные* полюсы этих полей будут притягиваться, а в течение другой половины – будут отталкиваться *одноименные* полюсы полей. Таким образом, за один период на ротор будет действовать знакопеременный момент, а средний синхронный момент за период будет равен нулю. Этим же объясняется тот факт, что синхронный момент при пуске двигателя равен нулю.

Поэтому *синхронный момент* $M_{с.м.}$, в отличие от асинхронного, *имеет место только при синхронной скорости вращения ротора* (то есть *равной синхронной скорости вращения поля* $n_s = f_c/p$) (см. рис. 11.5).

Номинальный синхронный момент, соответствующий углу $\theta_{ном}$, находится в области значений $|20^\circ| \leq \theta \leq |30^\circ|$ (см. рис. 11.8, с. 228). Синхронный двигатель с *неявнополюсным* ротором имеет максимальный момент при $\theta_m = -90^\circ$. При явнополюсном роторе угол θ_m , соответствующий максимальному моменту синхронного двигателя, составляет примерно $70...80^\circ$ (по абсолютной величине).

3.6. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Это есть зависимости $P_1, I_a, M, \cos \varphi, \eta = f(P_2/P_{2ном})$ при $U_c = U_{ном}$, $f_c = f_{ном}$ и $I_B = \text{const}$. При работе синхронного двигателя с нагрузкой на валу и *неизменным* током возбуждения I_B его рабочие характеристики имеют вид, представленный на рис. 11.7. Характеристики изображены для случая *нормального* возбуждения двигателя при холостом ходе ($P_2 = 0$). Поэтому при холостом ходе $\cos \varphi = 1$ и при изменении нагрузки его $\cos \varphi$ остается весьма устойчивым, несколько снижаясь при возрастании нагрузки. Можно отрегулировать синхронный двигатель путем изменения тока возбуждения таким образом, чтобы он имел $\cos \varphi = 1$ при *желаемой* нагрузке. Чем более возбужден (то есть *перевозбужден*) синхронный двигатель при холостом ходе,

тем больше получается величина тока холостого хода опережающего напряжение сети U_c и при тем более высокой нагрузке достигается $\cos \varphi = 1$. Коэффициент полезного действия η двигателя возрастает до некоторой максимальной величины и затем начинает снижаться. Условие максимума КПД – равенство постоянных потерь мощности (магнитных и механических) переменным потерям (электрическим). Ток I_x в обмотке якоря при холостом ходе невелик и соответствует потерям холостого хода; при возрастании нагрузки ток I_a возрастает почти по прямолинейной зависимости. Момент M на валу двигателя увеличивается линейно с увеличением нагрузки, так как ротор вращается с синхронной скоростью (см. разд. 4.2, с. 231, сл.).

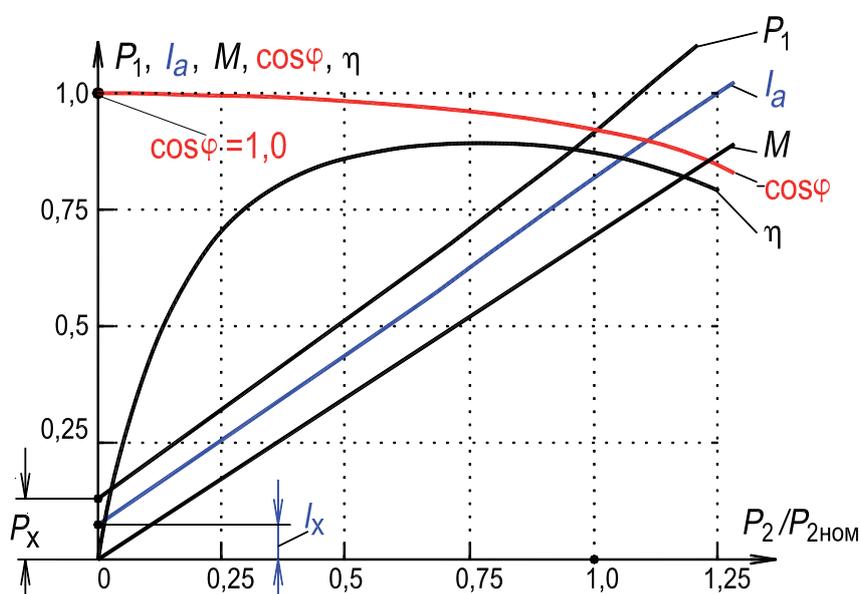


Рис. 11.7. Рабочие характеристики синхронного двигателя

3.7. Угловые характеристики активной мощности синхронного двигателя

Одним из наиболее характерных режимов является работа двигателя при *постоянном* возбуждении, $I_B = \text{const}$, и переменной нагрузке; этому режиму соответствуют: 1) рассмотренные выше рабочие характеристики и 2) угловые характеристики. Для случая $R_a \approx 0$ угловые характеристики активной мощности в генераторном и двигательном режимах показаны на рис. 11.8. Область статической устойчивости показана утолщенной линией (см. в Работе №3 разд. 3.1.4.1, б, с. 172, сл.). Угол θ при номинальном

режиме синхронного двигателя лежит обычно в пределах $|20...30^\circ|$. Максимальная мощность и момент, развиваемые синхронным двигателем без выпадения из синхронизма, соответствуют углу θ_m (термин 46, с. 20).

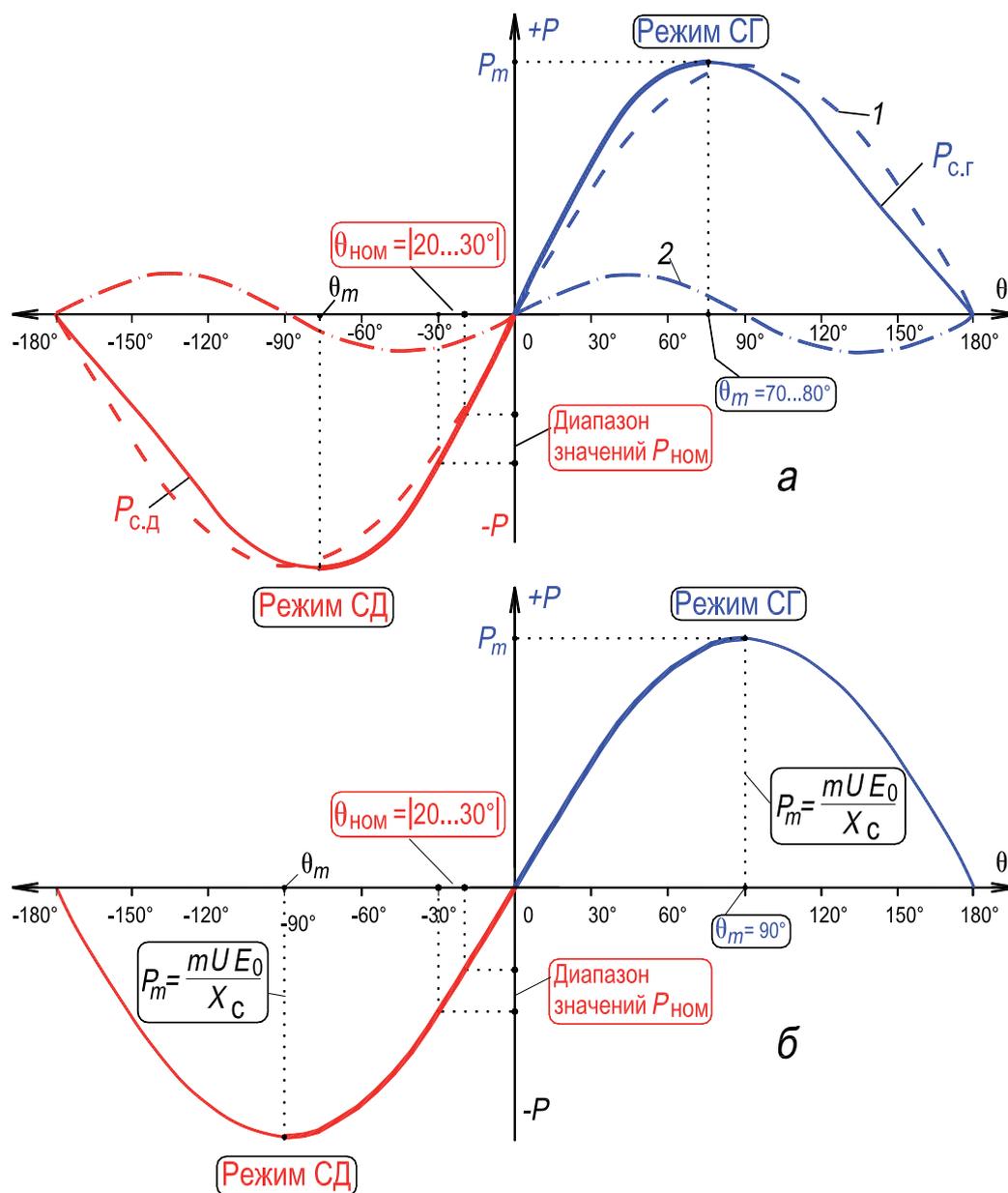


Рис. 11.8. Угловые характеристики синхронной машины:
 а – явнополюсной, б – неявнополюсной

3.8. V-образные характеристики синхронного двигателя

В этом режиме двигатель работает при постоянной нагрузке на валу и переменном возбуждении (рис. 11.9). При *перевозбуждении* ток I_a , протекающий в обмотке якоря, опережает напряжение сети U_c (см. рис. 11.1 и 11.3) и двигатель генерирует реактивную мощность в сеть. При *недовозбуждении* двигатель потребляет реактивную мощность из сети, а при нормальном возбуждении реактивная мощность равна нулю, $Q = 0$ (см. разд. 4.3, с. 234, сл.).

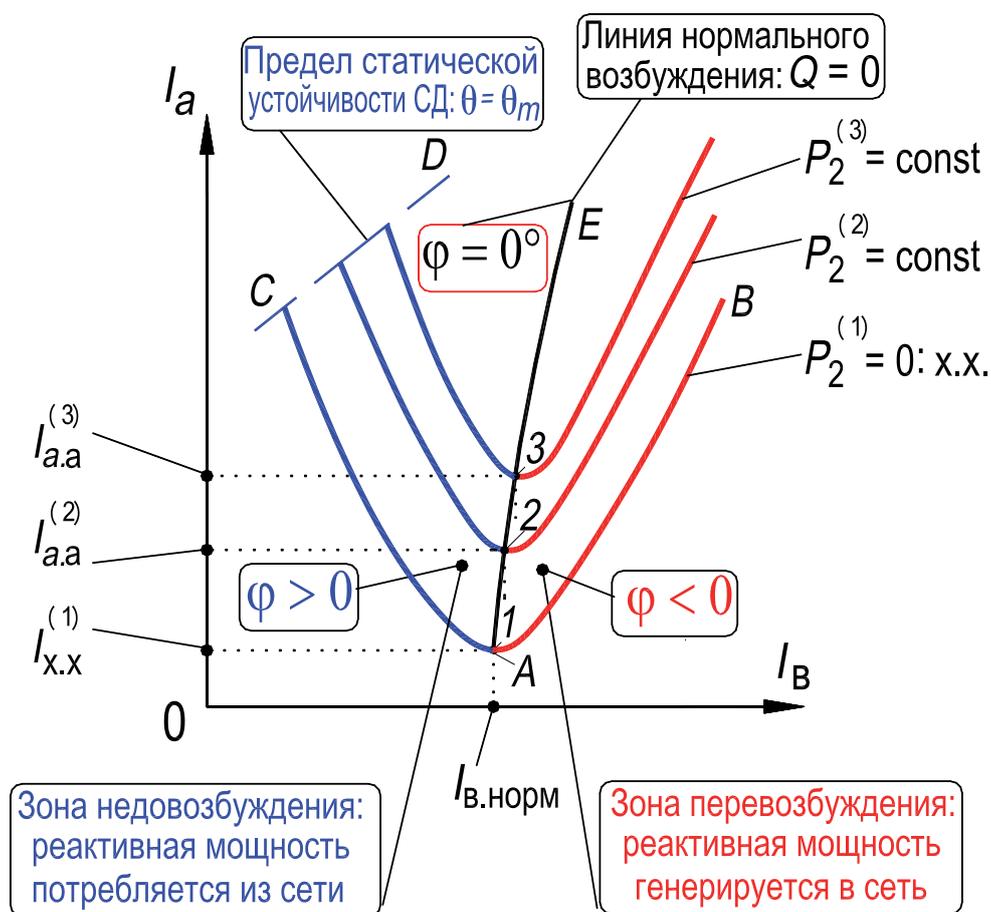


Рис. 11.9. V-образные характеристики синхронного двигателя.

Фаза φ тока I_a СД измеряется относительно напряжения сети U_c .

Номинальный режим двигателя соответствует зоне перевозбуждения

4. Экспериментальное исследование

Работа выполняется на лабораторной установке, в состав которой входят *явнополюсный* синхронный двигатель (СД) с возбудителем *МЕ*. Двигатель приводит во вращение машину постоянного тока, работающую в режиме генератора *G* (рис. 11.10) [5, с. 24]. **Фотографии установки – на рис. В1,..., В3, с. 11, 12.**

Значения номинальных данных – см. разд. 6, с. 60, сл.

Изменение нагрузки на валу двигателя осуществляется изменением электромагнитного момента генератора постоянного тока *G* посредством регулировки тока якоря генератора (реостат $RR_{нг}$, амперметр $PA4$).

В процессе выполнения работы скорость ротора СД несколько изменяется: ее значение колеблется около синхронной частоты вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин. При этом стрелки измерительных приборов также колеблются. Объясняется это тем, что у двигателя недостаточный *асинхронный* демпфирующий момент, так как на роторе отсутствует пусковая (демпфирующая) обмотка.

Собрать схему для испытания синхронного двигателя при его работе в сети б. б. м. (рис. 11.10).

4.1. Прямой асинхронный пуск синхронного двигателя

(см. разд. 3.5 на с. 214, сл.)

1. Выключатель $QS2$ установить в положение “Откл”, *двигатель запускается на холостой ход*;

2. Переключатель SA установить в положение “Пуск СД” /контакты 22 и 23/ (обмотка возбуждения двигателя замкнута на реостат RR);

3. Включить автомат $QF2$ (на обмотку якоря двигателя подано номинальное напряжение $U_c = U_{ном} = 127$). Двигатель разгоняется под действием *асинхронного* момента; возникает и реактивный момент;

4. После разгона двигателя до подсинхронной скорости ($s \approx 0,05$) переключатель SA установить в положение “Работа СД” /контакты 24 и 25/ (обмотка возбуждения двигателя присоединена к возбудителю *МЕ*);

5. Реостатом $RR_{в.в}$ установить ток возбуждения $I_B \approx 6...7$ А (амперметр $PA2$), при этом ток в ОЯ имеет минимальное значение $I_a \approx 2...4$ А (амперметр $PA5$). **Синхронный двигатель нормально возбужден** (см. на рис. 11.9 точку *A*);

6. Двигатель входит в синхронизм под действием *синхронного* и *реактивного* моментов (в процессе пуска на ротор также действует момент, обусловленный силами *инерции*).

Признак синхронной работы – устойчивая синхронная частота вращения (а также установившиеся значения тока якоря и мощности – приборы *PA5* и *PW*).

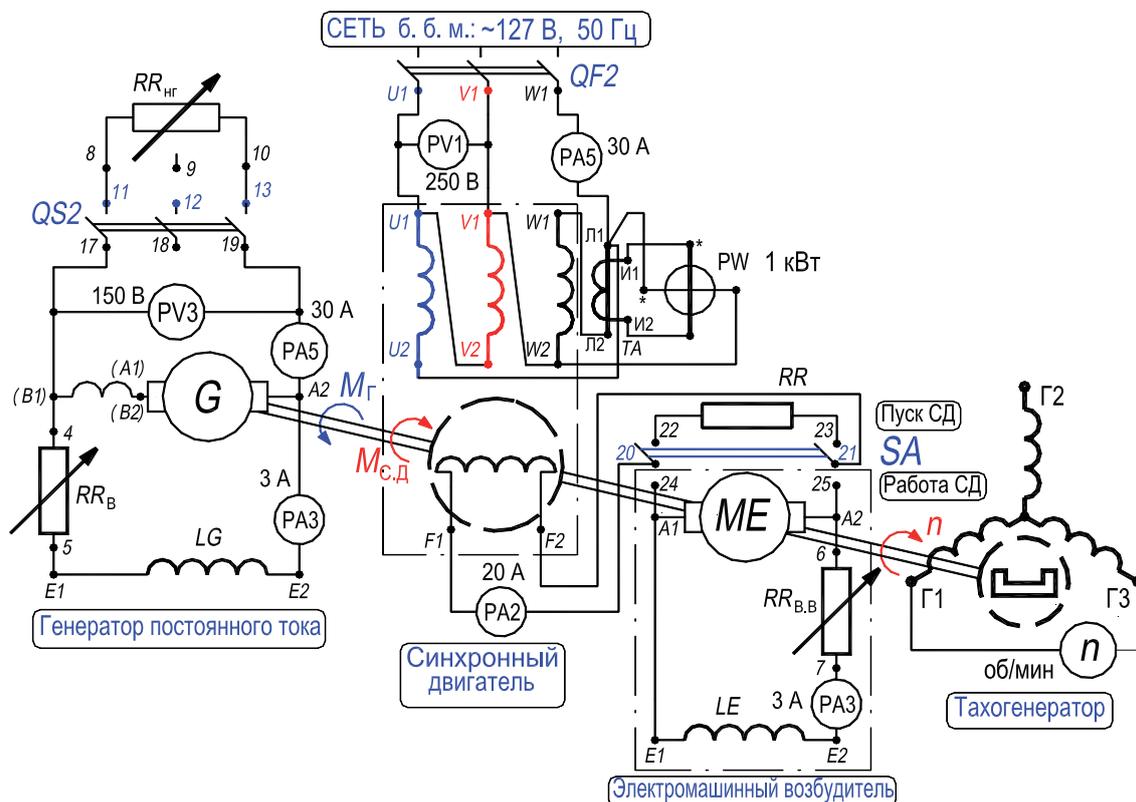


Рис. 11.10. Схема лабораторной установки для исследования синхронного двигателя. Для выполнения работы №4 заменить панели *PA4* (75 А) и *PA1* (20 А) на панели *PA5* (30 А); см. рис. 8.8 и 8.9 на с. 96 и 97

4.2. Рабочие характеристики синхронного двигателя

(см. разд. 3.6 на с. 226, сл.)

Рабочие характеристики – это есть зависимости P_1 , I_a , M , $\cos \varphi$, $\eta = f(P_2)$, при $U_c = U_{ном}$, $f_c = f_{ном}$, $I_B = const$.

Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 определяется электрической нагрузкой генератора постоянного тока G , то есть

$$P_2 = \eta_{Г} U_{Г} I_{Г}, \quad (11.21)$$

где $U_{Г}$, $I_{Г}$ – напряжение и ток генератора (приборы *PV3* и *PA5*); $\eta_{Г}$ – КПД генератора определяется по зависимости $\eta_{Г} = f(I_{Г})$ (рис. 11.11).

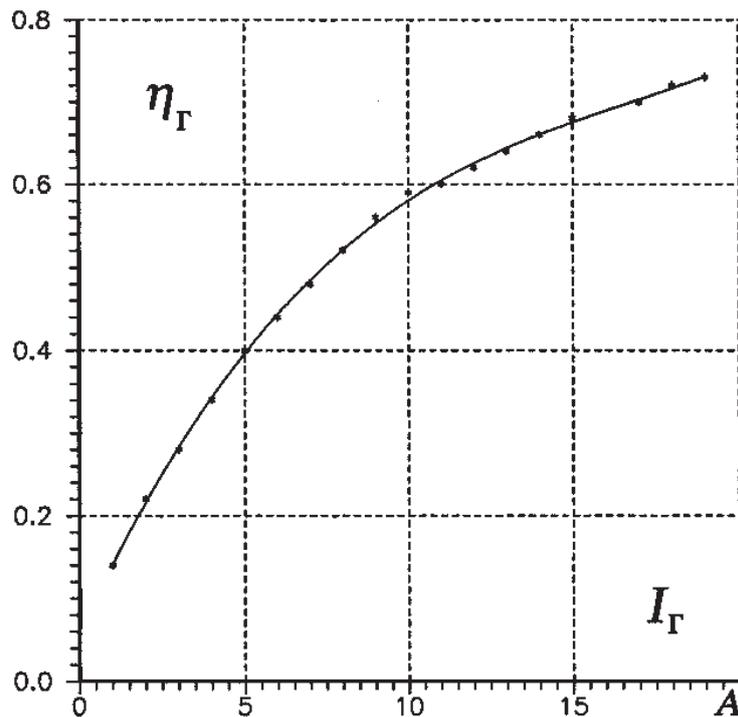


Рис. 11.11. Зависимость КПД генератора постоянного тока от тока якоря

Снятие характеристик осуществить следующим образом.

1. Выполнить прямой асинхронный пуск синхронного двигателя (см. разд. 4.1, с. 230);

2. Реостатом $RR_{в.в}$ установить значение тока возбуждения таким (амперметр $PA2$, это значение тока возбуждения поддерживается постоянным в процессе всего опыта, $I_{в.норм} = const$), чтобы линейный ток обмотки якоря имел минимальное значение $I_{a.a} = I_{a.min} = I_{x.x}^{(1)}$ (при этом коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi = 1$ и он нормально возбужден, см. точку A на рис. 11.9);

3. Выключателем $QS2$ подсоединить реостат $RR_{нг}$ и, изменяя момент генератора M_G , увеличивать нагрузку на валу СД до тех пор, пока линейный ток в обмотке якоря двигателя не достигнет номинального значения $I_a = I_{л.ном} = 19,4$ А (амперметр $PA5$).

4. Показания приборов $PA5$, PW (в цепи двигателя) и $PV3$, $PA5$ (в цепи генератора) занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Синхронный двигатель							Генератор постоянного тока			
Измерение		Расчет					Измерение		Расчет	
I_a	$P_{1\phi}$	P_1	P_2	$\cos \varphi$	M	η	I_{Γ}	U_{Γ}	η_{Γ}	P_{Γ}
А	Вт	Вт	Вт	–	Н·м	%	А	В	–	Вт

Активную мощность P_1 , потребляемую из сети синхронным двигателем, рассчитать по формуле $P_1 = 3P_{1\phi}$.

Электрическую мощность вырабатываемую нагрузочным генератором постоянного тока G рассчитать по формуле $P_{\Gamma} = U_{\Gamma}I_{\Gamma}$.

Полезную механическую мощность на валу синхронного двигателя определить, как $P_2 = \eta_{\Gamma}P_{\Gamma}$.

Коэффициент мощности двигателя – $\cos \varphi = P_1 / \sqrt{3}U_{\text{ном}}I_a$, где $U_c = U_{\text{ном}} = 127 \text{ В}$ – напряжение сети; I_a – линейный ток обмотки якоря двигателя.

Коэффициент полезного действия двигателя – $\eta = 100P_2/P_1 \%$.

Момент на валу двигателя – $M = 9,55P_2/n_{\text{ном}}$, где $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/мин}$.

Синхронный вращающий момент M в зависимости от P_2 изменяется по прямой, так как $n = \text{const}$. С увеличением нагрузки $\cos \varphi$ несколько уменьшается, это объясняется увеличением реактивного падения напряжения в обмотке якоря при росте тока в ней. Потребляемая мощность P_1 при увеличении P_2 растет несколько быстрее, чем P_2 , так как с увеличением нагрузки возрастают электрические потери в обмотке якоря. Ток I_a при увеличении P_2 также растет несколько быстрее, чем P_2 , так как с увеличением нагрузки $\cos \varphi$ уменьшается.

4.3. V-образные характеристики (см. разд. 3.8 на с. 229, сл.)

V-образные характеристики синхронного двигателя есть зависимости $I_a = f(I_B)$, которые снимаются при постоянной нагрузке на валу двигателя $P_2 = \text{const}$ и номинальных значениях $U_c = U_{\text{ном}}$, $f_c = f_{\text{ном}}$.

Снятие семейства характеристик при различных значениях $P_2 = \text{const}$ (эти значения задаются преподавателем) осуществить следующим образом.

1. Первую характеристику снять при холостом ходе двигателя, $P_2 = 0$ Вт; Выключатель $QS2$ установить в положение “Откл”;

2. Реостатом $RR_{\text{ВВ}}$ изменять ток в I_B цепи возбуждения двигателя от минимального значения до максимального. При этих значениях тока I_B ток в обмотке якоря I_a не должен превышать номинальное значение, $I_a = I_{\text{л.ном}} = 19,4$ А. Показания амперметра $PA5$ и ваттметра PW (в цепи обмотки якоря двигателя) и $PA2$ (в цепи обмотки возбуждения двигателя) заносить в табл. 11.3;

3. В процессе опыта фиксировать точку с координатами $\{I_{a.\text{min}}, I_{\text{В.ном}}\}$, где $I_{a.\text{min}} = I_{a.a} = I_{\text{X.X}}^{(1)}$ – минимальный ток в обмотке якоря двигателя ($I_{a.a}$ – это активный ток), $I_{\text{В.ном}}$ – соответствующий ему ток в обмотке возбуждения (это точка A на рис. 11.9). В этой точке синхронный двигатель *нормально* возбужден, он не генерирует и не потребляет из сети реактивную мощность, $Q = 0$ вар. Коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$.

4. В диапазоне значений тока возбуждения $I_B < I_{\text{В.ном}}$ двигатель *недо-возбужден* (фиксировать три точки), он потребляет реактивную мощность из сети (см. линию AC на рис. 11.9).

5. В диапазоне $I_B > I_{\text{В.ном}}$ двигатель *перевозбужден* (фиксировать три точки), он генерирует реактивную мощность в сеть (см. линию AB на рис. 11.9).

6. Снять еще две V-образные характеристики при значении мощности $P_2^* = 0,25; 0,5$. Выключатель $QS2$ установить в положение “Вкл”, а значение нагрузки на валу двигателя $P_2 = \text{const}$ поддерживать реостатами $RR_{\text{НГ}}$ и $RR_{\text{В}}$ (см. схему генератора постоянного тока на рис. 11.10; $P_2 = \eta_{\Gamma} P_{\Gamma} = \eta_{\Gamma} U_{\Gamma} I_{\Gamma}$).

Рассчитать и занести в табл. 11.3 значения коэффициента мощности двигателя $\cos \varphi = \sqrt{3} P_{1\phi} / U_{\text{ном}} I_a$, где $U_c = U_{\text{ном}} = 127$ В – напряжение сети; I_a – линейный ток ОЯ.

Таблица 11.3. V-образные характеристики синхронного двигателя

Возб-ние СД	$P_2^* = 0$				$P_2^* = 0,25$				$P_2^* = 0,5$			
	I_a	I_B	$\cos \varphi$	$P_{1\phi}$	I_a	I_B	$\cos \varphi$	$P_{1\phi}$	I_a	I_B	$\cos \varphi$	$P_{1\phi}$
	А	А	–	Вт	А	А	–	Вт	А	А	–	Вт
Недовозб-ние												
Норм-е												
Перевозб-ние												

V-образные кривые показаны на рис. 11.9. Минимальное значение тока I_a для каждой кривой (точки 1, 2 и 3) соответствует $\cos \varphi = 1$. Изменение тока якоря при изменении тока возбуждения происходит в основном вследствие изменения реактивной составляющей тока якоря. В левой части кривых (относительно линии AE) ток якоря отстает от напряжения сети U_c . При этом реактивная мощность потребляется двигателем. В правой части кривых (относительно линии AE) ток якоря опережает напряжение сети U_c . В этом случае реактивная мощность генерируется двигателем и поступает в сеть (см. рис. 11.1,е на с. 211).

При снижении тока возбуждения синхронного двигателя до значений меньших ограниченных пунктирной линией CD он выпадает из синхронизма (на рис. 11.9 эта линия соответствует пределу статической устойчивости; термины 26 и 29, с. 16,сл.) [см. в Работе №3 разд. 3.1.4.1,б, с. 172,сл.].

В отличие от V-образной характеристики генераторного режима (см. в Работе №3 рис. 10.8, кривая соответствующая $P^{(1)} = 0$, с. 177), в двигательном режиме, при $P_2^{(1)} = 0$, ток в обмотке якоря I_a больше нуля. Это обусловлено тем, что потери х. х. двигателя компенсируются за счет мощности, потребляемой из сети. У генератора же эти потери компенсируются за счет мощности, потребляемой от приводного двигателя. Смещение точки минимума V-образных кривых в зону больших токов возбуждения при увеличении нагрузки P_2 обусловлено увеличением потоков рассеяния.

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы (с. 206).
4. Номинальные данные синхронного двигателя и электромашинного возбудителя (разд. 6, с. 60 и 61).
5. Номинальные данные генератора постоянного тока (разд. 6.3, с. 61).
6. Схему испытаний синхронного двигателя, рис. 11.10.
7. Результаты опытов, представленные в таблицах 11.2 и 11.3;
8. Ниже таблицы 11.2 привести формулы для расчета величин (см. с. 233), входящих в таблицу, и график с рабочими характеристиками синхронного двигателя $P_1, I_a, M, \cos \varphi, \eta = f(P_2)$;
9. Ниже таблицы 11.3 привести формулу для расчета коэффициента мощности двигателя $\cos \varphi$ (с. 234) и график с характеристиками $I_a, \cos \varphi = f(I_B)$.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схемы опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Синхронные машины подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить последовательность операций при асинхронном пуске синхронного двигателя.
2. Почему обмотку индуктора при пуске нельзя оставлять разомкнутой или замыкать накоротко?
3. Каким образом регулируется $\cos \varphi$ синхронного двигателя?
4. Как установить режим работы двигателя с $\cos \varphi = 1$?
5. Как влияет на потребляемую мощность синхронного двигателя изменение тока возбуждения?
6. Как перевести синхронную машину из генераторного режима в двигательный?
7. В каком случае двигатель будет потреблять реактивную мощность из сети, а в каком отдавать её в сеть?
8. Каковы достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?

П11.1. Синхронный компенсатор

В современных электрических системах, связанных линиями электропередачи большой протяженности, а также в системах, потребляющих большую реактивную мощность, довольно широко используются синхронные машины, работающие *в режиме двигателя без нагрузки на валу* (холостой ход). Такие машины носят название *синхронных компенсаторов* (термин 50, с. 20). При *перевозбуждении* они отдают в сеть реактивную мощность и обуславливают протекание *в сети* емкостного тока I_c , при *недовозбуждении* – потребляют *из сети* индуктивный ток I_L и реактивную мощность. Емкостной ток I_c опережает напряжение сети U_c , а индуктивный ток I_L отстает от напряжения сети. Таким образом, *перевозбужденный* синхронный компенсатор эквивалентен подключенной к сети емкости, а *недовозбужденный* – индуктивности (см. в Работе № 3 рис. 10.3, с. 162) [1, 2].

Эти свойства синхронных компенсаторов в сочетании с применением регулируемых под нагрузкой (РПН) трансформаторов используются для поддержания наиболее экономически выгодных режимов в электрических системах [3]. Регулирование возбуждения синхронных компенсаторов осуществляется при этом обычно автоматически. Наиболее тяжелым по условиям нагревания машины является режим *перевозбуждения* синхронного компенсатора.

Синхронные компенсаторы предназначаются для компенсации коэффициента мощности сети и поддержания нормального уровня напряжения сети (то есть номинального напряжения при допустимых значениях его отклонения [17]) в районах сосредоточения потребительских нагрузок. Распространенным является *перевозбужденный* режим работы синхронного компенсатора, когда он отдает в сеть реактивную мощность.

В связи с этим компенсаторы, как и служащие для этих же целей батареи конденсаторов, устанавливаемые на потребительских подстанциях, называют также генераторами реактивной мощности. Однако в периоды спада потребительских нагрузок (например, ночью) нередко возникает необходимость работы синхронных компенсаторов также в *недовозбужденном* режиме, когда они потребляют из сети индуктивный ток и реактивную мощность, так как в этих случаях напряжение сети стремится возрасти

и для поддержания его на нормальном уровне необходимо загрузить сеть индуктивными токами, вызывающими в ней дополнительные падения напряжения. Для этого каждый синхронный компенсатор снабжается автоматическим регулятором возбуждения или напряжения, который регулирует его ток возбуждения так, что напряжение на зажимах компенсатора остается постоянным.

Синхронные компенсаторы с точки зрения режима своей работы, в сущности, являются синхронными двигателями, работающими на холостом ходу, то есть без нагрузки на валу, в сети б. б. м. ($U_c = \text{const}$, $f_c = \text{const}$). Поэтому синхронные компенсаторы загружены также небольшим активным током и потребляют из сети активную мощность для покрытия своих потерь холостого хода P_x : электрических $p_{эл}$ в обмотке якоря и магнитных $p_{мг}$.

Синхронный компенсатор имеет одну V-образную характеристику, соответствующую $P_2 = 0$, которая, по существу, совпадает с V-образной характеристикой синхронного двигателя на холостом ходу (на рис. 11.9, с. 229, V-образная характеристика СД при $P_2^{(1)} = 0$).

Компенсаторы изготавливаются на мощность до $P_{ном} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и имеют *явнополюсную* конструкцию, обычно с $2p = 6$ или 8 (рис. П11.1). Выступающих концов вала у компенсатора нет (рис. П11.2) [11]. Мощные компенсаторы имеют водородное охлаждение.

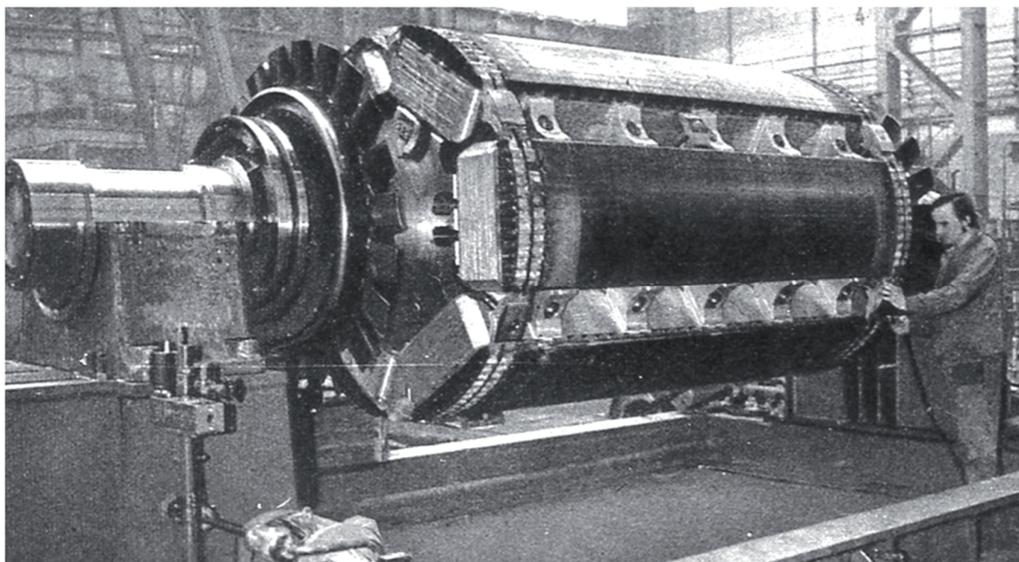
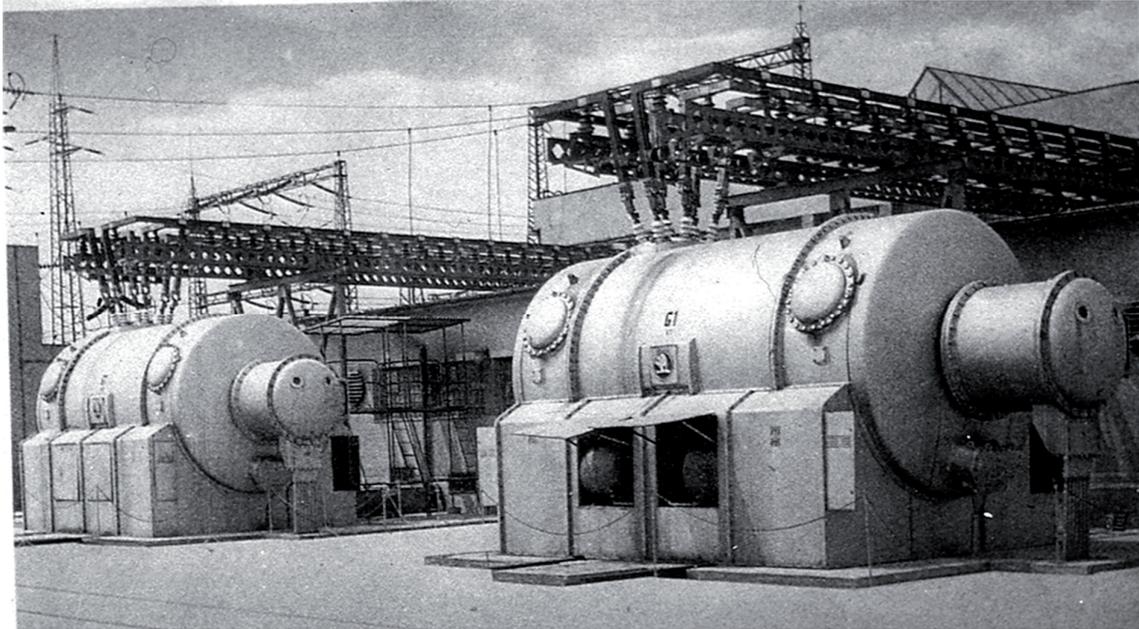


Рис. П11.1. Ротор синхронного компенсатора мощностью 30 Мвар, $2p = 6$



**Рис. П11.2. Два синхронных компенсатора мощностью 60 Мвар
на распределительной подстанции**

Пуск в ход синхронных компенсаторов осуществляется теми же способами, что и пуск синхронных двигателей. У синхронных компенсаторов пуск в ход протекает в более легких условиях из-за отсутствия внешней механической нагрузки на валу. По этой причине пусковые токи и продолжительность разгона ротора у синхронных компенсаторов меньше, чем у синхронных двигателей. Так как синхронные компенсаторы не имеют выступающего конца вала, то их станина более легко может быть герметизирована, что облегчает использование для компенсаторов водородного охлаждения.

Для осуществления асинхронного пуска синхронные компенсаторы снабжаются пусковыми обмотками в полюсных наконечниках (рис. П11.1) или их полюсы делают массивными. При этом используется способ *прямого*, а в необходимых случаях – способ *реакторного* пуска. При прямом пуске обмотка статора подключается непосредственно к сети на номинальное напряжение. Иногда мощные компенсаторы пускаются в ход также с помощью пусковых асинхронных двигателей с фазным ротором, укрепляемых с ними на одном валу (см. с. 214, сл.).

Так как синхронные компенсаторы не развивают активной мощности, то вопрос о статической устойчивости работы для них теряет остроту (см. с. 172, сл.). Поэтому они изготавливаются с меньшим воздушным зазором, чем синхронные генераторы и двигатели, и соответственно этому величины X_d и X_q

у них больше (Работа №2 Прил. 9.1, с. 153). Уменьшение зазора позволяет снизить расход меди или алюминия на обмотку возбуждения и удешевить машину.

Номинальная полная мощность $S_{\text{НОМ}}$ синхронного компенсатора

$$S_{\text{НОМ}} = mU_{\text{НОМ}}I_{a.\text{НОМ}} \quad (\text{П11.1})$$

соответствует его работе с перевозбуждением. Наибольшие значения тока и мощности в *недовозбужденном* режиме получаются при работе в реактивном режиме с $I_{\text{В}} = 0$ и, соответственно, $E_0 = 0$. Если пренебречь потерями, то, согласно выражению (8.7) /с. 79/, при этом

$$I_{a.\text{НВ}} = (E_0 - U_{\text{НОМ}}/jX_d = jU_{\text{НОМ}}/X_d, \quad (\text{П11.2})$$

и соответствующая полная мощность $S_{\text{НВ}}$ при недовозбуждении компенсатора

$$S_{\text{НВ}} = mU_{\text{НОМ}}I_{a.\text{НВ}} = mU_{\text{НОМ}}^2/X_d. \quad (\text{П11.3})$$

Согласно равенствам (П11.1) и (П11.3):

$$S_{\text{НОМ}}/S_{\text{НВ}} = X_d I_{a.\text{НОМ}}/U_{\text{НОМ}} = X_d^*. \quad (\text{П11.4})$$

Обычно $X_d^* = 1,5 \dots 2,5$. Это означает, что генерируемая синхронным компенсатором в сеть реактивная мощность $S_{\text{НОМ}}$ в режиме *перевозбуждения* в 1,5...2,5 раза больше реактивной мощности $S_{\text{НВ}}$, потребляемой им из сети в режиме *недовозбуждения*.

В большинстве случаев в *недовозбужденном* режиме требуются меньшие мощности, чем в *перевозбужденном*, и указанные значения отношения (П11.4) удовлетворяют эксплуатационным требованиям, но в некоторых случаях необходима большая мощность $S_{\text{НВ}}$. Этого можно достигнуть: 1) увеличением зазора, что, однако, приводит к удорожанию машины; 2) или при реализации режима с *отрицательным* током возбуждения. При этом в выражении (П11.2) $E_0 < 0$, вследствие чего $I_{\text{НВ}}$ увеличивается. Поскольку синхронный компенсатор по активной мощности загружен только потерями, то, согласно выражению (10.1) /с. 167/, он может работать устойчиво также с небольшим отрицательным возбуждением.

В ряде случаев в маловодные периоды для работы в режиме компенсаторов используются также синхронные генераторы гидроэлектростанций.

Вместо синхронного компенсатора может использоваться статический компенсатор реактивной мощности (СКРМ), который состоит из параллельно включаемых конденсаторных батарей и управляемого или насыщающегося реактора, используемого в качестве регулирующего элемента СКРМ [8, 9].

П11.2. Синхронные двигатели малой мощности

Общие сведения

Синхронные двигатели малой мощности, выполненные по классическому типу синхронной машины с электромагнитным возбуждением и пусковой обмоткой типа «беличьей клетки» (см. разд. 3, с. 207, сл.), имеют наиболее оптимальные рабочие и пусковые характеристики.

Однако такие двигатели практически не применяют в автоматических устройствах и приборах малой мощности, где энергетические характеристики не являются решающими. Основные причины заключаются в следующем: 1) для работы микродвигателя необходимо два источника питания – переменного и постоянного тока; 2) скользящий контакт кольца – щетки снижает надежность микродвигателя и усложняет его конструкцию; 3) требуется специальная пусковая схема, отключающая на период разгона обмотку возбуждения ротора от источника постоянного тока и подключающая ее к внешнему сопротивлению.

В схемах автоматики, приборах и бытовых устройствах малой мощности наибольшее распространение получили *бесконтактные* синхронные микродвигатели (их мощность в диапазоне от долей ватта до 1000 Вт), которые свободны от перечисленных недостатков. В зависимости от конструкции ротора, устройство и материал, которого в значительной мере определяют природу возникновения электромагнитного момента и рабочие свойства, эти микродвигатели можно подразделить на три основных типа: 1) с постоянными магнитами; 2) реактивные; 3) гистерезисные. Существуют также разновидности перечисленных типов микродвигателей.

Основные требования, предъявляемые к ним: высокая точность преобразования исходных величин; стабильность выходных характеристик; высокое быстродействие; высокая надёжность и др.

Статор этих микродвигателей не отличается от статоров обычных синхронных и асинхронных машин; его выполняют наборным из листовой электротехнической стали. В пазах статора располагают трехфазную или двухфазную распределенную обмотку, создающую вращающееся магнитное поле.

Общим свойством большинства микродвигателей, как и синхронных двигателей классического исполнения, является равенство в синхронном ре-

жиме скорости вращения ротора n и скорости n_1 первой гармоники магнитного поля статора, $n_1 = n = f_1/p$, об/с.

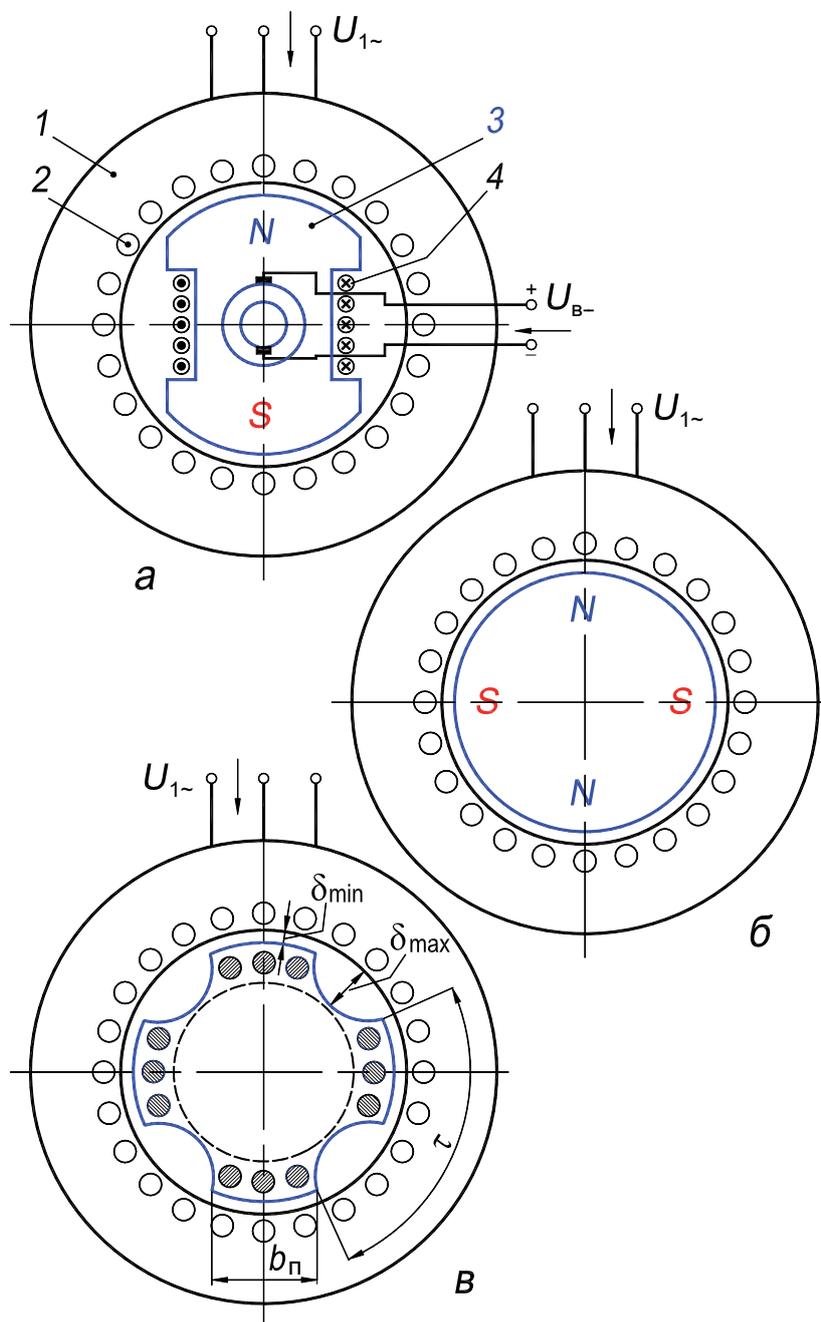


Рис. П11.3. Конструктивные схемы синхронных двигателей:

a – двигатель с возбуждением полюсов постоянным током ($2p = 2$);

б – двигатель с постоянными магнитами ($2p = 4$); *в* – реактивный двигатель ($2p = 4$)

Синхронный двигатель (рис. П11.3, *a*) нормального исполнения состоит из неподвижной части – статора 1, в пазах 2 которого размещается

трехфазная или двухфазная (редко однофазная) обмотка переменного тока, и вращающейся части – ротора 3, на полюсах которого размещается обмотка возбуждения 4, соединяющаяся посредством контактных колец и щеток с источником постоянного тока. Сравнительно редко встречаются синхронные двигатели с обратным расположением обмоток: на полюсах статора – обмотка возбуждения, в пазах ротора – обмотка переменного тока.

Статор синхронного двигателя по своему устройству ничем не отличается от статора обычной асинхронной машины. Ротор обычно имеет явно выраженные полюсы с размещёнными на них катушками обмотки постоянного тока. Принцип действия синхронного двигателя такого исполнения рассмотрен в Работе №4, разд. 3.2, с. 209, сл.

У синхронного микродвигателя с постоянными магнитами отсутствуют обмотка возбуждения и скользящие контакты (кольца и щетки) (рис. П11.3, б). Разноименные полюсы вращающегося поля статора и постоянного поля ротора притягиваются друг к другу и ротор вращается со скоростью поля статора под действием *магнитного* момента.

Синхронные реактивные двигатели (рис. П11.3, в) /термин 3, с. 13/ не имеют ни обмотки постоянного тока, ни постоянных магнитов, но зато всегда имеют явно выраженные полюсы (выступы) на роторе, которые вследствие неравенства его магнитной проводимости в различных направлениях увлекаются вращающимся магнитным полем под действием *реактивного* момента.

П11.2.1. Микродвигатели с постоянными магнитами

Принцип работы. Устройство. Принцип работы синхронных двигателей с постоянными магнитами основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля обмотки статора с полем постоянных магнитов, расположенных на роторе. Если числа пар полюсов статора и ротора равны, а скорости вращения полей одинаковы (синхронный режим), то возникает постоянное магнитное притяжение разноименных полюсов статора и ротора, что вызывает появление электромагнитного момента. Этот момент, называемый синхронным, *в среднем будет равен нулю*, если скорость ротора отлична от синхронной. Поэтому синхронный двигатель только с постоянными магнитами на роторе не имеет *пускового* момента (см. разд. 3.5.2, с. 225). Для пуска двигателя на роторе устраивают короткозамкнутую обмотку типа беличьей клетки, с помощью которой ротор двигателя под действием *асинхронного* момента разгоняется до скорости, близкой к синхронной,

и под действием *синхронного* момента входит в синхронизм. Таким образом, ротор двигателя должен сочетать в себе элементы синхронного двигателя (постоянные магниты) и асинхронного (короткозамкнутую обмотку) [5].

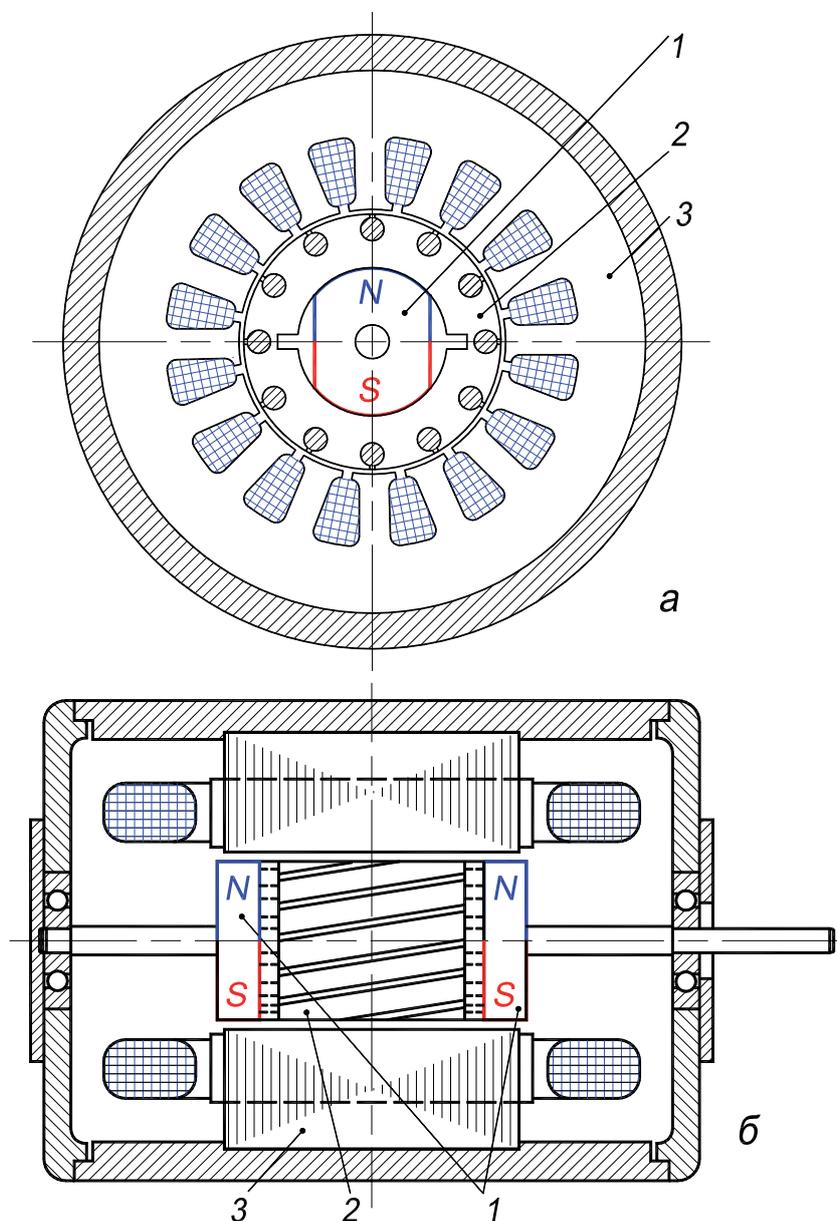


Рис. П11.4. Микродвигатель с постоянными магнитами:

- a* – с радиальным расположением магнита 1 и ротора 2;
- б* – с аксиальным расположением магнитов 1 и ротора 2

Наибольшее распространение на практике получили две конструкции синхронных двигателей с постоянными магнитами: с радиальным расположением постоянного магнита 1 и пусковой короткозамкнутой обмотки 2 (рис. П11.4,*a*) и с ак-

сиальным их расположением (рис. П11.4, б). Статоры 3 двигателей обоих конструктивных исполнений ничем не отличаются от статоров обычных асинхронных машин переменного тока: их пакеты набираются из изолированных листов электротехнической стали, а в пазах укладывается трехфазная или двухфазная обмотка. В первой конструктивной форме (рис. П11.4, а) пакет стали ротора выполнен в виде кольца, напрессованного на постоянный магнит. В кольцевом пакете имеются пазы для стержней беличьей клетки и *междуполосные прорези для исключения замыкания магнитного потока внутри ротора*. Во второй (рис. П11.4,б) пакет стали ротора – обычный для асинхронного двигателя; располагается он на валу рядом с постоянными магнитами. Роторы последней конструкции обычно применяют для многополюсных машин с малым внутренним диаметром статора в тех случаях, когда выполнение лучшей в электромагнитном отношении первой конструкции затруднительно.

При пуске двигатель работает как асинхронный – его асинхронный момент M_{ac} создается за счет взаимодействия вращающегося поля с наведенными им токами частоты скольжения $f_{2s} = f_1 s$ в короткозамкнутой обмотке ротора [4, с. 124]. При частоте вращения, близкой к синхронной, ротор за счет взаимодействия поля постоянных магнитов с вращающимся полем статора втягивается в синхронизм и в дальнейшем работает с синхронной частотой вращения (синхронный момент $M_{син}$), при этом величина $f_{2s} = 0$.

Величина синхронного момента микродвигателя в синхронном режиме в случае симметричной магнитной цепи и незначительного активного сопротивления обмотки статора определяется уравнением, известным из общей теории синхронных машин (см. Работа №4, разд. 3.2, с. 209, сл.):

$$M_{син} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\Omega_1 X_c} \sin \theta.$$

Особенность процесса пуска в ход микродвигателей состоит в том, что они пускаются в возбужденном состоянии, в то время как при пуске в ход двигателей с электромагнитным возбуждением обмотку возбуждения отключают от источника постоянного тока (см. Работа №4, разд. 3.5, с. 214, сл.).

В процессе разгона ротора под действием асинхронного момента M_{ac} [4, разд. 3.8, с. 124, сл.]

$$M_{ac} = (pm_1 U_1^2 R_2' / s) / 2\pi f_1 [(R_1 + \sigma R_2' / s)^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2] = f(s)$$

магнитное поле постоянных магнитов наводит в обмотках статора ЭДС, которая не уравновешивается напряжением источника питания, так как ее частота $f_2 = p \cdot n = p \cdot n_1(1 - s) = f_1(1 - s) = f_1 s_2$ при $n < n_1$ не равна частоте источника $f_1 = p \cdot n_1$. Под действием этой ЭДС в цепи обмотки статора возникают токи, которые взаимодействуют с полем ротора и создают тормозной (генераторный) момент M_T , направленный встречно полезному асинхронному моменту $M_{ас}$. На результирующей механической характеристике $M_{рез} = f(s)$ появляются провалы, которые ухудшают условия пуска. Например при моменте сопротивления на валу M_a ротор будет вращаться со скоростью, соответствующей скольжению s_a . Эта скорость далека от синхронной и синхронизации ротора с полем статора не наступит (рис. П11.5).

Двигатели с постоянными магнитами требуют особого внимания при проектировании, а именно, правильного выбора параметров двигателя и прежде всего степени возбужденности постоянных магнитов.

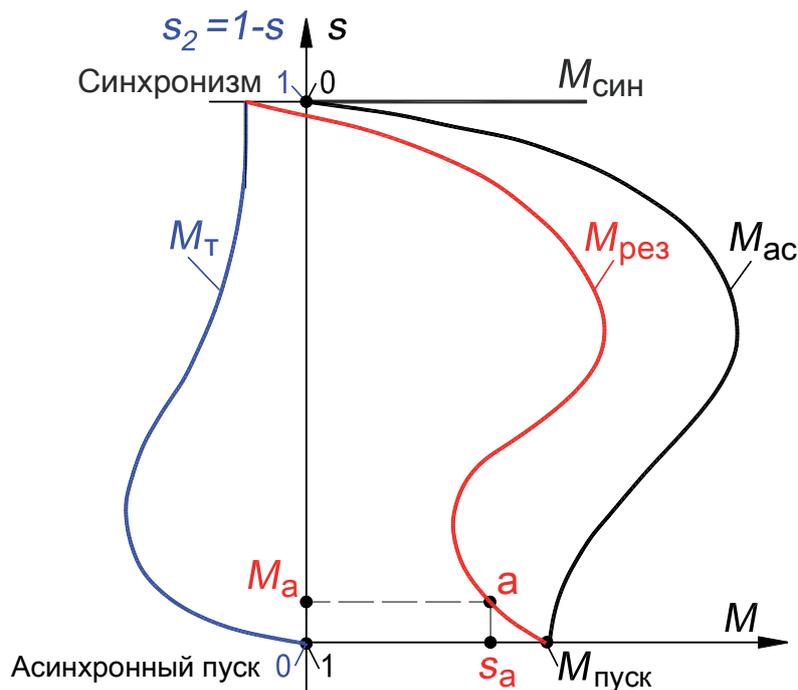


Рис. П11.5. Механическая характеристика микродвигателя с постоянными магнитами:

процесс пуска и перехода из асинхронного режима в синхронный режим

Дело в том, что увеличение возбужденности постоянных магнитов, с одной стороны, способствует повышению синхронного момента $M_{син}$ (а следова-

тельно, и механической мощности) в синхронном режиме, а с другой – способствует возрастанию тормозного момента M_T при пуске, то есть ухудшению пусковых свойств. При неправильном выборе степени возбужденности двигатель либо не будет пускаться (вследствие большого тормозного момента), либо не будет развивать должной механической мощности в синхронном режиме.

Для уменьшения тормозного момента M_T необходимо снижать степень возбужденности постоянных магнитов ротора, то есть уменьшать соотношение E_0/U_1 . Оптимальной является такая возбужденность постоянных магнитов ротора, которая обеспечит наилучшие характеристики в синхронном режиме при заданных пусковых характеристиках

К недостаткам двигателя с постоянными магнитами следует отнести: сравнительно невысокий коэффициент мощности; сложность изготовления ротора, которая увеличивается по мере уменьшения габаритов и скорости вращения двигателя (увеличения числа пар полюсов).

В настоящее время двигатели с постоянными магнитами выпускаются как в трехфазном, так и в однофазном (конденсаторном) исполнении. Мощность двигателей обычно не превосходит нескольких десятков ватт.

Ротор микродвигателя с постоянными магнитами изготавливается из высококачественных магнитных сплавов типа альни, алниси, алнико, магнико и др., относящихся к магнитотвердым материалам. Вследствие большой механической твердости и хрупкости таких железо-никель-алюминиевых сплавов они не поддаются непосредственной обработке режущим инструментом. Поэтому постоянным магнитам придают нужную форму путем фасонной отливки с последующей шлифовкой [1, 2].

П11.2.2. Синхронный реактивный микродвигатель

Принцип действия и устройство. Реактивный двигатель, в отличие от двигателя представленного рис. П11.3,*а* и рассмотренного в разд. 3.2, с. 209,сл., не имеет обмотки возбуждения (рис. П11.3,*в*). Его основной магнитный поток создается за счет намагничивающего тока обмотки статора. В двух- и трехфазных двигателях обмотка статора создает вращающееся магнитное поле.

Анализ выражения (11.4) /с. 210/ показывает, что при отсутствии магнитного потока возбуждения полюсов ротора ($E_0 = 0$) первое слагаемое, представляющее собой *основной* момент, равно нулю.

Таким образом, в реактивном двигателе действует лишь *реактивный* момент (см. с. 210)

$$M_p = \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta, \quad (11.5)$$

который и приводит ротор двигателя во вращение с синхронной частотой вращения n_1 .

Необходимым условием возникновения реактивного момента является неравенство индуктивных сопротивлений обмотки статора по продольной и поперечной осям ($X_d > X_q$), что имеет место лишь при явнополюсном роторе. Следовательно, *ротор реактивного двигателя обязательно должен быть явнополюсным* (рис. 4.2,*а*, с. 29) /термин 3, с. 13/.

Если ротор двигателя неявнополюсный ($X_d = X_q$) то реактивного момента не возникает, так как магнитное сопротивление ротора по продольной и поперечной осям одинаково (рис. 4.2,*б* на с. 29).

Конструктивно реактивный двигатель отличается от асинхронного лишь ротором. Наиболее часто в реактивных двигателях применяется ротор, устройство которого представлено на рис. П11.6,*а*. Этот ротор отличается от короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя, набираемого из пластин стали 2, лишь наличием впадин-вырезов 3 на цилиндрической поверхности, образующих явно выраженные полюсы. Короткозамкнутая обмотка ротора, выполненная по типу беличьей клетки 1, обеспечивает асинхронный пуск реактивного двигателя.

В реактивных двигателях, предназначенных для работы в схемах синхронной связи, ротор изготавливают из алюминия, в который при отливке закладывают полосы из стали (рис. П11.6, в, г).

В системах автоматики часто применяют однофазные реактивные двигатели. Обмотку статора этих двигателей выполняют такой же, как и у асинхронных конденсаторных электродвигателей, и включают по аналогичным схемам [4, с. 227, сл.].

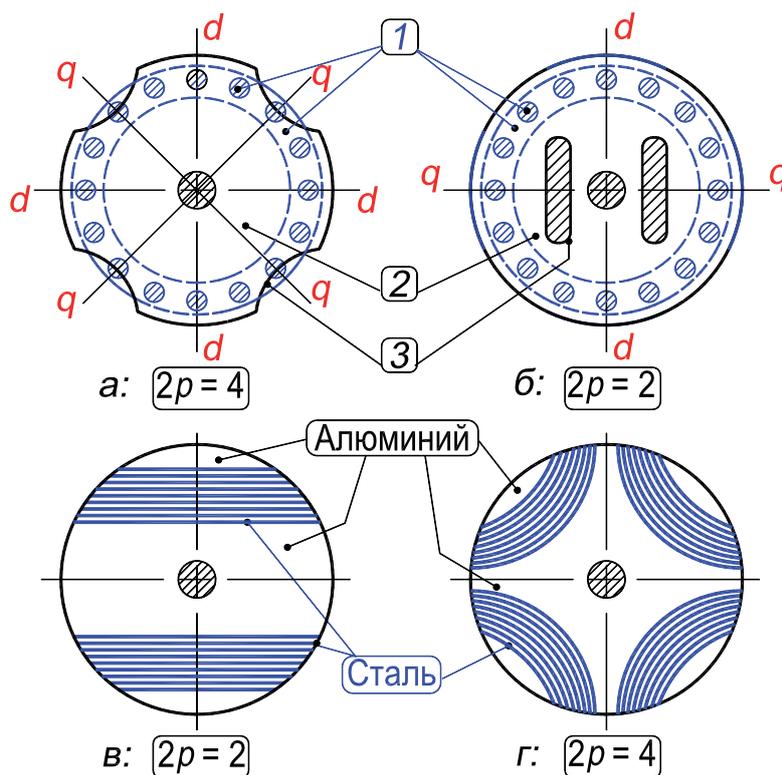


Рис. П11.6. Различные конструкции роторов синхронных реактивных двигателей

Вращающий момент реактивного двигателя. Появление реактивного момента M_p обусловлено разностью магнитных сопротивлений явнополюсной синхронной машины по продольной и поперечной осям (рис. 4.2, а; с. 29, сл.). Даже при отсутствии возбуждения в синхронной явнополюсной машине магнитное поле статора за счет притяжения явно выраженных полюсов ротора создает силы \bar{F} , тангенциальные составляющие которых \bar{F}_τ , стремятся повернуть ротор в положение, при котором магнитный поток статора имеет на своем пути минимальное магнитное сопротивление (рис. П11.7, б', б'', г', г''). Нормальные составляющие \bar{F}_n сил \bar{F} взаимно компенсируются.

Так как линии магнитного поля всегда стремятся замкнуться по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, то, очевидно, ротор с явно выраженными невозбужденными полюсами под действием сил поля всегда будет стремиться в положение «а» и «д» – положения устойчивого равновесия, в которых тангенциальные силы \overline{F}_T , создающие вращающий момент, равны нулю.

Если проследить за изменением тангенциальных сил \overline{F}_T , действующих на ротор при его повороте по часовой стрелке, то нетрудно убедиться в том, что тангенциальные силы, а следовательно, и вращающий реактивный момент M_p будут возрастать при повороте ротора от $\theta = 0$ до $\theta = 45^\circ$; далее, при повороте ротора от 45 до 90° , силы и момент будут уменьшаться и в положении «в», соответствующем $\theta = 90^\circ$, будут равны нулю; затем, при дальнейшем увеличении θ , изменят знак, так как полюсы ротора будут притягиваться уже к другим полюсам магнита, эквивалентного полю двигателя.

Анализ тангенциальных сил и момента, действующих на невозбужденный явно полюсный ротор, показывает, что они изменяются по закону $\sin 2\theta$ и зависят от разности магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям машины. Силы и моменты максимальны при $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ и равны нулю при $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Положениями устойчивого равновесия ротора будут положения «а» ($\theta = 0$) и «д» ($\theta = 180^\circ$); неустойчивого равновесия – «в» ($\theta = 90^\circ$ и $\theta = 270^\circ$).

В реальном синхронном реактивном двигателе (двигателе без возбуждения полюсов ротора) поле статора и ротор вращаются в пространстве с синхронной скоростью, однако зависимость вращающего реактивного момента M_p от угла θ будет точно такой же, как в рассмотренном случае, рис. П11.7.

Вращение ротора реактивного двигателя осуществляется под действием реактивного момента M_p . Из выражения, определяющего величину реактивного момента /см. (11.5), с. 210/, следует, что максимальное значение момента $M_{p \max}$ наступает при нагрузке, соответствующей углу $\theta_{кр} = 45^\circ$ (рис. П11.8, кривая 1).

Однако выражение (11.5) не учитывает влияния активного сопротивления обмотки статора на зависимость $M_p = f(\theta)$, которое в реактивных двигателях малой мощности довольно значительно. Под влиянием активного сопротивления обмотки статора максимальное значение реактивного момента наступает при $\theta_{кр} < 45^\circ$ ($\theta_{кр} = 30 \dots 40^\circ$). Это увеличивает крутизну кривой $M_p = f(\theta)$ в ее начальной части (рис. П11.8, кривая 2), а следовательно, повышает величину *удельного синхронизирующего момента* $M_{уд}$. Удельный синхронизирующий момент $M_{уд}$ – это момент, приходящийся на 1° угла θ и определяющий устойчивость работы реактивного двигателя, $M_{уд} = \Delta M_p / \Delta \theta$.

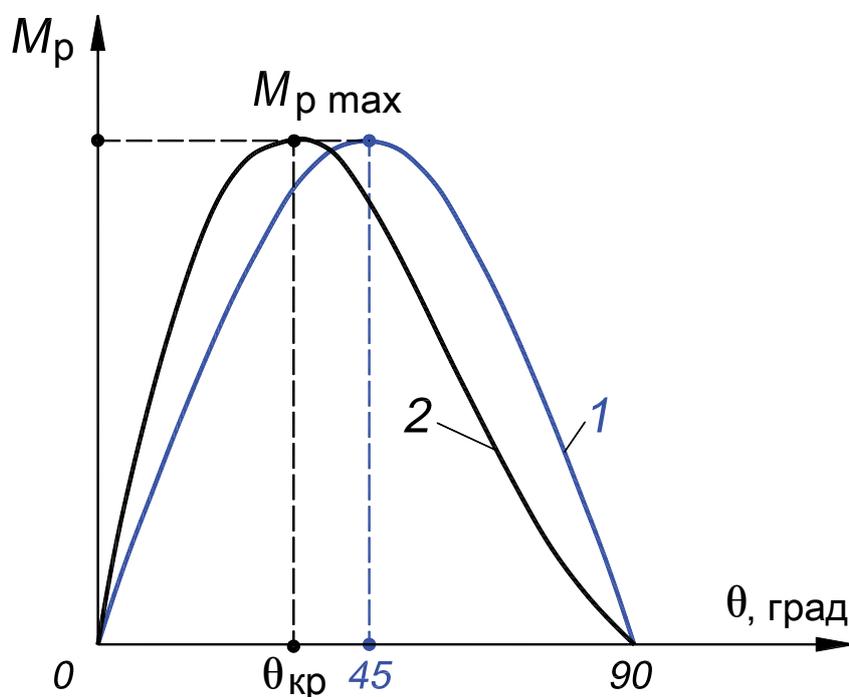


Рис. П11.8. Угловая характеристика реактивного двигателя

Максимальный момент $M_{p \max}$ реактивного двигателя принято называть *моментом выхода из синхронизма* $M_{вых}$. Если нагрузка на валу двигателя достигнет значения, при котором угол $\theta > \theta_{кр}$, произойдет «выпадение» двигателя из синхронизма. В этом случае ротор двигателя либо останавливается, либо продолжает вращаться асинхронно под действием электромагнитного момента, создаваемого токами пусковой короткозамкнутой обмотки.

Из выражения (11.5)/с. 249/ видно, что величина реактивного момента пропорциональна квадрату подводимого к двигателю напряжения ($M_p \equiv U_1^2$). Следовательно, реактивные двигатели чувствительны к колебаниям напряжения сети.

Представим индуктивные сопротивления обмотки статора по продольной X_d и поперечной X_q осям в виде

$$X_d = 2\pi f_1 L_d; \quad X_q = 2\pi f_1 L_q, \quad (\text{П11.5})$$

где L_d и L_q – индуктивности обмотки статора по продольной и по поперечной осям:

$$L_d = w_1^2 \Lambda_d; \quad L_q = w_1^2 \Lambda_q, \quad (\text{П11.6})$$

причем Λ_d и Λ_q – магнитные проводимости по осям d и q машины.

Подставив выражения (П11.5) и (П11.6) в (11.5), получим формулу реактивного момента:

$$M_p = \frac{mU_1^2}{4\pi f_1 w_1^2 \Omega_1} (R_{mq} - R_{md}) \sin 2\theta, \quad (\text{П11.7})$$

где $R_{md} = 1/\Lambda_d$ и $R_{mq} = 1/\Lambda_q$ — магнитные сопротивления по поперечной и продольной осям машины.

Из формулы (П11.7) следует, что реактивный момент пропорционален разности магнитных сопротивлений по поперечной R_{mq} и продольной R_{md} осям машины.

С углублением впадин на роторе (см. рис. П11.6,а) возрастает разность магнитных сопротивлений по поперечной и продольной осям и реактивный момент увеличивается, а следовательно, увеличивается максимальный синхронный реактивный момент $M_{p \max}$, то есть и момент выхода $M_{\text{вых}}$ из синхронизма.

Однако углубление впадин на роторе целесообразно лишь до определенного предела, так как с увеличением глубины впадин возрастает средняя величина воздушного зазора δ . Это ведет к уменьшению вращающего момента в пусковом асинхронном режиме $M_{\text{ас}}$. Последнее приводит к снижению пускового момента $M_{\text{п}}$ и момента входа $M_{\text{вх}}$ двигателя в синхронизм – наибольшего момента сопротивления, при котором ротор двигателя еще втягивается в синхронизм. Для втягивания в синхронизм необходима частота вращения ротора не менее $0,95n_1$, то есть скольжение $s \leq 0,05$ (рис. П11.9,а).

На рис. П11.9,б показан ряд зависимостей электромагнитного момента от скольжения при разных значениях активного сопротивления пусковой клетки, причем $R'_{п.к} < R''_{п.к} < R'''_{п.к}$. Величина момента входа в синхронизм $M_{вх}$ в синхронизм определяется скольжением $s = 0,05$. Из сделанных на рисунке построений видно, что чем больше активное сопротивление пусковой клетки, тем меньше момент входа в синхронизм $M_{вх}$.

Установлено, что наилучшие соотношения между максимальным моментом $M_{р\max}$ (моментом выхода $M_{вых}$ из синхронизма), начальным пусковым моментом $M_{п}$ и моментом входа в синхронизм $M_{вх}$ получаются при следующих отношениях полюсной дуги $b_{п}$ к полюсному делению τ и максимального воздушного зазора δ_{\max} к минимальному δ_{\min} (см. рис. П11.3,в, с. 243):

$$b_{п}/\tau = 0,5 \dots 0,6; \quad \delta_{\max}/\delta_{\min} = 10 \dots 12.$$

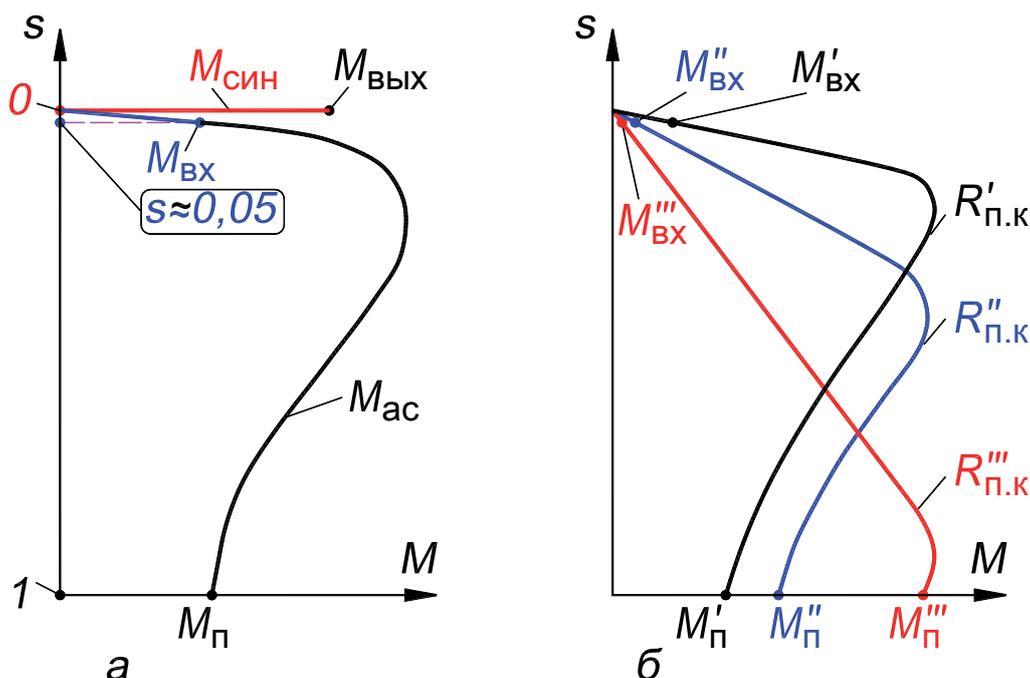


Рис. П11.9. Зависимость электромагнитного момента M от скольжения s :

a – иллюстрация моментов в процессе пуска и перехода двигателя

из асинхронного режима в синхронный режим;

б – влияние сопротивления $R_{п.к}$ пусковой клетки на моменты $M_{п}$ и $M_{вх}$

Существенный недостаток реактивных двигателей – низкий коэффициент мощности, что обусловлено значительной величиной намагничивающей составляющей тока статора.

В реактивном двигателе магнитный поток создается исключительно током статора; кроме того, среднее значение воздушного зазора из-за наличия впадин на роторе достаточно велико, что ведет к повышению сопротивления магнитной цепи машины. Указанные обстоятельства являются также причиной низкого КПД, который в двигателях мощностью в несколько десятков ватт обычно составляет 30...40 %, а в двигателях мощностью до 10 Вт – не превышает 20 %.

По габаритам реактивные двигатели больше синхронных и асинхронных двигателей обычного типа, что объясняется низким КПД, малым $\cos \varphi$ и небольшой величиной реактивного момента.

Для улучшения пусковых и рабочих свойств изготавливаются синхронные реактивные двигатели, у которых значительная разность магнитных сопротивлений по поперечной и продольной осям создается не за счет глубины *межполюсных впадин-вырезов* 3 (рис. П11.6,а), а за счет *внутренних вырезов* 3 в шихтованном сердечнике ротора (рис. П11.6,б). Эти вырезы обычно заливаются алюминием.

П11.2.3. Тихоходный редукторный двигатель реактивного типа

Синхронные двигатели этого типа, дают возможность получать практически сколь угодно малую синхронную скорость вращения. Впервые такие двигатели были предложены в США инженерами фирмы Вестингауз (Westinghouse) Л. Чеббом (L. Chubb) и Т. Уотсом (T. Watts).

Редукторные двигатели весьма разнообразны как по устройству, так и по принципу действия. Их особенностью является то, что они работают не на первой (основной), а на высших гармониках вращающегося магнитного поля, частота вращения которых в пространстве значительно меньше частоты вращения первой гармоники этого поля⁵. Рассмотрим редукторный двигатель реактивного типа. На рис. П11.10 представлена магнитная система такого двигателя. Статор и ротор двигателя набирают из изолированных листов электротехнической стали, в которых делают открытые пазы (на рисунке пазы полукруглые, в реальных двигателях они прямоугольные).

⁵ Пространственная гармоника ν вращающегося поля изменяется с частотой f_ν , $f_\nu = \nu f_1$, но имеет в ν раз большее число пар полюсов по сравнению с 1-й гармоникой поля, $p_\nu = \nu p_1$:

$$n_\nu = 60f_1/\nu p_1 = n_1/\nu$$

В пазах статора располагают трехфазную (или двухфазную) обмотку, которая создает вращающееся магнитное поле. Число зубцов статора $Z_1 = 16$ (обозначены $1, \dots, 16$), а ротора $Z_2 = 18$ (обозначены $1', \dots, 18'$). В общем случае разность $Z_2 - Z_1$ должна быть равна четному числу.

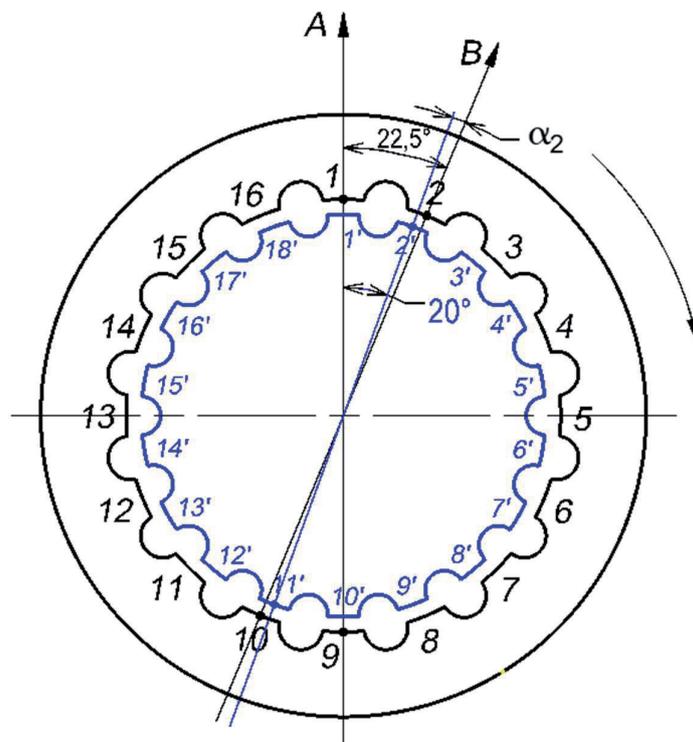


Рис. П11.10. Схема устройства редукторного двигателя реактивного типа

Рассмотрим принцип действия редукторного двигателя упрощенно, без разложения поля на высшие гармоники. Допустим, что поток статора вращается по часовой стрелке и в рассматриваемый момент направлен по оси A проходящей через зубцы статора 1 и 9 . Ротор при этом занимает положение, соответствующее минимальному магнитному сопротивлению на пути потока; его зубцы $1'$ и $10'$ располагаются против зубцов статора 1 и 9 . В следующий момент времени магнитный поток, повернувшись на одно зубцовое деление статора, соответствующее углу $\alpha_1 = 360^\circ/Z_1$, будет направлен по оси B . Ротор, стремясь занять положение, при котором сопротивление потоку было бы минимальным, также поворачивается на некоторый угол α_2 , так что под зубцами статора 2 и 10 расположатся зубцы ротора $2'$ и $11'$. При этом угол поворота ротора α_2 будет меньше угла поворота магнитного потока статора α_1 на величину $360^\circ/Z_2$:

$$\alpha_2 = 360^\circ/Z_1 - 360^\circ/Z_2. \quad (\text{П11.8})$$

Для конструкции, представленной на рис. П11.10, угол поворота ротора $\alpha_2 = 360^\circ/16 - 360^\circ/18 = 2,5^\circ$.

Таким образом, при повороте потока статора на 360° (на 16 зубцовых делений статора) ротор повернется лишь на 40° , то есть ротор двигателя будет вращаться с частотой, в девять ($360/40 = 9$) раз меньшей частоты вращения потока статора.

В общем случае частота вращения ротора

$$n_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2} \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (\text{П11.9})$$

где p – число пар полюсов обмотки статора.

Например, если обмотка статора двигателя (рис. П11.10) двухполюсная ($2p = 2$) и включена в сеть с частотой $f_1 = 50$ Гц, то частота вращения ротора

$$n_2 = \frac{18 - 1}{18} \cdot \frac{60 \cdot 50}{1} = 333,33 \text{ об/мин.}$$

Обычно реактивные двигатели с зубчатым ротором изготавливают на малые частоты вращения. Например, при $f_1 = 50$ Гц, $2p = 2$, $Z_1 = 598$; $Z_2 = 600$ частота вращения ротора

$$n_2 = \frac{600 - 5}{600} \cdot \frac{60 \cdot 50}{1} = 10 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, при питании от сети промышленной частоты рассматриваемый двигатель дает возможность без каких-либо дополнительных устройств (редукторов) получить небольшие частоты вращения. Именно благодаря этому свойству двигателя называют редукторными.

Если ротор редукторного реактивного двигателя выполнить *кольцеобразной* формы с зубцами на *внешней* и *внутренней* поверхностях и внутри такого ротора расположить второй ротор с внешними зубцами, то можно получить двойную, а в общем случае – при нескольких концентрических роторах – многократную редукцию.

По такому принципу выполняются электрические часы, у которых внутренний ротор связан с часовой, промежуточный – с минуткой, а внешний – с секундной стрелками.

Важным преимуществом редукторного двигателя является постоянство скорости вращения в пределах одного оборота.

Существующие разновидности редукторных реактивных двигателей, применяются в случаях, когда необходимы пониженные скорости вращения (например, электрические часы и ряд устройств автоматики), а также при использовании источников с повышенной частотой питания $f = 400 \dots 1000$ Гц.

П11.2.4. Гистерезисный синхронный микродвигатель

В специализированном электроприводе малой мощности и системах автоматического управления широкое применение получили гистерезисные синхронные микродвигатели (термин 2, с. 13). Эти двигатели по сравнению с синхронными реактивными имеют ряд преимуществ: меньшие габариты и потери, более высокий коэффициент мощности.

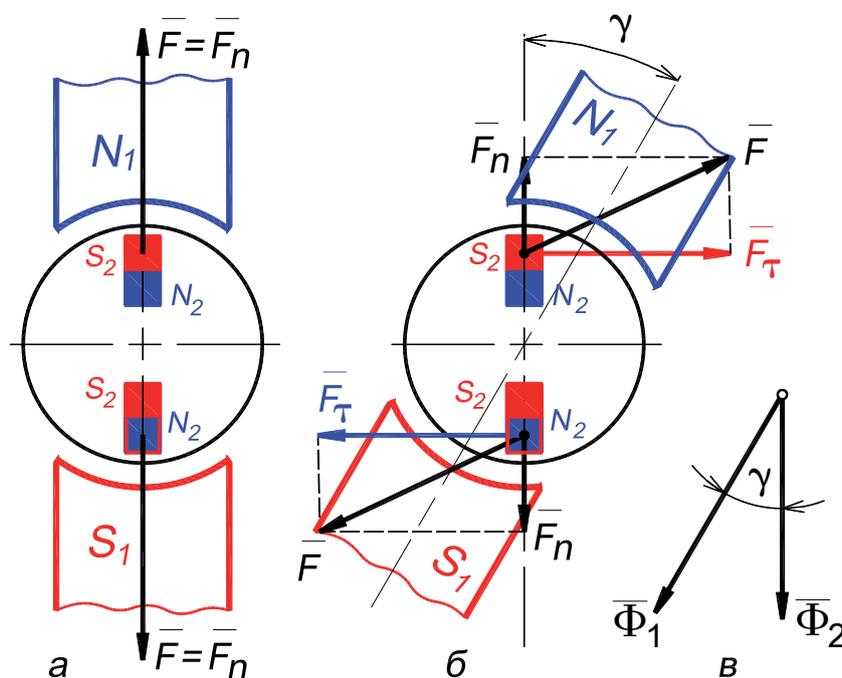


Рис. П11.11. Иллюстрация возникновения гистерезисного момента

Работа гистерезисного двигателя основана на действии *гистерезисного момента*. Возникновение этого момента иллюстрируется на рис. П11.11, где показаны два полюса постоянного магнита N_1-S_1 (поле статора); между ними расположен цилиндр (ротор) из магнитно-твердого материала (см. с. 248). Под действием внешнего магнитного поля ротор намагничивается. На стороне, обращенной к северному полюсу N_1 постоянного магнита, возбуждается южный полюс S_2 , а на стороне ротора, обращенной к южному полюсу S_1 постоянного магнита, –

северный полюс N_2 . На ротор начинают действовать силы направленные радиально к его поверхности (рис. П11.11,*а*). Если полюсы постоянного магнита N_1-S_1 вращать вокруг ротора, то вследствие явления магнитного запаздывания (гистерезиса) активная часть ротора не будет перемагничиваться одновременно с изменением направления вращающегося магнитного поля, и между осью поля ротора и осью внешнего поля появится угол γ . Силы \bar{F} , действующие на ротор, изменят свое направление также на угол γ . а тангенциальные составляющие этих сил \bar{F}_T создадут гистерезисный момент M_T (рис. П11.11,*б*).

Явление магнитного запаздывания заключается в том, что частицы ферромагнитного материала (помещенного во внешнее магнитное поле), представляющие собой элементарные магниты, стремятся ориентироваться в соответствии с направлением внешнего поля. Если внешнее поле изменит свое направление, то элементарные частицы меняют свою ориентацию. Однако повороту элементарных частиц препятствуют в магнитно-твердых материалах внутренние силы молекулярного трения. Для изменения направления этих частиц необходима определенная МДС, вследствие чего перемагничивание ротора несколько отстает от изменения направления внешнего поля. Это отставание (магнитное запаздывание) характеризуется углом гистерезисного сдвига γ между вектором магнитного потока ротора $\bar{\Phi}_2$ и вектором магнитного потока обмотки статора $\bar{\Phi}_1$ (рис. П11.11,*в*). Величина этого угла зависит исключительно от магнитных свойств материала ротора.

На преодоление сил молекулярного трения расходуется часть подводимой мощности, которая составляет *гистерезисные потери* P_T . Величина этих потерь зависит от частоты перемагничивания ротора $f_{2s} = f_1 \cdot s$ [4, формула (10.5), с. 104], а следовательно, от скольжения:

$$P_T = s \cdot P_{T,к}, \quad (\text{П11.10})$$

где $P_{T,к}$ – величина гистерезисных потерь при неподвижном роторе (при $s = 1$), то есть в режиме короткого замыкания.

Так как электромагнитная мощность, передаваемая ротору, равна потерям в роторе, деленным на скольжение [4, разд. 3.6.1, с. 116, сл.]:

$$P_{эм} = P_T / s = P_{T,к}, \quad (\text{П11.11})$$

а вращающий момент – электромагнитной мощности, деленной на синхронную угловую скорость:

$$M_{\Gamma} = P_{\text{эм}}/\Omega_1 = P_{\Gamma,к}/\Omega_1, \quad (\text{П11.12})$$

то, очевидно, величина гистерезисного момента не зависит от частоты вращения ротора (скольжения). График $M_{\Gamma} = f(s)$ представляет собой прямую, параллельную оси ординат (рис. П11.12).

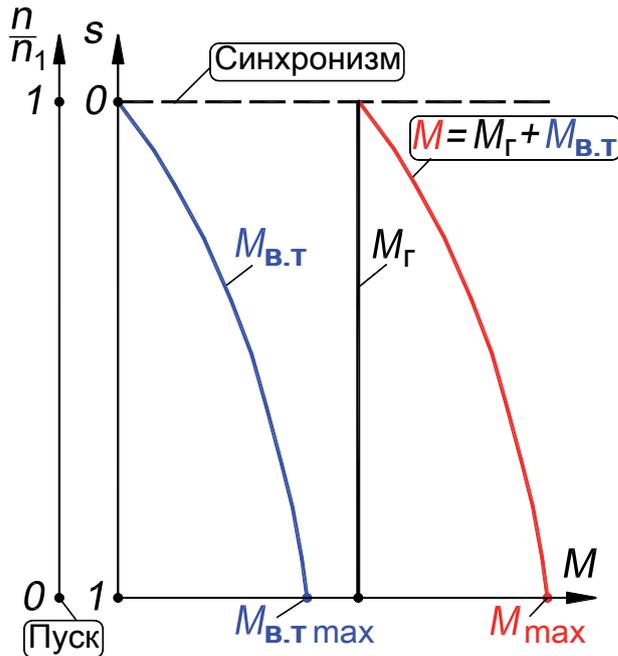


Рис. П11.12. Механические характеристики гистерезисного двигателя

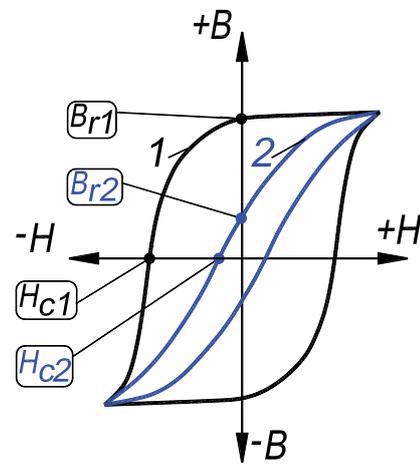


Рис. П11.13. Петля гистерезиса обычной стали (2) и сплава викаллой (1)

Величина угла гистерезисного сдвига γ зависит от ширины петли гистерезиса: чем шире петля гистерезиса магнитного материала, тем больше угол гистерезисного сдвига. На рис. П11.13 представлены две петли гистерезиса: сплава *викаллой* (кривая 1) и *обычной стали* (кривая 2). $B_{r1} > B_{r2}$ – остаточная индукция этих материалов; $[H_{c1}] > [H_{c2}]$ – коэрцитивная сила.

Применение обычной стали для изготовления ротора не обеспечивает получение гистерезисного момента достаточной величины. Только магнитно-твердые материалы (см. с. 248), такие, как сплавы типа *викаллой*, дают возможность получить большой гистерезисный момент. Роторы гистерезисных двигателей обычно делают сборными. Магнитно-твердая часть выполняется в виде шихтованного или массивного кольца 4, размещающегося на втулке 5, жестко насаженной на вал 6 (рис. П11.14).

На рис. П11.14 показано устройство гистерезисного двигателя. В корпус 1 запрессован шихтованный сердечник статора 3 с обмоткой 2. Ротор двигателя сборный, он состоит из магнитно-твердого кольца 4, втулки 5 и вала 6.

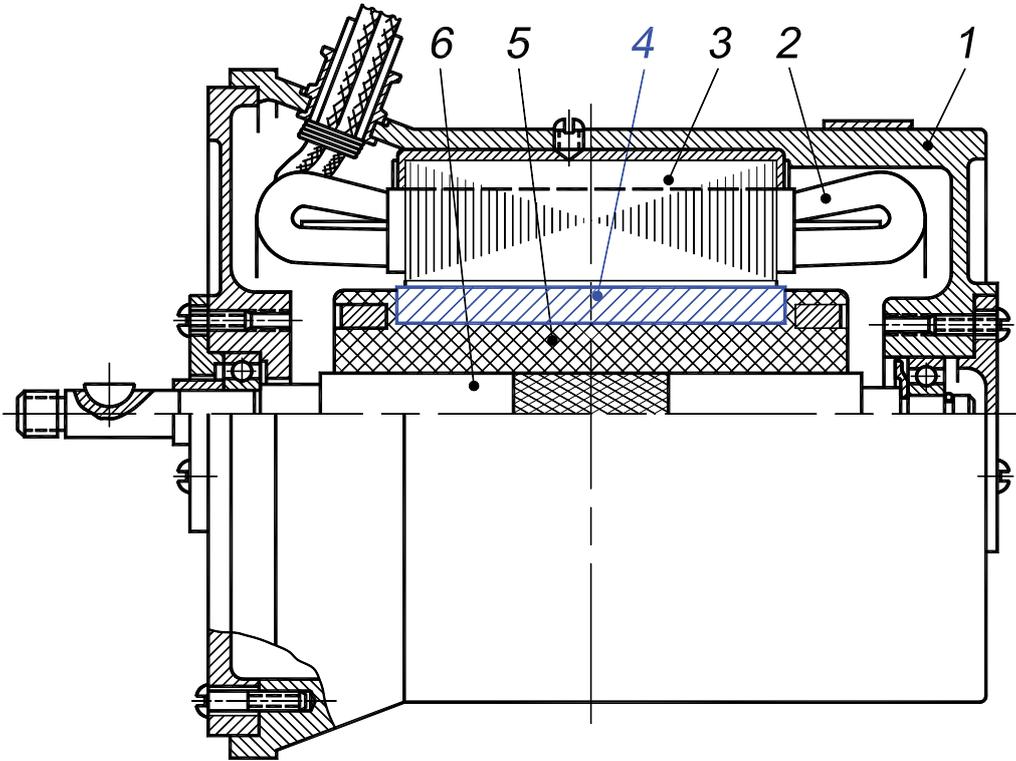


Рис. П11.14. Устройство гистерезисного синхронного двигателя

В машинах с массивным ротором вращающееся поле статора наводит в роторе значительные вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с полем статора возникает электромагнитный момент $M_{в.т}$, величина которого пропорциональна скольжению:

$$M_{в.т} = s \cdot P_{в.т.к} / \Omega_1, \quad (\text{П11.13})$$

где $P_{в.т.к}$ – потери на вихревые токи в роторе при $s = 1$, то есть в режиме короткого замыкания, Вт; Ω_1 – угловая синхронная скорость поля, рад/с.

Наибольшей величины момент $M_{в.т \max}$ достигает при неподвижном роторе ($s = 1$), то есть в момент пуска электродвигателя. Затем, по мере возрастания частоты вращения (уменьшения скольжения), момент $M_{в.т}$ убывает (см. рис. П11.12), при синхронизме он становится равным нулю.

Таким образом, электромагнитный вращающий момент гистерезисного двигателя создается совместным действием двух моментов: гистерезисного M_{Γ} (П11.12) и вихревых токов $M_{в.т}$ (П11.13):

$$M = M_{\Gamma} + M_{в.т} = P_{\Gamma.к} / \Omega_1 + s P_{в.т.к} / \Omega_1. \quad (\text{П11.14})$$

На рис. П11.12 представлена зависимость результирующего момента гистерезисного электродвигателя от скольжения: $M_{\Gamma} = f(s)$. Характер этой кривой зависит от соотношения $M_{в.т}$ и M_{Γ} .

Гистерезисный двигатель может работать с синхронной и асинхронной частотами вращения. Однако работа двигателя в асинхронном режиме неэкономична, так как связана со значительными потерями на перемагничивание ротора, величина которых возрастает с увеличением скольжения. Из приведенных на рис. П11.15 рабочих характеристик видно, что при переходе гистерезисного двигателя в асинхронный режим его КПД η резко снижается.

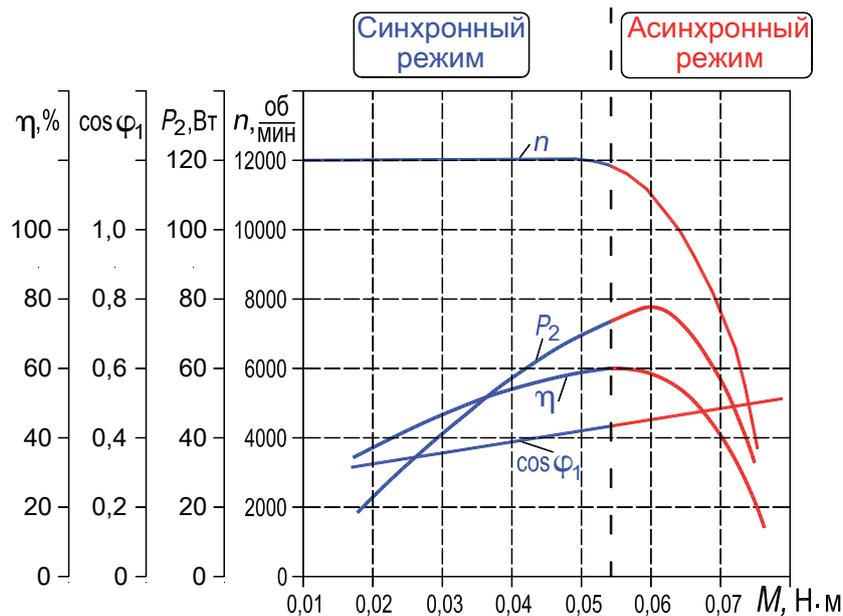


Рис. П11.15. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя

Достоинства гистерезисных двигателей – простота конструкции и надежность в работе, большой пусковой момент, плавность входа в синхронизм, сравнительно высокий КПД, бесшумность в работе, малое изменение тока от пуска до номинальной нагрузки ($I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 1,3 \dots 1,4$).

Недостатки гистерезисных двигателей – низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi_1 = 0,4 \dots 0,5$) и сравнительно высокая стоимость. Кроме того, гистерезис-

ные двигатели при резких колебаниях нагрузки склонны к качаниям, что создает неравномерности хода (вращения). Объясняется это отсутствием у гистерезисных двигателей пусковой клетки, которая при резких изменениях нагрузки оказывает на ротор успокаивающее (демпфирующее) действие. Наиболее сильные качания наблюдаются у шихтованного ротора, в котором вихревые токи сильно ограничены. Вызываемая качаниями неравномерность вращения ограничивает области применения гистерезисных двигателей.

Разница между двигателями с постоянными магнитами и гистерезисными состоит в том, что у первых ротор подвергается специальному предварительному намагничиванию, а у вторых ротор намагничивается полем статора двигателя.

Гистерезисные двигатели имеют лучшие показатели, чем реактивные, и выпускаются серийно на мощности до 300...400 Вт в трехфазном и однофазном исполнении на промышленную (50 Гц) и на повышенные (400, 500 Гц) частоты.

П11.2.5. Синхронно-импульсные шаговые двигатели

Шаговые, или импульсные, синхронные двигатели служат для преобразования электромагнитных импульсов в дискретные угловые или линейные перемещения – *шаги* [12]. Такие двигатели находят широкое применение в системах *программного управления* электроприводом.

На рис. П11.16 приведён реактивный шаговый двигатель, имеющий сосредоточенные обмотки на статоре, размещенные на выступающих полюсах.

На статоре расположены шесть выступающих полюсов. Обмотки возбуждения противоположных полюсов соединяются последовательно и присоединяются к источнику постоянного тока через *механический* или *электронный* коммутатор. Ротор выполняется одноосным без обмотки. При подаче постоянного тока возбуждения (импульса) в обмотки полюсов, например 1-1, ротор располагается под действием реактивного момента по оси этих полюсов (1-е положение, рис. П11.16, а). Если затем возбудить полюсы 2-2, сняв предварительно возбуждение с полюсов 1-1, то ротор повернется в направлении полюсов 2-2 на угол 60° и займет 2-е положение (рис. П11.16, б). После этого снимается возбуждение с полюсов 2-2 и затем возбуждаются полюсы 3-3 ротор поворачивается еще на 60° и занимает 3-е положение, совпадающее с положением оси полюсов 3-3 (рис. П11.16, в). Изменяя дальше в той же последовательности возбуждение полюсов статора, можно заставить ротор за один оборот сделать 6 шагов.

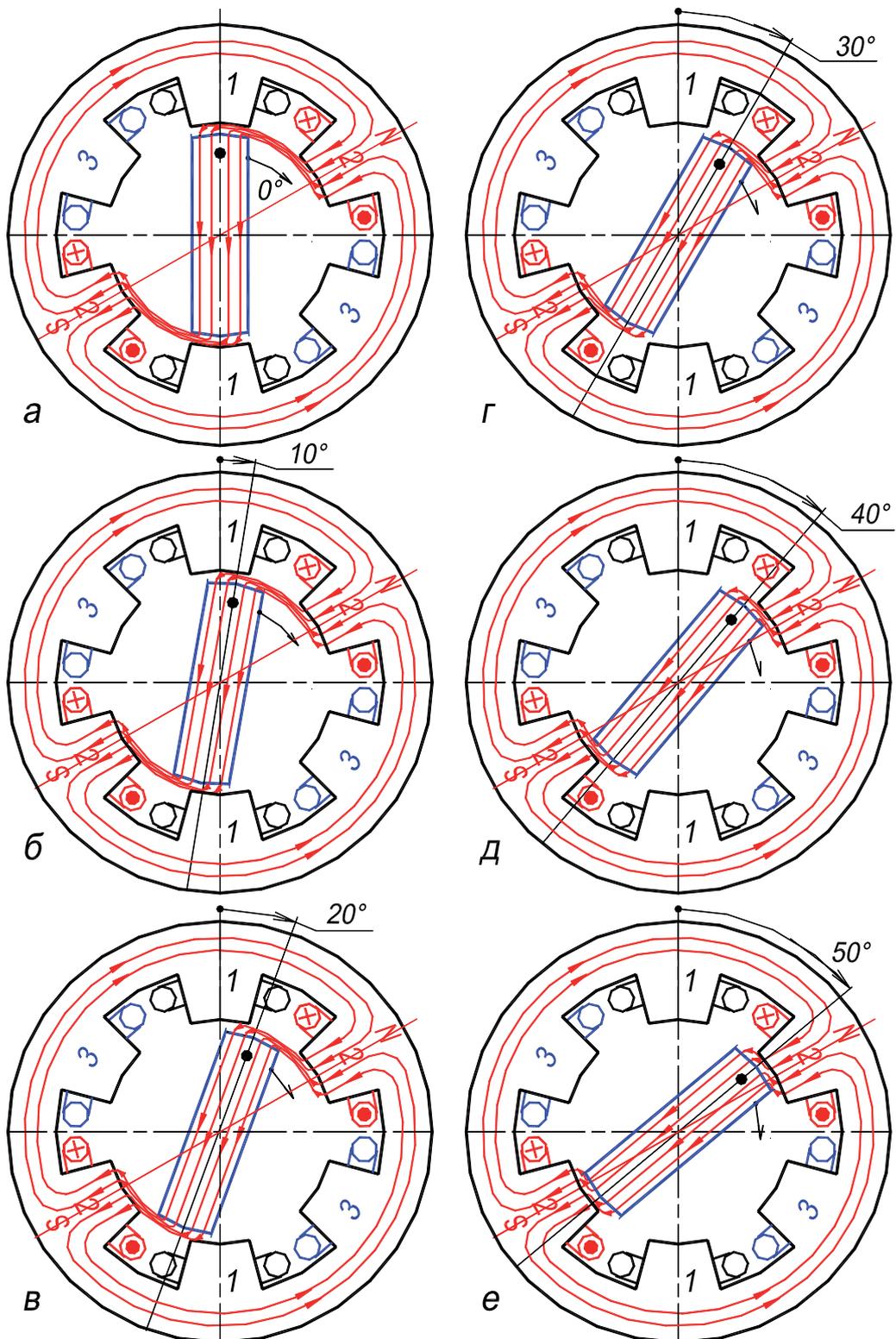


Рис. П11.17 Процесс выполнения одного шага (60°) двигателя от одного устойчивого положения ротора (см. рис. П11.16,*а*) к другому (рис. П11.16,*б*); распределение силовых линий изображено упрощенно

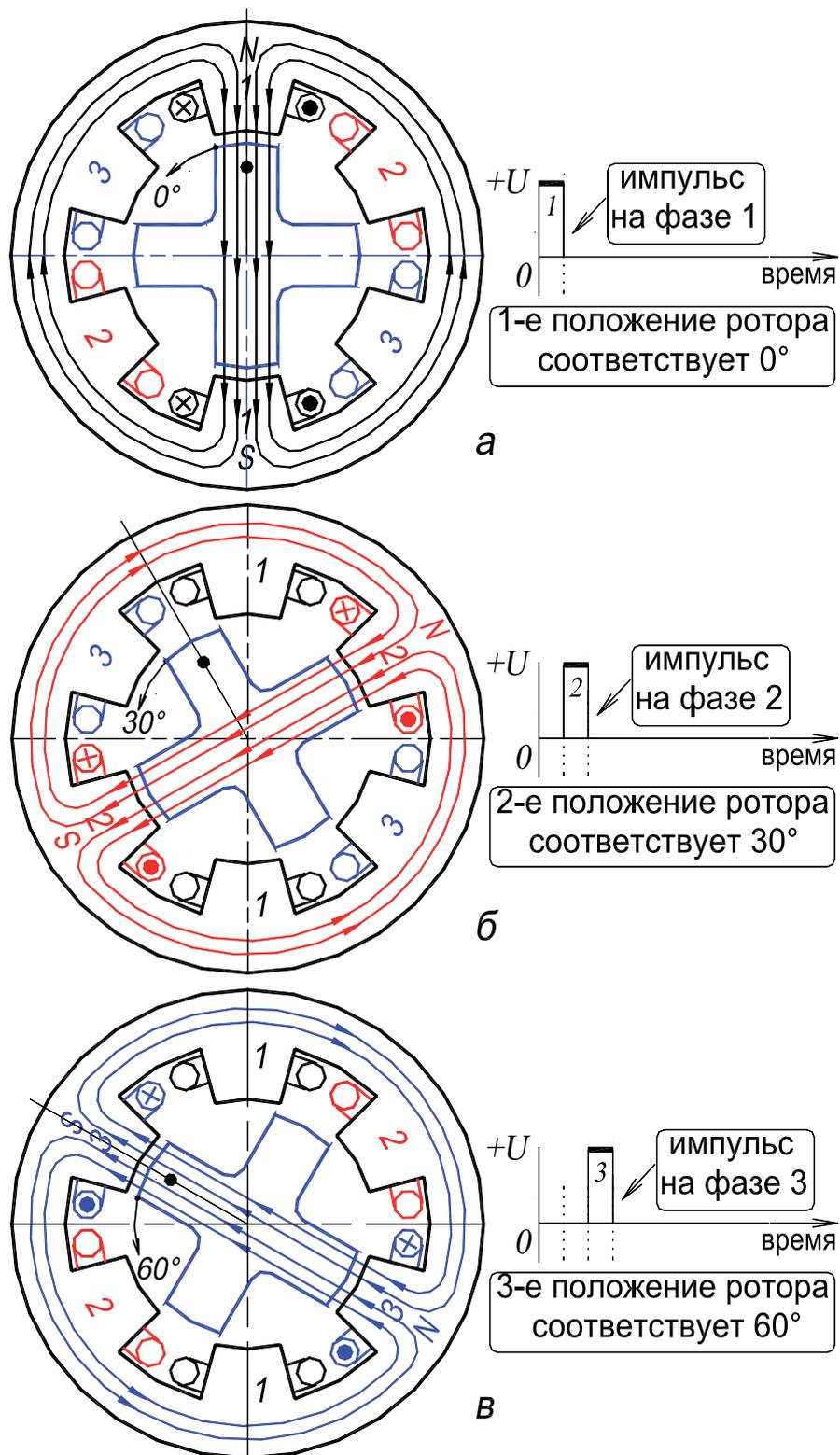


Рис. П11.18. Реактивный шаговый двигатель с двухосным ротором, шаг 30°; импульсы подаются на полюсы последовательно: 1-1, 2-2, 3-3, 1-1, etc.

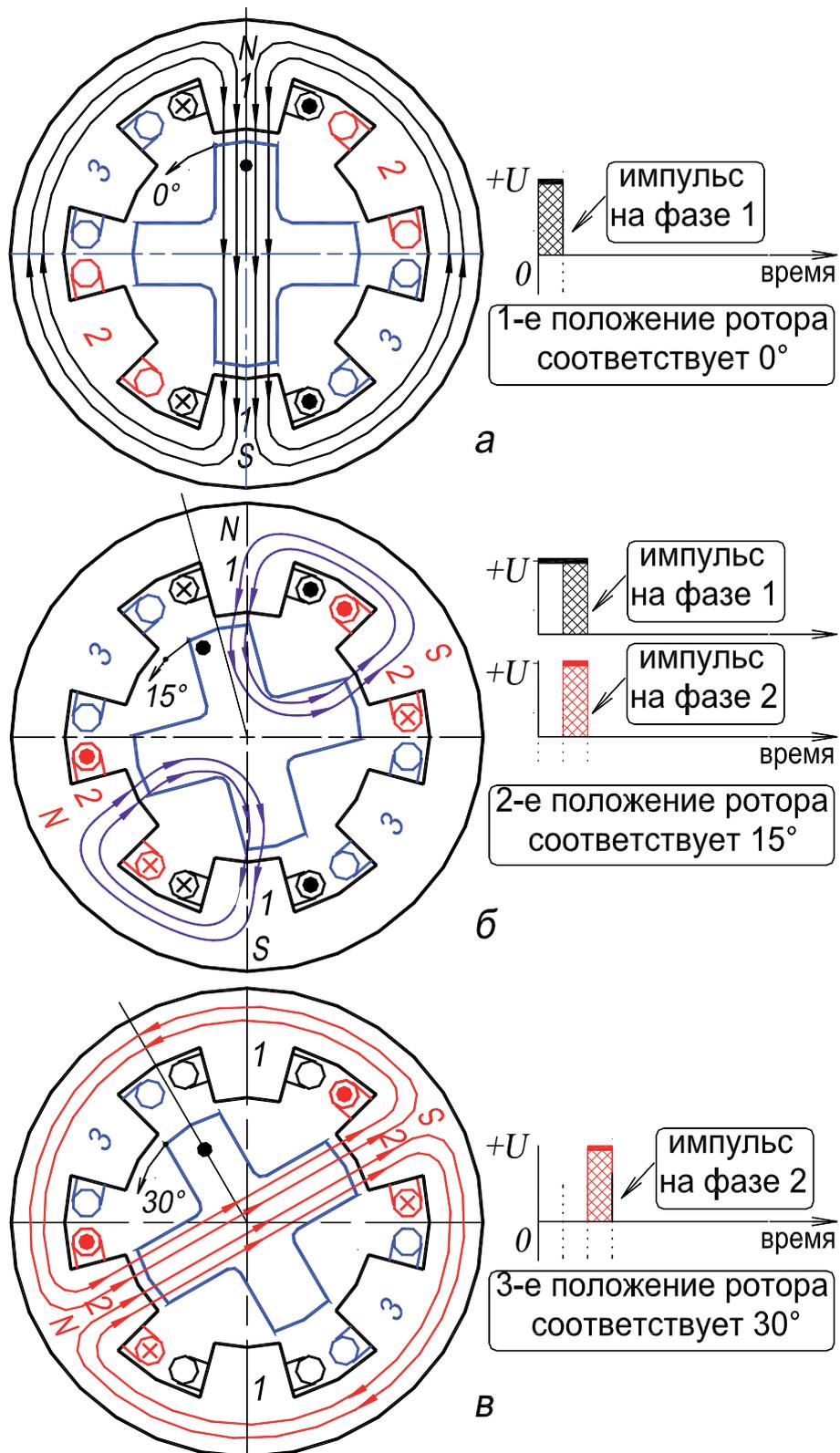


Рис. П11.19. Реактивный шаговый двигатель с двухосным ротором, шаг 15°; импульсы подаются на полюсы последовательно: 1-1, 1-1 и 2-2, 2-2 и 3-3, 3-3, etc.

Поворот ротора в пределах каждого шага от одного устойчивого положения к другому обусловлен стремлением силовых линий магнитного поля замыкаться по пути с минимальным магнитным сопротивлением. Рис. П11.17 иллюстрирует переход ротора от 1-го устойчивого положения (см. рис. П11.16,*а*) ко 2-му (рис. П11.16,*б*). По мере выполнения шага уменьшается длина пути по которому замыкаются эти линии в воздушном зазоре.

Если ротор двигателя выполнить двухосным крестообразным (рис. П11.18), и возбуждать полюсы в порядке соответствующем рис. П11.16, то при переходе от одного импульса возбуждения к другому ротор будет поворачиваться на угол 30° и сделает за один оборот ротора 12 шагов.

Если у двигателя, представленного на рис. П11.18, поочередно возбуждать неравные группы обмоток так, как показано на рис. П11.19, то ротор будет поворачиваться на угол 15° и будет делать за один оборот ротора 24 шага. Дальнейшее уменьшение шага двигателя можно достигнуть за счет увеличения числа полюсов на роторе или путем объединения в одном двигателе нескольких независимых статоров и роторов, повернутых друг относительно друга на соответствующий угол, а также за счет выполнения зубцов на полюсных выступах статора и ротора. Существуют разновидности двигателей с шагом 1° , $1,8^\circ$ и др.

Различные типы шаговых двигателей используются в периферийных устройствах компьютеров, в станках с числовым программным управлением и др.

На рис. П11.20 приведены фотографии шагового двигателя, который использовался для привода магнитных дисков размером 5,25 дюйма. Данный шаговый двигатель выполнял функцию перемещения магнитной головки по пазу в дискете, через который считывалась вся информация с магнитного диска.

На статоре двигателя расположена 4-фазная обмотка. Принцип работы шагового двигателя следующий: поочередно на каждую из фаз подается импульс напряжения положительной полярности. При подаче импульса ротор перемещается на один шаг, составляющий $1,8^\circ$. За один оборот ротор выполняет 200 шагов.

Система управления двигателем выполнена на базе микроконтроллера (приведена на web-странице <http://avrlab.com/node/60>). В соответствии с управляющей программой из портов микроконтроллера выдаются четыре бита (импульса) в следующей последовательности: 1000, 0100, 0010, 0001, которые поступают на транзисторный усилитель, а затем на фазы обмотки статора *A, B, C, D*.



Рис. П11.20. Фотографии шагового двигателя для привода магнитных дисков:
a – общий вид; *б* – в разобранном виде

К шаговым синхронным двигателям предъявляются обычно следующие требования: 1) максимальное быстродействие; 2) возможность получения шага порядка нескольких градусов или долей градуса; 3) максимальное использование активных материалов для создания синхронизирующего момента, способствующего быстрой стабилизации шага; 4) демпфирование свободных колебаний в процессе отработки шага; 5) минимальная угловая ошибка, вносимая в работу системы; 6) недопустимость накопления ошибки с увеличением числа отработанных шагов; 7) минимальное число отдельно коммутируемых обмоток управления и 8) надежность в эксплуатации.

Наибольшую частоту следования импульсов, при которой возможны пуск и остановка двигателя без потери шага, называют *приемистостью* двигателя. Эта частота в современных шаговых двигателях составляет от 10 до 10000 Гц.

На рис. П11.21 приведены сведения по реальным шаговым двигателям, выпускаемым промышленностью.

 **НПФ Электропривод**
www.electroprivod.ru

Мощные шаговые двигатели FL86ST и FL86STH:

- угловой шаг 1,8 градуса;
- крутящий момент до 122 кгс.см;
- максимальная частота приемистости до 2000 Гц;
- диапазон рабочих температур от минус 20 до плюс 50 градусов.

Шаговые двигатели FL86STH применяются в деревообрабатывающих станках, электроэрозионных и фрезерных станках с ЧПУ, сортировочных автоматах, лазерных роботизированных технологических комплексах автомобильной промышленности, в сварочных автоматах.

Шаговые двигатели FL86ST применяются в этикетировочных машинах, полиграфических автоматах, насосах, приводах исполнительных механизмов конвейеров, координатных столах для лазерной резки, морских радиолокационных и гидроакустических станциях.



Рис. П11.21. Информация по реальным шаговым двигателям, выпускаемым промышленностью

П11.3. Электромагнитные муфты

В современном управляемом электроприводе во многих случаях используются электромагнитные муфты, позволяющие осуществить *эластичную* связь ведущего вала с ведомым. Электромагнитная муфта по принципу действия напоминает асинхронный двигатель, в то же время отличаясь от него тем, что магнитный поток в ней создается не трехфазной системой, а возбуждаемыми постоянным током вращающимися полюсами.

Принцип устройства электромагнитной муфты показан на рис. П11.22. На ведущей части 1 вала размещается ротор с обмоткой возбуждения, питаемой от источника постоянного тока через контактные кольца. На ведомом валу 2 размещается второй ротор (внешний или внутренний) с короткозамкнутой обмоткой или заменяющим ее массивным цилиндром 3 из токопроводящего материала. При вращении ротора ведущего вала магнитное поле, созданное постоянным током возбуждения I_2 , перемещаясь относительно ведомого ротора, наводит в его массивном цилиндре 3 или короткозамкнутой обмотке токи.

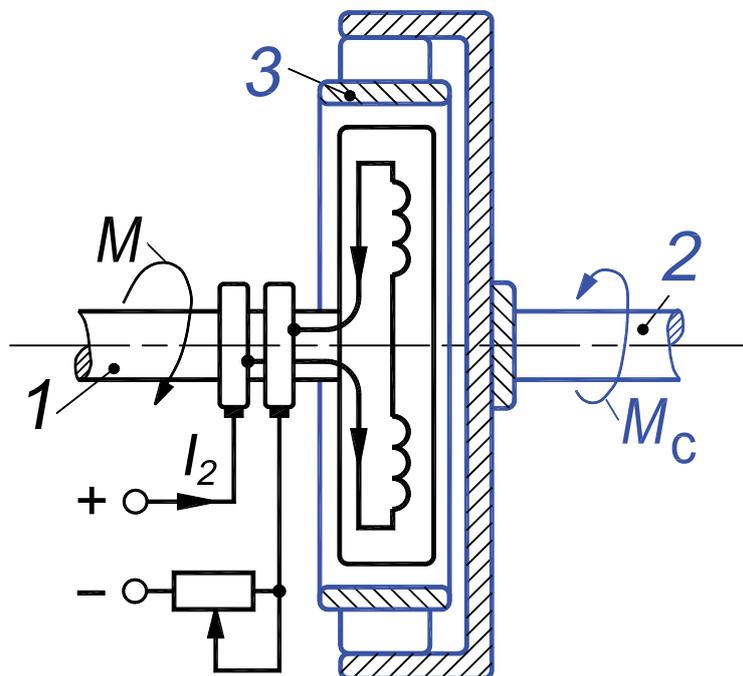


Рис. П11.22. Принцип устройства электромагнитной муфты

При этих условиях в электромагнитной муфте создается вращающийся момент M , при помощи которого осуществляется механическая связь между ведущим 1 и ведомым 2 валами. Такая электромагнитная муфта аналогична

возбужденной синхронной машине с короткозамкнутой обмоткой переменного тока. Поэтому, пользуясь теорией синхронной машины можно определить связь между ведущим и ведомым валами, а также связь между моментом M электромагнитной муфты и относительной скоростью вращения v ведущего и ведомого роторов при различных токах возбуждения I_2 . Такие характеристики моментов муфты показаны на рис. П11.23. Если при этом известен момент сопротивления M_c ведомого вала в зависимости от скорости его вращения при заданной скорости вращения ведущего вала, то можно найти устойчивые режимы работы электропривода с электромагнитной муфтой.

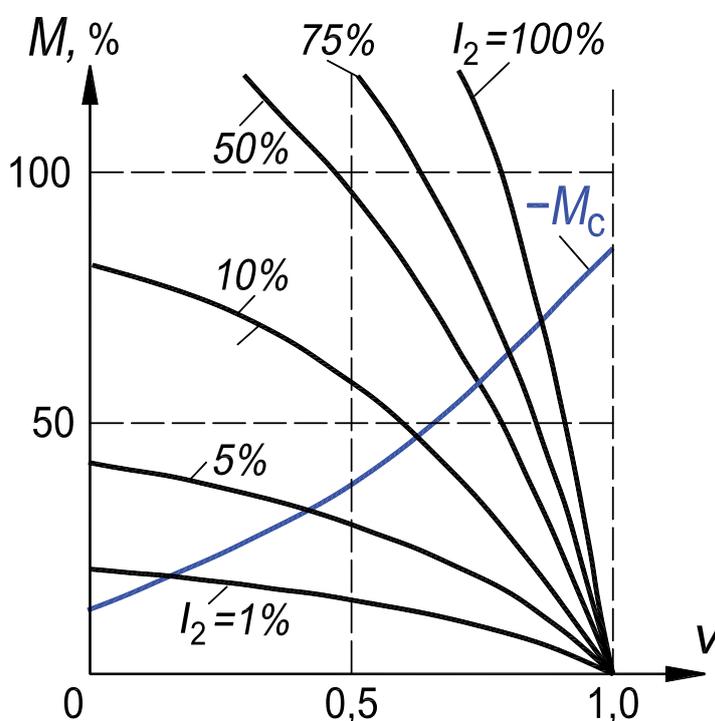


Рис. П11.23. Характеристики моментов электромагнитной муфты;

M_c — момент сопротивления ведомого вала
при заданной постоянной скорости вращения ведущего вала

Электромагнитные муфты используются в электроприводах мощностью до нескольких сотен киловатт.

Электромагнитные муфты применяют для замыкания и размыкания кинематических цепей без прекращения вращения, например в коробках скоростей и передач, а также для пуска, реверсирования и торможения приводов станков. Применение муфт позволяет разделить пуск двигателей и ме-

ханизмов, уменьшить время пускового тока, устранить удары как в электродвигателях, так и в механических передачах, обеспечить плавность разгона, устранить перегрузки, проскальзывания и др. Резкое уменьшение пусковых потерь в двигателях снимает ограничение по допустимому числу включений, что очень важно при цикличной работе двигателя.

Если ведомый ротор 2 выполнить с явно выраженными полюсами и короткозамкнутой обмоткой, то при определенных значениях тока возбуждения он будет втягиваться в синхронизм за счет реактивного момента и вращаться синхронно с ведущим ротором. Таким образом путем регулирования тока возбуждения муфты можно осуществлять плавное присоединение и отключение ведомого вала, регулирование его скорости вращения, а в некоторых случаях обеспечивать синхронное вращение обоих валов.

Электромагнитные муфты скольжения (называемые также индукционными, асинхронными, муфтами на вихревых токах или с массивным якорем) получили наибольшее распространение в промышленности в качестве элемента регулируемого автоматизированного электропривода переменного тока, включающего помимо муфты нерегулируемый электродвигатель и систему автоматического регулирования тока возбуждения муфты.

К достоинствам привода с муфтой скольжения относятся простота устройства и эксплуатации, низкая стоимость, высокая надежность и долговечность, малая мощность управления, облегчающая автоматизацию различных процессов и режимов работы.

Бесконтактные муфты скольжения по своей надежности и низким требованиям к обслуживанию не уступают асинхронным короткозамкнутым двигателям и даже превосходят их, имея массивный магнитопровод вместо шихтованного и простейшую кольцевую обмотку возбуждения 3 (рис. П11.24).

Простейшая электромагнитная муфта скольжения показана на рис. П11.24 состоит из двух вращающихся частей, разделенных воздушным зазором, из которых одна (1) присоединена к приводному двигателю, вторая (2) – к рабочему механизму. Передача вращающего момента с ведущей части на ведомую осуществляется вследствие их электромагнитного взаимодействия. Ведущая и ведомая части муфты образуют замкнутую магнитную систему, наибольшая часть магнитопровода которой выполняется

из ферромагнитных материалов и содержит одну (3) или несколько обмоток возбуждения, питаемых постоянным током I_2 .

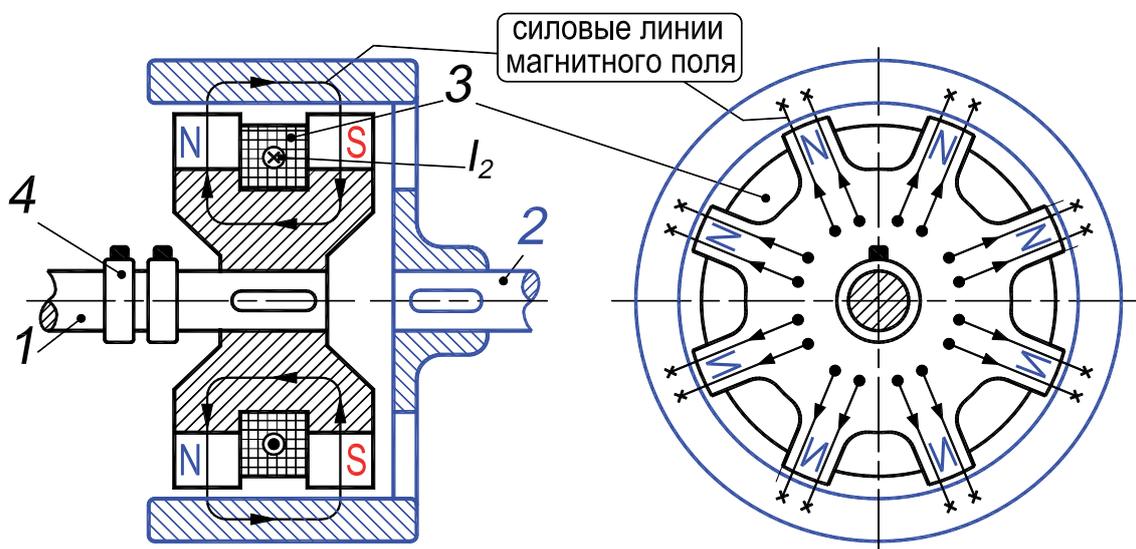


Рис. П11.24. Схема магнитной систем индукторной муфты со скользящим токоподводом: 1 – индуктор (ведущая часть); 2 – якорь (ведомая часть); 3 – обмотка; 4 – контактное кольцо

Одна часть магнитной системы имеет в воздушном зазоре зубцы, выполняющие роль полюсов $N - S$, и является индуктором I , вторая часть, не имеющая зубцов, служит якорем 2 . При относительном вращении возбужденного индуктора и якоря последний пересекается магнитным потоком, индуцирующим переменные ЭДС и вихревые токи, взаимодействие которых с потоком полюсов создает вращающий момент, увлекающий ведомую часть I за ведущей 3 . В данном случае массивный якорь муфты выполняет одновременно роль магнитопровода и электропроводящего элемента.

Литература

1. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. Учебник для вузов – М.– Л.: Госэнергоиздат. 1963.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: “Энергия”, 1978.
3. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 2002. – 166 с.
http://zabudsky.ru/Trans_UP1_end_ZEI.pdf
4. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях. Ч. 2. Асинхронные машины. Учебное пособие для вузов. – М.: ООО “Мегаполис”. 2017. – 304 с.
http://zabudsky.ru/AD_UP2/1-2_UP2-AD_T.pdf
5. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях. Ч. 4. Машины постоянного тока. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 2014. – 160 с.
http://zabudsky.ru/MPT_UP4_end_ZEI.pdf
6. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электро-энергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с. <http://zabudsky.ru/Up1.html>
7. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ. 1999. – 141 с. <http://zabudsky.ru/Up2.html>
8. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с.
<http://zabudsky.ru/regreak.html>
9. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. – М.: ООО “Мегаполис”, 2018. – 355 с.
http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf
10. Забудский Е.И. Учебно-методический комплекс по дисциплине “Электрические машины”. – М.: МГАУ. 1999 - 2019. – Интернет-реализация: <http://zabudsky.ru>
11. Забудский Е.И. Конструкция и технология сборки электрических машин. В 5-ти частях. Ч. 1. Трансформаторы. Ч. 2. Асинхронные машины. Ч. 3. Синхронные машины. Ч. 4. Машины постоянного тока. Ч. 5. Электростанции: Видеофильм. – М.: МГАУ, 2004 (разработано в Power Point).
<http://zabudsky.ru/index1.html>
12. Забудский Е.И. Шаговый двигатель. Устройство, принцип действия, назначение. Видеофильм – Мультимедиа – Учебное пособие. – М.: МГАУ, 2012. – 11 МБ (среда разработки: Macromedia Flash; AutoCAD) / После запуска: в начале просмотра в меню VIEW установить “100%”, а затем кликнуть по кнопке “Развернуть”.
http://zabudsky.ru/Sin-M_RAnchor/ShagDvig.exe

13. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989.
14. ГОСТ ИЕС 60034-1-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики.
15. ГОСТ 27471-87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
16. ГОСТ 10169-77. Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний.
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

URL-

URL-адрес	Наименование предприятия
http://www.power-m.ru/	Завод “Электросила”, г. Санкт-Петербург
http://www.elektrozavod.ru	ОАО “Электrozавод”, г. Москва
http://www.vemp.ru	Владимирский электромоторный завод, г. Владимир
http://www.eldin.ru	Ярославский электромашиностроительный завод, г. Ярославль
...	...
http://www2.viniti.ru/	Всероссийский институт научной и технической информации РАН (ВИНИТИ РАН), г. Москва
http://nd.gostinfo.ru/	Российский научно-технический центр по стандартизации (СТАНДАРТИНФОРМ), г. Москва

П1.1. Pascal-программа “Расчет экспериментальных значений величин в системе относительных единиц”

{Эта Паскаль-программа обеспечивает расчет в системе относительных единиц экспериментальной функциональной зависимости вида $Y = f(X)$, где X - независимая переменная, Y - зависимая переменная; переменные X и Y представлены в системе единиц SI.
x_SI[i] - значение независимой переменной в системе SI,
x_SOE[i] - значение независимой переменной в системе относительных единиц,
y_SI[i] - значение зависимой переменной в системе SI,
y_SOE[i] - значение зависимой переменной в системе относительных единиц. [См. графики на рис. П1, с. 283](#)}

```
uses crt;
var i, n      : integer;
    y_b, x_b : real;
    fo       : text;
    y_SI, x_SI, y_SOE, x_SOE : array[1..100] of real;
    h, np, zp, einp, eizp    : string[100];
begin
clrscr;
assign(fo,'d:\tp_7\pas\result.SOE'); rewrite(fo);
writeln('Эта паскаль-программа обеспечивает расчет в системе');
writeln('относительных единиц экспериментальной функциональной');
writeln('зависимости вида Y = f(X), где X - независимая пере-');
writeln('менная, Y - зависимая переменная;');
writeln('переменные X и Y представлены в системе единиц SI. ');
writeln('=====');
writeln('1. ВВЕДИТЕ название экспериментальной зависимости - ');
readln(h);
write('2. ВВЕДИТЕ название независимой переменной - ');
readln(np);
write('3. ВВЕДИТЕ обозначение единицы измерения ');
write('независимой переменной - ');
readln(einp);
write('4. ВВЕДИТЕ название зависимой переменной - ');
readln(zp);
write('5. ВВЕДИТЕ обозначение единицы измерения ');
write('зависимой переменной - ');
readln(eizp);
write('6. ВВЕДИТЕ число точек на экспериментальной зависимости n = ');
read (n);
write('7. ВВЕДИТЕ значения пар координат точек');
writeln(' на эксперимент-ой зависимости Y = f(X):');
for i := 1 to n do begin
write(' X('i:2,')= '); read(X_SI[i]);
write(' Y('i:2,')= '); read(Y_SI[i])
end;
```

```

write('ЗНАЧЕНИЯ БАЗИСНЫХ ВЕЛИЧИН - см. разд. 7, с. 62');
writeln('8. ВВЕДИТЕ значение базисной величины');
write(' для независимой переменной (' ,np,' , ' ,einp,' ) = ');
read(x_b);
writeln('9. ВВЕДИТЕ значение базисной величины');
write(' для зависимой переменной (' ,zp,' , ' ,eizp,' ) = ');
read(y_b);
{Расчет экспериментальной зависимости Y = f(X)
в системе относительных единиц}
for i := 1 to n do begin
X_SOE[i] := X_SI[i]/x_b;
Y_SOE[i] := Y_SI[i]/y_b
end;
{Вывод результатов}
writeln(fo,' ФАЙЛ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА');
writeln(fo,' =====');
writeln(fo,h,' в системе SI:');
writeln(fo);
writeln(fo,np,' ,einp,' , ' ,zp,' , ' ,eizp);
for i := 1 to n do
writeln(fo,'X_SI(',i:2,')= ',X_SI [i]:6:2,' ,einp,
' Y_SI(',i:2,')= ',Y_SI [i]:6:2,' ,eizp);
writeln(fo);
writeln(fo,'Базисная величина независимой переменной: ');
writeln(fo,np,' = ',x_b:6:2,' ,einp);
writeln(fo,'Базисная величина зависимой переменной: ');
writeln(fo,zp,' = ',y_b:6:2,' ,eizp);
writeln(fo,'-----');
writeln(fo);
writeln(fo,h,' в Сист. Относит. Единиц (COE):');
writeln(fo);
writeln(fo,np,' , о. е. ' ,zp,' , о. е. ');
for i := 1 to n do
writeln(fo,'X_COE(',i:2,')= ',X_SOE[i]:4:2,' о. е.',
' Y_COE(',i:2,')= ',Y_SOE[i]:4:2,' о. е. ');
writeln(fo);
write(fo,' Copyright, кафедра Электроснабжение и Электрические машины. ');
writeln(fo,' МГАУ, Москва. ');
writeln(fo,'Паскаль-программу составил профессор Е.И. Забудский ');
writeln(fo,'28 июня 2000 года. ');
close(fo)
end.

```

ФАЙЛ result.SOE С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА

Характеристика холостого хода в системе SI:

Ток возбуждения, А ЭДС ОЯ фазная, В

X_SI(1)= 2.00 А Y_SI(1)= 55.00 В

X_SI(2)= 3.20 А Y_SI(2)= 95.00 В

X_SI(3)= 5.00 А Y_SI(3)= 125.00 В

X_SI(4)= 9.00 А Y_SI(4)= 150.00 В

X_SI(5)= 11.00 А Y_SI(5)= 158.00 В

X_SI(6)= 12.80 А Y_SI(6)= 165.00 В

X_SI(7)= 13.50 А Y_SI(7)= 170.00 В

Базисная величина независимой переменной:

Ток возбуждения = 5.70 А

Базисная величина зависимой переменной:

ЭДС ОЯ фазная = 133.00 В

Характеристика холостого хода в Сист. Относит. Единиц (COE):

Ток возбуждения, о. е. ЭДС ОЯ фазная, о. е.

X_COE(1)= 0.35 о. е. Y_COE(1)= 0.41 о. е.

X_COE(2)= 0.56 о. е. Y_COE(2)= 0.71 о. е.

X_COE(3)= 0.88 о. е. Y_COE(3)= 0.94 о. е.

X_COE(4)= 1.58 о. е. Y_COE(4)= 1.13 о. е.

X_COE(5)= 1.93 о. е. Y_COE(5)= 1.19 о. е.

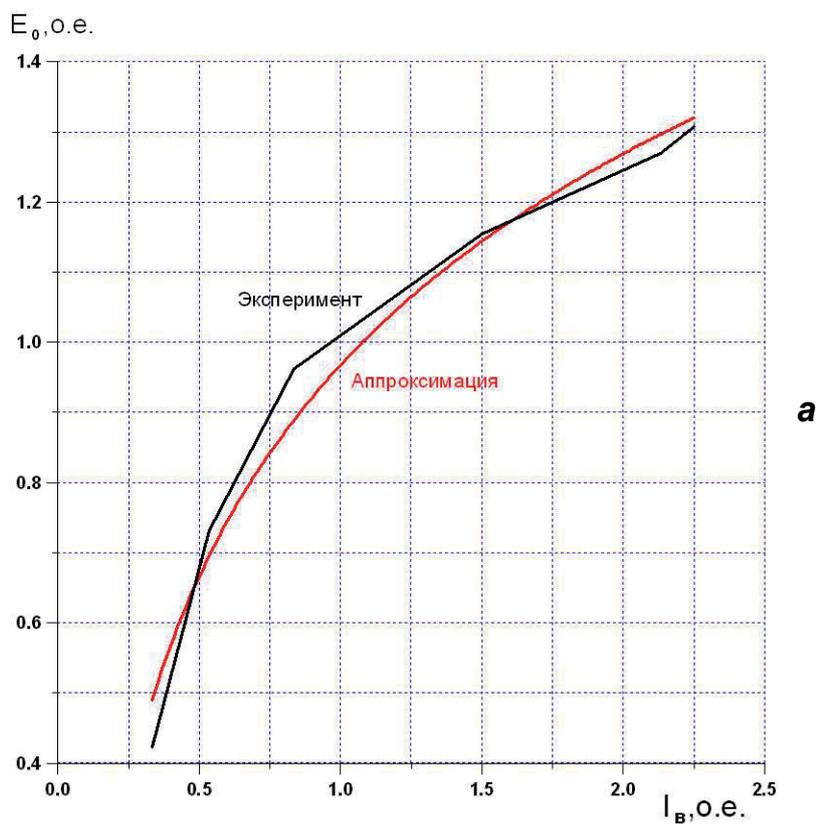
X_COE(6)= 2.25 о. е. Y_COE(6)= 1.24 о. е.

X_COE(7)= 2.37 о. е. Y_COE(7)= 1.28 о. е.

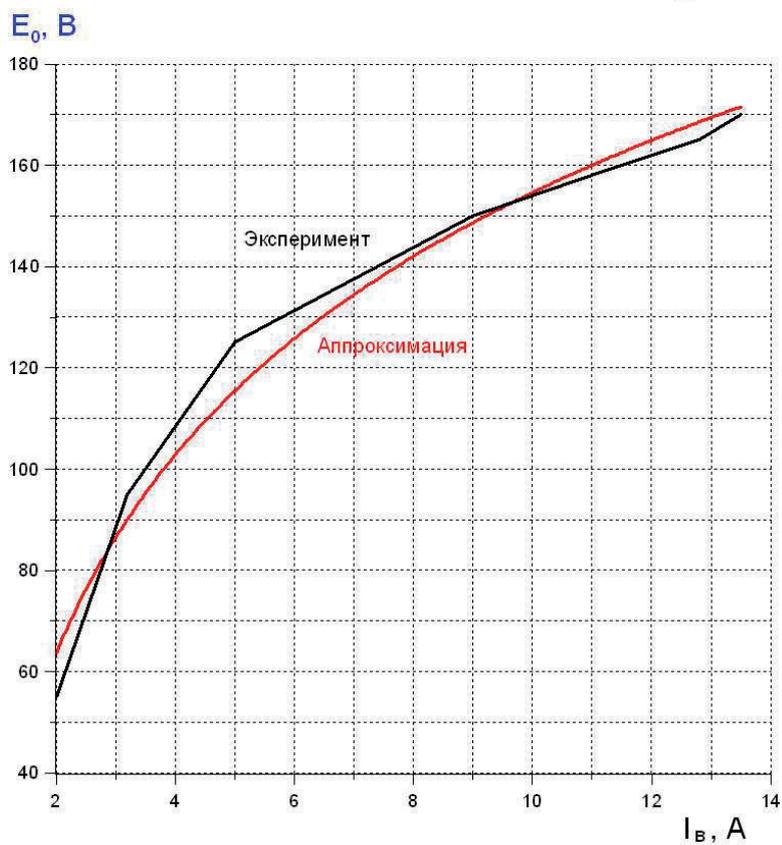
© Copyright, кафедра Электроснабжение и Электрические машины. МГАУ,
Москва.

Паскаль-программу составил проф. Е.И. Забудский

28 июня 2000 года.



a



б

Рис. III. Характеристика холостого хода синхронного генератора:
a – в системе о. е.; *б* – в системе SI

П1.2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ» / ИНТЕРНЕТ-РЕАЛИЗАЦИЯ /

Евгений Забудский

Аннотация: Разработан учебно-методический комплекс дисциплины «Электрические машины». Комплекс включает программу дисциплины, учебные пособия с грифом, описание и фотографии разработанных лабораторных стендов, исходные тексты компьютерных программ, техническое задание и методические материалы по курсовой работе, мультимедийные лекции, слайд-фильмы, гиперссылки на Интернет-ресурсы, etc. Комплекс представлен в интернете (<http://zabudsky.ru/ind.html>).

Ключевые слова: Электрическая машина, трансформатор, магнитное поле, Интернет, web-сайт, комплекс.

ACM Classification Keywords: K.3.1 Computer Uses in Education: Distance learning.

Conference topic: The paper is selected from VI-th International Conference “Modern (e-) Learning” Mel 2011, June 20 - 26, 2011, Varna (Bulgaria).

Введение

Электрические машины и трансформаторы представляют основную и важнейшую часть силового электрооборудования. Поэтому глубокое изучение их теории и практики является неотъемлемой составляющей процесса подготовки инженеров электриков. Спецификой устройств, затрудняющей изучение, является сложность представления и понимания «рабочего тела» устройств – магнитного поля. Кроме того при относительной простоте конструкций, их иллюстрация на лекциях занимает много времени, и с помощью только традиционных средств не всегда является эффективной. Для устранения указанных проблем учебно-методический комплекс дисциплины среди прочего включает разработанные мультимедийные приложения: компьютерные звуковые фильмы, в которых представлены в деталях конструкции устройств, дана интерпретация магнитного поля в пространственно-временном континууме, изложены элементы теории. Использование комплекса в учебном процессе преподавателями и студентами повышает эффективность изложения и усвоения дисциплины «Электрические машины».

Учебно-методический комплекс

На рис. 1 представлена web-страница с расположенным на ней учебно-методическим комплексом (УМК) дисциплины «Электрические машины» (URL-адрес – <http://zabudsky.ru/index1.html>).

Далее приводится краткое описание и иллюстрации (рис. 2 ... рис. 5) некоторых методических мультимедийных материалов, к которым имеется доступ посредством гиперссылок на этой web-странице [1 ... 7].

Спроектированы и изготовлены стенды к лабораторным работам по разделам курса «Трансформаторы», «Синхронные машины» и «Машины постоянного тока» (см. п. 6 УМК). Реализован фронтальный метод проведения работ. Приведены фотографии и описание стендов (рис. 2). При домашней подготовке к занятиям, имея доступ к Интернету, студенты могут умозрительно и виртуально собрать соответствующую электрическую схему (см., например, [4] и <http://zabudsky.ru/CM.html>).

Учебно-методический комплекс дисциплины **Электрические машины** (фото)

1	<p>Забудский Е.И. Программа дисциплины Электрические машины. Рекомендована Министерством образования и науки России для направления подготовки дипломированного специалиста 660300 - "Агроинженерия" (специальность 311400 - Электрификация и автоматизация сельского хозяйства)</p>
2	<p>Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2002. – 166 с.</p> <p>2.1. Форма отчета по Лабораторной работе (образец оформления; на примере Работы №1)</p> <p>2.2. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода трансформатора" (обработка данных эксперимента)</p>
3	<p>Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные машины. Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2002. – 100 с. (оригинал-макет)</p> <p>3.1. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода асинхронного двигателя" (графическая интерпретация; обработка данных эксперимента)</p>
4	<p>Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины. Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2008. – 195 с.</p> <p>4.1. Паскаль-программа "Расчет экспериментальных значений величин в системе относительных единиц" (графическая интерпретация)</p>
5	<p>Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 4. Машины постоянного тока. Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 2004. – 100 с. (оригинал-макет)</p> <p>5.1. Паскаль-программа "Расчет рабочих характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением" (графическая интерпретация; обработка данных эксперимента)</p>
6	<p>Информация о лабораториях Электрических машин: тексты лабораторных работ и фото стендов</p> <p>6.1. Стенд для проведения лабораторных работ по разделу "Трансформаторы" (фото и описание)</p> <p>6.2. Стенды для проведения лабораторных работ по разделу "Машины постоянного тока" (фото и описание)</p> <p>6.3. Стенд для проведения лабораторных работ по разделу "Синхронные машины" (фото и описание)</p> <p>6.4. Стенды для проведения лабораторных работ по разделу "Асинхронные машины" (стенды в стадии разработки)</p>
7	<p>Техническое задание и Методические рекомендации к курсовой работе "Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором"</p> <p>7.1. Паскаль-программа "Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя" (к курсовой работе; руководство пользователю): загрузить файл RX_AD.rar. Файл сохранить в корне диска C (в rar-файле находятся файл RX_AD.exe и файл с исходными тест-данными RX_AD_dn.dat)</p>

	Продолжение web-страницы
	7.2. Каталоги Электрических машин и Трансформаторов , изготавливаемых заводами России, etc. (интернет-ресурс)
	7.3. ФГУП Институт промышленного развития (Информэлектро) – Информационный центр России (интернет-ресурс)
	7.4. Всероссийский институт научной и технической информации РАН (ВИНИТИ РАН) (интернет-ресурс)
	7.5. Всероссийский научно-технический информационный центр (ВНТИЦентр) (интернет-ресурс)
	7.6. Защита интеллектуальной собственности (РУПАТЕНТ) (интернет-ресурс)
	7.7. Российский научно-технический центр по стандартизации, ... (СТАНДАРТИНФОРМ) (интернет-ресурс)
8	Экзаменационные вопросы по дисциплине Электрические машины: 1-й семестр (Тр и АМ); ... 2-й семестр (СМ, МПТ и ЭММ)
9	СТАТЬИ И ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ , опубликованные на web-сайте ...
	9.1. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы : Учебное пособие для вузов.– М.: МГАУ, 2002. – 168 с. (полный текст пособия: скачивайте ...)
	9.2. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины : Учебное пособие для вузов.– М.: МГАУ, 2008. – 196 с. (-, -, -: скачивайте ...)
	9.3. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 4. Машины постоянного тока : Учебное пособие для вузов.– М.: МГАУ, 2010. – 217 с. (-, -, -: скачивайте ...)
	9.4. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств : Учебное пособие для вузов. - Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с.
	9.5. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов : Учебное пособие для вузов. - Москва: МГАУ, 1999. – 141 с.
	9.6. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы : Монография. - Москва: Энергоатомиздат, МГАУ, 2003. – 436 с.
10	Забудский Е.И. Комплекс математических моделей и компьютерных программ для расчета электромагнитных полей и режимов ферромагнитных устройств
11	Забудский Е.И. Пакеты компьютерных программ , зарегистрированных в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Министерства образования и науки России
12	Забудский Е.И. Компьютерный фильм “Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля в устройствах электромеханики” (сертификат №3/93)
	Карта сайта профессора Е.И.Забудского ...

Рис. 1. Web-страница с учебно-методическим комплексом (<http://zabudsky.ru/index1.html>)

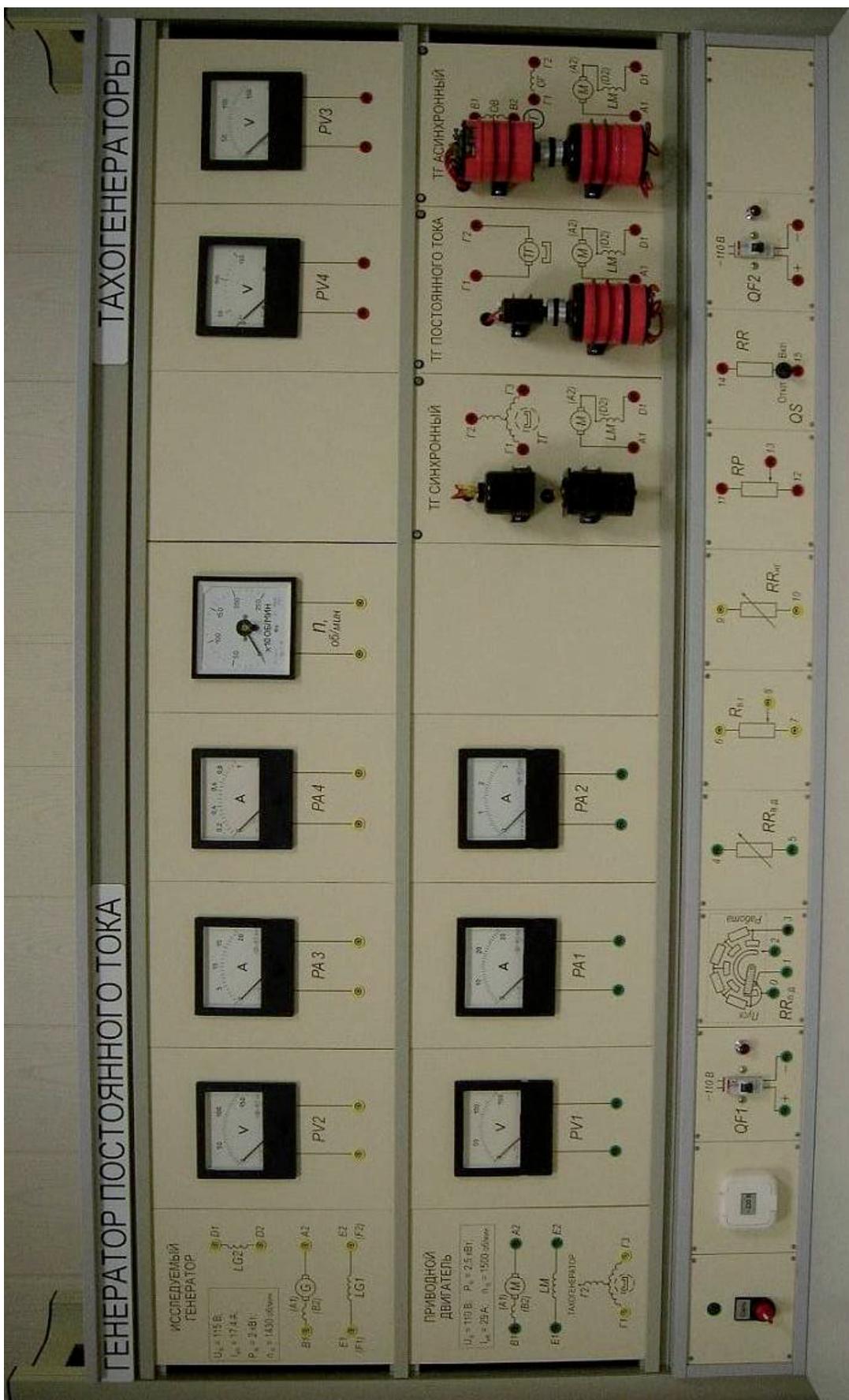


Рис. 2. Приборная панель лабораторного стенда «Генератор постоянного тока» (<http://zabudsky.ru/MPT.html>)

Опубликованы в электронном виде (и в твердом варианте) учебные пособия по указанным выше разделам курса (см. п.п. 9.1...9.3 УМК, <http://zabudsky.ru/index1.html>). Приведены описания лабораторных работ, схемы, нормативные материалы, основы теории, etc. (рис. 3). С сайта возможно скачать (public domain) эти пособия в *полном* объеме.

Студенты имеют возможность просмотреть компьютерный слайд-фильм, в котором представлены результаты расчета магнитного поля, выполненного методом конечных элементов в сильнонасыщенном устройстве трансформаторного типа [8...10] (фильм разработан в среде Графор, <http://zabudsky.ru/filmr/film.html>). В фильме наглядно представлены: изменение магнитных индукции, напряженности, проницаемости и векторного потенциала в пространственно-временном континууме; картина распределения силовых линий магнитного поля; результаты гармонического анализа, оформленные в виде гистограммы, etc. (рис. 4). В процессе работы студенты не только изучают характер распределения магнитного поля в пространстве и во времени, его зависимость от насыщения среды, от конфигурации области расчета и пр., но и развивают абстрактное мышление, позволяющее мысленно представить и воссоздать картину распределения поля в различных типах электрических машин и трансформаторов. Фильм имеет сертификат (<http://zabudsky.ru/15.html>).

На web-странице имеются также гиперссылки на файлы с исходными текстами паскаль-программ (см., например, п.7.1 УМК) на основе которых осуществляются: расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя (http://zabudsky.ru/RX_AD_Pr.pdf), выполняемый в рамках курсового проекта. (рис. 5); обработка результатов эксперимента (http://zabudsky.ru/SM1_OE_Programma.pdf).

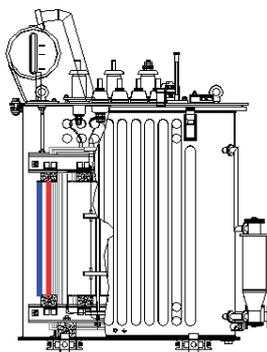
Кроме того на web-странице приведены гиперссылки на паскаль-программы в которых реализованы методы решения систем уравнений, моделирующих установившиеся симметричные, несимметричные и переходные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах (<http://zabudsky.ru/7.html>). К этим системам и методам их решения относятся: системы линейных алгебраических уравнений (метод Гаусса, <http://zabudsky.ru/Nuton.pdf>); системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений (метод Ньютона, <http://zabudsky.ru/Nuton.pdf>); системы обыкновенных дифференциальных уравнений (метод Рунге-Кутты с модификацией Фельберга, http://zabudsky.ru/SODU_2.pdf); системы дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных элементов, <http://zabudsky.ru/Up2.html>).

Ряд разработанных электронных мультимедиа-материалов в связи с их большим объемом не расположены в Интернете на web-странице УМК, но непосредственно демонстрируются с помощью ноутбука и мультимедийного проектора на лекциях и практических занятиях. К ним относятся:

- пять звуковых видеофильмов по конструкции и технологии сборки электрических машин в соответствии пятью разделами дисциплины: 1. Трансформаторы (рис. 6), 2. Асинхронные машины, 3. Синхронные машины, 4. Машины постоянного тока, 5. Тепловые и гидроэлектростанции (разработано в среде PowerPoint);
- мультимедиа-лекция по теме «Реакция якоря синхронной машины». В лекции представлен в динамике процесс влияния поля обмотки якоря на поле обмотки возбуждения при различном характере нагрузки, подключенной к обмотке якоря. Рис. 7 иллюстрирует это влияние при активной нагрузке (разработано в среде MicromediaFlash);
- видеоматериалы, иллюстрирующие в динамике условия создания вращающегося поля трехфазной обмоткой. Эти условия заключаются в следующем: 1) фазы обмотки должны быть сдвинуты в пространстве на 120 электрических градусов; 2) токи в этих фазах должны быть смещены во времени на 120 градусов. На рис. 8 представлено положение силовых линий вращающегося поля, созданного обмоткой статора, для двух моментов времени (разработано там же);
- видеоматериалы, иллюстрирующие в динамике процесс укладки и устройство якорной обмотки машины постоянного тока, а также выпрямление напряжения коллектором генератора, рис. 9 (там же).

Электрические машины

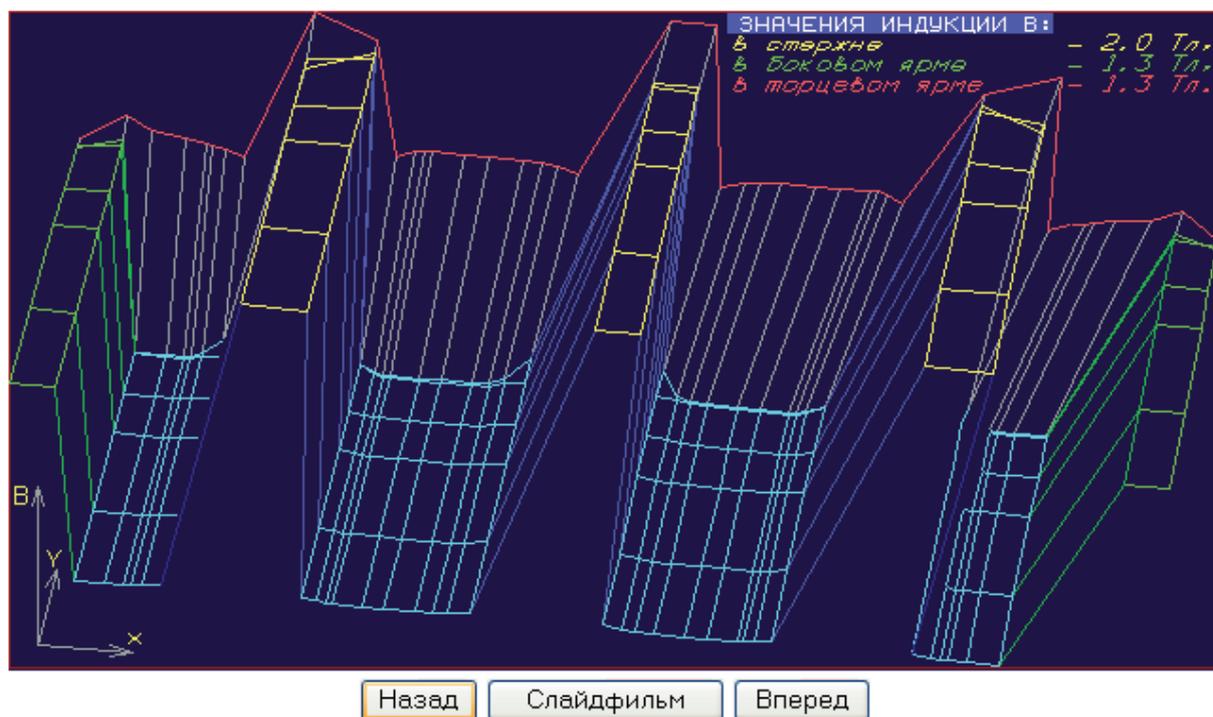
Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ



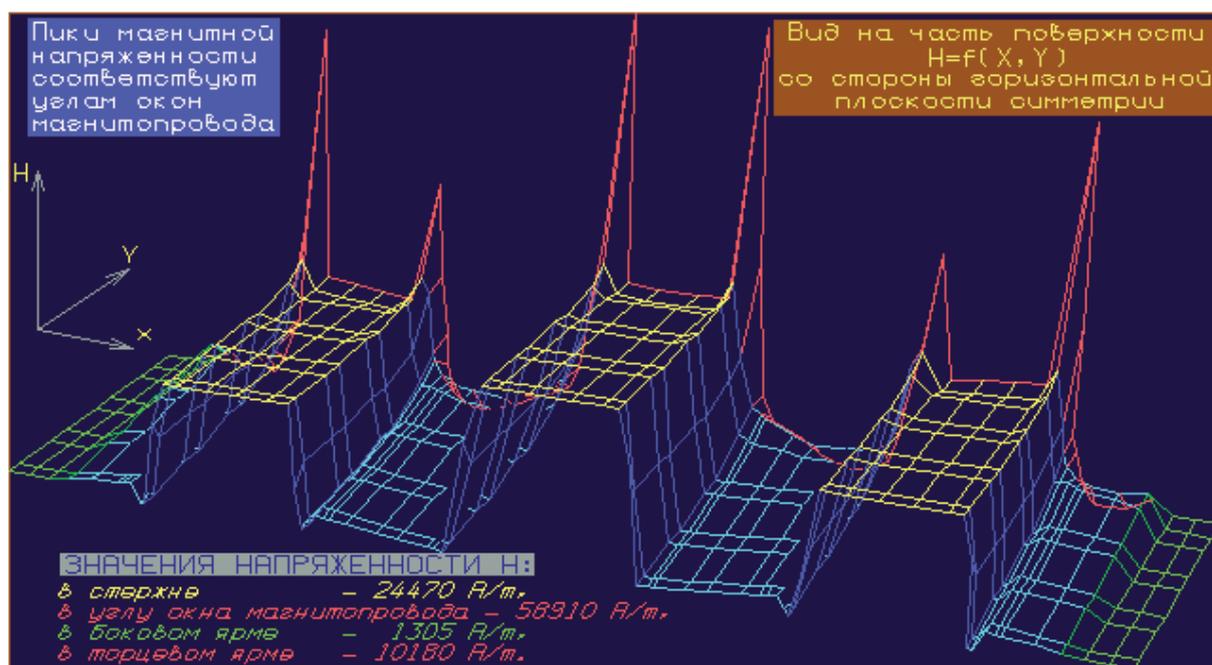
Содержание

<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	4
1. Термины и определения	6
1.1. Общие понятия	6
1.2. Виды трансформаторов	6
1.3. Магнитная система трансформатора	7
1.4. Обмотки трансформатора	8
1.5. Изоляция трансформатора	8
1.6. Отдельные части трансформатора	9
1.7. Детали конструкции и параметры частей трансформатора	10
1.8. Режимы и процессы	11
1.9. Параметры трансформатора	11
1.9.1. Общие параметры	11
1.9.2. Номинальные данные трансформатора	12
2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах	13
3. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов	14
4. Условное обозначение трансформаторов	16
5. Номинальные данные и устройство исследуемого трансформатора	18
6. Работа №1 ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБОМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР	20
7. Работа №2 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	37
8. Работа №3 НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	55
9. Работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА	70
<u>ЛИТЕРАТУРА</u>	98
<u>URL-адреса предприятий, производящих электрические машины трансформаторы</u>	98
<u>URL-адрес ПАО ЕЭС "Россия"</u>	98
Приложения:	
1. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода трансформатора"	99
2. Трансформаторы специального назначения	102
3. Форма отчета по Лабораторной работе (образец оформления)	141
4. Примерная программа дисциплины Электрические машины	154

Рис. 3. Web-страница с учебным пособием (<http://zabudsky.ru/soderghanie.html>)



а



б

Рис. 4. Картины пространственного распределения: а – индукции магнитного поля;

б – напряженности магнитного поля (кадры слайд-фильма)

(<http://zabudsky.ru/filmr/film.html>)

**Результаты расчета рабочих характеристик I_1 , η , $\cos\varphi$, $s = f(P_2)$
асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

Таблица 1. Исходные данные

$P_{2\text{НОМ}} = 15.00$ кВт	$U_{1\text{НОМ}} = 220/380$ В	$I_{1\text{НОМ}} = 28.40$ А
$P_{\text{СТ}} = 0.369$ кВт	$P_{\text{Мех}} = 0.117$ кВт	$I_{0a} = 0.520$ А
$I_{0p} = 7.910$ А	$r_1 = 0.355$ Ом	$r_2' = 0.186$ Ом
$c_1 = 1.025$	$a' = 1.051$	$a = 0.364$ Ом
$b' = 0.000$	$b = 1.650$ Ом	$s_{\text{НОМ}} = 0.024$

Таблица 2. Результаты расчета, выполненного на ПК (см. п.п 7 и 7.1 УМК)

#	s	-	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.024
1	R	Ом	39.46	19.91	13.40	10.14	8.18	6.88	8.51
2	X	Ом	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650	1.650
3	Z	Ом	39.50	19.98	13.50	10.27	8.35	7.08	8.67
4	I_2''	А	5.57	11.01	16.30	21.42	26.35	31.09	25.38
5	$\cos\varphi_2'$	-	0.999	0.997	0.993	0.987	0.972	0.980	0.982
6	$\sin\varphi_2'$	-	0.042	0.083	0.122	0.161	0.198	0.233	0.190
7	I_{1a}	А	6.09	11.49	16.70	21.66	26.35	30.76	25.44
8	I_{1p}	А	8.14	8.82	9.90	11.35	13.12	15.16	12.74
9	I_1	А	10.17	14.49	19.41	24.45	29.44	34.29	28.45
10	I_2'	А	5.71	11.29	16.71	21.95	27.01	31.87	26.02
11	P_1	кВт	4.02	7.59	11.02	14.30	17.39	20.30	16.79
12	$P_{\Sigma 1}$	кВт	0.11	0.22	0.40	0.64	0.92	1.25	0.86
13	$P_{\Sigma 2}$	кВт	0.02	0.07	0.16	0.27	0.41	0.57	0.38
14	$P_{\text{Доб}}$	кВт	0.02	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.08
15	ΣP	кВт	0.63	0.82	1.10	1.46	1.90	2.41	1.81
16	P_2	кВт	3.38	6.77	9.92	12.83	15.49	17.89	14.98
17	η	-	0.842	0.892	0.900	0.898	0.891	0.881	0.892
18	$\cos\varphi$	-	0.599	0.795	0.860	0.886	0.895	0.897	0.894

Номинальные данные спроектированного двигателя:

$P_{2\text{НОМ}} = 15$ кВт, $U_{1\text{НОМ}} = 220/380$ В, $I_{1\text{НОМ}} = 28.4$ А, $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0.894$, $\eta_{\text{НОМ}} = 0.892$.

Методические рекомендации студенту-расчетчику по анализу результатов:

- сравнить рассчитанное значение мощности P_2 на валу двигателя (см. в табл. 2 строку 16) с заданным значением P_2 (см. Задание);
 - сравнить рассчитанные значения КПД η и коэффициента мощности $\cos\varphi$ (см. в табл. 2 строки 17 и 18) с принятыми значениями (см. Задание).
- Если рассчитанные величины отличаются от указанных **более чем на 15 %**, то необходимо внести коррективы в расчет и выполнить его еще раз.

Рис. 5. Текст файла с результатами расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя

http://zabudsky.ru/Technical_Requirement_AD.pdf

(в качестве теста приняты данные, изложенные в книге: Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 2002. – С.467)

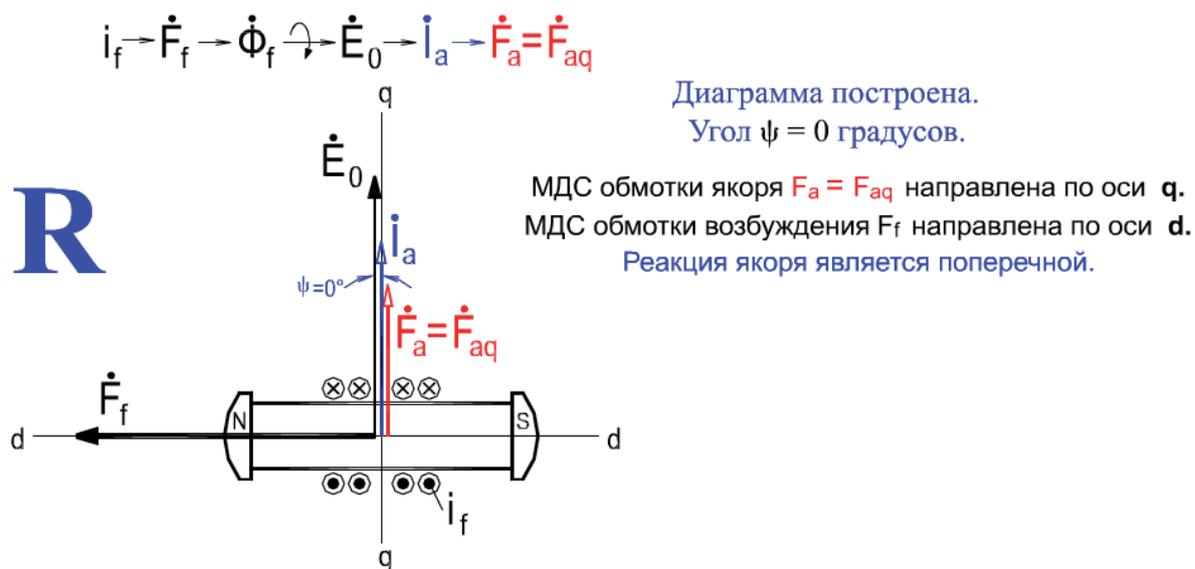
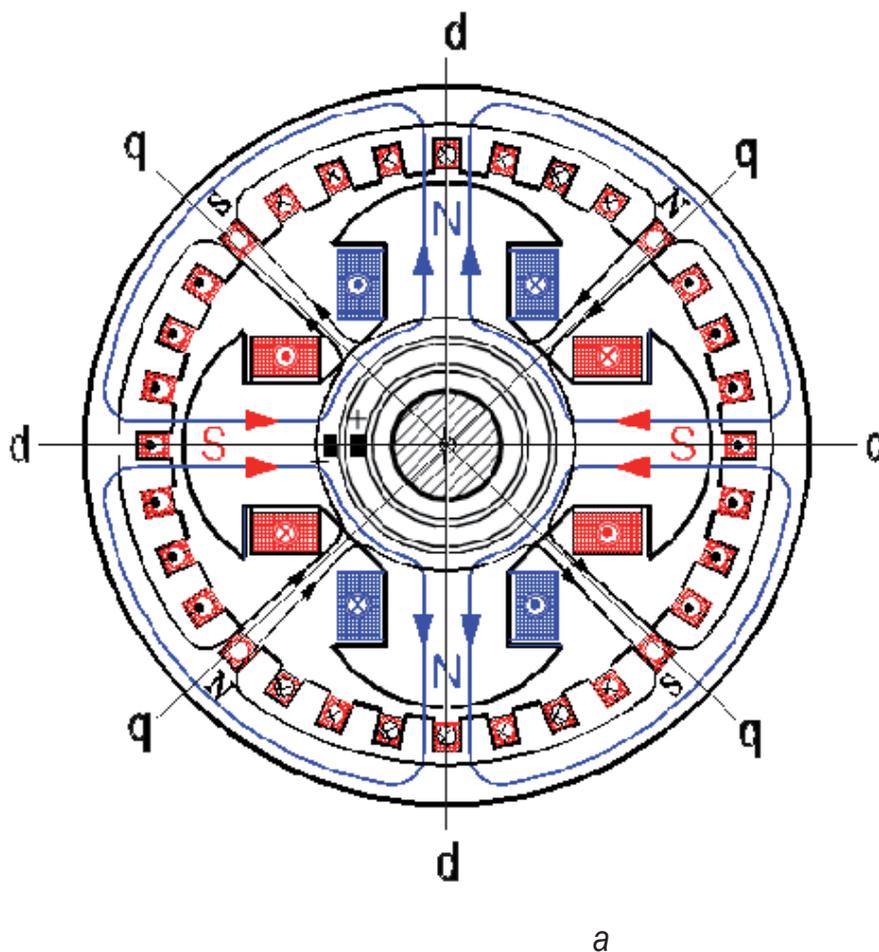


а



б

Рис. 6. Скриншоты кадров компьютерного видеофильма «Конструкция и технология электрических машин». Часть 1. Трансформаторы:
 а – фотография трансформатора, установленного на Асуанской ГЭС;
 б – осевая опрессовка и сушка обмоток НН и ВН трансформатора



**РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ ЯВНОПОЛЮСНОГО СГ
ПРИ АКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ**

б

Рис. 7. Мультимедийные фрагменты видеолекции «Реакция якоря синхронной машины», иллюстрирующие в динамике влияние активной нагрузки, подключенной к обмотке якоря: а – взаимная ориентация магнитных полей якоря и индуктора; б – векторная диаграмма

УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБМОТКОЙ:

1. Фазы обмотки смещены в пространстве на 120 электрических градусов;
2. Токи в фазах смещены во времени на 120 градусов

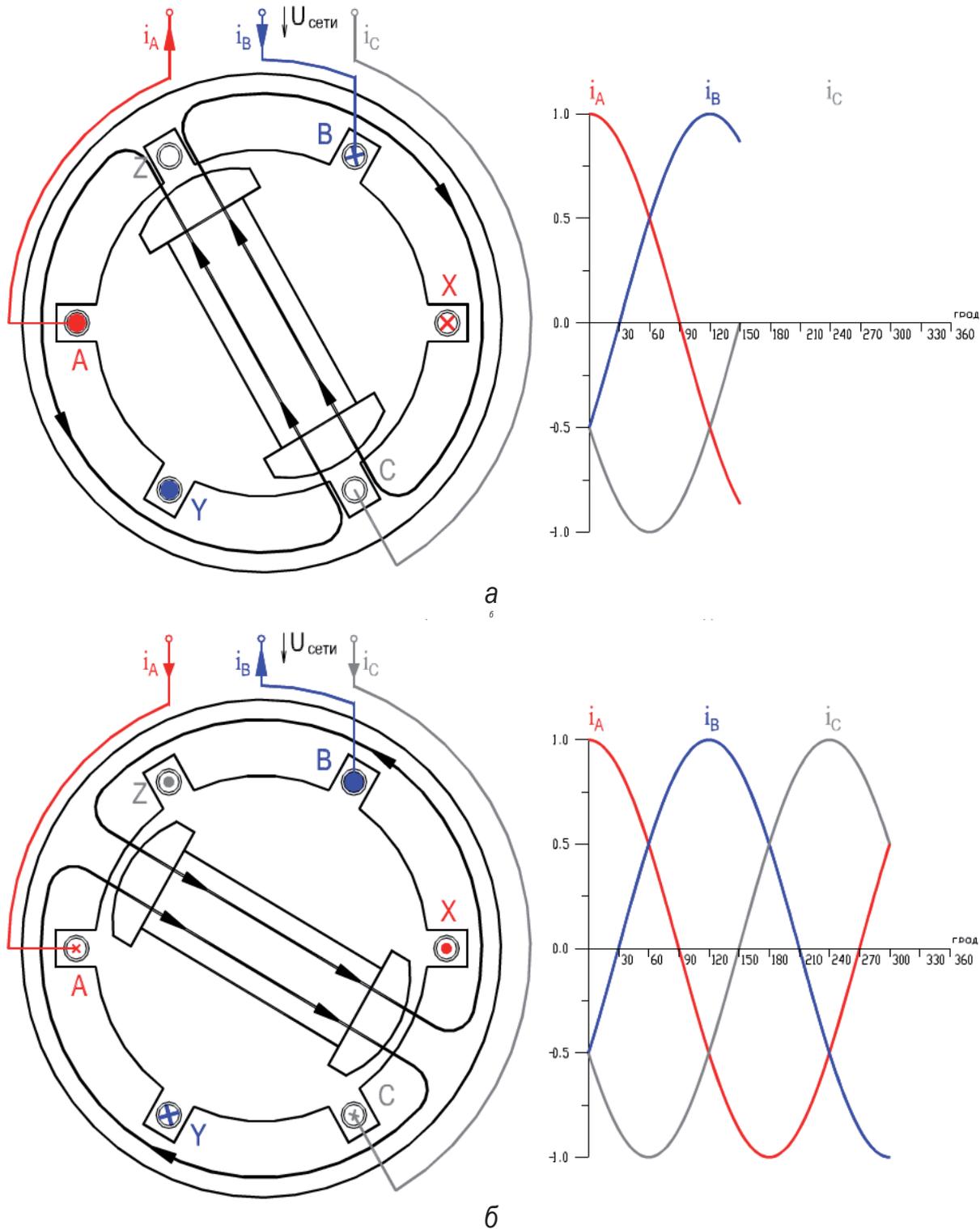
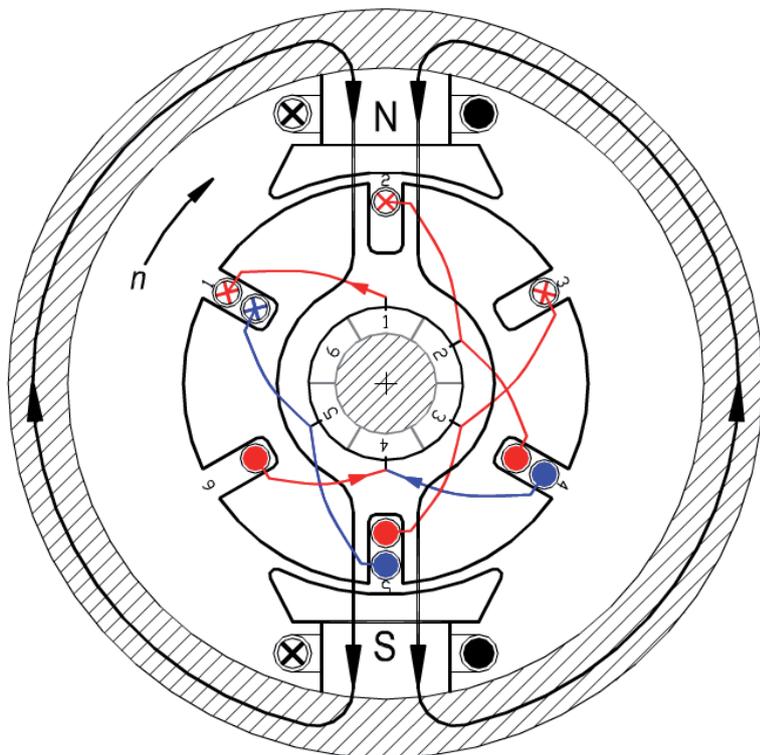


Рис. 8. Фрагменты видеоматериалов, иллюстрирующие в динамике условия создания вращающегося поля трехфазной обмоткой, соответствующие различным мгновенным значениям токов в обмотке:

$$а - i_b = |-i_a| \approx 0,707, i_c = 0; б - i_a = i_c = 0,5, i_b = -1,0$$

УКЛАДКА БАРАБАННОЙ ОБМОТКИ В ПАЗЫ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

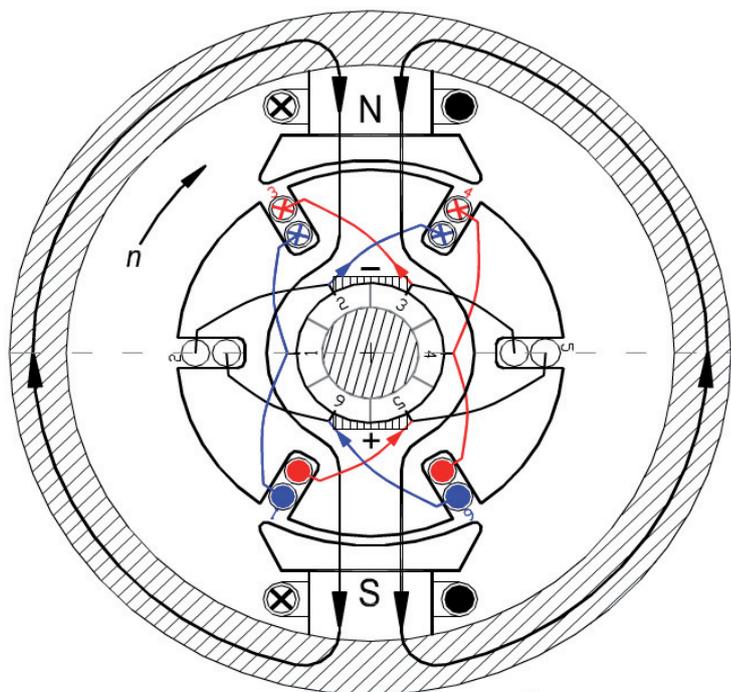


а

	Параллельная ветвь обмотки	
	Первая	Вторая
# секции	1	4
	2	5
	3	

Укладка 5-й секции.
Начало 5-й секции подсоединяется к 5-й коллекторной пластине, а левая сторона секции укладывается наверх 5-го паза

ПРИ ВРАЩЕНИИ В ОБМОТКЕ ЯКОРЯ ИНДУЦИРУЕТСЯ ПЕРЕМЕННАЯ Э.Д.С.



б

Положение якоря	## секции в ветви		## к.з. секции
	1-я ветвь	2-я ветвь	
0°	1, 2 и 3	4, 5 и 6	нет
30°	1 и 2	4 и 5	3 и 6
60°	6, 1 и 2	3, 4 и 5	нет
90°	6 и 1	3 и 4	2 и 5
120°	5, 6 и 1	2, 3 и 4	нет
150°	5 и 6	2 и 3	1 и 4
180°	4, 5 и 6	1, 2 и 3	нет
210°	4 и 5	1 и 2	6 и 3
240°	3, 4 и 5	6, 1 и 2	нет
270°	3 и 4	6 и 1	5 и 2

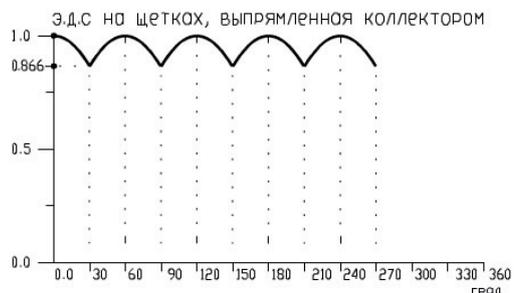


Рис. 9. Фрагменты видеоматериалов, иллюстрирующие в динамике процесс укладки и устройство якорной обмотки машины постоянного тока (а), а также выпрямление напряжения коллектором генератора (б)

Вывод

В результате использования преподавателями и студентами разработанных Учебно-методического комплекса дисциплины «Электрические машины» (электронная реализация УМК размещена в Интернете, <http://zabudsky.ru/ind.html>), и мультимедийных приложений повышена эффективность изложения материала, достигнуто понимание студентами сложных вопросов теории и устройства электрических машин и трансформаторов.

Библиография

1. [Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств](#): Учебное пособие для вузов. - Ульяновск: УлГТУ, 1998. - 120 с.
2. [Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов](#): Учебное пособие для вузов. - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 1999. - 141 с.
3. [Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы](#): Учебное пособие для вузов.– М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2002. - 168 с.
4. [Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины](#): Учебное пособие для вузов – М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. - 196 с.
5. [Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 4. Машины постоянного тока](#): Учебное пособие для вузов – М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2010. - 217 с.
6. [Забудский Е.И. Компьютерный фильм “Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля в устройствах электромеханики”](#): Пакет компьютерных программ / Зарегистрирован в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобразования РФ. Регистр. № 94696, 16.02.94. [Сертификат № 3/93 от 10.09.93 г.](#)
7. Evgeny Zabudsky. [Lecturer’s web-site and its role in distance learning](#) // International Journal “Information Technologies and Knowledge” (IJ ИТК), Vol. 1/2007, p. 279-281.
8. А.с. 1651326 СССР. Трехфазный насыщающийся реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин. Опубл. 23.05.91, Бюл. # 19.
9. А.с. 1658224 СССР. Трехфазный управляемый реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин. Опубл. 23.06.91, Бюл. # 23 (<http://zabudsky.ru/11.html>).
10. А.с. 1663721 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный утроитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин, В.Г. Ольховский, О.В. Воловецкий. Опубл. 15.07.91, Бюл. # 26.

Информация об авторе



Евгений Забудский – Российский университет Дружбы народов, профессор кафедры Кибернетика и мехатроника, доктор техн. наук, 117923, Москва, Россия, ул. Орджоникидзе, д. 3; e-mail: zei@inbox.ru; web-сайт: zabudsky.ru.

Направление научной работы: Регулируемые электромагнитные устройства для управления режимами электроэнергетических систем. Компьютерные и информационные технологии в образовании.

Учебное издание

Евгений Иванович Забудский

Электрические машины

Часть 3 Синхронные машины

Учебное пособие для вузов

2-е издание, переработанное и дополненное

В четырех частях

Издается в авторской редакции

Дизайн обложки *Полина Шапошникова*

Подписано в печать 08.04.2019. Формат 70x100/16.

Усл.-печ. л. 18,44. Тираж 150 экз. Заказ № 59

ООО “Мегаполис”

www.m-megapolis.ru; Тел.: +7 (499) 391-34-54

E-mail: zakaz@m-megapolis.ru

125413, Москва, ул. Флотская, д. 17, корп. 2

Отпечатано в ПАО “Т8 Издательские Технологии”

Тел.: +7 (499) 322-38-31

109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5