

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроснабжения

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области сельского хозяйства в качестве
лабораторного практикума для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности 1-74 06 05
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства
(по направлениям)*

В двух частях

Часть 1

**Машины постоянного тока.
Синхронные машины**

Минск
БГАТУ
2011

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.261я7
Э45

Авторы:

кандидат технических наук, доцент *Н. Е. Шевчик*,
кандидат технических наук *В. М. Збродыга*,
ассистент *В. И. Кузьмич*,
старший преподаватель *А. И. Зеленкевич*,
ассистент *Е. А. Тюнина*

Рецензенты:

заведующий кафедрой электроснабжения БНТУ *В. Б. Козловская*;
начальник электротехнического отдела ОАО «ПТИ «Промзернопроект»
В. И. Потаннев

Э45

Электрические машины : лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1.
Машины постоянного тока. Синхронные машины / Н. Е. Шевчик
[и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – 100 с.
ISBN 978-985-519-441-6.

Приведены характеристики генераторов постоянного тока с независимым, параллельным и смешанным возбуждением, характеристики двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения, а также характеристики синхронных генераторов и синхронных двигателей переменного тока. Изложены методики экспериментального получения вышеперечисленных характеристик.

Для студентов высших и учащихся средних специальных учебных заведений специальностей 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика) и 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство).

УДК 621.313(075.8)
ББК 31.261я7

ISBN 978-985-519-441-6

© БГАТУ, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
Лабораторная работа № 1	
ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	5
Лабораторная работа № 2	
ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ	17
Лабораторная работа № 3	
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	27
Лабораторная работа № 4	
ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	36
Лабораторная работа № 5	
СИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ГЕНЕРАТОР.....	46
Лабораторная работа № 6	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАУНДИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	61
Лабораторная работа № 7	
ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	66
Лабораторная работа № 8	
ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ.....	75
Лабораторная работа № 9	
ИСПЫТАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	91
ЛИТЕРАТУРА.....	96

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью изучения дисциплины «Электрические машины» является формирование у студентов системы знаний, умений, навыков и профессиональных компетенций в области преобразования механической энергии в электрическую, а также электрической энергии в механическую, приобретение студентами системы знаний в областях проектирования, монтажа, наладки, ремонта, технического обслуживания электрических машин сельскохозяйственного назначения.

В результате изучения дисциплины студент должен знать устройство, принцип действия, характеристики, режимы работы и области применения электрических машин. Должен уметь подключать и испытывать, рассчитывать и измерять параметры, строить необходимые характеристики электрических машин.

Составными частями дисциплины являются следующие разделы: машины постоянного тока, синхронные машины, асинхронные машины, трансформаторы.

Первая часть лабораторного практикума «Электрические машины» включает в себя 9 лабораторных работ по разделам «Машины постоянного тока» и «Синхронные машины».

В лабораторных работах приведены краткие теоретические сведения, включающие описание устройства, принципа действия машин постоянного тока и синхронных машин. Представлены характеристики генераторов постоянного тока с независимым, параллельным и смешанным возбуждением, характеристики двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения, а также характеристики синхронных генераторов и синхронных двигателей переменного тока. Изложен порядок выполнения лабораторных работ и требования по содержанию отчетов по работам.

Материал каждой лабораторной работы заканчивается контрольными вопросами.

ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы – изучение конструкции и характеристик генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

Общие сведения

Машина постоянного тока имеет неподвижную часть – корпус и подвижную – якорь (рис. 1.1).

К корпусу крепятся полюса, подшипниковые щиты и лапы для крепления машины к фундаменту. В отличие от машины переменного тока, корпус машины постоянного тока является частью магнитопровода, по нему идет магнитный поток, поэтому он называется еще и станиной. Так как магнитный поток постоянный, потери в стали малы, станина изготавливается не из пластин электротехнической стали, а из цельной заготовки литой стали.

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

Дополнительные полюсы предназначены для улучшения коммутации. На них размещается обмотка, которая включается последовательно с обмоткой якоря.

Якорь машины постоянного тока состоит из вала, сердечника с обмоткой и коллектора. Сердечник якоря так же, как и сердечник полюсов, набирается из пластин электротехнической стали и напрессовывается на вал. В сердечнике якоря имеются пазы, в которые укладывается обмотка якоря. Она изготавливается из обмоточного провода. Концы секций обмоток электрически соединены с коллекторными пластинами. Коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди, изолированных между собой и валом.

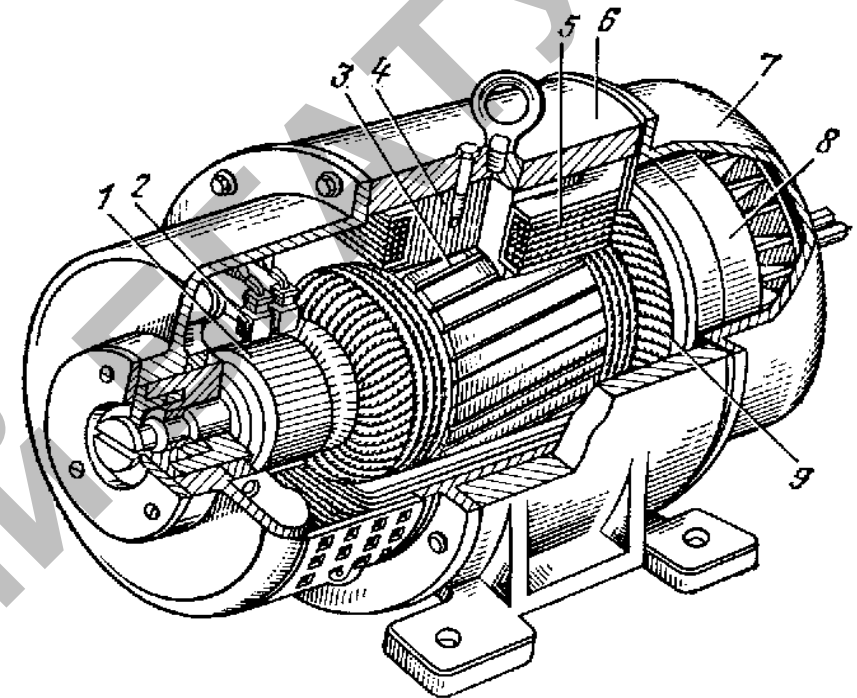


Рис. 1.1. Машина постоянного тока: 1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – якорь; 4 – полюс; 5 – обмотка возбуждения; 6 – корпус; 7 – подшипниковые щиты; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

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

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

На валу машины напрессованы подшипники, которые расположены в подшипниковых щитах, закрывающих станину.

Генератором называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую. Работа генератора основана на законе электромагнитной индукции: в проводнике, пересекающем магнитное поле, создается ЭДС.

Магнитное поле в машине постоянного тока создается обмоткой возбуждения, которая располагается на главных полюсах. Создать магнитное поле в машине – это возбудить ее. В машине могут быть одна или две обмотки возбуждения. Варианты подключения по отношению к обмотке якоря показаны на рисунке 1.2.

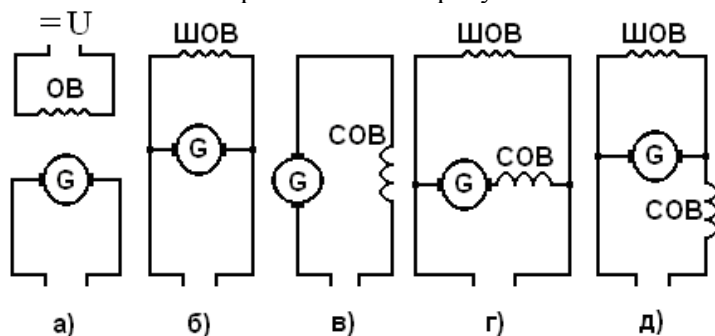


Рис. 1.2. Способы возбуждения машины постоянного тока:

a – независимое, *б* – параллельное, *в* – последовательное, *г* и *д* смешанное; обмотки возбуждения: ОВ – независимая, ШОВ – параллельная (шунтовая), СОВ – последовательная (серийная)

Таблица 1.1

Обозначение обмоток машин постоянного тока

Название обмоток	Обозначение	
	ГОСТ 183-74	ГОСТ 26772-85
Обмотка якоря	Я1-Я2	A1-A2
Независимого возбуждения	Ш1-Ш2	F1-F2
Параллельного возбуждения	Ш1-Ш2	E1-E2
Последовательного возбуждения	С1-С2	D1-D2
Компенсационная обмотка	К1-К2	C1-C2
Обмотка добавочных полюсов	Д1-Д2	B1-B2

Обмотка возбуждения должна обладать магнитодвижущей силой (МДС), достаточной для создания требуемого магнитного потока. По закону полного тока МДС F равна:

$$F = I_B \cdot W_B, \quad (1.1)$$

где I_B – ток, проходящий по обмотке возбуждения, А;

W_B – количество витков обмотки возбуждения.

Из формулы видно, что необходимое значение МДС можно получить, используя малое количество витков с большим током или большое количество витков с малым током. Конструктивно более удобен второй вариант: провод малого сечения проще уложить в катушки и легче выполнить контакты. Обмотки независимого и параллельного возбуждения поэтому имеют большое количество витков из провода малого сечения.

По обмотке же последовательного возбуждения протекает ток нагрузки, поэтому она имеет малое количество витков, выполненных проводом большого сечения. Схема генератора с независимым возбуждением приведена на рисунке 1.2, *a*. Обмотка возбуждения подключена к независимому источнику напряжения, что объясняет название генератора.

Работа любого генератора постоянного тока характеризуется следующими параметрами:

- 1) частотой вращения n , мин⁻¹;
- 2) напряжением генератора U_G , В;
- 3) током нагрузки или током якоря I_A , А;
- 4) током возбуждения I_B , А.

Все четыре параметра генератора взаимосвязаны, и исследовать их одновременно сложно. Поэтому обычно исследуют зависимость между двумя параметрами, предполагая, что оставшиеся два остаются постоянными. Такая зависимость называется характеристикой генератора, т.к. частота вращения не зависит от самого генератора, а зависит от приводного двигателя, поэтому для всех характеристик она считается постоянной, $n = \text{const}$. Чтобы исследовать генератор постоянного тока достаточно снять пять характеристик.

1. Характеристика холостого хода – это зависимость между напряжением генератора и током возбуждения, если ток якоря равен

нулю, а частота вращения является постоянной, т.е. $U_{\Gamma} = f(I_{\text{В}})$, $I_{\text{Я}} = 0$, $n = \text{const}$;

2. Внешняя характеристика – зависимость напряжения генератора от тока якоря при неизменном токе возбуждения, постоянной частоте вращения: $U_{\Gamma} = f(I_{\text{Я}})$, $I_{\text{В}} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

3. Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянном напряжении генератора и постоянной частоте вращения: $I_{\text{В}} = f(I_{\text{Я}})$, $U_{\Gamma} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

4. Нагрузочная характеристика – зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при постоянном токе якоря, не равном нулю и постоянной частоте вращения: $U_{\Gamma} = f(I_{\text{В}})$, $I_{\text{Я}} \neq 0 = \text{const}$, $n = \text{const}$.

5. Характеристика короткого замыкания – зависимость тока якоря от тока возбуждения, если сопротивление нагрузки генератора равно нулю и частота вращения постоянная: $I_{\text{Я}} = f(I_{\text{В}})$, $R_{\text{Н}} = 0$, $n = \text{const}$.

Характеристика холостого хода (рис. 1.3) имеет прямолинейный и криволинейный участки.

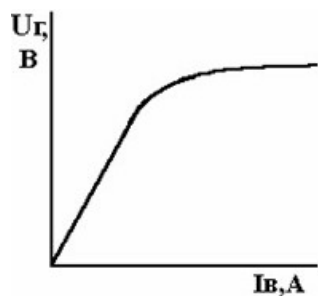


Рис. 1.3. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Как известно (1.1), увеличение тока возбуждения приводит к росту МДС. С ростом МДС будет увеличиваться магнитный поток Φ .

$$\Phi = F / Z_M, \quad (1.2)$$

где Z_M – сопротивление магнитному потоку.

$$Z_M = Z_{M\delta} + Z_{MC}, \quad (1.3)$$

где $Z_{M\delta}$ – сопротивление воздушного зазора магнитному потоку;

Z_{MC} – сопротивление стали магнитному потоку.

Сопротивление воздушного зазора всегда постоянно и не зависит от значения магнитного потока. Сопротивление стали в ненасыщенном режиме близко к нулю, а при насыщении начинает увеличиваться. Поэтому на участке I магнитный поток растет линейно, пропорционально току возбуждения, а на участке II теряет свою линейность.

В режиме холостого хода напряжение генератора U_{Γ} равно его ЭДС E . ЭДС пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения якоря машины:

$$E = C_E \Phi n, \quad (1.4)$$

где C_E – постоянная машины для расчета ЭДС.

Внешняя характеристика (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

Для построения ее используем уравнение равновесия ЭДС генератора

$$U_{\Gamma} = E - I_{\text{Я}} r_{\text{Я}}. \quad (1.5)$$

Если бы $E = \text{const}$, характеристика представляла бы собой прямую линию: на напряжение влияло бы только падение напряжения на якоре $I_{\text{Я}} r_{\text{Я}}$. Но так как ЭДС зависит от магнитного потока (1.4),

на который воздействует реакция якоря, характеристика теряет свою линейность.

Регулировочная характеристика (рис. 1.5) показывает, в каких пределах следует регулировать ток возбуждения, чтобы напряжение осталось постоянным при изменении нагрузки. Чтобы выяснить характер кривой, необходимо рассматривать ее совместно с внешней характеристикой; с ростом нагрузки I_A напряжение U уменьшается. Чтобы поддерживать его постоянным нужно увеличивать ЭДС $E = C_E \Phi n$. Магнитный поток, в свою очередь, зависит от тока обмотки возбуждения I_B – чем больше I_B , тем выше Φ . Изменяя ток возбуждения, регулируем напряжение.

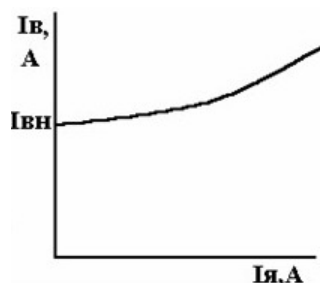


Рис. 1.5. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Нагрузочная характеристика (рис. 1.6) практически повторяет характеристику холостого хода, но идет ниже ее за счет падения напряжения на якоре $I_A r_A$, а также из-за реакции якоря. Характеристика имеет прямолинейный (ненасыщенный) и криволинейный (насыщенный) участки.

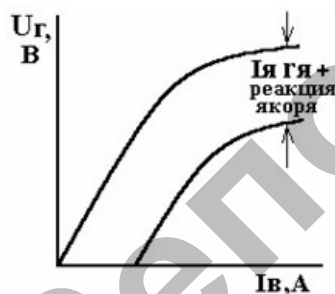


Рис. 1.6. Нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Характеристика короткого замыкания (рис. 1.7). Ток якоря определим согласно закону Ома:

$$I_A = U_G / r_A. \quad (1.6)$$

В опыте короткого замыкания напряжение мало, потому что сопротивление нагрузки равно нулю – $R_H = 0$, а ток якоря не должен превышать номинальный ток генератора. Поэтому опыт короткого замыкания проводится в пределах прямолинейного участка нагрузочной характеристики, следовательно, характеристика короткого замыкания также прямолинейна.

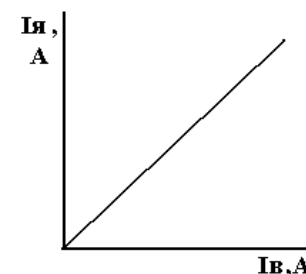


Рис. 1.7. Характеристика короткого замыкания генератора

Основной недостаток генератора с независимым возбуждением – необходимость в источнике напряжения для питания обмотки возбуждения.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию машины постоянного тока по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 1.8).
3. Снять характеристики генератора.

Замеры производить:

- напряжение генератора U – вольтметром PV1;
- тока якоря (нагрузки) I – амперметром PA1;
- тока возбуждения I_B – миллиамперметром PA2.

Регулировать:

- ток возбуждения I_B – реостатом;
- ток якоря I_A – включением нагрузки выключателями QS2...QS6.

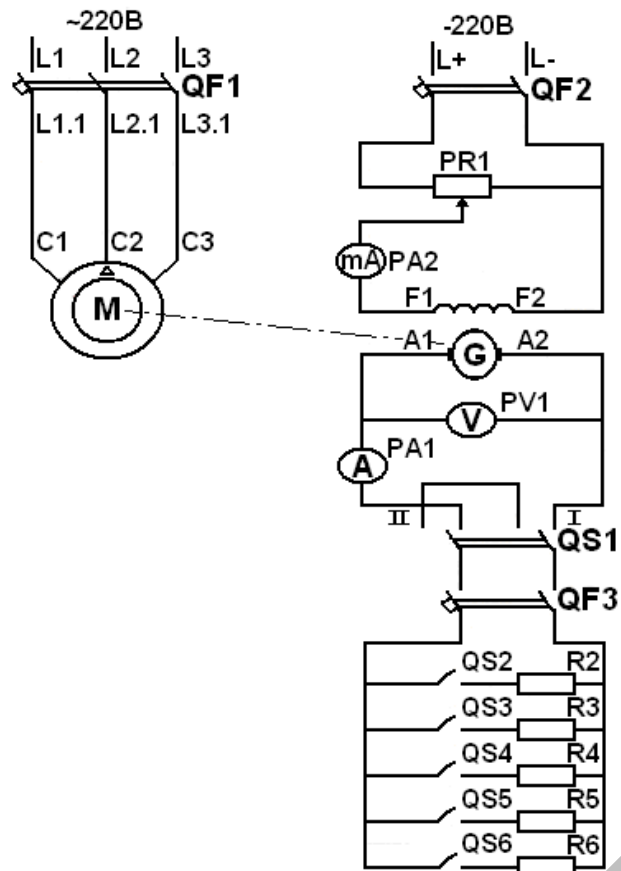


Рис. 1.8. Принципиальная электрическая схема испытания генератора постоянного тока с независимым возбуждением

Характеристика холостого хода $U_{\Gamma} = f(I_{\text{B}})$, $I_{\text{Я}} = 0$, $n = \text{const}$.

Привести генератор G во вращение двигателем M , включив автоматический выключатель $QF1$. Значение первой точки характеристики снимается при отключенном автоматическом выключателе $QF2$ ($I_{\text{B}} = 0$). Затем подать напряжение на обмотку возбуждения $F1-F2$, включив автоматический выключатель $QF2$ и, увеличивая ток возбуждения, снять значения точек характеристики холостого хода до $U = 1,2U_{\text{H}}$. Количество точек измерения должно быть не менее пяти. Данные свести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Данные для построения характеристики холостого хода

I_{B}, A	$U_{\Gamma}, \text{В}$

Построить по данным таблицы 1.2 характеристику холостого хода и сравнить ее с теоретической (рис. 1.3). Сделать выводы.

Внешняя характеристика $U_{\Gamma} = f(I_{\text{Я}})$, $I_{\text{B}} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

При холостом ходе (нагрузка не включена) реостатом $PR1$ установить номинальное напряжение 200 В и занести полученные данные в таблицу 1.3. В дальнейшем, не изменяя ток возбуждения, нагрузить генератор, поочередно включая выключатели $QS2 \dots QS6$ до номинального тока, получая значения остальных точек внешней характеристики.

Таблица 1.3

Данные для построения внешней характеристики

$U_{\Gamma}, \text{В}$	$I_{\text{Я}}, \text{А}$	$I_{\text{B}}, \text{А}$

По данным опыта построить внешнюю характеристику генератора, сравнить с теоретической (рис. 1.4) и сделать выводы.

Регулировочная характеристика $I_{\text{B}} = f(I_{\text{Я}})$, $U_{\Gamma} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

В режиме холостого хода установить напряжение 200 В. Далее постепенно нагружая генератор (включая $QS2 \dots QS6$) до номиналь-

ной нагрузки, изменяют сопротивление реостата PR1 так, чтобы напряжение оставалось неизменным (200 В). Данные измерений заносят в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Данные для построения регулировочной характеристики

$U_T, В$	$I_A, А$	$I_B, А$

По данным таблицы 1.4 построить регулировочную характеристику, сравнить с рисунком 1.5 и сделать выводы.

Характеристика короткого замыкания $I_A = f(I_B)$, $R_H = 0$, $n = \text{const}$.

Для проведения опыта необходимо напряжение на выходе генератора установить равным нулю ($I_B = 0$) и переключатель QS1 установить в положение 2. В дальнейшем, увеличивая ток возбуждения, снять значения остальных точек характеристики. Значение первой точки снимается при $I_B = 0$, последней – при $I_A = 1,2 I_H$, где I_H – номинальный ток генератора. Данные опыта занести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5

Данные для построения характеристики короткого замыкания

$I_A, А$	$I_B, А$

По данным таблицы 1.5 построить характеристику короткого замыкания, сравнить ее с рисунком 1.7 и сделать выводы.

Нагрузочная характеристика $U_T = f(I_B)$, $I_A \neq 0 = \text{const}$, $n = \text{const}$.

Для снятия нагрузочной характеристики приводят генератор во вращение и устанавливают нагрузку $0,5I_H$, включив QS2, QS3. Значения последующих точек получают включением выключателей QS4, QS5, QS6, уменьшая при этом ток возбуждения, чтобы ток нагрузки был неизменным $0,5I_H$. Данные опыта занести в таблицу 1.6.

Таблица 1.6

Данные для построения нагрузочной характеристики

$U_T, В$	$I_B, А$

По данным таблицы 1.6 построить нагрузочную характеристику генератора, сравнить ее с теоретической и сделать выводы.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема проведения опытов, паспортные данные испытуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
 - название опыта;
 - краткое описание опыта;
 - экспериментальные данные и построенные характеристики;
 - выводы.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементы конструкции генератора и материалы, используемые для их изготовления.
2. Назовите параметры генератора постоянного тока с независимым возбуждением и его характеристики.
3. Нарисуйте электрическую схему генератора постоянного тока независимого возбуждения с регулировочным и нагрузочным реостатами, а также приборами для измерения его параметров.
4. Поясните порядок экспериментального снятия каждой характеристики генератора, нарисуйте их и объясните характер кривых.

ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы – изучение конструкции и характеристик генератора с параллельным и смешанным возбуждением.

Общие сведения

Схема для экспериментального снятия характеристик изображена на рисунке 2.7. Назначение приборов и реостатов такое же, как и для генератора с независимым возбуждением.

Обмотка возбуждения получает питание от якоря самого генератора, имеет место самовозбуждение генератора. Для самовозбуждения генератора необходимы три условия:

- 1) наличие остаточного магнитного потока;
- 2) совпадение по направлению потока обмотки возбуждения и остаточного магнитного потока;
- 3) сопротивление цепи, по которой замыкается ток возбуждения (якорь – обмотка возбуждения), должно быть определенного значения.

Процесс самовозбуждения поясняет рис. 2.1. При вращении якоря генератора остаточный магнитный поток вызывает остаточное напряжение $U_{ост}$. В свою очередь $U_{ост}$, приложенное к обмотке возбуждения, вызывает ток возбуждения $I_{в.ост}$, который наводит магнитный поток.

Если магнитный поток, наведенный током возбуждения, совпадает с остаточным, потоки суммируются и вызывают в обмотке якоря напряжение U_1 , которое будет больше $U_{ост}$. Большее напряжение вызовет больший ток возбуждения и, следовательно, еще больший поток и напряжение. Происходит лавинообразный процесс, в результате которого напряжение генератора повышается до напряжения холостого хода U_x , определяемого точкой пересечения характеристики холостого хода 1 и линии 2, выражающей зависимость тока возбуждения от приложенного к обмотке возбуждения напряжения.

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

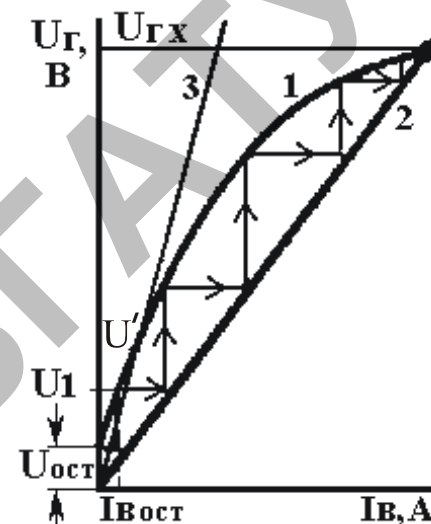


Рис. 2.1. Процесс самовозбуждения генератора:
1 – характеристика холостого хода; 2, 3 – зависимость тока возбуждения от приложенного к обмотке возбуждения напряжения (2 – при нормальном сопротивлении цепи; 3 – при повышенном сопротивлении цепи)

$$I_{в} = U_{Г} / R_{я-в}. \quad (2.1)$$

При большом сопротивлении $R_{я-в}$ зависимость будет ближе к оси ординат (линия 3), а генератор не возбудится или возбудится до напряжения U' , которое мало.

Характеристики генератора. Характеристика холостого хода показана на рисунке 2.1. Ее отличие от аналогичной характеристики генератора с независимым возбуждением состоит только в обязательном наличии остаточного напряжения, т.е. она должна начинаться не с нуля. В остальном они одинаковы: имеют прямолинейный участок и область насыщения – криволинейный участок (см. лабораторную работу № 1).

Нагрузочная характеристика также аналогична характеристике генератора с независимым возбуждением (рис. 2.2), только идет ниже ее, потому что на нее влияет также снижение напряжения генератора, от которого зависит ток возбуждения. Характеристики генератора с независимым возбуждением, приведенные для сравнения, показаны на рисунках штриховой линией.

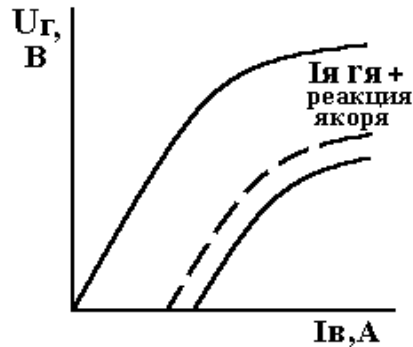


Рис. 2.2. Нагрузочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением показана на рисунке 2.3.

На этом же рисунке показана внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением. Их отличие объясняется тем, что у генератора с параллельным возбуждением на величину напряжения влияют три фактора:

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

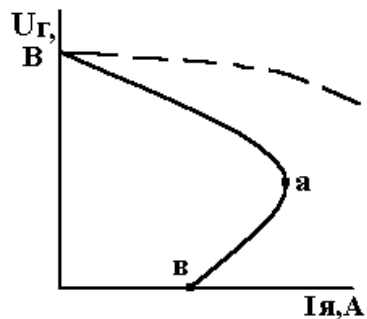


Рис. 2.3. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

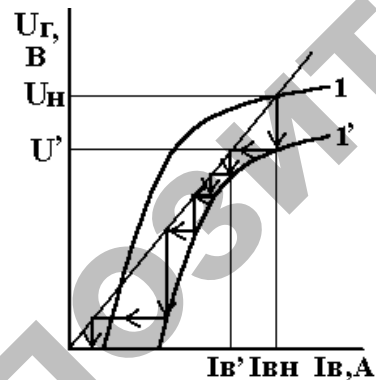


Рис. 2.4. Процесс лавинообразного снижения напряжения генератора при увеличении нагрузки

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

Если нагрузка генератора увеличится до критической (точка «а», рис. 2.3), происходит лавинообразное снижение напряжения до нуля. Предположим, что генератор работал с номинальной нагрузкой, которая соответствует нагрузочной характеристике, приведенной на рисунке 2.4 (кривая 1), при номинальном напряжении U_n . Потом нагрузка увеличилась, нагрузочная характеристика пошла ниже (кривая 1'). Напряжение генератора уменьшилось до U' . Это вызвало снижение

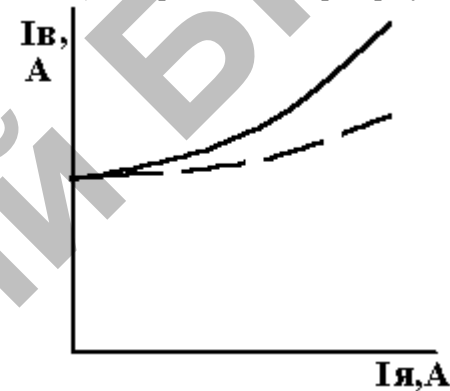


Рис. 2.5. Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

тока возбуждения до $I_{в}'$. Произошел лавинообразный процесс, обратный процессу самовозбуждения, который показан на рисунке 2.1, и напряжение упало до нуля (точка «в», рис. 2.3).

Так как внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением идет ниже, чем у генератора с независимым возбуждением, регулировочная характеристика пойдет выше (рис. 2.5).

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

Генераторы параллельного возбуждения находят широкое применение, так как не требуют дополнительного источника постоянного напряжения для возбуждения. У генератора со смешанным возбуждением обмотка параллельного возбуждения ШОВ (шунтовая ОВ) создает основной магнитный поток, последовательного (СОВ – серийная обмотка возбуждения) – дополнительный поток, который зависит от нагрузки.

Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением показана на рисунке 2.6.

Последовательная обмотка обычно включается согласно параллельной, чтобы их потоки совпадали.

В этом случае магнитный поток последовательной обмотки компенсирует поток реакции якоря, обеспечивая жесткую внешнюю характеристику. Для сравнения на рисунке 2.6. штриховой линией приведена внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

При встречном включении обмоток напряжение генератора резко уменьшается, т.к. поток последовательной обмотки направлен против основного магнитного потока.

Встречное включение обмоток можно применять в специальных генераторах (сварочных), где используется мягкая внешняя характеристика.

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

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию машины.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 2.7).
3. Снять характеристики генератора.

Замеры производить:

- напряжение генератора U – вольтметром PV1;
- тока якоря (нагрузки) $I_{я}$ – амперметром PA1;
- тока возбуждения $I_{в}$ – миллиамперметром PA2.

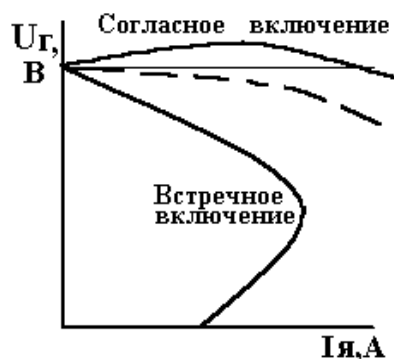


Рис. 2.6. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением

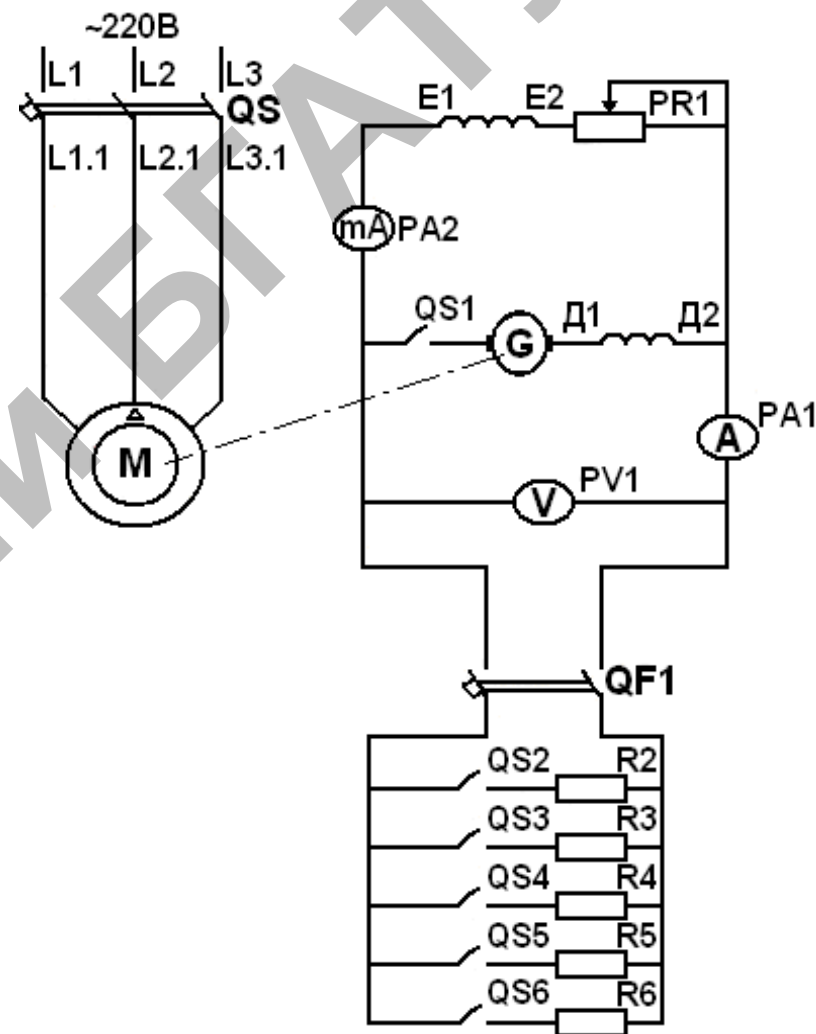


Рис. 2.7. Схема испытания генератора смешанного и параллельного возбуждения

Регулировать:

- ток возбуждения $I_{в}$ – реостатом PR1;

- ток якоря $I_{\text{я}}$ – включением нагрузки выключателями QS2–QS6.

Характеристика холостого хода $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{В}})$, $I_{\text{я}} = 0$, $n = \text{const}$.

Привести якорь генератора G во вращение двигателем M , включив выключатель QS. Проверить соответствие направления вращения якоря генератора согласно стрелке на станине генератора. Если направление вращения не соответствует требуемому, изменить на двигателе M порядок чередования фаз питающего напряжения. Изменяя сопротивление реостата PR1, возбуждите генератор. При проведении опыта автоматический выключатель QF1 отключен.

Значение первой точки характеристики холостого хода снять при отключенном выключателе QS1, чтобы зафиксировать напряжение, обусловленное остаточным магнетизмом главных полюсов машины. Замкнув выключатель QS1 и увеличив ток в обмотке возбуждения до получения напряжения $U = 1,2U_{\text{н}}$, снять значения последующих (5...6) точек. Данные занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Данные для построения характеристики холостого хода

$U_{\text{Г}}$, В	$I_{\text{В}}$, А

По данным таблицы 2.1 построить характеристику холостого хода генератора $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{В}})$, определить коэффициент насыщения машины $K_{\text{н}}$, сравнить построенную кривую с теоретической и сделать выводы.

Внешняя характеристика $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{я}})$, $I_{\text{В}} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

Якорь генератора смешанного возбуждения привести во вращение двигателем M и так же, как и в предыдущем опыте, возбудить генератор до напряжения 200 В. Затем, включив автоматический выключатель QF1, постепенно нагрузить генератор до тока, близкого к номинальному, используя сопротивления R2...R6, включив соответственно выключатели QS2...QS6. Записать значение первой точки характеристики в таблицу 2.2 (для смешанного возбуждения). Для получения значений всех следующих точек ток возбуждения не менять, а нагрузку уменьшать до нуля.

После проверки преподавателем результатов опыта изменить принципиальную схему, исключив последовательную обмотку возбуждения. Снять аналогично внешнюю характеристику для генератора параллельного возбуждения. Данные занести в таблицу 2.2 (для параллельного возбуждения).

Таблица 2.2

Данные для построения внешней характеристики

Параллельное возбуждение		Смешанное возбуждение	
$U_{\text{Г}}$, В	$I_{\text{я}}$, А	$U_{\text{Г}}$, В	$I_{\text{я}}$, А

По данным таблицы 2.2 построить на одном графике внешние характеристики генераторов параллельного и смешанного возбуждения.

Регулировочная характеристика $I_{\text{В}} = f(I_{\text{я}})$, $U_{\text{Г}} = \text{const}$, $n = \text{const}$.

В режиме холостого хода для генератора с параллельным возбуждением установить номинальное напряжение 200 В и данные занести в таблицу 2.3 (графа «параллельное возбуждение»).

Далее, включив автоматический выключатель QF1 и оставляя для всех последующих точек неизменным напряжение генератора 200 В, довести нагрузку выключателями QS2...QS6 до значений, не превышающих ток $1,2I_{\text{н}}$. Данные занести в таблицу 2.3 (графа «параллельное возбуждение»).

После проверки полученных данных аналогично снять регулировочную характеристику для генератора со смешанным возбуждением. Данные занести в таблицу 2.3 (графа «смешанное возбуждение»).

Таблица 2.3

Данные для построения регулировочной характеристики

Параллельное возбуждение		Смешанное возбуждение	
I_B, A	I_A, A	I_B, A	I_A, A
	0		0

По данным опыта на одном графике построить регулировочные характеристики.

Нагрузочная характеристика $U_G = f(I_B), I_A \neq 0 = \text{const}, n = \text{const}$.

Для снятия нагрузочной характеристики соберите схему генератора с параллельным возбуждением, приведите якорь генератора во вращение, возбудите генератор до номинального напряжения и выключателями QS2...QS3 установите нагрузку $0,5I_N$. Это первая точка характеристики. Последующие точки характеристики получают путем уменьшения тока возбуждения, но при этом сохраняя ток нагрузки равным $0,5I_N$. Данные занести в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

Данные для построения нагрузочной характеристики

U_G, B	I_B, A

По данным опыта построить нагрузочную характеристику генератора.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема проведения опытов, паспортные данные испытуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
 - название опыта;
 - краткое описание опыта;
 - экспериментальные данные и построенные характеристики;
 - выводы.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементы конструкций генератора и материалы, используемые для их изготовления.
2. Назовите паспортные данные используемой машины.
3. Нарисуйте принципиальную схему генераторов смешанного и параллельного возбуждения.
4. Объясните процесс самовозбуждения генератора.
5. Какую роль выполняет последовательная обмотка возбуждения?
6. Назовите участки магнитной цепи машины.
7. Поясните методику проведения опытов для получения каждой характеристики генератора, нарисуйте их и объясните характеры кривых.

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы – изучение конструкции и характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Общие сведения

Устройство машины постоянного тока приведено в лабораторной работе № 1. Принцип действия двигателя постоянного тока рассмотрим на простейшей модели.

Возьмем два магнитных полюса, разместим их как показано на рисунке 3.1. Между ними равномерное магнитное поле с индукцией

B . Поместим между полюсами рамку из проводникового материала шириной D , длиной l , концы которой припаяны к полукольцам. Электрический контакт внешней сети с полукольцами осуществляется щетками. Получим простейшую машину постоянного тока. Для того, чтобы машина работала в качестве двигателя, необходимо к рамке подвести напряжение. Напряжение вызывает ток I . Ток будет взаимодействовать с магнитным потоком Φ , а на проводник с током действует сила f :

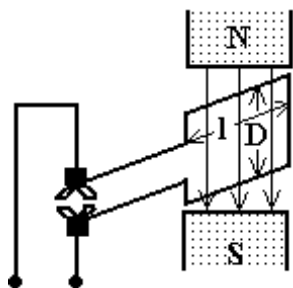


Рис. 3.1. Рамка в магнитном поле

$$f = BIl. \quad (3.1)$$

Эта сила создаст вращающий момент. Направление вращения (вектор приложения силы f) определится по правилу левой руки. Чтобы изменить направление силы, необходимо изменить или направление тока в рамке, или направление магнитного потока.

Уравнение равновесия ЭДС двигателя имеет следующий вид:

$$U = E_d + I_{\text{я}} r_{\text{я}}, \quad (3.2)$$

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

E_d – ЭДС якоря двигателя, В.

Сравните его с аналогичным уравнением генератора. Уравнение моментов двигателя:

$$M_d - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.3)$$

где M_d – момент двигателя, Н·м;

M_c – момент сопротивления рабочей машины, Н·м;

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент;

J – суммарный момент инерции якоря двигателя и вала рабочей машины.

Двигатели постоянного тока имеют следующие характеристики.

1. Моментная – зависимость момента на валу двигателя от тока якоря, $M = f(I_{\text{я}})$ при постоянном напряжении сети $U = \text{const}$.

2. Скоростная (электромеханическая) – зависимость частоты вращения якоря двигателя от тока якоря $n = f(I_{\text{я}})$, при $U = \text{const}$.

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

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

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

Схема двигателя параллельного возбуждения приведена на рисунке 3.2.

Из схемы видно, что если напряжение сети постоянное, ток возбуждения также постоянен. Следовательно, если пренебречь реакцией якоря, постоянным является и основной магнитный поток. Момент на валу двигателя:

$$M = C_m \Phi I_{\text{я}}, \quad (3.4)$$

где C_m – постоянная машины для расчета ЭДС.

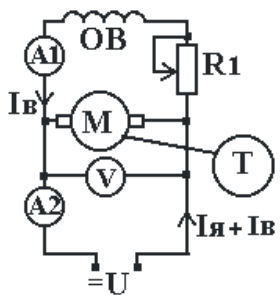


Рис. 3.2. Схема двигателя параллельного возбуждения

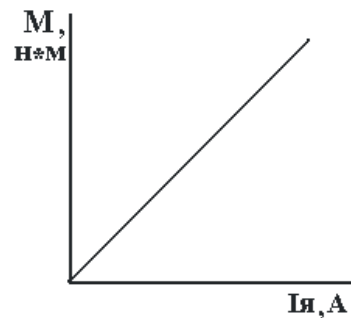


Рис. 3.3. Моментная характеристика двигателя параллельного возбуждения

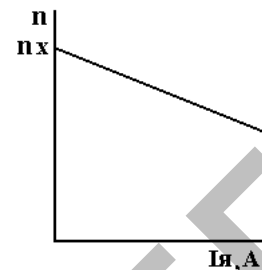


Рис. 3.4. Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения

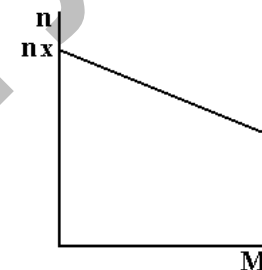


Рис. 3.5. Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения

Так как магнитный поток постоянный, не зависит от нагрузки, то зависимость момента от тока якоря линейная, и моментная характеристика является прямой линией (рис. 3.3).

Для вывода уравнения скоростной характеристики воспользуемся формулой равновесия ЭДС двигателя (3.2).

Как известно, ЭДС машины постоянного тока

$$E = C_e \Phi n. \quad (3.5)$$

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

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_e \Phi}. \quad (3.6)$$

Скоростная характеристика приведена на рисунке 3.4. На ней n_x означает частоту вращения в режиме холостого хода. Если $I_{\text{я}} = 0$ (холостой ход), то

$$n_x = \frac{U}{C_e \Phi}. \quad (3.7)$$

Из анализа формул (3.6) и (3.7) следует, что при обрыве цепи обмотки возбуждения магнитный поток будет равен остаточному, и частота вращения резко увеличится. Это может привести к аварии.

Следует также обратить внимание, что скоростная характеристика двигателя с параллельным возбуждением жесткая: при значительном изменении тока якоря частота вращения меняется незначительно.

Для вывода уравнения механической характеристики выразим из формулы (3.4) ток якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_M \Phi}. \quad (3.8)$$

Подставим его в уравнение (3.6). Получим выражение для механической характеристики:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M r_{\text{я}}}{C_e C_M \Phi}. \quad (3.9)$$

Также как и скоростная характеристика, она линейна (рис. 3.5).

Рабочие характеристики показаны на рисунке 3.6.

Характеристика $I_{\text{я}} = f(P_2)$. Как известно, мощность на валу равна:

$$P_2 = U I_{\text{я}} \eta.$$

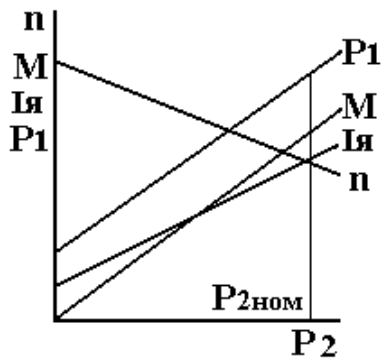


Рис. 3.6. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

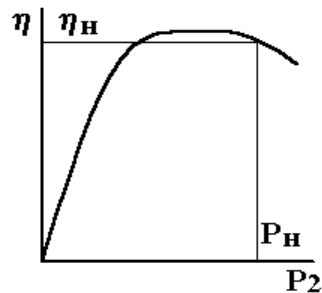


Рис. 3.7. Зависимость КПД от нагрузки

Поэтому ток якоря

$$I_{я} = \frac{P_2}{U\eta}. \quad (3.10)$$

При $P_2 = 0$ ток якоря равен току холостого хода I_x . При изменении P_2 от $0,25P_n$ до $1,25P_n$ КПД практически не изменяется. При построении характеристик можно допустить, что $\eta = \text{const}$. Тогда при $U = \text{const}$ характеристика $I_{я} = f(P_2)$ близка к линейной.

Характеристика $n = f(P_2)$. Если выражение (3.10) подставим в формулу (3.6), то получим:

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{P_2 r_{я}}{\eta U C_e\Phi}. \quad (3.11)$$

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

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

$$M = 9550(P_2 / n). \quad (3.12)$$

Так как с ростом P_2 частота вращения n уменьшается, а P_2 прямо пропорционально $I_{я}$, кривая характеристики $M = f(P_2)$ будет иметь больший наклон, чем кривая зависимости $I_{я} = f(P_2)$, и начинаться с нуля.

Характеристика $P_1 = f(P_2)$. Подведенная мощность к двигателю больше мощности на валу на величину потерь ΔP .

$$P_1 = P_2 + \Delta P. \quad (3.13)$$

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

Характеристика $\eta = f(P_2)$ приведена на рисунке 3.7. При $P_2 = 0$ КПД также равен нулю. При изменении нагрузки от $0,25P_n$ до $1,25P_n$ КПД меняется незначительно.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию машины постоянного тока по имеющимся в лаборатории образцам и плакатам.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 3.8).
3. Снять скоростную, моментную, механическую и рабочие характеристики двигателя.

Внимание! Перед включением установить выход «А» двухканального автотрансформатора TV в положение «min», а выход «В» — в положение «max». Убедиться, что нагрузка двигателя отключена автоматическим выключателем QF3.

Осуществить пуск двигателя. Для этого включить автоматический выключатель QF1. На выходе «В» двухканального автотрансформатора установить ток возбуждения, равный 0,9 А. Затем включить автоматический выключатель QF2 и постепенно увеличить напряжения автотрансформатора на выходе «А» до номинального значения 200В.

Для снятия характеристик двигатель нагружают от тока холостого хода до номинального тока электромагнитным тормозом YB, включив автоматический выключатель QF3 и увеличивая сопротивление реостата PR. При этом необходимо поддерживать номинальное напряжение 200 В и ток в обмотке возбуждения 0,9 А.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементы конструкции двигателя постоянного тока, материалы, используемые для их изготовления.
2. Объясните принцип действия двигателя постоянного тока.
3. Как правильно осуществить пуск двигателя, изменить направление вращения?
4. Нарисуйте принципиальную схему двигателя параллельного возбуждения с учетом требований стандарта.
5. Поясните порядок экспериментального снятия каждой характеристики двигателя, объясните их характер.
6. Назовите области применения двигателей постоянного тока.

Лабораторная работа № 4

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы – изучение конструкции и характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Общие сведения

Схема двигателя последовательного возбуждения приведена на рисунке 4.1.

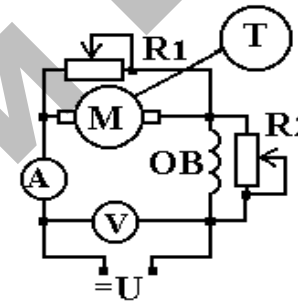


Рис. 4.1. Схема двигателя

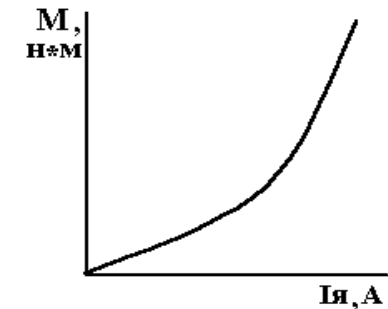


Рис. 4.2. Моментная характеристика

Характерная особенность указанного двигателя в том, что ток возбуждения является током нагрузки и магнитный поток практически пропорционален току якоря.

$$\Phi = kI_{я}, \quad (4.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Подставив выражение (4.1) в формулу момента двигателя (3.4), получим аналитическое выражение моментной характеристики:

$$M = C_M k I_{я}^2. \quad (4.2)$$

Из выражения видно, что моментная характеристика является параболой (рис. 4.2).

Чтобы получить формулу скоростной характеристики (рис. 4.3), подставим выражение (4.1) в уравнение (3.6). Получим:

$$n = \frac{U}{C_e k I_{\text{я}}} - \frac{r_{\text{я}}}{C_e k}. \quad (4.3)$$

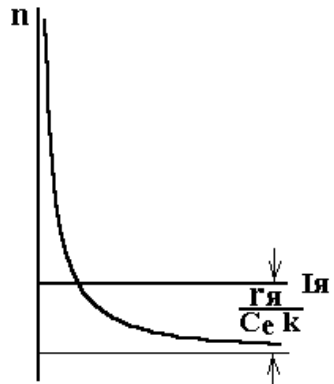


Рис. 4.3. Скоростная характеристика двигателя

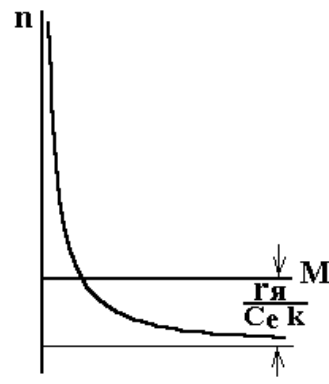


Рис. 4.4. Механическая характеристика двигателя

Скоростная характеристика является гиперболой. Из выражения (4.3) видно, что если ток якоря равен нулю $I_{\text{я}} = 0$, частота вращения равна бесконечности. Это означает, что двигатель последовательного возбуждения нельзя запускать в режиме холостого хода.

Для вывода аналитического выражения механической характеристики, выразим ток из формулы (4.2):

$$I_{\text{я}} = \sqrt{M / C_m k}. \quad (4.4)$$

Подставим полученное выражение в уравнение (4.3):

$$n = \frac{U}{C_e k \sqrt{M / C_m k}} - \frac{r_{\text{я}}}{C_e k} = \frac{U}{C_e} \frac{\sqrt{C_m}}{\sqrt{Mk}} - \frac{r_{\text{я}}}{C_e k}. \quad (4.5)$$

Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением – также гиперболой (рис. 4.4). Следует обратить внимание, что скоростная и механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением мягкие: при изменении нагрузки в значительной мере меняется частота вращения.

Рабочие характеристики показаны на рисунке 4.5.

Характеристика $\eta = f(P_2)$. Если выражение (3.10) подставить в (4.3), получим следующее выражение:

$$n = \frac{U^2 \eta}{C_e k P_2} - \frac{r_{\text{я}}}{C_e k}. \quad (4.6)$$

Из формулы видно, что характер кривой аналогичен скоростной характеристике.

Характеристика $M = f(P_2)$. Аналитическое выражение этой характеристики получится путем подстановки выражения (3.10) в формулу (4.2):

$$M = C_m k \frac{P^2}{\eta^2 U^2}. \quad (4.7)$$

Из формулы видно, что характеристика представляет собой параболу.

Характеристики $I_{\text{я}}, P_1, \eta = f(P_2)$ подобны аналогичным характеристикам двигателя с параллельным возбуждением (см. лабораторную работу № 3).

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения возможно путем включения дополнительного сопротивления в цепь якоря, шунтированием обмотки якоря, шунтированием обмотки возбуждения. Схема регулирования частоты вращения двигателя и скоростные характеристики приведены на рисунке 4.6.

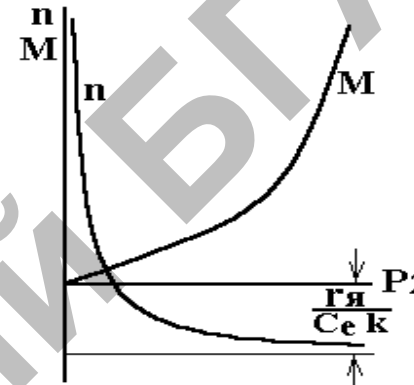
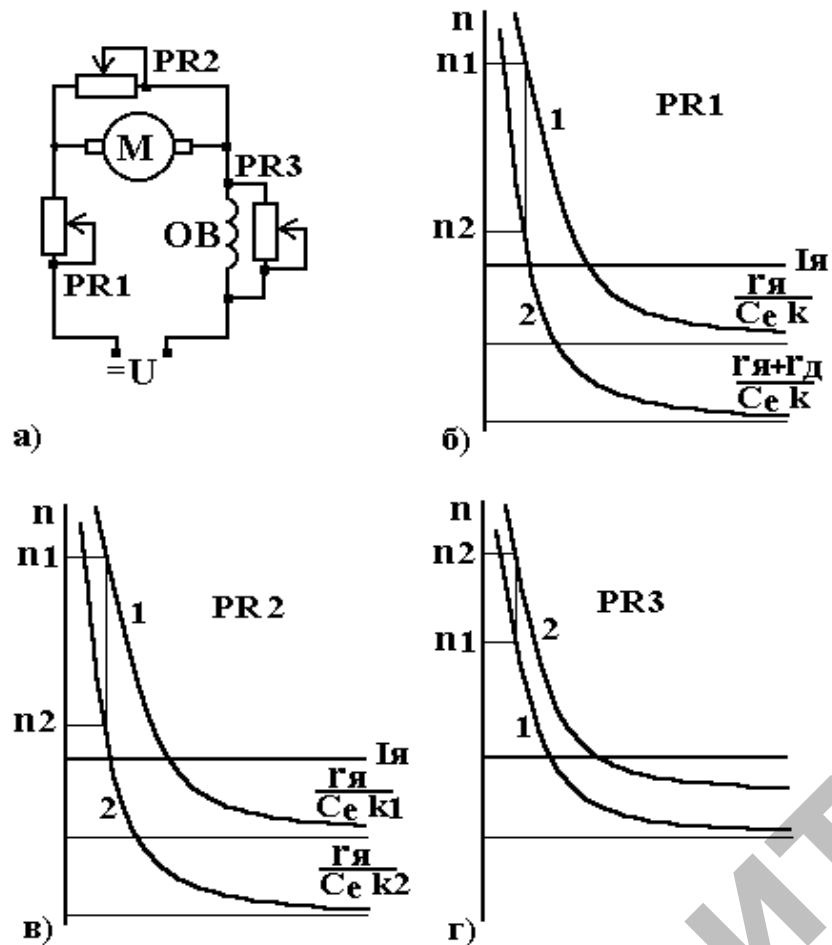


Рис. 4.5. Рабочие характеристики двигателя



Из

Рис. 4.6. Регулирование частоты вращения двигателя:
 а – схема; б – скоростные характеристики при включении в цепь якоря дополнительного сопротивления; в – скоростные характеристики при шунтировании якоря сопротивлением; г – скоростные характеристики при шунтировании обмотки возбуждения; 1 – естественные; 2 – искусственные характеристики

При включении дополнительного сопротивления PR_1 в цепь якоря (рис. 4.6, а), если ток не меняется (задается нагрузкой), частота вращения равна:

$$n = \frac{U}{C_e k I_a} - \frac{r_a + r_d}{C_e k} \quad (4.8)$$

Из формулы следует, что скоростные характеристики смещаются на величину $\frac{r_d}{C_e k}$, где r_d – дополнительное сопротивление в цепи якоря (рис. 4.6, б). Точно так же пойдут характеристики, если изменить питающее напряжение.

При шунтировании якоря сопротивлением PR_2 , по обмотке якоря пойдёт меньший ток, чем по обмотке возбуждения, потому что часть тока пойдёт по шунтирующему якорь сопротивлению. Вторая составляющая формулы (4.3) уменьшится и кривая 2 пойдёт ниже кривой 1 (рис. 4.6, в).

При шунтировании обмотки возбуждения сопротивлением PR_3 коэффициент k (4.1) уменьшится, обе составляющие формулы (4.3) увеличатся и кривая 1 пойдёт ниже кривой 2 (рис. 4.6, г).

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию машины постоянного тока по имеющимся в лаборатории образцам и плакатам.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 4.7).
3. Снять характеристики двигателя: скоростную, механическую, моментную, регулировочные и рабочие.

Параметры определять следующими приборами:

- напряжение двигателя U_d – вольтметром PV1;
- ток якоря I_a – амперметром PA2;
- напряжение генератора U_g – вольтметром PV2;
- ток генератора I_g – амперметром PA5;
- ток возбуждения I_B – амперметром PA1;
- ток шунтов $I_{ш}$ – амперметрами PA3 и PA4.

Осуществить пуск двигателя.

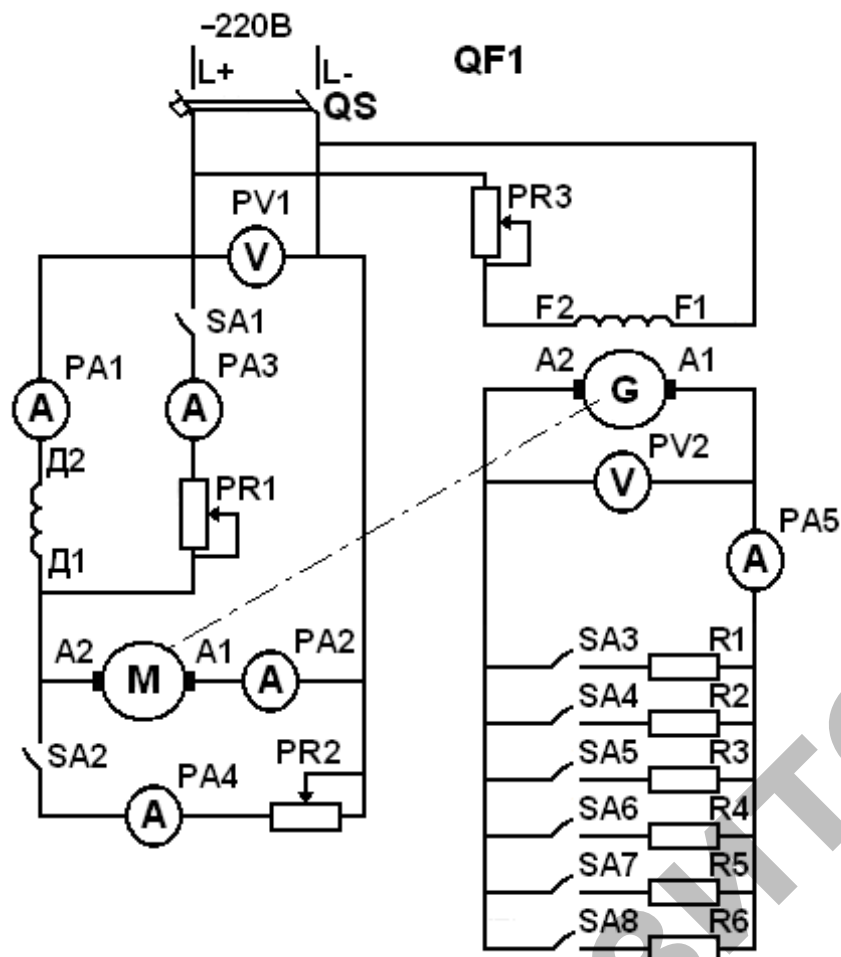


Рис. 4.7. Схема испытания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Скоростная, моментная и механическая характеристики двигателя.

Перед пуском необходимо убедиться, что цепи, шунтирующие обмотку возбуждения и якоря, отключены выключателями SA1, SA2,

а генератор G нагружен включением одной ступени сопротивлений (включен SA3). Запустите двигатель. Установите напряжение генератора 200 В. Двигатель при этом нагружен генератором, который, в свою очередь, работает на нагрузку. Последующие точки получают включением остальных ступеней сопротивлений (R2–R6) выключателями SA4–SA8. Напряжение генератора поддерживать равным 200 В для снятия показателей всех измеряемых точек характеристик. Данные записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Данные для построения скоростной, механической и моментной характеристик

$U_d, В$	$I_a, А$	$n, \text{мин}^{-1}$	$I_f, А$	$U_f, В$

На основании полученных данных построить скоростную $n = f(I_a)$, моментную $M = f(I_a)$ и механическую $n = f(M)$ характеристики.

Регулировочные характеристики.

Запустить двигатель. Генератор при этом должен быть нагружен двумя ступенями сопротивлений R1 и R2 (включены SA3, SA4). Напряжение генератора поддерживать для измерения значений всех точек неизменным (150 В).

Далее шунтируют обмотку возбуждения сопротивлением PR1 (выключатель SA1 включить). Для снятия характеристик изменяют сопротивление PR1 и данные заносят в таблицу 4.2. На основании полученных данных строят регулировочную характеристику скоростную $n = f(I_B)$.

В дальнейшем размыкают шунтирующую цепь выключателем SA1 и включают шунтирующую цепь обмотки якоря двигателя включением SA2. Изменяя сопротивление PR2, получают вторую регулировочную характеристику. Данные опыта заносят в таблицу 4.2. На основании полученных данных строят регулировочную характеристику скоростную $n = f(I_a)$.

- экспериментальные данные и построенные характеристики;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементы конструкции двигателя постоянного тока, материалы, используемые для их изготовления.
2. Объясните принцип действия двигателя постоянного тока.
3. Как правильно осуществить пуск двигателя?
4. Нарисуйте принципиальную схему двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с учетом требований стандарта.
5. Поясните порядок экспериментального снятия каждой характеристики двигателя, объясните их характер.
6. Назовите области применения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

СИНХРОННЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Цель работы – изучить конструкцию и характеристики синхронного генератора.

Общие сведения

Синхронная машина состоит из неподвижной части – статора и подвижной – ротора (рис. 5.1). Статор включает в себя корпус, выполненный из чугуна или алюминиевого сплава. В корпус запрессован сердечник, выполненный из изолированных пластин электротехнической стали. В сердечнике выштампованы пазы, в которые уложена трехфазная обмотка. В режиме работы в качестве генератора в ней наводится ЭДС, а в режиме двигателя она создает вращающееся магнитное поле. С двух сторон корпус закрыт подшипниковыми щитами. В подшипниках размещена подвижная часть двигателя – ротор. Он представляет собой вал с закрепленным на нем сердечником из пластин электротехнической стали. В сердечнике уложена обмотка возбуждения, создающая основной магнитный поток. Выводы обмотки присоединены к контактным кольцам, расположенным на валу.

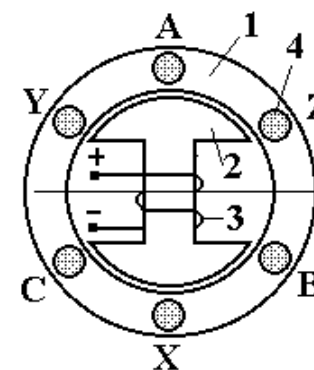


Рис. 5.1. Схематичный разрез синхронной машины:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – обмотка возбуждения; 4 – обмотка якоря (статора)

Конструктивное исполнение синхронной машины может быть различным в зависимости от ее назначения и мощности. Существует прямое и обратное исполнение синхронной машины. Прямое исполнение – обмотка возбуждения расположена на роторе, а обмотка якоря – на статоре. Обратное – обмотка возбуждения расположена на статоре, а обмотка якоря – на роторе. В электромагнитном отношении оба исполнения одинаковы. В первом варианте через скользящие контакты передается мощность возбуждения, которая составляет не более 3 % от номинальной мощности машины. Во втором варианте скользящие контакты должны быть рассчитаны на полную мощность машины, поэтому обратное исполнение применяется для машин небольшой мощности.

Роторы синхронных машин могут иметь явнополюсную и неявнополюсную конструкции (рис. 5.2). Явнополюсные роторы применяются в мощных машинах с малой частотой вращения (гидрогенераторы) и в быстроходных машинах малой мощности (синхронные двигатели, дизель-генераторы). Неявнополюсные роторы используют в мощных быстроходных машинах (турбогенераторы).

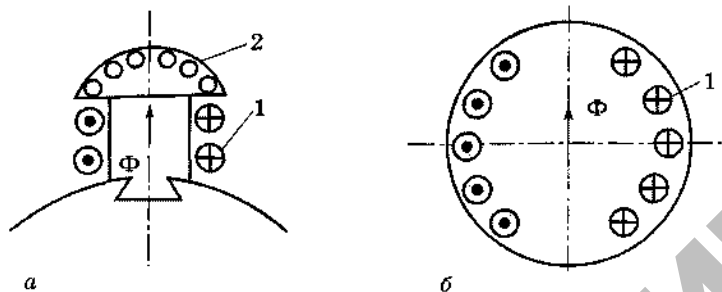


Рис. 5.2. Конструкции роторов синхронных машин:
а – явнополюсная; б – неявнополюсная

Кроме обмотки возбуждения 1 (рис. 5.2), ротор может иметь демпферную обмотку 2. Она расположена в наконечниках полюсов и по своей конструкции аналогична короткозамкнутой обмотке ротора в асинхронном двигателе. Демпферная обмотка играет роль успокоительной обмотки при колебаниях нагрузок. Кроме того, в генераторе она ослабляет поле обратной последовательности, а в двигателях является пусковой обмоткой.

При работе синхронной машины в режиме генератора ротор

приводится во вращение приводным двигателем. Обмотка возбуждения через скользящие контакты подключается к источнику постоянного напряжения. Создаваемый ею магнитный поток, пересекая витки обмотки якоря (статора), наводит в них ЭДС:

$$E_0 = 4,44 f_1 W_1 \Phi K_{об}, \quad (5.1)$$

где $f_1 = \frac{pn_2}{60}$ – частота тока;

Φ – магнитный поток обмотки возбуждения;

W_1 – количество витков обмотки статора (якоря);

$K_{об}$ – обмоточный коэффициент статора;

p – число пар полюсов генератора;

n_2 – частота вращения ротора генератора.

В качестве приводных двигателей для генераторов могут использоваться гидравлические и паровые турбины, а также дизельные двигатели. В соответствии с этим различают гидрогенераторы, турбогенераторы, дизель-генераторы, конструкции которых отличны друг от друга. Гидрогенератор характеризуется малой частотой вращения (50–600 мин⁻¹), поэтому ротор его выполняется явнополюсным с большим количеством полюсов. Для увеличения момента инерции ротор изготавливается с возможно большим диаметром и наименьшей длиной. Обычно гидрогенератор имеет вертикальное расположение вала. Турбогенераторы быстроходны (частота вращения до 3000 мин⁻¹) и выполняются с неявнополюсным ротором с горизонтальным расположением вала. Длина ротора больше, чем у гидрогенератора, а диаметр меньше.

Для создания магнитного поля в мощных синхронных машинах используется электромагнитное возбуждение. Основным требованием к нему является эффективное регулирование тока возбуждения. Различают независимое возбуждение и самовозбуждение. При независимом возбуждении обмотка возбуждения синхронных машин питается от генератора постоянного тока (возбудителя), установленного на валу ротора синхронной машины (рис. 5.3, а). Регулирование тока возбуждения осуществляется реостатом. Процесс регулирования осуществляется автоматически. В крупных генераторах ток возбуждения составляет сотни, а то и тысячи ампер, и

процесс самовозбуждения становится затруднительным. В этом случае обмотка возбуждения возбудителя синхронной машины питается от вспомогательного генератора, который называется подвозбудителем (рис. 5.3, б). Для того чтобы исключить скользящий контакт, питающий обмотку возбуждения синхронной машины, в качестве возбудителя используют синхронный генератор обращенной конструкции (рис. 5.3, в). Выпрямительный блок устанавливается на валу синхронной машины. Он может быть регулируемым. Тогда необходимы дополнительные скользящие контакты для сигналов управления. При самовозбуждении (рис. 5.3, г) обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через регулируемый выпрямительный блок.

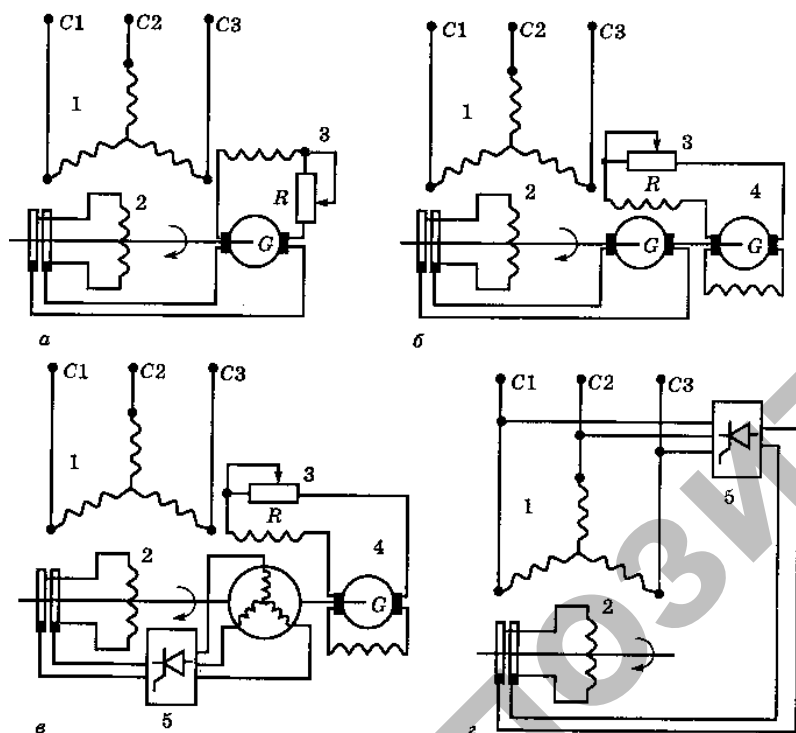


Рис. 5.3. Схемы возбуждения синхронной машины:
1 – обмотка статора; 2 – обмотка возбуждения; 3 – возбудитель;
4 – подвозбудитель; 5 – выпрямительный блок

При нагрузке машины в обмотке статора появляется ток, который будет создавать свой магнитный поток. Он будет искажать, усиливать или ослаблять основной магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения. Воздействие потока, созданного обмоткой статора, на основной магнитный поток называется реакцией якоря.

Действие реакции якоря зависит от характера нагрузки. Нагрузка может быть активной (R), индуктивной (L), емкостной (C) или смешанной ($R-L$ или $R-C$).

На рисунке 5.4 показана реакция якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузках на примере однофазного двухполюсного синхронного генератора, обмотка которого имеет только одну секцию.

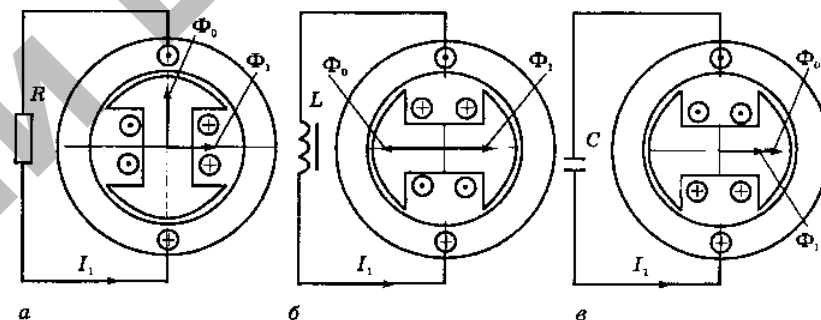


Рис. 5.4. Реакция якоря синхронного генератора при активной (а), индуктивной (б) и емкостной (в) нагрузках

При активной нагрузке (рис. 5.4, а) ток в обмотке статора I_1 совпадает по фазе с ее ЭДС E_0 . Максимальной ЭДС (когда стороны секции находятся посередине полюса, что соответствует вертикальному расположению ротора) будет соответствовать максимальный ток. Показав по правилу «буравчика» направление магнитных потоков обмоток возбуждения и статора, видим, что поток статора Φ_1 направлен перпендикулярно потоку возбуждения Φ_0 – имеет место поперечная реакция якоря. Результирующий магнитный поток машины уменьшается. Это ведет к уменьшению ЭДС машины.

При индуктивной нагрузке (рис. 5.4, б) ток статора отстает от ЭДС по фазе на 90° . Поэтому, когда ток статора достигнет максимума, ротор успеет провернуться на 90° . Поток статора Φ_1 направ-

лен вдоль оси полюса ротора противоположно основному потоку Φ_0 . Таким образом, поток статора при индуктивной нагрузке ослабляет поле машины, реакция якоря оказывает продольно-размагничивающее действие.

При емкостной нагрузке (рис. 5.4, в) вектор тока статора опережает вектор ЭДС на 90° . Ток будет максимальным тогда, когда ротор еще не довернется до вертикального положения на 90° , и потоки статора и обмотки возбуждения будут совпадать. При этом магнитное поле машины усиливается, реакция якоря – продольно-намагничивающаяся.

Синхронный генератор имеет пять характеристик: холостого хода, короткого замыкания, внешнюю, регулировочную и нагрузочную.

Характеристика холостого хода представляет зависимость напряжения генератора от тока возбуждения $U = f(I_B)$ при постоянной частоте вращения $n = \text{const}$ и токе нагрузки равным нулю $I_1 = 0$.

Характеристика холостого хода приведена на рисунке 5.5. Так как нагрузки нет, то потоки реакции якоря и рассеяния наводиться не будут, следовательно, $U_1 = E_0$. Характеристика холостого хода имеет прямолинейный и криволинейный участки, что связано с насыщением стали магнитной системы.

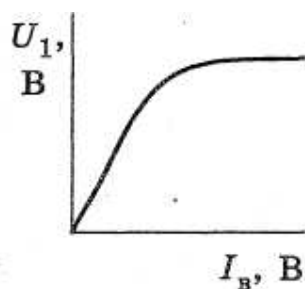


Рис. 5.5. Характеристика холостого хода

Характеристика короткого замыкания — это зависимость тока статора от тока возбуждения $I_1 = f(I_B)$ при замкнутых выводах обмотки статора и постоянной частоте вращения ($n = \text{const}$ и $Z_{\text{нагр}} = 0$, где $Z_{\text{нагр}}$ – сопротивление нагрузки).

При коротком замыкании ток статора равен:

$$I_1 = \frac{E_0}{\sqrt{r_1^2 + x_c^2}}, \quad (5.2)$$

где r_1, x_c – активное и реактивное сопротивления обмотки статора.

Это означает, что нагрузкой генератора является собственное сопротивление, поэтому машина будет работать на прямолинейном участке нагрузочной характеристики. Характеристика короткого замыкания будет прямолинейной. Так как основной составляющей полного сопротивления генератора x_c является сопротивление реакции якоря x_a , характеристика трехфазного короткого замыкания (линия 3, рис. 5.6) идет ниже, чем однофазного и двухфазного (линии 1 и 2), потому что поток реакции якоря от трех фаз больше, чем от одной или двух фаз.

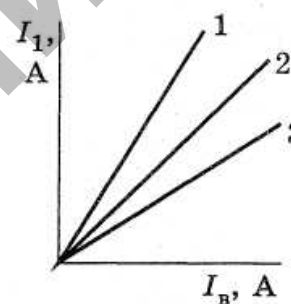


Рис. 5.6. Характеристика короткого замыкания

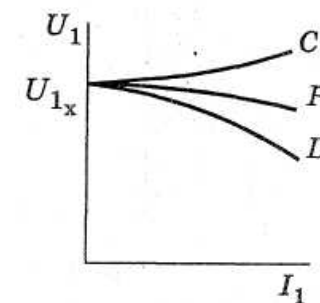


Рис. 5.7. Внешняя характеристика короткого замыкания

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения генератора от тока нагрузки $U_1 = f(I_1)$ при постоянном токе возбуждения ($I_B = \text{const}$, $n = \text{const}$ и $\cos\varphi_1 = \text{const}$).

На рисунке 5.7 показаны внешние характеристики синхронного генератора для емкостной C , активной R и индуктивной L нагрузок. Характер кривых объясняется действием реакции якоря. При индуктивной нагрузке поток реакции якоря направлен встречно магнитному потоку обмотки возбуждения, поэтому с ростом нагрузки основная ЭДС и, следо-

вательно, напряжение генератора будет уменьшаться. При емкостной нагрузке наоборот – поток реакции якоря усиливает основной магнитный поток и напряжение увеличивается. При активной нагрузке поперечный поток реакции якоря искажает основной магнитный поток, тем самым ослабляя его. Поэтому с ростом нагрузки напряжение уменьшается, но не так сильно, как при индуктивной нагрузке.

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_B = f(I_1)$ при постоянном напряжении, если ($U_B = \text{const}$, $n = \text{const}$ и $\cos\varphi_1 = \text{const}$).

Поведение кривых (рис. 5.8) зависит от характера нагрузки и объясняется внешними характеристиками. При индуктивной нагрузке (с ее ростом) внешняя характеристика идет вниз. Чтобы напряжение генератора осталось постоянным, ток возбуждения необходимо увеличить, поэтому регулировочная характеристика идет вверх. При емкостной нагрузке напряжение наоборот – увеличивается, поэтому регулировочная характеристика идет вниз. При активной нагрузке регулировочная характеристика также идет вверх.

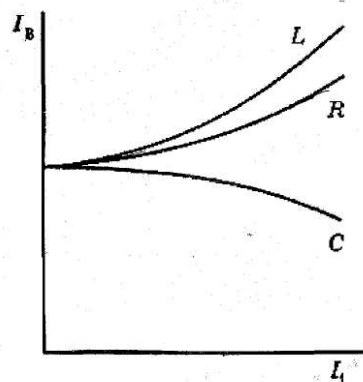


Рис. 5.8. Регулировочная характеристика

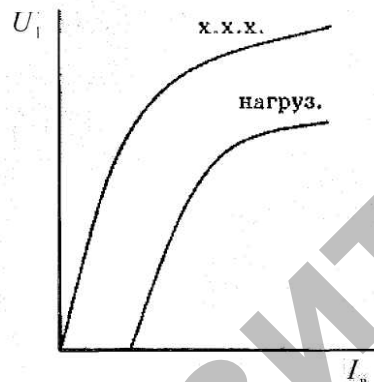


Рис. 5.9. Нагрузочная характеристика

Нагрузочной характеристикой называется зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при постоянной нагрузке $U_1 = f(I_B)$ ($I_1 \neq 0 = \text{const}$, $n = \text{const}$ и $\cos\varphi_1 = \text{const}$).

Нагрузочная характеристика представлена на рисунке 5.9. Она идет ниже характеристики холостого хода (х.х.х.) и может быть объяснена индуктивным характером нагрузки. Уменьшение напря-

жения происходит за счет реакции якоря, потоков рассеяния и падения напряжения в обмотке статора.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию синхронной машины по имеющимся в лаборатории образцам и плакатам.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 5.10). Записать номинальные данные исследуемой машины.
3. Снять характеристику холостого хода, характеристику короткого замыкания, внешнюю характеристику, регулировочную и нагрузочную характеристики синхронного генератора.

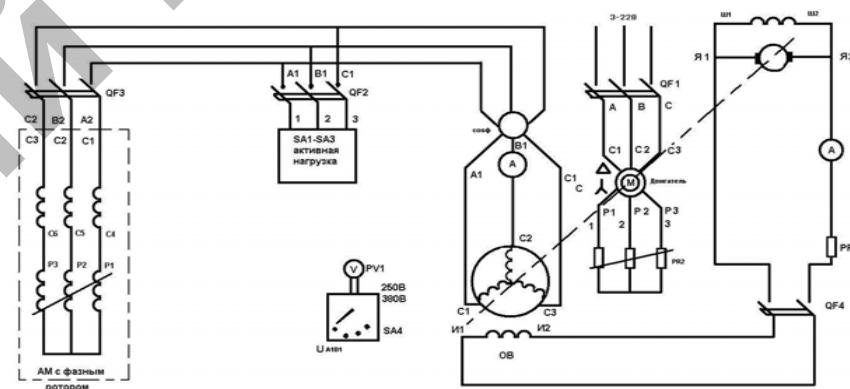


Рис. 5.10. Принципиальная электрическая схема исследования характеристик синхронного генератора

Характеристика холостого хода.

Перед включением установки в работу проверить положение пускового реостата двигателя PR2 – он должен находиться в положении «Пуск», регулировочный реостат в цепи возбуждения генератора PR1 – в положении, соответствующем минимуму тока возбуждения, автоматы в цепи нагрузки QF2 и QF3 должны быть отключены. После включения автоматом QF1 питания приводного двигателя пусковой реостат PR2 плавно (в течение 5–7 с) вывести в положение «Полный». Подключить обмотку возбуждения генератора автоматом QF4. Ток возбуждения при помощи реостата PR1

изменять от нуля до значения, при котором напряжение генератора станет равным $1,2U_{1н}$. Данные опыта занести в таблицу 5.1. Выключить лабораторную установку.

Таблица 5.1

Данные для построения характеристики холостого хода

Измерено		Вычислено		
U_1 , В	I_B , А	$U_{1ф}$, В	$U_{1ф*}$, о.е.	I_{B*} , о.е.

В практических расчетах, связанных с исследованием электрических машин, применяется система относительных единиц, позволяющая более наглядно сравнивать машины разных типов и мощности и облегчающая расчеты. Параметр в относительных единицах выражается как доля базовой величины и обозначается тем же индексом, но со звездочкой. За базовые величины принимаются соответствующие номинальные параметры машины.

Расчетные формулы:

$$U_{1ф} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad U_{1ф*} = \frac{U_1}{U_{1н}}; \quad I_{B*} = \frac{I_B}{I_{Вн}}$$

На основании полученных результатов построить характеристику холостого хода синхронного генератора в системе относительных единиц $U_{1ф*} = f(I_{B*})$.

Характеристика короткого замыкания.

Отключить от электросети лабораторную установку. Режим двухфазного короткого замыкания получают путем соединения накоротко двух выходных клемм генератора. Перед включением установки в работу проверить, чтобы пусковой реостат двигателя PR2 находился в положении «Пуск», регулировочный реостат в цепи возбуждения генератора PR1 – в положении, соответствующем ми-

нимуму тока возбуждения, автоматы в цепи нагрузки QF2 и QF3 и в цепи возбуждения QF4 отключены. После включения автоматом QF1 питания приводного двигателя пусковой реостат PR2 плавно (в течение 5–7 с) вывести в положение «Полный». Подключить обмотку возбуждения генератора автоматом QF4. Ток возбуждения при помощи реостата PR1 изменять от нуля до значения, при котором ток генератора станет равным $1,2I_{1н}$. Данные опыта занести в таблицу 5.2.

Выключить лабораторную установку и отключить ее от электросети. Соединив накоротко все три клеммы обмотки якоря генератора, аналогично снимают характеристику трехфазного короткого замыкания. Данные опыта занести в таблицу 5.2. Выключить лабораторную установку и отключить ее от электросети.

Таблица 5.2

Данные для построения характеристик короткого замыкания

Двухфазное короткое замыкание				Трехфазное короткое замыкание			
Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
$I_1^{(2)}$, А	I_B , А	$I_{1*}^{(2)}$, о.е.	I_{B*} , о.е.	$I_1^{(3)}$, А	I_B , А	$I_{1*}^{(3)}$, о.е.	I_{B*} , о.е.

Расчетные формулы:

$$I_{1*}^{(2)} = \frac{I_1^{(2)}}{I_{1н}}; \quad I_{1*}^{(3)} = \frac{I_1^{(3)}}{I_{1н}}; \quad I_{B*} = \frac{I_B}{I_{Вн}}$$

На основании полученных результатов построить на одном графике характеристики короткого замыкания синхронного генератора $I_{1*}^{(2)} = f(I_{B*})$ и $I_{1*}^{(3)} = f(I_{B*})$.

Внешняя характеристика.

Восстановить первоначальную схему. Запустить генератор и в режиме холостого хода установить номинальное напряжение на его выходе. Автоматом QF2 включить активную нагрузку и, регулируя ее с помощью выключателей SA1–SA3, нагружать генератор до номинального тока, поддерживая ток возбуждения неизменным. Данные опыта занести в таблицу 5.3. Отключить активную нагрузку. В режиме холостого хода установить номинальное напряжение на выходе генератора. Автоматом QF3 включить реактивную нагрузку и нагружать генератор до номинального тока, поддерживая ток возбуждения неизменным. Данные опыта занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Данные для построения внешних характеристик

Активная нагрузка генератора				Реактивная нагрузка генератора			
Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
$U_1, В$	$I_1, А$	$U_{1\phi*}, о.е.$	$I_{1*}, о.е.$	$U_1, В$	$I_1, А$	$U_{1\phi*}, о.е.$	$I_{1*}, о.е.$

Расчетные формулы:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad U_{1\phi*} = \frac{U_1}{U_{1н}}; \quad I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1н}}$$

На основании полученных результатов построить на одном графике внешние характеристики генератора $U_{1\phi*} = f(I_{1*})$ при активном и при реактивном характере нагрузок.

Регулировочная характеристика.

Запустить генератор и в режиме холостого хода установить номинальное напряжение на его выходе. Автоматом QF2 включить активную нагрузку и, регулируя ее с помощью выключателей SA1–SA3, нагружать генератор до номинального тока, поддерживая напряже-

ние на выводах генератора неизменным путем регулирования тока возбуждения. Данные занести в таблицу 5.4. Отключить активную нагрузку. В режиме холостого хода установить номинальное напряжение на выходе генератора. Автоматом QF3 включить реактивную нагрузку и нагружать генератор до номинального тока, поддерживая напряжение генератора неизменным. Данные занести в таблицу 5.4.

Таблица 5.4

Данные для построения регулировочных характеристик

Активная нагрузка генератора				Реактивная нагрузка генератора			
Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
$I_B, А$	$I_1, А$	$I_{B*}, о.е.$	$I_{1*}, о.е.$	$I_B, А$	$I_1, А$	$I_{B*}, о.е.$	$I_{1*}, о.е.$

Расчетные формулы:

$$I_{B*} = \frac{I_B}{I_{Bн}}; \quad I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1н}}$$

На основании полученных результатов построить на одном графике регулировочные характеристики генератора $I_{B*} = f(I_{1*})$ при активном и при реактивном характере нагрузки.

Нагрузочная характеристика.

Запустите генератор и в режиме холостого хода и установите на его выходе напряжение, равное $1,2U_{1н}$. В качестве нагрузки подключите автоматом QF3 асинхронную машину с фазным ротором, работающую в режиме регулируемой реактивной катушки. Путем поворота ротора добейтесь в цепи генератора номинального тока. Далее, изменяя одновременно угол поворота ротора и уменьшая ток возбуждения генератора, снимите характеристику, поддерживая номинальное значение тока в цепи генератора. Данные опыта занесите в таблицу 5.5.

Таблица 5.5

Данные для построения нагрузочной характеристики

Измерено		Вычислено		
U_1 , В	I_B , А	$U_{1\phi}$, В	$U_{1\phi*}$, о.е.	I_{B*} , о.е.

Расчетные формулы:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad U_{1\phi*} = \frac{U_1}{U_{1н}}; \quad I_{B*} = \frac{I_B}{I_{Bн}}$$

На основании полученных результатов построить нагрузочную характеристику синхронного генератора в системе относительных единиц $U_{1\phi*} = f(I_{B*})$.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема проведения опытов, паспортные данные испытуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
 - название опыта;
 - краткое описание опыта;
 - экспериментальные данные и построенные характеристики;
 - выводы.

Контрольные вопросы

1. Назовите элементы конструкции синхронной машины, материалы, используемые для их изготовления.
2. Объясните принцип действия синхронного генератора.
3. Объясните методику вычисления параметров синхронной машины в системе относительных единиц.

4. Почему точка $U = U_n$ выбрана на сгибе характеристики холостого хода, а не в точке с меньшим насыщением?

5. Почему характеристики короткого замыкания прямолинейны?

6. Почему при одинаковом токе возбуждения ток двухфазного короткого замыкания больше тока трехфазного короткого замыкания?

7. Как влияет характер нагрузки на внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора?

8. Какие способы возбуждения синхронных машин вы знаете?

9. Что такое реакция якоря и как она влияет на работу синхронного генератора?

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАУНДИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы – изучить конструкцию, основные характеристики компаундированного синхронного генератора.

Общие сведения

Известно, что внешняя характеристика обычного синхронного генератора круто падает с увеличением нагрузки. Для того чтобы поддерживать напряжение постоянным, близким к номинальному, как этого требуют правила эксплуатации, нужно обеспечить изменение тока возбуждения генератора в зависимости от тока его нагрузки. Это достигается компаундированием генератора.

В лабораторной работе используется однофазный компаундированный синхронный генератор (КСГ), который выполнен в одном корпусе с приводным двигателем постоянного тока параллельного возбуждения.

На неподвижной части статора КСГ к станине крепятся полюсы с основной обмоткой возбуждения (И1, И2) и вспомогательной (К1, К2) компаундированной обмоткой. Назначение статора – создать основной магнитный поток обмоткой И1, И2 и дополнительной – К1, К2. Последняя, компаундирующая обмотка включается согласно основной обмотке возбуждения с тем, чтобы создаваемые магнитные потоки суммировались. Статор в данной конструкции называют индуктором (индуктирует поток). Генератор может работать и с отключенной компаундирующей обмоткой.

Подвижная часть машины – ротор имеет вал, магнитопровод с якорной обмоткой (С1, С2), подключенной на два контактные кольца, размещенные на этом же валу. В обмотке С1, С2 наводится ЭДС, с контактных колец посредством токосъемных щеток снимается напряжение. Ротор в этом случае называют якорем.

Компаундирующая обмотка получает питание от вторичной обмотки трансформатора тока (ТА) после выпрямления диодным мостом (ВД1). Первичная обмотка трансформатора тока (Л1, Л2) включается последовательно с обмоткой якоря (С1, С2).

Число витков компаундирующей обмотки W_k выбирается с учетом необходимости компенсации реакции якоря и вызываемого этим падением напряжения в обмотке якоря при номинальной нагрузке:

$$W_k = W_{\text{осн}} / 20,$$

где $W_{\text{осн}}$ – число витков основной обмотки возбуждения.

Как известно из теории работы синхронного генератора, с ростом нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается, что вызвано ослаблением основного магнитного потока вследствие размагничивающего действия реакции якоря. При наличии компаундирующей обмотки пропорционально увеличению нагрузки возрастает автоматически напряжение вторичной обмотки трансформатора тока, в цепь которой она включена, и при правильном выборе числа витков обмотки К1, К2 суммарный магнитный поток остается неизменным, несмотря на размагничивающее действие реакции якоря. Таким образом, компаундирующая обмотка позволяет улучшить работу синхронного генератора под нагрузкой.

В данной лабораторной работе при снятии значений основных характеристик включение и отключение компаундирующей обмотки производится с помощью переключателя QS2. Различная по величине активная нагрузка включается выключателями QS3–QS5 и автоматически выключателем QF3. Реактивная нагрузка включается автоматическим выключателем QF2 и регулируется изменением числа витков на катушке с сердечником.

Пуск приводного двигателя постоянного тока необходимо осуществлять с ограничением пускового тока, включая на это время сопротивление R_n , после пуска его закорачивают выключателем QS1.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство синхронного генератора с компаундирующей обмоткой, правила пуска приводного двигателя и включения генератора в работу.

2. Собрать схему исследования генератора (рис. 6.1). Запустить приводной двигатель M , предварительно поставив переключатель QS1 в положение «Пуск», а реостат в цепи возбуждения двигателя PR1 в положение минимального сопротивления (QF2, QF3 отключены). После окончания разгона перевести QS1 в положение «Работа».

Таблица 6.1

Включить QF4 и, увеличивая напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения (I1, I2), с помощью автотрансформатора TV2 добиться номинального напряжения 220 В (PV1) генератора при частоте 50 Гц, регулируя PR1. Ток возбуждения генератора (PA3), соответствующий этому режиму, считать номинальным $i_{ВН}$.

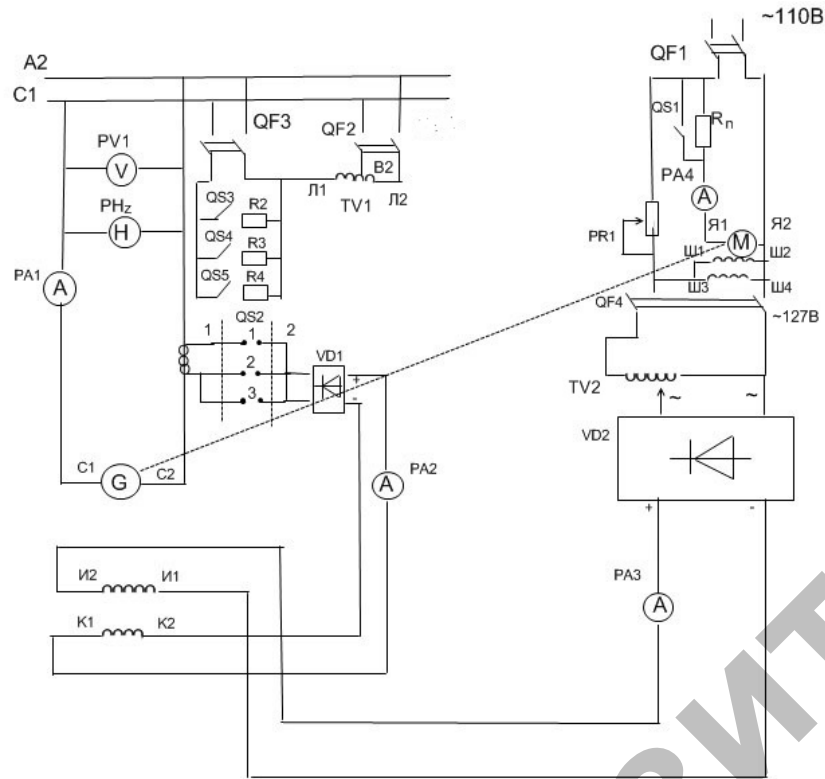


Рис. 6.1. Схема испытания компаундированного синхронного генератора

3. Снять внешние характеристики синхронного генератора $U = f(I)$, соблюдая условия: $i_{ВН} = \text{const}$, $f = 50 \text{ Гц} = \text{const}$. Генератор нагружать от точки холостого хода (QF3, QF2 отключены) до номинального тока 10 А активной нагрузкой ($\cos\varphi = 1$), реактивной ($\cos\varphi = 0$), в режиме без компаундирования и с компаундированием (переключатель QS2). Данные занести в таблицы 6.1 и 6.2.

Внешние характеристики генератора при $\cos\varphi = 1$

с компаундированием					без компаундирования				
опыт		расчет			опыт		расчет		
$i_{ВН}, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_*, \text{о.е.}$	$I_*, \text{о.е.}$	$i_{ВН}, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_*, \text{о.е.}$	$I_*, \text{о.е.}$

Таблица 6.2

Внешние характеристики генератора при $\cos\varphi = 0$

с компаундированием					без компаундирования				
опыт		расчет			опыт		расчет		
$i_{ВН}, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_*, \text{о.е.}$	$I_*, \text{о.е.}$	$i_{ВН}, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_*, \text{о.е.}$	$I_*, \text{о.е.}$

Относительное напряжение генератора $U_* = U / U_H$, где U_H – номинальное напряжение генератора.

Относительный ток нагрузки генератора $I_* = I / I_H$, где I_H – номинальный ток генератора.

4. Снять регулировочные характеристики синхронного генератора $i_{ВН} = f(I)$, соблюдая условие: $U = U_H = 200 \text{ В} = \text{const}$, $f = 50 \text{ Гц} = \text{const}$.

Регулировочные характеристики снять с компаундированием для активной нагрузки ($\cos\varphi = 1$) и для реактивной нагрузки ($\cos\varphi = 0$). Нагрузку изменять от холостого хода до номинальной 10 А. Данные опыта занести в таблицы 6.3 и 6.4.

Таблица 6.3

Регулировочные характеристики генератора при $\cos\varphi = 1$

без компаундирования				с компаундированием			
опыт		расчет		опыт		расчет	
$i_{В}, \text{А}$	$I, \text{А}$	$i_{В*}, \text{о.е.}$	$I_*, \text{о.е.}$	$i_{В}, \text{А}$	$I, \text{А}$	$i_{В*}, \text{о.е.}$	$I_*, \text{о.е.}$

Регулировочные характеристики генератора при $\cos\varphi = 0$

без компаундирования				с компаундированием			
опыт		расчет		опыт		расчет	
i_B, A	I, A	$i_B^*, o.e.$	$I^*, o.e.$	i_B, A	I, A	$i_B^*, o.e.$	$I^*, o.e.$

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема проведения опытов, паспортные данные испытуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
 - название опыта;
 - краткое описание опыта;
 - экспериментальные данные и построенные характеристики;
 - выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните конструкцию однофазного компаундированного синхронного генератора.
2. Объясните назначение статора и ротора в генераторе.
3. В чем сущность метода компаундирования?
4. Для каких целей в данной машине применяется компаундирующая обмотка?
5. Как влияет характер нагрузки на работу генератора?
6. Объясните назначение внешних характеристик.
7. Объясните назначение регулировочных характеристик.
8. Укажите достоинства и недостатки данной конструкции генераторов.

**ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Цель работы – определение по опытным данным параметров синхронного генератора X_d ненас, X_q , X_2 , X_d , X_q ; построение диаграммы Blondеля.

Общие сведения

В машинах с явно выраженными полюсами, имеющими разную величину воздушного зазора вдоль окружности статора, магнитные потоки реакции якоря по продольной и поперечной осям машины и соответствующие им индуктивные сопротивления X_d и X_q вследствие различной величины магнитных сопротивлений путей этих потоков неодинаковы. Значения этих сопротивлений можно найти опытным путем методом скольжения.

На практике встречаются случаи, нарушающие нормальную работу синхронной машины. К ним относятся несимметричная нагрузка фаз синхронного генератора, переходные процессы (резкое изменение режима работы синхронного генератора вследствие роста или сброса нагрузки, замыкания и размыкания электрических цепей обмоток, короткие замыкания в этих цепях и т.п.). Переходные процессы, возникающие в одной машине, могут оказывать большое влияние на работу других машин и энергосистемы в целом, в том числе вызывать серьезные аварии. Для характеристики устойчивости работы синхронного генератора при нормальных и переходных режимах определяют такие его параметры, как синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям X_d и X_q , переходные индуктивные сопротивления X_d' , X_q' , индуктивное сопротивление обратной последовательности X_2 .

Общим методом исследования несимметричных режимов работы является метод симметричных составляющих. При симметричной нагрузке синхронного генератора существуют только токи прямой последовательности. Наиболее существенной особенностью нормального режима работы синхронной машины с токами прямой последовательности является то, что ротор машины вращается син-

хронно с полем токов прямой последовательности или полем реакции якоря и потому это поле не индуцирует в цепях индуктора никаких токов. В таком случае определяют X'_d и X'_q , которые являются существенными по величине.

При наличии токов обратной последовательности создается магнитное поле обратной последовательности, вращающееся по отношению к статору с синхронной скоростью в обратном направлении, а по отношению к ротору – с удвоенной синхронной скоростью. Относительно этого поля скольжение ротора $S_2 = 2$. В обмотках возбуждения, успокоительной и массивных частях ротора индуцируются вторичные токи двойной частоты, которые вызывают соответствующие потери и нагрев ротора.

Токи нулевой последовательности обмотки статора создают в воздушном зазоре только пульсирующие поля нечетных гармоник, кратных трем, а основная гармоника поля будет отсутствовать. Эти гармоники поля индуцируют в обмотках возбуждения и успокоительные токи, величины которых относительно невелики.

Как видно, при несимметричной нагрузке синхронного генератора кроме токов прямой последовательности практически существуют только токи обратной последовательности. Последние вызывают в машине ряд нежелательных явлений, режим работы машины становится тяжелым.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с методикой опытного определения параметров синхронной машины – синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям X_d и X_q , переходных индуктивных сопротивлений X'_d , X'_q , индуктивного сопротивления обратной последовательности X_2 , рабочей схемой, установкой. Записать паспортные данные применяемых машин и приборов. Установка состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, используемого в качестве приводного двигателя и испытываемого явнополюсного синхронного генератора с возбудителем на одном валу, регулятора напряжения. Собрать схему установки (рис. 7.1). Перед пуском установки в работу установить выходное напряжение на регуляторе (АТМН-32), равное нулю, а обмотку возбуждения синхронного генератора разомкнуть (QS1).

Опыт 1. Определить $X_{d \text{ ненас}}$, X_q , X_2 (см. схему рис. 7.1). Опыт проводить следующим образом. Включив приводной двигатель и питание цепи якоря генератора (QF2), постепенно увеличивать с помощью регулятора напряжение на якоре до $(0,25-0,4) U_n$, цепь возбуждения при этом должна быть разомкнута (QS1). Далее наблюдать за показаниями амперметра в цепи якоря (PA1). В случае, если амперметр покажет медленные периодические колебания тока с частотой порядка 1–3 Гц, следует определять X_d , X_q . Если же ток практически не изменяется, то определять X_2 . Изменения тока связаны с относительным направлением вращения поля якоря и ротора. При совпадении направлений поле якоря медленно вращается по отношению к ротору с частотой $n_1 = n$, при противоположных направлениях поле якоря вращается по отношению к ротору практически с двойной синхронной частотой, равной $n_1 + n$.

Для перехода от одного режима к другому достаточно изменить или направление вращения поля, или ротора.

1.1. Определение X_d , X_q . Установить напряжение на якоре равным $0,4U_n$, обмотка возбуждения разомкнута. Записать в таблицу 7.1 значения колебаний тока якоря $I_{\phi \text{ max}}$, $I_{\phi \text{ min}}$ и колебаний напряжения $U_{л \text{ max}}$, $U_{л \text{ min}}$. Рассчитать X_d , X_q .

1.2. Определение X_2 . Установить напряжение на якоре $0,25U_n$, замкнуть накоротко обмотку возбуждения (QS1). Записать в таблицу 7.1 значения тока I_{ϕ} , напряжения $U_{л}$. Рассчитать X_2 .

Таблица 7.1

Данные по определению параметров синхронного генератора

Определение X_d, X_q						Определение X_2					
опыт			расчет			опыт			расчет		
$I_{\phi \text{ max}}$	$I_{\phi \text{ min}}$	$U_{л \text{ max}}$	$U_{л \text{ min}}$	X_d	X_q	X_{d^*}	X_{q^*}	I_{ϕ}	U_{ϕ}	X_2	X_{2^*}
А	А	В	В	Ом	Ом	о.е.	о.е.	А	В	Ом	о.е.

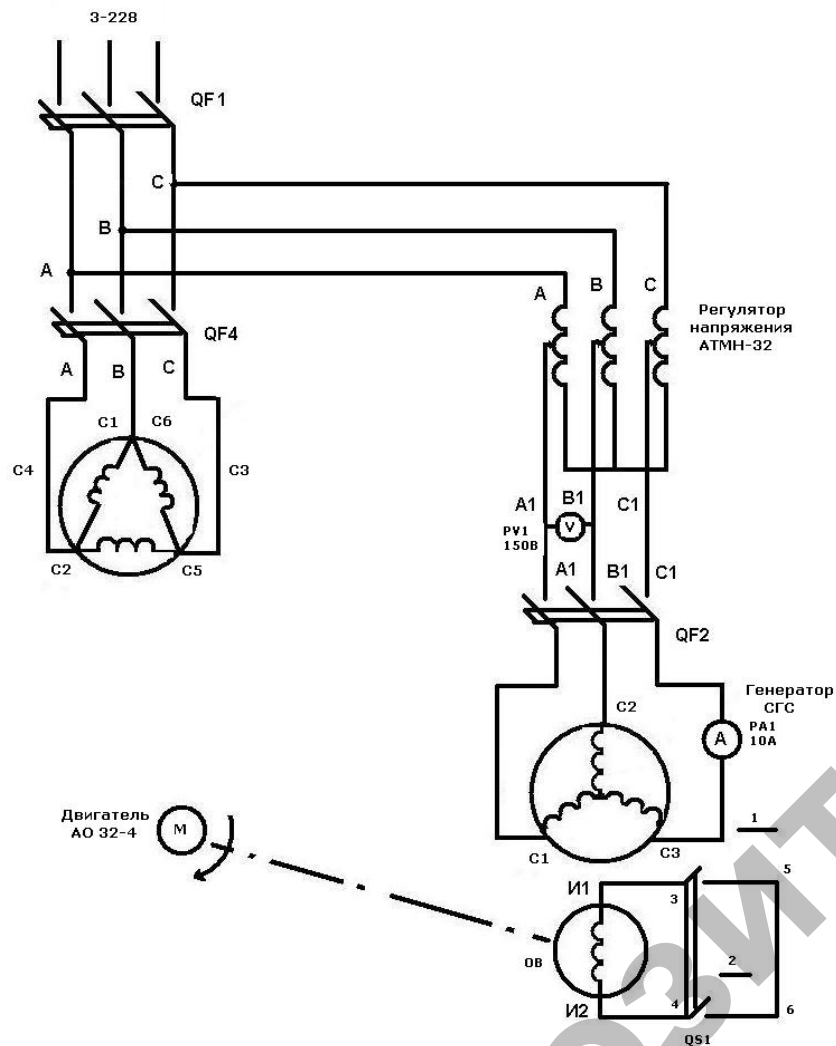


Рис. 7.1. Схема установки для опытного определения параметров синхронного генератора

Расчетные формулы:

- синхронное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси (ненасыщенное):

$$X_d = U_{л \max} / \sqrt{3} I_{\phi \min};$$

69

- синхронное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси в относительных единицах:

$$X_d^* = X_d / Z_6 = X_d I_{\phi \text{н}} / U_{\phi \text{н}}; \quad U_{\phi \text{н}} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3};$$

- синхронное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси:

$$X_q = U_{л \min} / \sqrt{3} I_{\phi \max};$$

то же в относительных единицах:

$$X_q^* = X_q / Z_6 = X_q I_{\phi \text{н}} / U_{\phi \text{н}}; \quad U_{\phi \text{н}} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3};$$

- сопротивление обратной последовательности:

$$X_2 = U_{л} / \sqrt{3} I_{\phi};$$

оно же в относительных единицах:

$$X_2^* = X_2 / Z_6 = X_2 I_{\phi \text{н}} / U_{\phi \text{н}}; \quad U_{\phi \text{н}} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3};$$

где Z_6 – базовое сопротивление (см. лабораторную работу № 5);

$I_{\phi \text{н}}$, $U_{\phi \text{н}}$, $U_{\text{лн}}$ – номинальные значения соответственно тока, напряжения (фазное и линейное). Индексы min, max – их минимальное и максимальное значения.

Опыт 2. Определить X'_d , X'_q . Собрать схему, представленную на рисунке 7.2.

Опыт проводить следующим образом. Установить на выходе регулятора напряжение, равное нулю, замкнуть обмотку возбуждения (QS1). Далее включить питание (QF2) и установить на якоре напряжение $0,25U_{\text{н}}$. Затем вручную, с помощью диска, укрепленного на валу агрегата, поворачивать ротор, фиксируя по амперметру (PA1) максимальный и минимальный токи якоря. Данные опыта занести в таблицу 7.2.

70

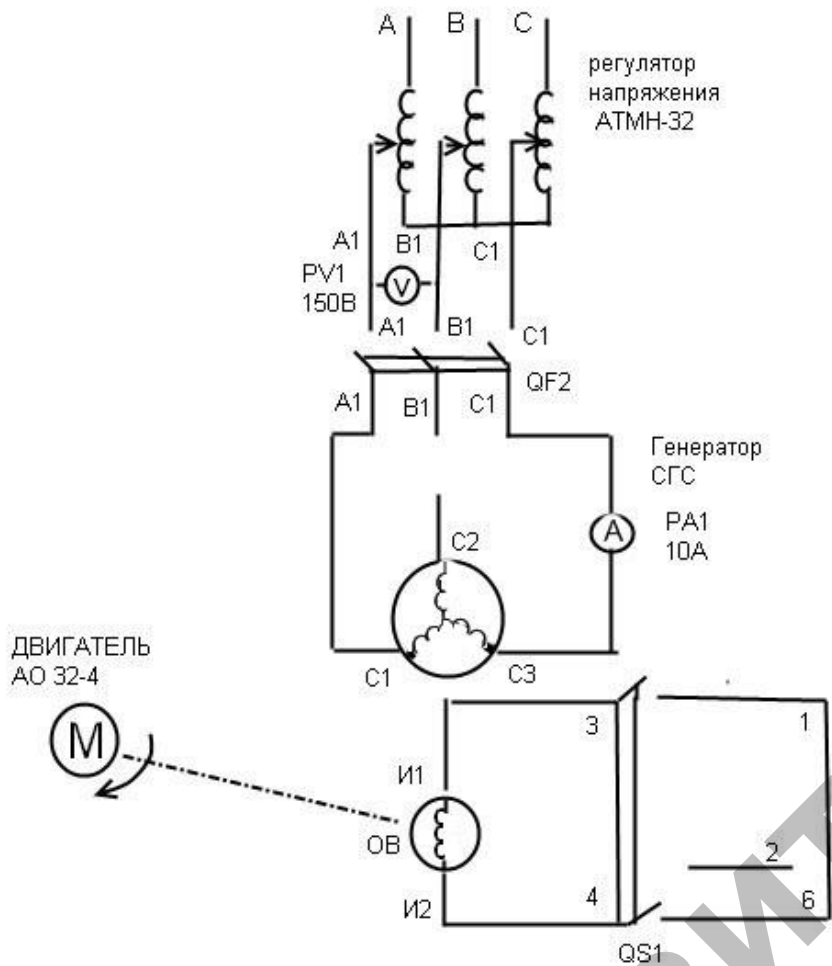


Рис. 7.2. Схема определения переходных значений синхронных индуктивных сопротивлений X'_d , X'_q

Расчетные формулы:

X'_d – переходное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси,

$$X'_d = U_{\max} / 2I_{\phi \min};$$

X'_{d*} – то же в относительных единицах,

$$X'_{d*} = X'_d / Z_0 = X'_d I_{\phi n} / U_{\phi n}; \quad U_{\phi n} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3};$$

X'_q – переходное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси,

$$X'_q = U_{\min} / 2I_{\max};$$

X'_{q*} – то же в относительных единицах,

$$X'_{q*} = X'_q / Z_0 = X'_q I_{\phi n} / U_{\phi n};$$

$$U_{\phi n} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3}.$$

Таблица 7.2

Данные по определению параметров синхронного генератора при переходных режимах работы

Определение X'_d , X'_q							
опыт				расчет			
I_{\max} , А	I_{\min} , А	U_{\max} , В	U_{\min} , В	X'_d , Ом	X'_{d*} , о. е.	X'_q , Ом	X'_{q*} , о. е.

При правильно поставленном опыте выполняются соотношения $X'_d < X_d$ и $X'_q \approx X_q$.

Рассчитать токи короткого замыкания, принимая полное сопротивление сети равное нулю.

$I_{\text{уст}}^{(3)}$ – установившийся ток трехфазного короткого замыкания при $i_B = i_{\text{вн}}$.

$$I_{\text{уст}}^{(3)} = U_{\phi n} / X'_d;$$

$I_{\text{уст}}^{(3)*}$ – то же в относительных единицах,

$$I_{\text{уст}}^{(3)*} = 1 / X'_{d*};$$

$i_{\text{уд}}^{(3)}$ – начальное амплитудное значение тока трехфазного короткого замыкания,

$$i_{\text{уд}}^{(3)} = (1,8 \sqrt{2} \cdot 1,05 U_{\phi n}) / X'_d;$$

$i_{\text{уд}}^{(3)*}$ – то же в относительных единицах,

$$i_{\text{уд}}^{(3)*} = (1,8 \sqrt{2} \cdot 1,05) / X'_{d*};$$

$I_{уст}^{(2)}$ – установившийся ток двухфазного короткого замыкания при $i_B = i_{вн}$.

$$I_{уст}^{(2)} = \sqrt{3} U_{фн} / (X'_d + X_2);$$

$I_{уст*}^{(2)}$ – то же в относительных единицах,

$$I_{уст*}^{(2)} = \sqrt{3} / (X_d + X_{2*});$$

$i_{уд}^{(2)}$ – начальное амплитудное значение тока двухфазного короткого замыкания,

$$i_{уд}^{(2)} = \sqrt{3} U_{фн} / (X'_d + X_2);$$

$i_{уд*}^{(2)}$ – то же в относительных единицах,

$$i_{уд*}^{(2)} = \sqrt{3} / (X'_d + X_{2*}).$$

Данные расчетов записать в таблицу 7.3.

Таблица 7.3

Расчетные значения токов короткого замыкания

$I_{уст}^{(3)}$ А	$I_{уст*}^{(3)}$ о.е.	$I_{уст}^{(2)}$ А	$I_{уст*}^{(2)}$ о.е.	$i_{уд}^{(3)}$ А	$i_{уд*}^{(3)}$ о.е.	$i_{уд}^{(2)}$ А	$i_{уд*}^{(2)}$ о.е.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Паспортные данные машин, оборудования и приборов, применяемых в работе;
3. Информация по каждому опыту:
 - принципиальная электрическая схема;
 - таблицы с данными опытов и расчетов;
 - примеры расчетов и требуемые графики.

Контрольные вопросы

1. Объясните сущность опыта определения X_d, X_q .
2. Объясните сущность опыта определения X'_d, X'_q .
3. Объясните причину значительного увеличения амплитуды тока короткого замыкания в его начальные моменты.

4. Как возможно практически получить режим генератора, при котором якорь обладает сопротивлением X_2 ?
5. Почему $X'_d \ll X_d$?
6. Как влияет степень насыщения машины на величину $I_{уст}^{(3)}$?
7. Какая реакция якоря в генераторе при активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$)?
8. Объясните соотношение между X_d и X_q .
9. Как изменится величина X_d при увеличении (уменьшении) воздушного зазора?

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

Цель работы – ознакомиться с методами включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью. Снять и проанализировать U -образные характеристики генератора при параллельной работе с различной отдаваемой мощностью.

Общие сведения

Необходимость и условия включения на параллельную работу синхронных генераторов. Параллельная работа синхронных генераторов повышает надежность энергосистемы, дает возможность регулировать нагрузку для обеспечения стабильной частоты тока.

Практически все электростанции Республики Беларусь объединены в единую систему. Это значит, что все генераторы работают либо параллельно, либо в кольце. Поэтому мы будем исследовать параллельную работу одного генератора с сетью бесконечной мощности, т.е. будем считать параметры сети, напряжение U_c и частоту тока f_c постоянными.

Для того чтобы включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью, необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- равенство напряжения сети и генератора;
- одинаковые частоты тока генератора и сети;
- одинаковый порядок чередования фаз.

Несоблюдение одного из вышеуказанных условий приводит к появлению уравнительных токов, что может вызвать аварию.

Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее всем указанным условиям, называют синхронизацией.

Способы включения синхронных генераторов на параллельную работу.

Различают точную синхронизацию и самосинхронизацию синхронных генераторов. При точной синхронизации генератор приводят в состояние, отвечающее вышеуказанным условиям, для чего используют прибор, называемый синхроноскопом. Устройство прибора очень простое: он представляет собой 3 лампы накаливания,

которые могут включаться по двум схемам: на потухание и на бегущий огонь. Данные схемы приведены на рисунке 8.1.

При включении ламп по схеме (рис. 8.1, а) в идеальном случае, когда все условия соблюдаются, они гореть не должны. Наиболее сложно при включении добиться равенства частот напряжений генератора и сети. Поэтому векторы напряжений сети будут вращаться с частотой ω_c , а векторы напряжений генератора — с частотой ω_1 . По мере того как векторы совпадают, лампы гаснут. В этот момент и необходимо производить включение генератора.

При настройке синхроноскопа по схеме на бегущий огонь в момент включения на одной из ламп напряжение должно быть равно нулю. На векторной диаграмме, приведенной на рисунке 8.1, б, указанная лампа включена в фазу «А». Две другие лампы будут находиться под линейным напряжением и гореть с одинаковым накалом. Если частота напряжения сети не равна частоте напряжения генератора, предположим, больше ее ($f_c > f_1 \rightarrow \omega_c > \omega_1$), то векторы напряжений генератора и сети начнут расходиться.

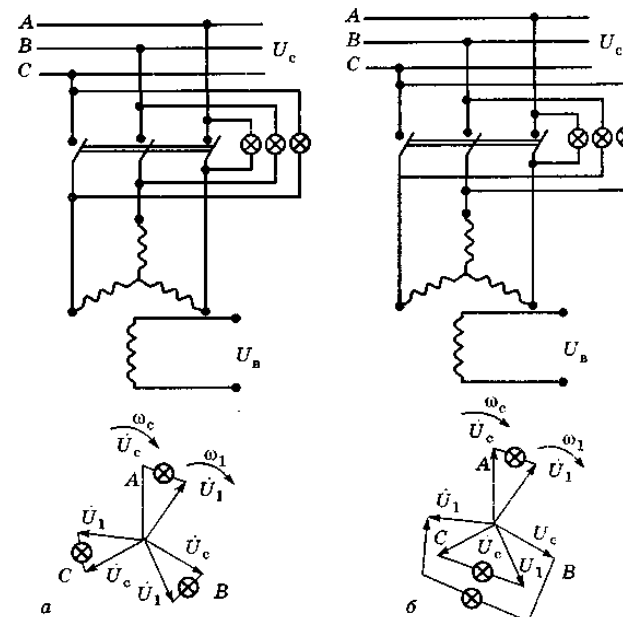


Рис. 8.1. Схемы включения ламп при точной синхронизации: а – на потухание; б – на бегущий огонь

Вектор напряжения сети \dot{U}_c будет опережать вектор напряжения генератора \dot{U}_1 , лампа в фазе «А» будет загораться, лампа, включенная между фазами «С» сети и «В» генератора, потухать, а лампа между фазами «В» сети и «С» генератора будет загораться ярче. После потухания лампы между фазами «С» сети и «В» генератора будет потухать третья лампа. Таким образом, темное пятно, наблюдаемое в лампах в момент потухания, будет поочередно обегать лампы, создавая зрительное впечатление вращающегося света. Направление вращения света будет зависеть от того, какая частота больше – генератора или сети, что позволяет регулировать частоту вращения подключаемого генератора. В этом заключается преимущество включения синхроскопа по схеме на бегающий огонь, чем на потухание.

На электростанциях, когда частота тока колеблется в широких пределах, а также при авариях на любой электростанции, точную синхронизацию осуществить сложно. В таких случаях может быть использован метод самосинхронизации. Он заключается в том, что ротор возбужденного генератора раскручивают до частоты вращения, близкой к синхронной, а затем генератор подключается к сети, включается обмотка возбуждения и генератор синхронизируется.

Время, когда обмотка статора подключена к сети, а обмотка возбуждения не включена, является особенно «неприятным»: наблюдается толчок тока, снижение напряжения в сети, возникновение перенапряжений в обмотке ротора. Толчок тока возникает потому, что напряжение генератора равно нулю, а активное сопротивление обмотки статора небольшое. Возникший при этом ток приводит к резкому (на 20–40) % снижению напряжения в сети. Для того чтобы избежать перенапряжений в обмотке ротора, ее замыкают на некоторое сопротивление.

До подачи тока возбуждения на вал будут действовать: асинхронный момент при наличии демпферной обмотки (рис. 8.2), реактивный момент в явнополюсной машине (рис. 8.3). После включения обмотки возбуждения появляется дополнительный синхронизирующий момент (8.4) и машина синхронизируется.

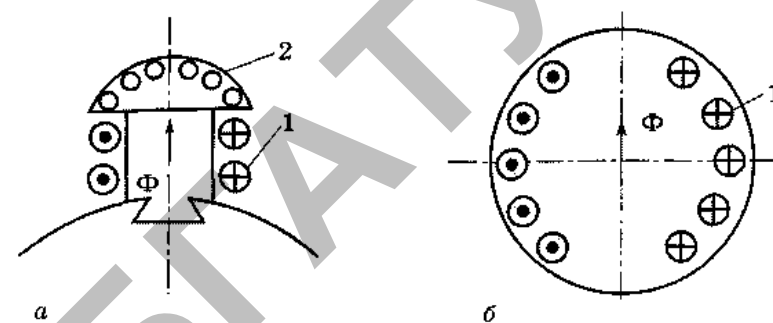


Рис. 8.2. Конструкции роторов синхронных машин: а – явнополюсная; б – неявнополюсная; обмотки: 1 – возбуждения; 2 – демпферная

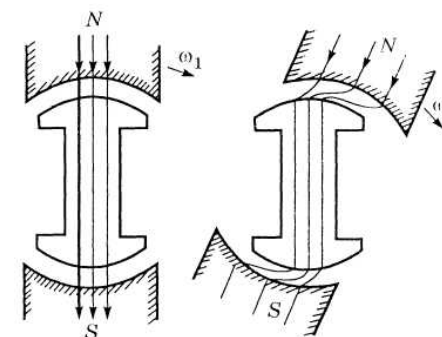


Рис. 8.3. Принцип возникновения реактивного момента

Угловая характеристика и синхронизирующая способность синхронного генератора.

В формуле электромагнитной мощности (8.1) переменной величиной является угол θ . Остальные величины постоянны: x_q , x_d , m определяются конструкцией машины; U_1 равно напряжению сети, т.е. практически постоянно, ЭДС E_0 зависит от магнитного потока и частоты вращения генератора, т.е. изменяется незначительно.

$$P_{эм} = \frac{mE_0U_1}{x_d} \sin\theta + \frac{mU_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (8.1)$$

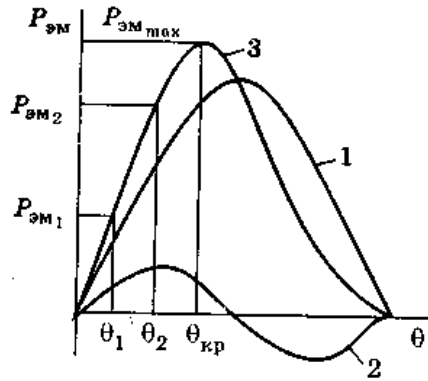


Рис. 8.4. Угловая характеристика синхронного генератора

Таким образом, от угла θ между ЭДС E_0 генератора и напряжением сети U_1 зависит мощность генератора. Поэтому этот угол называют нагрузочным углом генератора. Он характеризует положение ротора в пространстве. Если ось ротора совпадает с вектором вращающегося магнитного поля статора, угол θ равен нулю. На рисунке 8.4. показана зависимость электромаг-

нитной мощности от нагрузочного угла $P_{эм} = f(\theta)$. Поэтому эту зависимость называют угловой характеристикой (кривая 3 на рис. 8.4).

На этом же рисунке показаны зависимости составляющих электромагнитной мощности: 1 — первая часть, изменяется пропорционально $\sin\theta$; вторая часть, обусловленная чисто магнитным моментом, изменяется пропорционально $\sin 2\theta$. При работе генератора в номинальном режиме приводной двигатель вращает ротор, ось ротора опережает вектор вращающегося магнитного поля статора на угол θ_1 , что соответствует электромагнитной мощности $P_{эм1}$. При увеличении нагрузки нагрузочный угол увеличивается до значения θ_2 , что соответствует увеличению мощности генератора до $P_{эм2}$. При этом возникает момент, старающийся вернуть ротор в прежнее положение. В результате частота вращения генератора не изменяется, т.е. генератор работает устойчиво. Однако если нагрузка изменится так, что угол θ будет больше критического $\theta > \theta_{кр}$, условие устойчивости нарушается, т.е. дальнейшее увеличение угла будет соответствовать уменьшению мощности, частота вращения изменится и машина рассинхронизируется. Отношение

$$P_{\text{син}} = \frac{P_{эм2} - P_{эм1}}{\theta_2 - \theta_1} \quad (8.2)$$

называется синхронизирующей мощностью $P_{\text{син}}$ генератора. Она характеризует синхронизирующую способность генератора, т.е. стремление ротора, выведенного из равновесия, вернуться назад.

Мощность синхронного генератора, подключенного к сети

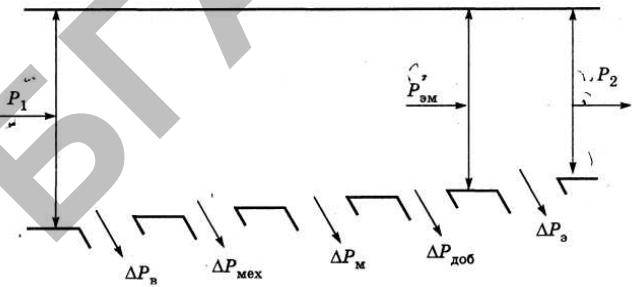


Рис. 8.5. Энергетическая диаграмма синхронного генератора

Регулирование активной мощности, отдаваемой в сеть синхронным генератором.

Работа параллельно работающего синхронного генератора при изменении тока показана на схеме 8.3.

$$I_{\text{в}} \uparrow \xrightarrow{1} \Phi_0 \uparrow \xrightarrow{2} E_0 \uparrow \xrightarrow{3} U_1 \uparrow (U_1 > U_c) \xrightarrow{4} I_{\text{ур}} = \frac{U_1 - U_c}{x_c} \quad (8.3)$$

Пояснение к схеме.

1. При увеличении тока обмотки возбуждения возрастает основной магнитный поток Φ_0 .
2. Рост Φ_0 приводит к увеличению ЭДС генератора E_0 .
3. Согласно уравнениям (8.4) и (8.5) при увеличении E_0 растет напряжение генератора U_1 и оно становится больше напряжения сети U_c .

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - jI_1 x_a - jI_1 x_s - I_1 r_1 = \dot{E}_0 - jI_1 (x_a + x_s) - I_1 r_1 \quad (8.4)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - jI_1 x_c - I_1 r_1 \quad (8.5)$$

4. Возникает уравнительный ток $I_{ур}$. Он будет реактивным, так как разность напряжений $U_1 - U_c$ приложена к индуктивному сопротивлению x_c и течет от генератора в сеть, так как $U_1 > U_c$.

Это означает, что генератор генерирует реактивную мощность в сети.

Если ток возбуждения уменьшится, то

$$I_B \downarrow \xrightarrow{1} \Phi_0 \downarrow \xrightarrow{2} E_0 \downarrow \xrightarrow{3} U_1 \downarrow (U_1 > U_c) \xrightarrow{4} I_{ур} = \frac{U_1 - U_c}{x_c}. \quad (8.6)$$

Уравнительный ток будет направлен к генератору, т.е. генератор будет потреблять реактивную мощность.

Зависимость тока статора I_1 от тока возбуждения I_B называется U -образной характеристикой. U -образные характеристики при различной нагрузке генератора приведены на рисунке 8.6. Из рисунка видно, что указанные зависимости имеют U -образный характер.

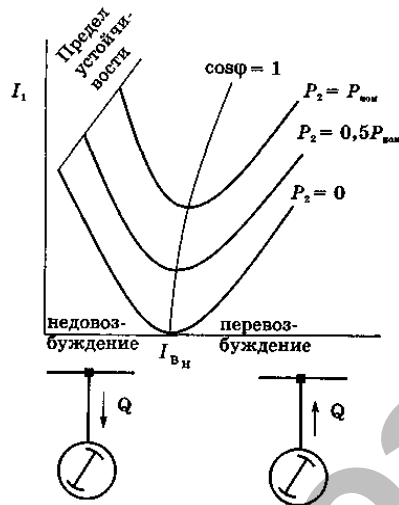


Рис. 8.6. U -образные характеристики синхронного генератора

При некотором токе возбуждения, называемом нормальным $I_{Bн}$, ток статора минимальный. Коэффициент мощности в этом случае равен единице $\cos\varphi = 1$.

При изменении тока возбуждения I_B ток статора I_1 увеличивается. Активная составляющая тока статора не изменяется, изменяется только реактивная составляющая. При токе возбуждения больше $I_{Bн}$ (перевозбуждение) реактивный ток направлен от генератора к сети, т.е. генератор посылает в сеть реактивную мощность. При токе возбуждения меньше $I_{Bн}$ (недовозбуждение) генератор потребляет из сети реактивную мощность. При перевозбуждении реакция якоря продольно намагничивающая, при недовозбуждении — продольно размагничивающая.

При увеличении нагрузки значение тока возбуждения $I_{Bн}$, соответствующее $\cos\varphi = 1$ (минимум тока якоря I_1), увеличивается, потому что с ростом активной составляющей увеличиваются потери напряжения в генераторе. С уменьшением тока возбуждения наступает такой момент, при котором магнитный поток оказывается настолько ослабленным, что нагрузочный угол θ (рис. 8.6) превышает критическое значение, генератор выходит из синхронного режима работы. На рисунке 8.6 пунктирной линией отмечен предел устойчивости работы синхронного генератора при недовозбуждении.

Наиболее выгодной для генератора является его работа с нормальным током возбуждения, т.е. когда $\cos\theta = 1$. Так как нагрузка энергосистемы имеет индуктивный характер (асинхронные двигатели, люминесцентные лампы и др.), то для уменьшения потерь энергии в линиях электропередачи генераторы работают в режиме перевозбуждения.

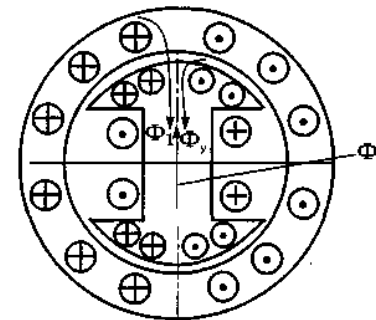


Рис. 8.7. Магнитные потоки синхронного генератора при внезапном коротком замыкании

Переходный процесс в синхронном генераторе при внезапном коротком замыкании

При внезапном коротком замыкании синхронного генератора появляется ударный ток. Рассмотрим этот процесс. При этом будем считать, что до короткого замыкания генератор работал в режиме холостого хода, т.е. ток в обмотке статора равен нулю. При

коротком замыкании в обмотке статора появляется ток I_1 , который создает свой поток Φ_1 , направленный встречно потоку обмотки возбуждения. Основной поток машины ослабляется, пересекая при этом успокоительную обмотку так, что в указанной обмотке наводится ЭДС. Так как обмотка замкнута, ЭДС приводит к появлению в ней тока. Ток, в свою очередь, наводит свой магнитный поток Φ_y , направленный встречно основному потоку, еще более ослабляя его (рис. 8.7). Кроме того, в обмотке возбуждения будет также наводиться ЭДС, и ток, созданный этой ЭДС, будет направлен против тока возбуждения, уменьшая его.

В результате магнитный поток машины сильно ослабляется, сопротивление машины резко уменьшается.

$$x_c'' < x_c,$$

где x_c'' — полное сопротивление синхронного генератора при внезапном коротком замыкании. Сопротивление в указанный момент времени называют сверхпереходным сопротивлением. Резкое уменьшение сопротивления приводит к резкому увеличению тока короткого замыкания, который называется ударным током короткого замыкания.

$$I_K'' = E_0 / x_c''.$$

Через некоторое время ток в успокоительной обмотке уменьшается до нуля, магнитный поток и сопротивление генератора увеличиваются, ток короткого замыкания станет равным

$$I_K' = E_0 / x_c,$$

где x_c' — переходное сопротивление короткого замыкания синхронного генератора, $x_c' > x_c''$.

Этот момент называется переходным.

Еще через некоторое время ток обмотки возбуждения восстановится до прежнего значения:

$$I_K = E_0 / x_c.$$

Ток I_K называется установившимся током короткого замыкания.

Ударный ток I_K'' создает опасность для самого генератора и для элементов электрической сети, по которой он проходит. Он создает значительные электромагнитные силы, действующие на обмотку статора и ротор. Поэтому при расчете механической прочности генератора должен учитываться ударный ток.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с установкой, рабочей схемой. Записать паспортные данные исследуемой машины, вспомогательного оборудования и используемых приборов. В установке в качестве приводной машины используется двигатель постоянного тока смешанного возбуждения (М). Пуск двигателя осуществляется через пусковой реостат. Начальное положение ручки пускового реостата «Пуск», регулировочного реостата PR1 – min. После подачи питания (QF3) плавно вывести пусковой реостат в положение «Ход». Синхронный генератор (СГ) представляет собой явнополюсную трехфазную синхронную машину прямого исполнения с питанием обмотки возбуждения по цепи: сеть (QF2) – ЛАТР – выпрямительный мост – обмотка возбуждения.

Паспортные данные генератора

$I_{\text{н}} = 10 \text{ A}$; $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{вн}} = 4,8 \text{ А}$, $\eta = 0,8$; $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,9$; $S_{\text{н}} = 3880 \text{ ВА}$; $n_{\text{н}} = 1500 \text{ мин}^{-1}$.

Опыт 1. Собрать схему, представленную на рисунке 8.8. Включить СГ на параллельную работу методом точной синхронизации. Параллельная работа с сетью возможна при одинаковых параметрах генератора (напряжение, частота сети). Для нормальной работы необходимо также, чтобы форма напряжения генератора была близка к синусоидальной. При практическом включении необходимо обеспечить:

- 1) равенство напряжений и частот сети и генератора;
- 2) одинаковый порядок чередования фаз сети и генератора;
- 3) совпадение фаз напряжений сети и генератора в момент включения.

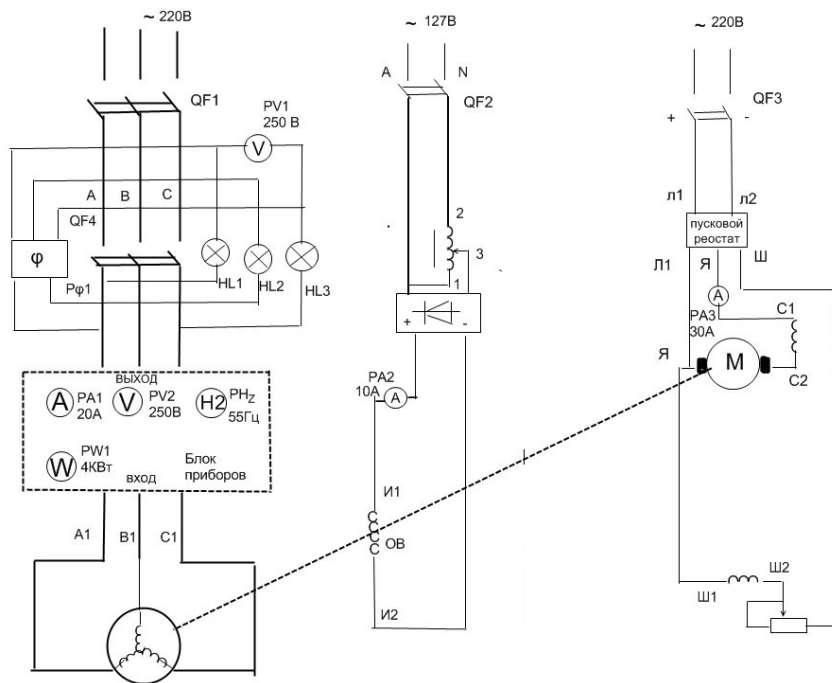


Рис. 8.8. Схема включения генератора на параллельную работу (лампы синхроскопа включены на «потухание огня»)

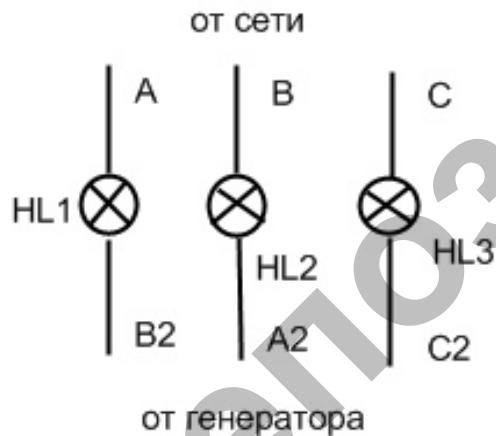


Рис. 8.9. Схема включения ламп синхроскопа на «вращение огня»

Осуществить следующую последовательность операций включения на параллельную работу.

1. Запустить приводной двигатель (М), установить соответствие направления вращения согласно указанию стрелки.
2. Убедиться в том, что автомат включения на параллельную работу QF4 отключен, включить питание цепи возбуждения (QF1, QF2) и установить ЛАТРОм ток возбуждения, при котором напряжение генератора равно напряжению сети (PV2, PV1). Проверить совпадение порядка чередования фаз сети и генератора.
3. Установить частоту вращения генератора близкой к номинальной, при которой частота мигания ламп синхроскопа равна 0,5...1 Гц. На схеме (рис. 8.8) лампы синхроскопа включены по схеме на «потухание», поэтому при одинаковом порядке чередования фаз сети и генератора все они должны загораться и гаснуть одновременно. В противном случае необходимо изменить порядок чередования фаз генератора. Регулирование частоты вращения осуществлять реостатом PR1.

4. Определить моменты совпадения фаз сети и генератора с помощью лампового синхроскопа. Согласно схеме включения ламп синхроскопа (HL1, HL2, HL3) при совпадении фаз напряжений сети и генератора точки их подключения будут иметь одинаковый потенциал и лампы гореть не будут. Максимальное свечение ламп будет наблюдаться в момент, когда напряжения сети и генератора находятся в противофазе. Контроль совпадения фаз можно также осуществлять по стрелочному синхроскопу (Pф I). В момент совпадения фаз стрелка синхроскопа проходит над красной чертой. Стрелочный синхроскоп дает дополнительную информацию об отклонении частоты генератора от частоты сети: если стрелка вращается в направлении «больше» – $fr > fc$, «меньше» – $fr < fc$.

Уловив момент потухания ламп или проход стрелки синхроскопа над красной чертой, включить генератор на сеть (QF4). Частота мигания ламп должна быть примерно 1 Гц. При определении момента включения иметь в виду, что лампы потухнут при напряжении на них около 30–40 % от номинального, поэтому включение выполнять с некоторой задержкой после наблюдаемого погашения ламп.

6. Отключение генератора выполнять в следующей последовательности:

- а) отключить генератор от сети (QF4);

- б) установить ЛАТРом $i_g = 0$, отключить питание (QF1, QF2);
 в) отключить питание двигателя (QF3), установить пусковой реостат двигателя в положение «пуск», регулировочный PRI – в положение «min».

Опыт 2. Изменить схему включения ламп синхроскопа на «вращение огня» (см. рис. 8.9). Остальная часть схемы не меняется. При включении ламп на «вращение огня» HL3 остается включенной на одноименные фазы, HL1 и HL2 соответственно на фазы А и В и В и А. Это создает эффект «вращения огня», т.е. поочередного загорания ламп. «Вращение огня» позволяет получить информацию о знаке отклонения частоты генератора от частоты сети. Повторить последовательность включения по пунктам опыта 1. При определении момента включения по ламповому синхроскопу учитывать только состояние лампы HL3 или положение стрелки стрелочного синхроскопа. Отключить генератор. Построить в масштабе 1 В/мм векторные диаграммы фазных напряжений сети и генератора (одной фазы) для углов сдвига α от 0 до 360° через 30°. По диаграмме определить для каждого угла сдвига напряжение на лампе синхроскопа (разностное напряжение между генератором и сетью) и построить график $U = f(\alpha)$. Данные, полученные из диаграммы, занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

Зависимость фазных напряжений сети и генератора от угла сдвига

α	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$U_{\text{вкл}}, \text{В}$													

Рассчитать ток включения при синхронизации генератора в момент нахождения напряжения сети и генератора в противофазе $\alpha = 180^\circ$.

$$I_{\text{вкл}} = U_{\text{вкл}} / (Z_c + Z_r),$$

где Z_c – полное сопротивление сети (Z_c приравнять к нулю);

Z_r – полное сопротивление цепи якоря генератора, $Z_r = 2 \text{ Ом}$.

Определить кратность тока включения $K_{\text{вкл}} = I_{\text{вкл}} / I_N$,

где I_N – номинальный ток генератора.

Опыт 3. Включить генератор на сеть методом самосинхронизации. Недостатком метода точной синхронизации является наличие ручных операций включения, что требует определенного времени и не исключает субъективных ошибок. Поэтому распространение получил метод самосинхронизации. Метод позволяет оперативно включать генератор на параллельную работу, легко автоматизируется. Как недостаток следует отметить значительный бросок тока при включении, однако конструкция генератора предусматривает такой режим. При правильном включении он безопасен. Сущность метода в том, что якорь невозбужденного генератора включается в сеть и сразу вслед за этим включается возбуждение. Предварительно генератор должен быть приведен в состояние так называемого «горячего резерва» (ротор вращается с синхронной скоростью, регулятор возбуждения в позиции, соответствующей номинальному напряжению).

С физической точки зрения процесс включения выглядит так: после включения якоря появляется поле якоря, вращающееся против направления вращения якоря, поэтому по отношению к неподвижным полюсам оно или неподвижно при $n = n_1$, или вращается с незначительной разностной частотой $n_1 - n$. В момент включения возбуждения полюсы намагничиваются и происходит «захват» поля якоря, т.е. его ось устанавливается по продольной оси полюсов. Так как момент подачи возбуждения произволен, возможен благоприятный случай (ось поля якоря совпадает с продольной осью полюсов) и случай несовпадения осей. Таким образом, длительность броска тока якоря зависит как от момента включения возбуждения, так и от времени между включением якоря на сеть и подачей возбуждения. Осуществить включение генератора в сеть методом самосинхронизации в следующем порядке:

- 1) запустить приводной двигатель (М), убедившись, что автомат включения QF4 разомкнут;
- 2) включить питание цепи возбуждения (QF1, QF2);
- 3) отрегулировать частоту вращения приводного двигателя (PRI) и ток возбуждения (ЛАТР) таким образом, чтобы выполнялись условия $U_r = U_c$ и $f_r = f_c$;
- 4) отключить цепь возбуждения (QF2);
- 5) осуществить синхронизацию последовательным включением:
 - а) якоря генератора на сеть (QF4);

б) цепи возбуждения (QF2).

Обязательна очередность операций включения. Время между операциями должно быть минимально возможным.

Опыт 4. Исследовать U -образные характеристики синхронного генератора для различных значений активной нагрузки генератора $I = f_n(i_B)$ при $U = U_n = \text{const}$, $f_r = f_n = \text{const}$. Включить генератор на параллельную работу с сетью одним из рассмотренных способов. Снять U -образные характеристики для нагрузок генератора, равных соответственно 0; 1,0 и 1,5 кВт. Контроль активной нагрузки вести по ваттметру PW1. Установить значение тока возбуждения, при котором ток якоря будет минимальным I_{\min} . Затем уменьшать ток возбуждения так, чтобы ток якоря изменялся в пределах от I_{\min} до I_n (недовозбуждение). Замерить показатели в 5–6 точках. После этого восстановить первоначальное значение тока возбуждения, при котором ток якоря будет минимальным I_{\min} . Затем увеличивать ток возбуждения, чтобы ток якоря изменялся в пределах от I_{\min} до I_n (первозбуждение). Величину активной нагрузки и ее поддержание постоянно осуществлять регулированием момента приводного двигателя реостатом PR1. Данные опыта занести в таблицу 8.2 и рассчитать токи нагрузок и возбуждения генератора в относительных единицах.

$$I^* = I / I_n; \quad i_B^* = i_B / i_{Bn}$$

Таблица 8.2

Зависимости тока возбуждения от тока нагрузки генератора при различной отдаваемой активной мощности в сеть

$P_r = 0$				$P_r = 1,0 \text{ кВт}$				$P_r = 1,5 \text{ кВт}$			
I_r	i_B	I_r	i_B	I_r	i_B	I^*	i_B^*	I_r	i_B	I_r	i_B
А	А	о.е.	о.е.	А	А	о.е.	о.е.	А	А	о.е.	о.е.

По данным таблицы 2 построить на одном графике U -образные характеристики $I^* = f(i_B^*)$ для различных значений активной нагрузки.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Паспортные данные машин, оборудования и приборов, применяемых в работе.
3. Информация по каждому опыту:
 - принципиальная электрическая схема;
 - таблицы с данными опытов и расчетов;
 - примеры расчетов, векторные диаграммы и графики.

Контрольные вопросы

1. Что такое синхронизация СГ с сетью и какими методами она осуществляется?
2. Объясните механизм метода самосинхронизации.
3. Объясните механизм метода точной синхронизации.
4. Поясните принцип работы лампового синхроскопа при включении ламп на «потухание огня».
5. Поясните принцип работы лампового синхроскопа при включении ламп на «вращение огня».
6. Как загрузить генератор, работающий параллельно с сетью, активной мощностью?
7. Как изменить $\cos\phi$ генератора, работающего параллельно с сетью?
8. Объясните термины «первозбуждение», «недовозбуждение» генератора.
9. Почему нельзя снять U -образные характеристики на генераторе, работающем изолированно от сети?
10. Почему на U -образных кривых минимум тока сдвигается в сторону увеличения тока возбуждения при росте активной нагрузки?

ИСПЫТАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы – изучить способы пуска синхронного двигателя, определить опытным путем его рабочие характеристики.

Общие сведения

Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными ряд преимуществ, так как благодаря возбуждению постоянным током они могут работать с $\cos\varphi = 1$ и не потребляют при этом реактивной мощности из сети, а при работе с перевозбуждением даже отдают реактивную мощность в сеть. В результате улучшается коэффициент мощности сети и уменьшаются падения напряжения и потери в ней, а также повышается коэффициент мощности генераторов, работающих на электростанциях.

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален напряжению, а асинхронного двигателя – квадрату напряжения. Поэтому при понижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую нагрузочную способность. Кроме того, использование возможности увеличения тока возбуждения синхронного двигателя позволяет увеличивать надежность его работы при аварийных понижениях напряжения в сети. Вследствие большей величины воздушного зазора добавочные потери в стали и в клетке ротора синхронного двигателя меньше, чем у асинхронного, благодаря чему КПД синхронного двигателя обычно выше.

Однако конструкция синхронного двигателя сложнее, чем асинхронного с короткозамкнутым ротором, так как он должен иметь возбудитель или специальное устройство для питания обмотки возбуждения постоянным током. Вследствие этого синхронный двигатель дороже асинхронного с короткозамкнутым ротором, а пуск и регулирование скорости вращения синхронных двигателей сложнее.

Синхронный двигатель выгодно использовать при P_n больше 50–200 кВт, где не требуется частых пусков и остановок, регулирования частоты вращения (двигатель-генераторы, мощные насосы, вентиляторы, компрессоры, мельницы, дробилки и т.п.). Пуск синхронного двигателя в большинстве случаев осуществляется по принципу асинхронного двигателя. Для этого синхронный двига-

тель снабжается пусковыми обмотками в полюсных наконечниках или их полюсы изготавливаются массивными.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию синхронного двигателя по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 9.1).
3. Осуществить пуск в ход синхронного двигателя методом асинхронного пуска. Опыт проводится в такой последовательности. Обмотка возбуждения двигателя замыкается (SA1) на резистор PR2 величиной, в 8–12 раз превышающей ее омическое сопротивление ($PR2 = 20\text{--}30\ \text{Ом}$). После этого кратковременно включают двигатель в сеть, замечая направление вращения (последнее должно соответствовать стрелке).

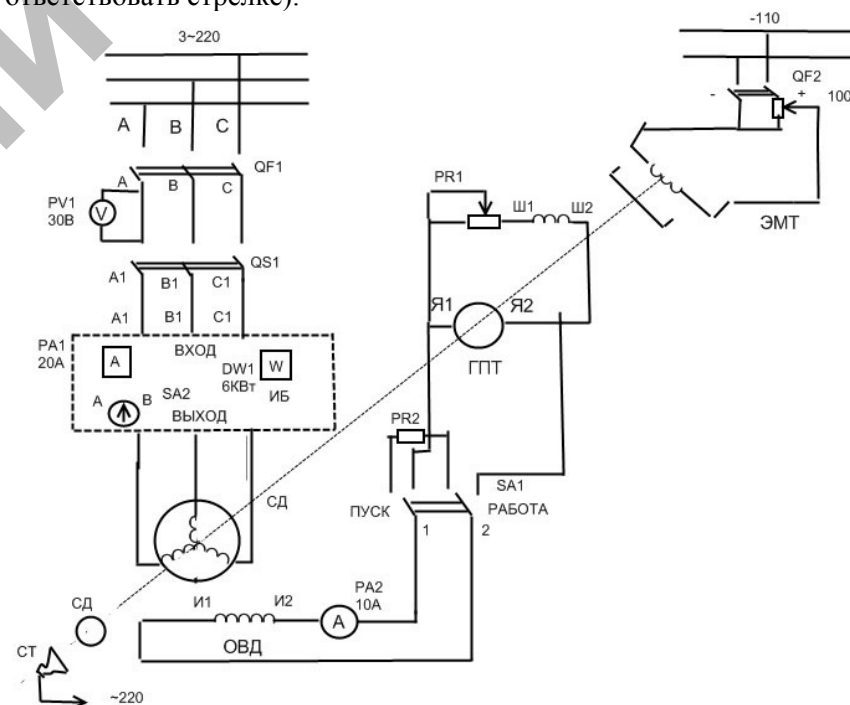


Рис. 9.1. Схема асинхронного пуска и испытания синхронного двигателя

Для изменения направления вращения необходимо изменить порядок чередования фаз на двигателе. Затем для обеспечения максимального пускового момента устанавливают движок реостата в цепи возбуждения возбудителя PR1 в положение, отмеченное риской, и включают двигатель в сеть.

В результате взаимодействия вращающегося поля с токами, индуцированными в стали полюсов и обмотке возбуждения, появляется вращающий асинхронный момент, под действием которого ротор разворачивается до частоты вращения, близкой синхронной.

После достижения ротором установившейся частоты вращения (через 5–10 с после включения) обмотку возбуждения двигателя переключают переключателем SA1 на якорь возбудителя. При этом по обмотке возбуждения потечет постоянный ток, появится синхронизирующий момент и двигатель входит в синхронный режим работы.

Так как данный синхронный двигатель не имеет специальной пусковой обмотки, пусковой момент двигателя мал, поэтому для успешного пуска необходимо обеспечить минимальный тормозной момент, т.е. проводить пуск при обесточенном электромагнитном тормозе (автомат QF2 отключен). После проведения пуска, включить цепь питания электромагнитного тормоза и установить минимальную нагрузку, при которой отсутствуют колебания тока якоря двигателя.

4. Снять и построить рабочие I_1 , P_1 , M , $\eta = f(P_2)$ и угловую $\theta = f(M)$ характеристики двигателя.

Опыт проводить, постепенно нагружая двигатель электромагнитным тормозом до тока $I = I_n$, начиная с точки устойчивой работы. Ток возбуждения при снятии характеристик поддерживать постоянным и равным номинальному. Одновременно со снятием рабочих характеристик снимается угловая характеристика двигателя $\theta = f(M)$. Для этого на валу агрегата закреплена шкала, имеющая деления в электрических градусах. При освещении шкалы стробоскопом, дающим вспышки импульсивной лампы с частотой, равной частоте тока сети, для каждой точки нагрузки по шкале θ определить угол между осью полюсов и осью поля якоря. Данные опыта и расчетов занести в таблицу 9.1.

Рабочие и угловая характеристики синхронного двигателя

Опыт					Расчет					
I_1 , А	U_1 , В	P_1 , Вт	M , Н·м	θ , град	I_{1*} , о.е.	P_{1*} , о.е.	M_* , о.е.	P_{2*} , о.е.	P_2 , Вт	η_d , о.е.

Мощность на валу двигателя $P_2 = M\omega$,

где M – момент на валу двигателя, Н·м;

ω – угловая частота вращения вала двигателя, рад/с.

Коэффициент полезного действия двигателя $\eta_d = P_2 / P_1$,

где P_1 – мощность, потребляемая двигателем, Вт.

Относительные значения тока, момента, мощности:

$$I_{1*} = I_1 / I_n; M_* = M / M_n; P_{1*} = P_1 / S_n; P_{2*} = P_2 / S_n,$$

где I_n , M_n , S_n – номинальные значения тока, момента и полной мощности двигателя.

5. Снять и построить U -образную характеристику двигателя $I_{1*} = f(i_B)$ при $M_2 = \text{const}$.

Запустить двигатель, установить момент на валу двигателя $M = 8$ Н·м. Затем изменять значения тока возбуждения двигателя с помощью реостата PR1 в таких пределах, чтобы ток двигателя I_1 изменялся от $I_1 = I_n$ до $I_1 = I_{\text{min}}$ (недовозбуждение) и от $I_1 = I_{\text{min}}$ до $I_1 = I_n$ (перевозбуждение).

При снятии характеристики ток статора не должен превышать номинального значения, так как возможен выход машины из синхронного режима работы. В таком случае опыт следует повторить сначала. Данные опыта и расчета значений токов в относительных единицах занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2

Зависимость значений тока возбуждения от тока нагрузки двигателя

I_1 , А	I_{1*} , о.е.	i_B , А	i_{B*} , о.е.

Относительный ток возбуждения двигателя $i_{в*} = i_{в} / i_{вн}$,
где $i_{вн}$ – номинальный ток возбуждения двигателя.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Паспортные данные машин, оборудования и приборов, применяемых в работе.
3. Информация по каждому опыту:
 - название опыта;
 - краткое описание опыта,
 - экспериментальные данные и построенные характеристики;
 - выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип работы синхронного двигателя.
2. Какие существуют способы пуска синхронного двигателя? В чем сущность асинхронного пуска?
3. Почему обмотка ротора синхронного двигателя в период пуска замыкается на резистор?
4. Зависит ли КПД синхронного двигателя от величины $\cos\varphi$ при одной и той же мощности на валу?
5. Как снимается U -образная характеристика синхронного двигателя?
6. Покажите на U -образной характеристике зоны перевозбуждения, недовозбуждения и точку с $\cos\varphi = 1$.
7. Почему U -образная характеристика синхронного двигателя при $P_2 = 0$ не касается оси абсцисс и лежит выше ее?
8. Чем объясняется выход двигателя из синхронного режима работы при его нагрузке?
9. Как обеспечивается синхронное вращение двигателя с полем якоря?
10. Имеются ли существенные отличия в характеристиках синхронного двигателя с явно и неявно выраженными полюсами?

ЛИТЕРАТУРА

1. Брускин, Д. Э. Электрические машины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. Москва, 1987.
2. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. Ленинград, 1978.
3. Костенко, М. П. Электрические машины / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Ленинград, 1973.
4. Шевчик, Н. Е. Электрические машины / Н. Е. Шевчик, Г. Д. Подгайский. Минск, 2000.

Для заметок

Для заметок

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Для заметок

Учебное издание

Шевчик Николай Евгеньевич, **Збродыга** Владимир Михайлович,
Кузьмич Владимир Иванович и др.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Лабораторный практикум

В двух частях

Часть 1

Машины постоянного тока.
Синхронные машины

Ответственный за выпуск *Н. Е. Шевчик*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *Д. О. Хмелевской*

Подписано в печать 17.11.2011 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 4,54. Тираж 400 экз. Заказ 990.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.