Ю.В. ЗУБКОВ

СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Часть 1

Учебно-методическое пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и нетрадиционная энергетика»

Ю.В. ЗУБКОВ

СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Часть 1

Учебно-методическое пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2013

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.313
З-91

Зубков Ю.В.

З-91 **Синхронные электромеханические преобразователи. Часть 1**: учеб.-метод. пособие / *Ю.В. Зубков*. – 2-е изд. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 102 с.: ил.

Содержит теоретические сведения о синхронных электромеханических преобразователях (СЭМП). Рассмотрены конструкция и принцип действия основных типов синхронных машин, системы возбуждения, холостой ход и работа под нагрузкой автономных синхронных генераторов. Даны практические рекомендации по экспериментальному определению основных потребительских характеристик и параметров обмотки якоря СЭМП, а также контрольные вопросы, указания по обработке экспериментальных данных.

Предназначены для подготовки бакалавров направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очного, заочного, очно-заочного обучения.

Дисциплина – «Электрические машины».

УДК 621.313
З-91

Рецензент д-р техн. наук *П.К. Кузнецов*

© Ю.В. Зубков, 2013
© Самарский государственный технический университет, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для подготовки квалифицированных инженерных кадров из студентов электротехнических и электромеханических специальностей требуются специально ориентированные учебные и методические пособия. Имеющиеся руководства по лабораторным работам для исследования синхронных машин [1] достаточно полно отражают связь теоретических разделов курса «Синхронные электромеханические преобразователи» с практическим исследованием характеристик и параметров СЭМП. Однако они не соответствуют современной лабораторной базе, и в них не содержится хотя бы краткая теория синхронных машин. В настоящем пособии ставится задача ознакомить обучающихся с основными разделами классической теории синхронных машин и практическими навыками определения основных характеристик и параметров СЭМП. Учебно-методическое пособие содержит описание конструкции и принципа действия основных типов синхронных машин, систем возбуждения, холостого хода и работы под нагрузкой синхронных генераторов.

Даны практические рекомендации по экспериментальному определению основных потребительских характеристик и параметров обмотки якоря СЭМП, а также контрольные вопросы, указания по обработке экспериментальных данных.

Во всех формулах по возможности устранены коэффициенты, полученные подстановкой численных значений различных констант (μ_0, π и т.п.), что придает формулам классический вид, какой они имеют в общепризнанных вузовских учебниках по электрическим машинам [3, 4]. Термины и определения, а также условные буквенные обозначения величин по возможности приняты такими же, как в указанных учебниках.

Настоящее пособие не ставит целью заменить полноформатные издания по теории синхронных машин. Поэтому при выполнении лабораторных работ студентам рекомендуется пользоваться также литературой из предлагаемого библиографического списка, научно-техническими журналами.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования СамГТУ и рецензентам за ценные замечания при работе над рукописью.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 242, СамГТУ, кафедра электромеханики и автомобильного электрооборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Синхронные электромеханические преобразователи широко используются в качестве генераторов электрической энергии на электростанциях всех типов, двигателей, компенсаторов реактивной мощности. Мощность СЭМП, применяемых в качестве генераторов, колеблется от нескольких киловатт для автономных установок до нескольких сотен тысяч киловатт для крупных электростанций. Синхронные двигатели используются в крупных компрессорах, двигатель-генераторных установках. Они выпускаются серийно мощностью от 100 до нескольких десятков тысяч киловатт на различные частоты вращения. Наряду с мощными двигателями наша промышленность широко выпускает синхронные микродвигатели различных типов мощностью от долей до нескольких сотен ватт.

Иногда синхронные двигатели, работающие без нагрузки на валу, используют в качестве источника реактивной мощности. Синхронная машина, работающая в таком режиме, называется синхронным компенсатором. Синхронные компенсаторы находят практическое применение для улучшения коэффициента мощности сети.

1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1.1. КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Как следует из названия синхронных машин, скорость вращения их ротора равна скорости вращения электромагнитного поля и направлена в ту же сторону. Следовательно, скольжение синхронных машин в установившемся режиме работы и частоту токов в роторе можно выразить в следующем виде:

$$s = {(n_1 - n)}/{n_1} = 0, \quad f_2 = sf_1 = 0.$$

Таким образом, цепь ротора синхронной машины является цепью постоянного тока, а ЭДС наводится только в обмотке статора. Поэтому в синхронных машинах помимо разделения активной части на неподвижную и подвижную (статор и ротор) существует и другое деление: часть машины, в которой наводится ЭДС, называется якорем, а часть машины с цепью постоянного тока – индуктором. В классическом варианте конструкции этих машин статор является якорем, а ротор – индуктором.

Статор (якорь) синхронной машины не отличается от статора асинхронной машины. Ротор – это система постоянного тока, поэтому его магнитопровод может выполняться как массивным, так и шихтованным (рис. 1.1). Обмотка 4 ротора, питающаяся от источника постоянного тока, является однофазной и называется обмоткой возбуждения.

Сердечник статора синхронной машины не отличается от сердечника статора машины асинхронной и представляет собой полый цилиндр, набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности этого цилиндра выштампованы пазы для укладки обмотки якоря. При внешнем диаметре сердеч-

ника менее 1 м его собирают из цельных кольцевых пластин, а при большем диаметре каждый кольцевой слой составляют из отдельных сегментов. Размещают сердечник в станине (корпусе) статора.

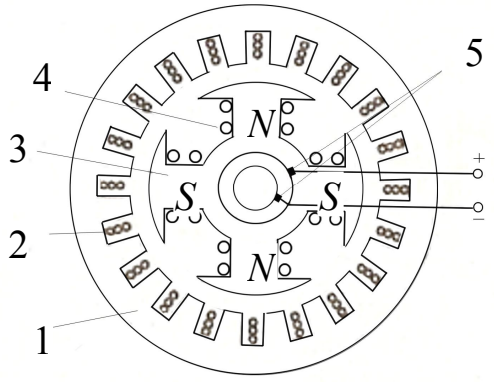


Рис. 1.1. Конструктивная схема синхронной машины:
1 – якорь; 2 – обмотка якоря; 3 – полюсы индуктора;
4 – обмотка возбуждения; 5 – контактные кольца со щетками

В зависимости от конструкции магнитопровода ротора синхронные машины делятся на два класса (рис. 1.2): явнополюсные и неявнополюсные. Ротор явнополюсных синхронных машин имеет выступающие полюсы.

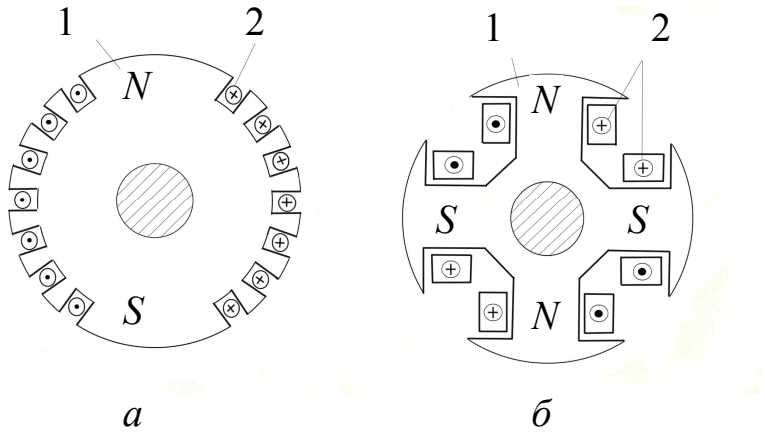


Рис. 1.2. Поперечные разрезы роторов неявнополюсной (*а*)
и явнополюсной (*б*) машин:
1 – сердечник; 2 – обмотка

Сердечники полюсов для машин большой мощности шихтуются из пластин конструкционной стали толщиной 1 ÷ 2 мм, а для машин небольшой мощности – из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 ÷ 1 мм. На рис. 1.3 показаны различные способы крепления полюсов. В машинах небольшой мощности полюсы 1 крепят болтами 2 непосредственно к валу (см. рис. 1.3, *а*), а в тихоходных машинах большей мощности – к ободу 3 ротора (см. рис. 1.3, *б*). В мощных и относительно быстроходных машинах полюсы крепят к ободу ротора с помощью хвостов, имеющих Т-образную форму или форму ласточкина хвоста (см. рис. 1.3, *в*, *г*). Такое крепление обеспечивает большую механическую прочность ротора.

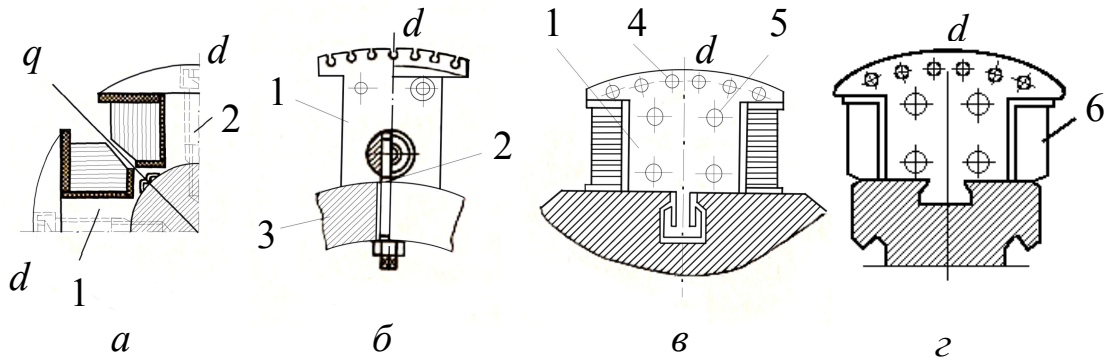


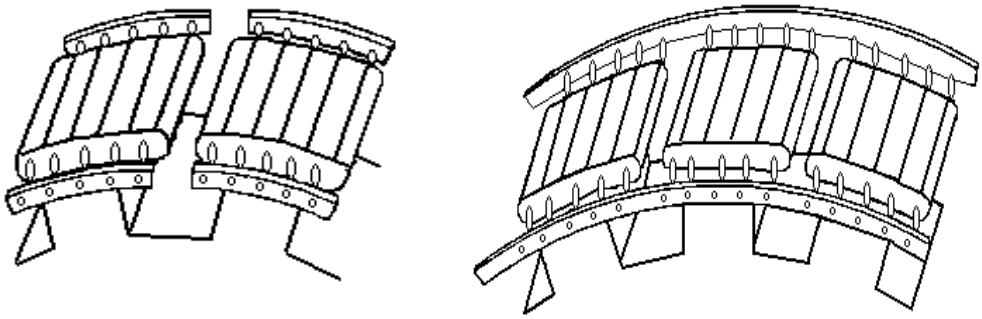
Рис. 1.3. Различные способы крепления полюсов:
а – болтами непосредственно к валу; *б* – болтами к ободу ротора;
в – с помощью Т-образного хвоста к ободу ротора; *г* – с помощью ласточкина хвоста.
1 – полюс; 2 – болт; 3 – обод ротора; 4 – паз демпферной обмотки; 5 – стяжная шпилька;
6 – обмотка возбуждения

В магнитном отношении явнополюсный ротор имеет две оси симметрии: продольную *d*, совпадающую с осью полюсов и обмотки возбуждения 6, и поперечную *q*, перпендикулярную продольной (смещенную на угол 90° электрических).

Катушки обмотки возбуждения в мощных машинах для лучшего охлаждения выполняют из неизолированных медных шин большого сечения, намотанных на ребро. Между соседними витками катушки укладывают изоляционные прокладки. В машинах небольшой мощности катушки обмотки возбуждения выполняют из изолированных

проводников прямоугольного или круглого сечения. На полюсах ротора часто устанавливают демпферную обмотку, размещая ее в пазах полюсных наконечников. Медные или латунные стержни этой обмотки, уложенные в пазы, по торцам замыкают сегментами таким образом, чтобы образовалась короткозамкнутая клетка. Демпферные обмотки подразделяются на продольные и продольно-поперечные.

Продольная обмотка состоит из короткозамкнутых клеток полюсов, не соединенных друг с другом (рис. 1.4, *а*). В продольно-поперечной обмотке сегменты всех полюсов соединяются между собой с помощью гибких перемычек (рис. 1.4, *б*). Ось продольной демпферной обмотки совпадает с продольной осью *d* (с осью полюсов), а продольно-поперечная обмотка имеет две оси симметрии: продольную и поперечную.



а *б*

Рис. 1.4. Продольная (*а*) и продольно-поперечная (*б*) демпферные обмотки

Демпферная обмотка выполняет ряд функций. В генераторах она ослабляет влияние токов обратной последовательности при несимметричной нагрузке и уменьшает пульсации магнитного потока, вызванные зубчатостью статора. В двигателях она выполняет функции пусковой обмотки (типа беличьей клетки) и уменьшает амплитуду качаний ротора при изменении нагрузки.

Общий вид ротора явнополюсной машины с горизонтальным валом показан на рис. 1.5. Синхронные явнополюсные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с гидравлическими турбинами, называются гидрогенераторами. В зависимости от типа гидротурбины гидрогенераторы могут быть как с горизонталь-

ным, так и с вертикальным валом. Механическая прочность различных деталей гидрогенераторов рассчитывается по угонной частоте вращения, которая в два-три раза больше номинальной и может достигаться при аварийном отключении генератора от сети.

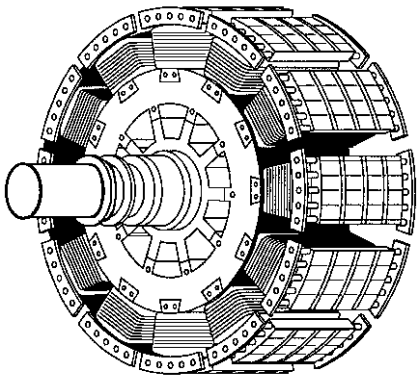


Рис. 1.5. Ротор явнополюсной синхронной машины с горизонтальным валом

Неявнополюсные роторы (рис. 1.6, 1.7) применяют в высокоскоростных (с частотой вращения n, равной 1500 или 3000 об/мин) синхронных машинах большой мощности, так как при большой мощности применение машин явнополюсной конструкции невозможно по условиям механической прочности ротора. Неявнополюсные роторы имеют быстроходные синхронные двигатели большой мощности – турбодвигатели и синхронные неявнополюсные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами (турбогенераторы).

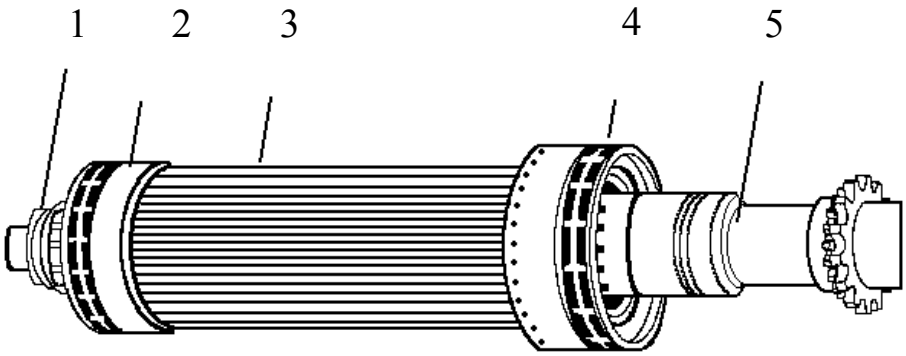


Рис. 1.6. Ротор неявнополюсной синхронной машины:
1 – контактные кольца; 2 – бандаж обмотки возбуждения; 3 – бочка ротора; 4 – вентилятор; 5 – вал

Роторы турбогенераторов изготавливают массивными, из цельной поковки, выполненной из высокопрочной легированной стали. По условиям сохранения механической прочности ротора его диаметр при частоте вращения 3000 об/мин не должен превышать $1200 \div 1250$ мм. На наружной поверхности ротора фрезеруют прямоугольные пазы, в которые укладывают катушки обмотки возбуждения (см. рис. 1.7). Примерно на одной трети полюсного деления обмотку не укладывают, и эта часть образует так называемый большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока возбуждения.

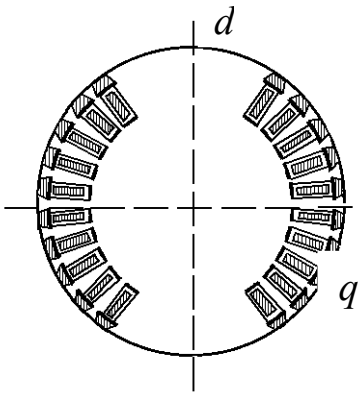


Рис. 1.7. Поперечный разрез ротора двухполюсного турбогенератора

Из-за больших центробежных сил, действующих на обмотку возбуждения, ее крепление в пазах производят с помощью немагнитных металлических клиньев. Эти клинья ослабляют магнитные потоки пазового рассеяния, которые могут вызывать насыщение зубцов и приводить к уменьшению полезного потока. Лобовые части обмотки возбуждения закрепляют роторными бандажами 2 (см. рис. 1.6), а ее выводы подсоединяют к контактным кольцам 1.

1.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СЭМП

Рассмотрим принцип действия на примере синхронного генератора. Если по его обмотке возбуждения пропустить постоянный ток, то этот ток создаст постоянное во времени и неподвижное относительно ротора магнитное поле с чередующейся полярностью. При

вращении ротора (индуктора) его магнитное поле будет вращаться относительно неподвижной обмотки статора (якоря) и наводить в ней переменную ЭДС.

Если на якоре уложена симметричная трехфазная обмотка (т.е. магнитные оси фаз сдвинуты в пространстве на 120° электрических, а электрические сопротивления и числа витков фаз одинаковы), то в этой обмотке индуцируется симметричная система ЭДС (т.е. равных по модулю и сдвинутых во времени на 120° электрических). При этом частота индуктируемых в обмотках ЭДС

$$f_1 = {pn}/{60},$$

где p – число пар полюсов обмотки; n – скорость ротора, об/мин.

Если к трехфазной обмотке якоря синхронного генератора подключить симметричное внешнее сопротивление, то по этой обмотке будет протекать симметричная система токов, создающих круговое вращающееся магнитное поле якоря. Частота вращения этого поля относительно статора

$$n_1 = {60 f_1}/{p}.$$

В основном конструктивном варианте поле возбуждения имеет ту же частоту вращения, что и ротор, поэтому результирующее поле, созданное совместным действием токов обмоток якоря и возбуждения, будет иметь частоту вращения ротора.

При работе синхронной машины двигателем трехфазная обмотка статора присоединяется к трехфазной сети, при этом образуется вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_1. Это поле, взаимодействуя с полем полюсов ротора, создает вращающий момент. Чтобы при взаимодействии полей момент имел одно и то же направление, они должны быть неподвижными относительно друг друга. Это будет в том случае, если ротор, а следовательно, и его магнитное поле будут вращаться с частотой вращения n_1. Поэтому в синхронном двигателе ротор как при холостом ходе, так и при нагрузке вращается с постоянной частотой вращения, равной частоте вращения поля.

1.3. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СЭМП

Большинство синхронных машин имеет электромагнитное возбуждение. Источником постоянного тока для обмотки возбуждения являются специальные системы возбуждения, к которым предъявляется ряд важных требований, главными из них являются:

1) надежное и устойчивое регулирование тока возбуждения в любых режимах работы машины;

2) достаточное быстродействие, для чего применяется форсировка возбуждения, т.е. быстрое увеличение напряжения возбуждения от номинального значения до предельного, называемого потолочным. Форсировка напряжения применяется для поддержания устойчивой работы машины во время аварии и после ее ликвидации. Потолочное напряжение возбуждения выбирается не менее 1,8-2 номинального напряжения возбуждения, а скорость его нарастания – 1,5-2 номинального напряжения возбуждения в секунду;

3) быстрое гашение магнитного поля, т.е. уменьшение тока возбуждения машины до нуля без значительного повышения напряжения на ее обмотках. Необходимость в гашении поля возникает при отключении или аварии в генераторе.

В синхронных машинах применяются несколько систем возбуждения.

Электромашинная система возбуждения с возбудителем постоянного тока (рис. 1.8). В этой системе в качестве источника используется специальный генератор постоянного тока, называемый возбудителем. Мощность возбудителя обычно равна $0{,}3 \div 3$ % мощности синхронного генератора, он приводится во вращение от вала синхронного генератора. Ток возбуждения крупной синхронной машины I_f относительно велик и составляет несколько сотен и даже тысяч ампер. Поэтому его регулируют с помощью реостатов, установленных в цепи возбуждения возбудителя.

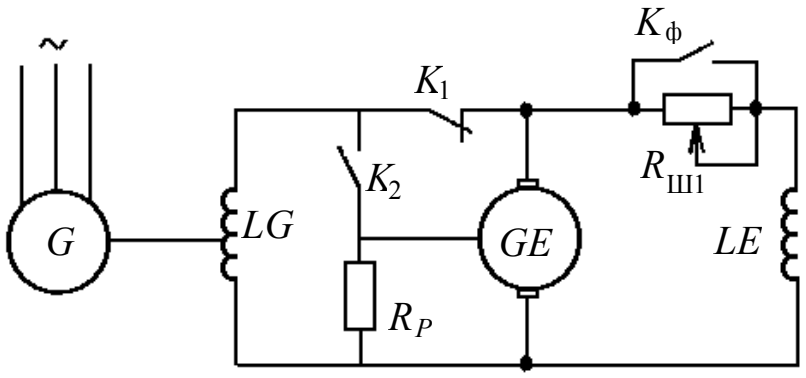


Рис. 1.8. Электромашинная система возбуждения
LG – обмотка возбуждения синхронного генератора;
LE – обмотка возбужденна возбудителя *GE*; $R_{ш1}$ – регулировочное сопротивление

Возбуждение возбудителя осуществляется по схеме самовозбуждения (рис. 1.8) или независимого возбуждения от специального генератора постоянного тока, называемого подвозбудителем (рис. 1.9). Подвозбудитель работает с самовозбуждением, и сопротивление резистора $R_{Ш2}$ в процессе работы генератора не изменяется.

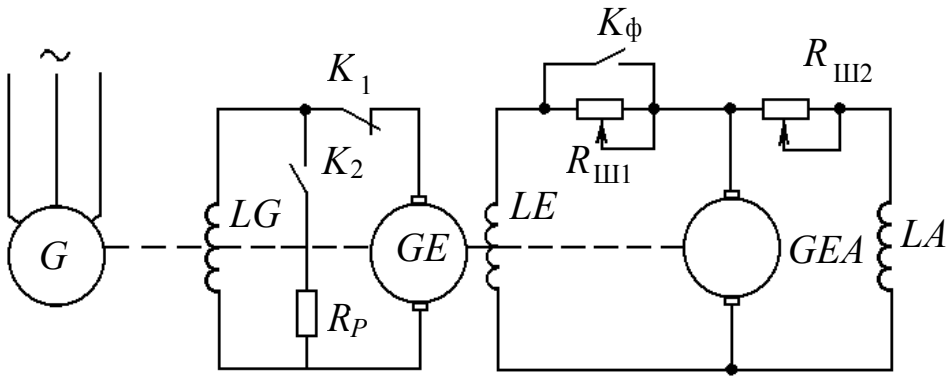


Рис. 1.9. Электромашинная система возбуждения с подвозбудителем:
LG – обмотка возбуждения синхронного генератора; *LE* – обмотка возбуждения возбудителя *GE;* *LA* – обмотка возбуждения подвозбудителя *GEA*

Для гашения магнитного поля применяется автомат гашения поля (АГП), который состоит из контакторов K_1, K_2 и гасительного (разрядного) резистора R_P. Гашение поля проводится в следующем порядке. При включенном контакторе K_1 включается контактор K_2, за-

мыкающий обмотку возбуждения на резистор $R_P \approx 5R_f$, где R_f – сопротивление обмотки возбуждения. Затем происходит размыкание контактора K_2, и ток в цепи обмотки возбуждения генератора начинает уменьшаться (затухать) с постоянной времени

$$T = L_f / (R_f + R_P),$$

где L_f – индуктивность обмотки возбуждения) в соответствии с уравнением

$$i_f = I_f e^{-t/T}.$$

Ток возбуждения можно было бы снизить до нуля выключением только одного контактора K_1 без включения гасительного резистора R_P. Ток возбуждения в этом случае исчез бы практически мгновенно. Но мгновенный разрыв цепи возбуждения недопустим, так как из-за большой индуктивности обмотки возбуждения в ней индуцировалась бы большая ЭДС самоиндукции $e_L = -L_f \dfrac{di_f}{dt}$, превышающая в несколько раз номинальное напряжение, в результате чего возможен пробой изоляции этой обмотки. Кроме того, в контакторе K_1 при разрыве выделялась бы большая энергия, запасенная в магнитном поле обмотки возбуждения, и из-за большой дуги произошло бы разрушение контактов. Для крупных машин затухание тока возбуждения при наличии гасительного резистора происходит с постоянной времени около 1 с.

Форсировка возбуждения в схемах рис. 1.8 и 1.9 осуществляется шунтированием резистора $R_{Ш1}$, включенного в цепь возбуждения возбудителя.

Вентильные системы возбуждения могут быть построены на большие мощности и являются более надежными, чем электромашинные. Различают три разновидности вентильных систем возбуждения: с самовозбуждением, независимую и бесщеточную.

В системе с самовозбуждением (рис. 1.10) энергия для возбуждения синхронной машины отбирается от обмотки якоря основного генератора, а затем преобразуется статическим преобразователем ПУ в

энергию постоянного тока, которая поступает в обмотку возбуждения. Начальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного намагничивания его полюсов.

В независимой системе вентильного возбуждения (рис. 1.11) энергия для возбуждения получается от специального возбудителя *GN*, выполненного в виде трехфазного синхронного генератора. Ротор его расположен на валу главного генератора. Переменное напряжение возбудителя выпрямляется и подается в обмотку возбуждения.

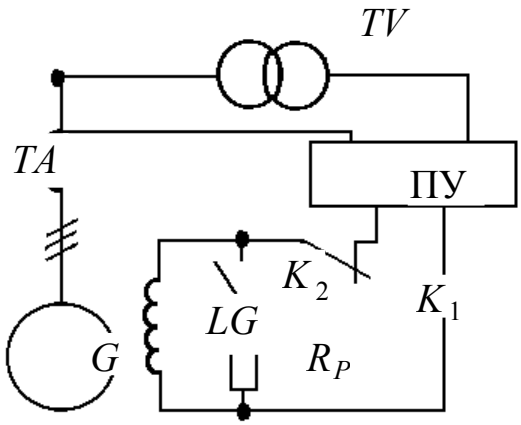


Рис. 1.10. Вентильная система возбуждения синхронного генератора с самовозбуждением:

LG – обмотка возбуждении генератора; ПУ – преобразовательное устройство с регулятором напряжения; *TV* – трансформатор напряжения, снижающий подводимое к обмотке возбуждения напряжение; *TA* – трансформатор тока, служащий для поддержания напряжения возбуждения при изменении нагрузки генератора

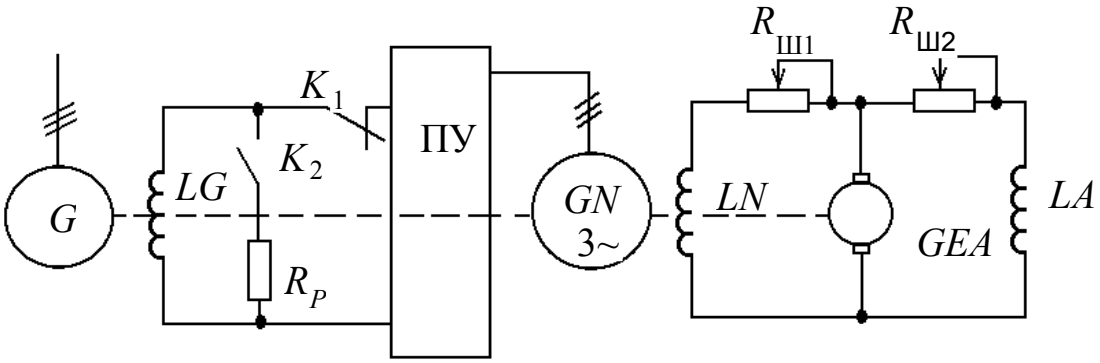


Рис. 1.11. Вентильная независимая система возбуждения**:**

GN – возбудитель переменного тока (синхронный); *LN* – обмотка возбуждения возбудителя; *GEA* – подвозбудитель; *LA* – обмотка возбуждения подвозбудителя; ПУ – преобразовательное устройство с регулятором напряжения

Разновидностью независимой системы вентильного возбуждения является бесщеточная система возбуждения. В этом случае на валу основной синхронной машины размещается якорь возбудителя переменного тока с трехфазной обмоткой. Переменное напряжение этой обмотки через выпрямительный мост, закрепленный на валу машины, преобразуется в постоянное и непосредственно (без колец) подается на обмотку возбуждения основного генератора. Обмотка возбуждения возбудителя располагается на статоре и получает питание от подвозбудителя или регулятора напряжения.

1.4. ХОЛОСТОЙ ХОД СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Под холостым ходом автономного синхронного генератора понимается такой режим его работы, при котором ротор вращается приводным двигателем, а ток в обмотке якоря равен нулю. В этом случае магнитное поле машины создается обмоткой возбуждения и его можно разложить на две составляющие: основное поле, магнитные линии которого пронизывают обмотку якоря, и поле рассеяния, магнитные линии которого сцеплены только с обмоткой возбуждения.

Магнитный поток основного поля при вращении ротора индуцирует в обмотке якоря ЭДС, форма которой должна быть максимально приближена к синусоиде. Это требование стандарта качества электрической энергии (ГОСТ 13109-97), критерием для оценки которого служит коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %,

$$K_{нсU} = 100(\sqrt{\sum U_n^2})/U_H,$$

где U_n, U_H – действующие значения соответственно высших гармонических составляющих и номинального напряжения; n – номер гармонической составляющей, $n = 2, 3...$.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в трехфазных сетях переменного тока напряжением до 1 кВ не должен превышать 8 %, а в сетях напряжением 35 кВ – 4 %.

Для получения кривой ЭДС, близкой к синусоиде, необходимо, чтобы кривая магнитного поля возбуждения машины в воздушном зазоре была по возможности близка к синусоидальной. Поскольку магнитный поток Φ, создающая его МДС F, магнитное сопротивление R_M связаны законом Ома для магнитной цепи $\Phi = F/R_M$, то это требование можно выполнить различными путями. В явнополюсной синхронной машине МДС постоянна на полюсном делении (обмотка возбуждения сосредоточенная). Следовательно, для обеспечения синусоидальности распределения магнитного потока необходимо, чтобы магнитное сопротивление рабочему потоку изменялось обратно пропорционально синусоидальному закону. Для этого зазор между полюсом и статором делают неравномерным: под краями полюса зазор δ_{max} обычно в 1,5-2,5 раза больше, чем под его серединой. На рис. 1.12 показано распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Для сравнения на рисунке штриховой линией дана кривая магнитной индукции при постоянном зазоре δ.

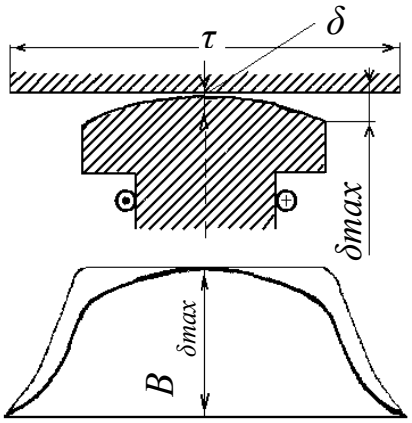


Рис. 1.12. Распределение индукции
в явнополюсной синхронной машине

В неявнополюсной синхронной машине неизменным остается магнитное сопротивление, так как воздушный зазор постоянен. Следовательно, для обеспечения синусоидальности распределения магнитного потока необходимо, чтобы МДС возбуждения изменялась по синусоидальному закону, поэтому обмотку возбуждения делают рас-

пределенной. Без учета влияния пазов можно считать, что МДС обмотки возбуждения и магнитное поле распределены по окружности по трапецеидальному закону (рис. 1.13). Амплитудные значения основных гармоник МДС и индукции поля возбуждения соответственно можно представить в следующем виде:

$$F_{fm1} = (4/\pi)(\sin\alpha/\alpha)F_{f\max} = (4/\pi)(\sin\alpha/\alpha)\, I_f w_f;$$

$$B_{\delta m1} = (4/\pi)(\sin\alpha/\alpha)\, B_{\delta\max},$$

где α – половина длины дуги, на которой располагается обмотка возбуждения; $F_{f\max}$, $B_{\delta\max}$ – максимальные значения МДС обмотки возбуждения на один полюс и индукции в воздушном зазоре соответственно; w_f, I_f – число витков обмотки возбуждения на один полюс и ток возбуждения соответственно.

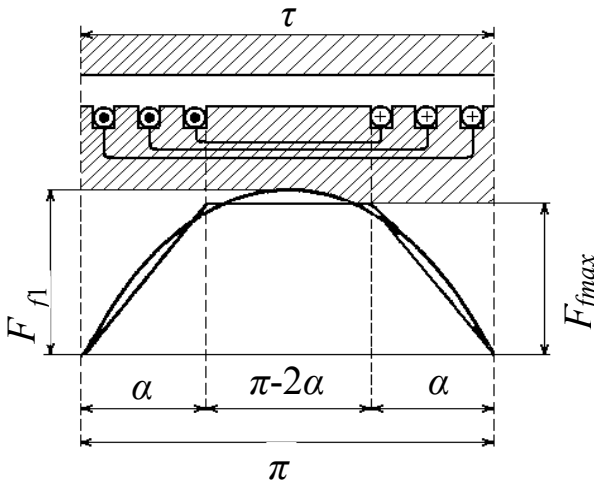


Рис. 1.13. Распределение МДС
в неявнополюсной синхронной машине

В целях улучшения кривой магнитного поля возбуждения часть полюса, на которой не укладывается обмотка, выбирают равной $\tau/3\,(\alpha = \pi/3)$. Здесь τ – полюсное деление.

В этом случае в кривой магнитной индукции будут отсутствовать все гармоники, кратные трем, а остальные высшие гармоники будут ослаблены.

Помимо этого для улучшения формы кривой ЭДС обмотки якоря

последнюю выполняют распределенной по пазам с укороченным шагом. В крупных многополюсных машинах улучшению кривой ЭДС способствует применение обмоток якоря с дробным числом пазов на полюс и фазу q.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ПО ГЛАВЕ 1

1. Назовите основные конструктивные схемы синхронных машин.
2. Опишите конструкцию синхронной явнополюсной машины.
3. Как устроена синхронная неявнополюсная машина?
4. Почему роторы гидрогенераторов и турбогенераторов имеют различную конструкцию?
5. Каково назначение демпферной (успокоительной) обмотки?
6. Каким образом улучшают форму напряжения в явнополюсных и неявнополюсных синхронных генераторах?
7. Как определяют относительное значение тока возбуждения синхронного генератора?
8. Что такое нормальная характеристика холостого хода?
9. Какие системы возбуждения применяются для синхронных СЭМП и в чем заключается их различие?

2. РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

2.1. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

При подключении симметричной трехфазной нагрузки к трехфазному синхронному генератору по обмотке якоря будут протекать симметричные токи, система которых создает вращающееся магнитное поле якоря. Как было показано в гл. 1, поле якоря перемещается в пространстве с той же частотой вращения и в ту же сторону, что и поле возбуждения, т.е. по отношению друг к другу эти поля неподвижны. Результирующее магнитное поле машины при нагрузке будет создаваться совместным действием МДС обмоток возбуждения и якоря и будет отличаться от магнитного поля при холостом ходе.

Воздействие МДС якоря на поле возбуждения машины называется **реакцией якоря.** Характер этого воздействия зависит от взаимного расположения в пространстве полей возбуждения и якоря. Поле возбуждения всегда направлено по оси полюсов (продольной оси *d*) и наводит в обмотке якоря ЭДС E_{10}, направленную по поперечной оси *q*. Ориентация магнитного поля якоря по отношению к осям симметрии ротора, зависящая от характера сопротивления нагрузки, определяется углом сдвига ψ между ЭДС E_{10} и током якоря I_1. Если пренебречь относительно малым активным сопротивлением обмотки якоря по сравнению с ее индуктивным сопротивлением x_1, то электрическую схему замещения для одной фазы обмотки якоря можно представить в виде, показанном на рис. 2.1. В этом случае угол ψ в зависимости от характера нагрузки $z_н$ может изменяться от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

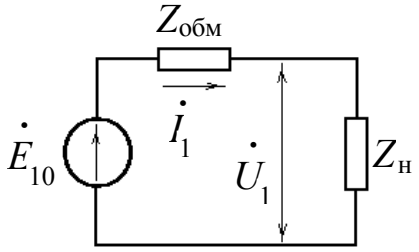


Рис. 2.1. Электрическая схема замещения фазы обмотки якоря

Рассмотрим проявление реакции якоря в трех предельных случаях:

1. Ток якоря I_1 отстает от E_{10} на угол $\psi = \pi/2$. Из анализа схемы на рис. 2.1 следует, что такому режиму соответствует индуктивный характер нагрузки ($z_н = x_L$). На рис. 2.2 схематично показаны реакция якоря при индуктивной нагрузке и соответствующая этой нагрузке векторная диаграмма.

Для упрощения обмотка каждой фазы представлена одной катушкой. Будем считать, что поле возбуждения имеет синусоидальный характер. При вращении ротора в обмотках фаз якоря наводятся ЭДС, направление которых определяется по правилу правой руки. Для момента времени, соответствующего положению ротора, приведенному на рисунке, направления ЭДС показаны крестиками и точками около

проводников. Максимальная ЭДС индуктируется в проводниках фазы *A*, расположенных по оси полюсов (т.е. когда индукция возбуждения максимальна).

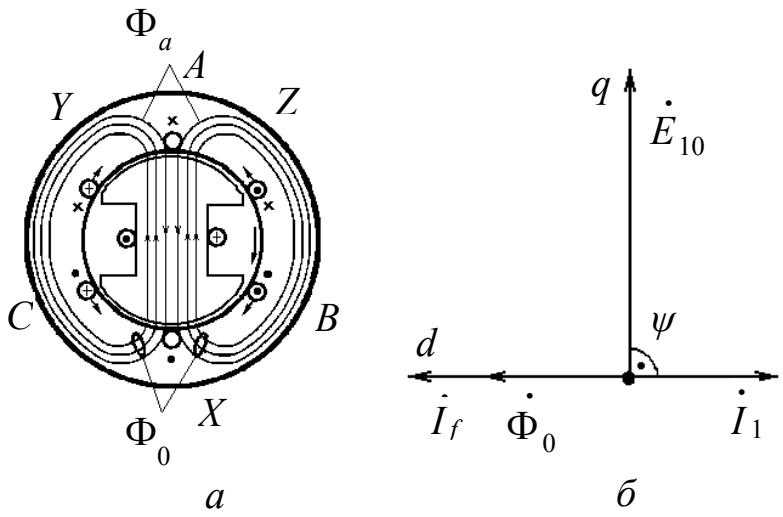


Рис. 2.2. Реакция якоря (*а*) и векторная диаграмма (*б*) синхронного генератора при индуктивной нагрузке

Порядок чередования фаз на этом рисунке согласован с направлением вращения ротора.

Магнитное поле якоря $\dot{\Phi}_a$, совпадающее с направлением тока якоря $\dot{I}_1$, направлено по продольной оси *d* навстречу полю возбуждения $\dot{\Phi}_0$. Следовательно, при индуктивной нагрузке в синхронном генераторе возникает продольная размагничивающая реакция якоря, а значит, результирующий магнитный поток и индуцированная в обмотке якоря ЭДС меньше, чем при холостом ходе.

Используя правило левой руки, по рис. 2.2 можно определить направления сил *f*, действующих на проводники якоря, а из этого заключить, что сумма сил, действующих на обмотку якоря, равна нулю. Следовательно, равен нулю и электромагнитный момент, развиваемый при этой нагрузке синхронным генератором. Иными словами, при индуктивной нагрузке (продольной реакции якоря) электромагнитный момент синхронного генератора равен нулю.

2. Ток якоря I_1 опережает E_{10} на угол $\psi = \pi/2$. Согласно рис. 2.1 можно считать, что такому режиму соответствует емкостный характер нагрузки ($z_н = x_c$). На рис. 2.3 схематично показаны реакция якоря синхронного генератора при емкостной нагрузке и соответствующая этой нагрузке векторная диаграмма. По сравнению с предыдущим случаем индуктивной нагрузки здесь токи фаз *B* и *C* изменили направление. Поле якоря по отношению к оси полюсов также продольное, но оно оказывает намагничивающее действие, вследствие чего результирующий магнитный поток и индуктированная в обмотке якоря ЭДС будут больше, чем при холостом ходе.

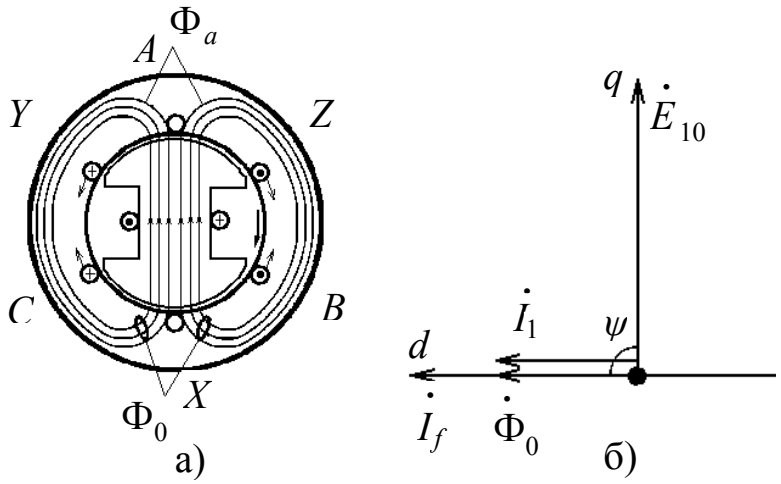


Рис. 2.3. Реакция якоря (*а*) и векторная диаграмма (*б*) синхронного генератора при емкостной нагрузке

Следовательно, при емкостной нагрузке реакция якоря в синхронном генераторе является продольной и намагничивающей. Анализ направлений сил f показывает, что при емкостной нагрузке (продольной реакции якоря) электромагнитный момент синхронного генератора равен нулю.

3. Ток якоря I_1 совпадает по фазе с E_{10} ($\psi = 0$). Согласно рис. 2.1 можно считать, что такому режиму соответствует смешанный (активно-емкостный) характер нагрузки $z_н = r + jx_c$. При этом емкостное сопротивление x_c должно быть равно индуктивному сопротивлению обмотки якоря x_1.

Реакция якоря и векторная диаграмма, соответствующая рассматриваемому случаю, показаны на рис. 2.4. Здесь максимальный ток имеет место в фазе *A*, где в этот момент времени ЭДС также максимальна. Магнитное поле, созданное токами якоря, по отношению к оси полюсов является поперечным, т.е. оно ослабляет поле на набегающей половине полюса и усиливает на сбегающей половине. Если магнитная система машины ненасыщена (линейна), то поле якоря не изменяет значение магнитного потока, а если насыщена (нелинейна), – уменьшает.

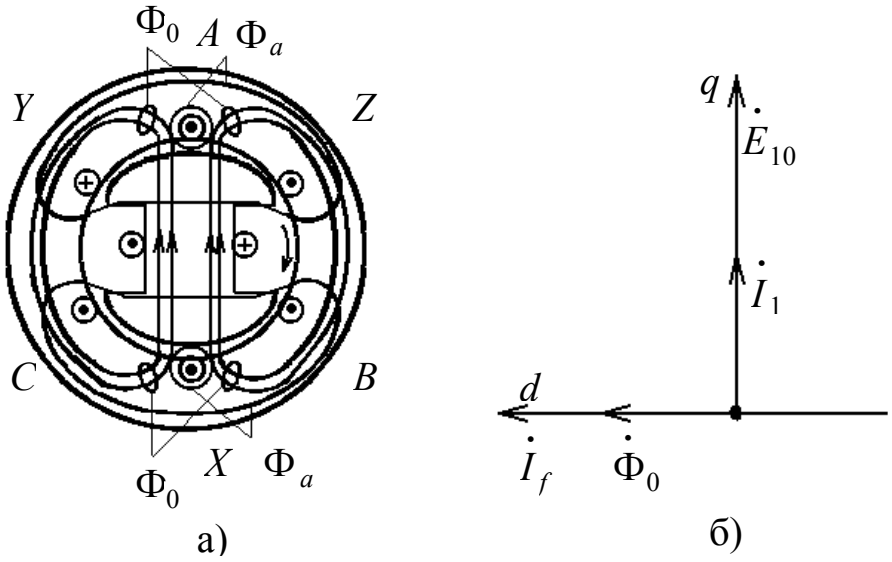


Рис. 2.4. Реакция якоря (*а*) и векторная диаграмма (*б*) синхронного генератора при $\psi = 0$

При $\psi = 0$ электромагнитные силы, создаваемые токами, протекающими по обмотке статора, направлены в одну сторону, совпадающую с направлением вращения ротора. При этом на ротор действуют такие же по значению силы, но направленные против его вращения, т.е. создающие тормозной электромагнитный момент. Для компенсации этого момента приводной двигатель должен развивать равный ему механический момент на валу генератора.

В общем случае ток якоря можно разложить на две составляющие (рис. 2.5):

$$\dot{I}_{1d} = \dot{I}_1 \sin\psi\,;\ \dot{I}_{1q} = \dot{I}_1 \cos\psi\,.$$

Одна из этих составляющих тока $\dot{I}_{1q}$, совпадающая по фазе с ЭДС, создает поперечную МДС якоря и называется поперечным током якоря. Другая составляющая $\dot{I}_{1d}$ создает продольную МДС якоря и называется продольным током якоря. Таким образом, в общем случае при нагрузке в машине существуют как продольная, так и поперечная реакция якоря.

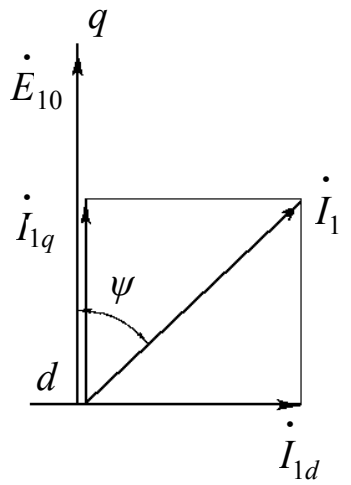


Рис. 2.5. Разложение тока якоря
на продольную и поперечную составляющие

Влияние поля якоря было рассмотрено на примере явнополюсного синхронного генератора. Однако полученные результаты в полной мере относятся и к неявнополюсным машинам.

Количественный учет влияния реакции якоря на работу машины производится на основе векторных диаграмм. Обычно с их помощью находят МДС обмотки возбуждения (или ток I_f), необходимую для обеспечения соответствующего режима работы, который, в свою очередь, определяется током якоря I_1 при данных значениях $\cos\varphi$ и напряжения на выводах генератора U_1.

2.2. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НЕЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА БЕЗ УЧЕТА НАСЫЩЕНИЯ

При качественном рассмотрении процессов, происходящих в генераторе, целесообразно использовать более простую векторную диаграмму, построенную без учета насыщения.

При построении такой диаграммы применяется метод наложения, согласно которому можно считать, что в машине существуют два независимых магнитных потока: поток возбуждения и поток якоря. Каждый из этих потоков, в свою очередь, можно разделить на рабочий поток, сцепленный с обеими обмотками, и поток рассеяния, сцепленный лишь с одной из них.

Полный поток возбуждения $\Phi_f = \Phi_0 + \Phi_{f\sigma}$; полный поток якоря $\Phi_1 = \Phi_a + \Phi_{a\sigma}$. Потоки Φ_0, Φ_a и $\Phi_{a\sigma}$ наводят в обмотке якоря ЭДС соответственно E_{10}, E_a и $E_{a\sigma}$. Тогда, исходя из второго закона Кирхгофа, для фазы обмотки якоря можно записать

$$\dot{E}_{10} + \dot{E}_a + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{I}_1 z_н + \dot{I}_1 r_1, \qquad (2.1)$$

где $z_н$ – комплексное сопротивление нагрузки; r_1 – активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Магнитный поток и индуктируемая им ЭДС пропорциональны току якоря:

$$\dot{E} = -j\dot{I}x,$$

где x – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивным сопротивлением.

Тогда входящие в (2.1) ЭДС можно представить в следующем виде:

$$\dot{E}_a = -j\dot{I}_1 x_a; \; \dot{E}_{a\sigma} = -j\dot{I}_1 x_{\sigma a}. \qquad (2.2)$$

Подставив значения ЭДС из (2.2) в (2.1) и заменив $\dot{I}_1 z_н$ на $\dot{U}_1$, получим

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_1(x_a + x_{\sigma a}) + \dot{I}_1 r_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_1 x_c + \dot{I}_1 r_1, \qquad (2.3)$$

где x_a – индуктивное сопротивление реакции якоря; $x_{a\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря; x_c – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря, $x_c = x_a + x_{\sigma a}$.

С учетом (2.3) по заданным U_1, I_1 и $\cos\varphi$ на рис. 2.6 построена векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора. Ток

возбуждения I_f, соответствующий определяемой по этой векторной диаграмме ЭДС $\dot{E}_{10}$, находят по спрямленной характеристике холостого хода.

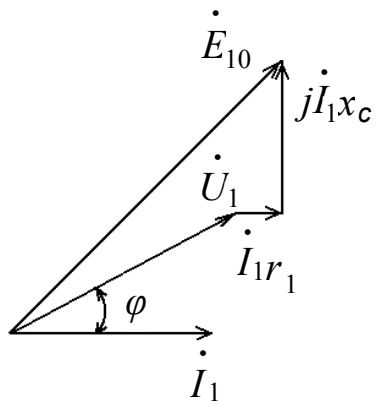


Рис. 2.6. Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора без учета насыщения

Активное сопротивление обмотки якоря очень мало по сравнению с индуктивными сопротивлениями. Поэтому при построении векторных диаграмм вектором $\dot{I}_1 r_1$ обычно пренебрегают.

2.3. ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В ЯВНОПОЛЮСНОМ СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ. МЕТОД ДВУХ РЕАКЦИЙ

Магнитный поток якоря в машине с ненасыщенной магнитной системой пропорционален МДС обмотки якоря F_a и обратно пропорционален магнитному сопротивлению R_M контура, по которому замыкается этот поток. Основную часть магнитного сопротивления составляют воздушные зазоры δ между статором и ротором. При анализе режимов работы неявнополюсных генераторов можно считать, что вдоль всей расточки машины $\delta = \text{const}$ и, следовательно, $R_M = \text{const}$. Поэтому в таких генераторах значение потока якоря и индуктируемая им ЭДС E_a являются функцией МДС F_a и не зависят от положения оси этой МДС относительно полюсов (угла ψ).

В явнополюсной синхронной машине ротор в магнитном отношении является несимметричным: воздушный зазор по его продольной оси меньше, чем по поперечной. Вследствие этого при изменении характера нагрузки (угла ψ) и соответствующем изменении

положения в пространстве вектора МДС якоря возникают различные магнитные сопротивления для потока, созданного этой МДС. Следовательно, в явнополюсной синхронной машине магнитный поток якоря и его форма зависят от двух величин: МДС якоря F_a и угла ψ.

Для облегчения учета реакции якоря в явнополюсной машине широко применяется метод двух реакций, предложенный французским электротехником А. Блонделем. Согласно этому методу МДС якоря F_a раскладывается на две составляющие ($\dot{F}_a = \dot{F}_d + \dot{F}_q$), аналогично разложению на составляющие тока якоря $\dot{I}_1$, показанному на рис. 2.5.

Составляющая $\dot{F}_d$ совпадает с осью полюсов d и является продольной составляющей МДС якоря. Составляющая $\dot{F}_q$ направлена по поперечной оси q и является поперечной составляющей МДС якоря. Составляющая $\dot{F}_d$ создается током $\dot{I}_{1d}$, а составляющая $\dot{F}_q$ – током $\dot{I}_{1q}$ (см. рис. 2.5).

Составляющие МДС якоря определяются по формулам

$$F_d = 1{,}35\left(\frac{w_1 k_{об1}}{p}\right) I_{1d} = 1{,}35\left(\frac{w_1 k_{об1}}{p}\right) I_1 \sin\psi;$$

$$F_q = 1{,}35\left(\frac{w_1 k_{об1}}{p}\right) I_{1q} = 1{,}35\left(\frac{w_1 k_{об1}}{p}\right) I_1 \cos\psi. \qquad (2.4)$$

По оси каждой из составляющих (2.4) зазоры между статором и ротором при вращении последнего остаются неизменными, поэтому магнитные потоки, созданные этими составляющими, зависят только от соответствующих МДС. Кривая распределения индукции магнитного поля для каждой из составляющих МДС якоря сохраняет свою форму при любых значениях угла ψ и зависит от размера воздушного зазора и конфигурации полюсного наконечника.

При расчетах и построении векторных диаграмм нагруженных синхронных явнополюсных машин приходится определять результирующую МДС от совместного действия токов обмоток возбуждения и якоря. Но эти обмотки имеют различное пространственное рас-

пределение, поэтому их численно равные МДС создают неодинаковые первые гармоники потоков в воздушном зазоре машины. Распределенная обмотка якоря создает синусоидальные МДС F_d и F_q, а сосредоточенная обмотка возбуждения образует МДС прямоугольной формы F_f, поэтому, чтобы определить результирующую МДС, необходимо привести одну МДС к другой. Так как обычно при расчетах и построении диаграмм используется характеристика холостого хода $E_0 = f(I_f)$, целесообразно приводить МДС якоря к МДС обмотки возбуждения.

Чтобы для МДС обмотки якоря F_d и F_q найти эквивалентные по действию МДС обмотки возбуждения F_{ad}, F_{aq} требуется умножить первые на коэффициенты реакции якоря k_d и k_q:

$$F_{ad} = k_d F_d; \quad F_{aq} = k_q F_q. \tag{2.5}$$

Полученные таким образом МДС F_{ad} и F_{aq} создают магнитные поля, первые гармоники которых наводят в обмотке якоря такие же ЭДС, как и первые гармоники полей, создаваемых МДС F_d и F_q. Поскольку F_{ad} пропорциональна току I_{1d}, а F_{aq} – току I_{1q}, на временных векторных диаграммах эти ЭДС изображаются векторами, совпадающими по фазе с соответствующими токами.

Зависимости коэффициентов k_d и k_q от коэффициента полюсного перекрытия $\alpha = b_П / \tau$ приведены в литературе [3, 4, 6]. Здесь $b_П$ – ширина полюсного наконечника при различных значениях отношения δ_{max}/δ, где δ_{max} – воздушный зазор у краев полюса; δ – воздушный зазор у середины полюса; τ – полюсное деление.

2.4. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА БЕЗ УЧЕТА НАСЫЩЕНИЯ

По аналогии с неявнополюсным синхронным генератором можно считать, что в явнополюсном генераторе существуют четыре магнит-

ных потока, индуктирующих ЭДС в обмотке якоря: поток возбуждения Φ_0, продольный поток реакции якоря Φ_{ad}, поперечный поток реакции якоря Φ_{aq}, поток рассеяния обмотки и коря $\Phi_{a\sigma}$.

Согласно второму правилу Кирхгофа, для фазы обмотки можно записать следующее уравнение:

$$\dot{E}_{10}+\dot{E}_{ad}+\dot{E}_{aq}+\dot{E}_{a\sigma}=\dot{U}_1+\dot{I}_1 r_1. \qquad (2.6)$$

ЭДС E_{ad}, индуктируемая потоком Φ_{ad}, пропорциональна продольному току якоря I_{1d}:

$$\dot{E}_{ad}=-j\dot{I}_{1d}x_{ad}, \qquad (2.7)$$

где x_{ad} – индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси.

Аналогичные выражения запишем для остальных ЭДС, входящих в уравнение (2.5):

$$\dot{E}_{aq}=-j\dot{I}_{1q}x_{aq};\ \ \dot{E}_{a\sigma}=-j\dot{I}_1 x_{\sigma a}, \qquad (2.8)$$

где x_{aq} – индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси; $x_{\sigma a}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Подставив выражения для ЭДС из (2.7) и (2.8) в (2.6), получим

$$\dot{U}_1=\dot{E}_{10}-j\dot{I}_{1d}x_{ad}-j\dot{I}_{1q}x_{aq}-j\dot{I}_1 x_{\sigma a}-\dot{I}_1 r_1. \qquad (2.9)$$

По уравнению (2.9) построим векторную диаграмму явнополюсного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку (рис. 2.7), предположив, что известны I_1, E_{10}, ψ и параметры генератора.

При построении диаграммы ток $\dot{I}_1$ предварительно раскладывается на составляющие $\dot{I}_{1d}$ и $\dot{I}_{1q}$, а затем из $\dot{E}_{10}$ вычитаются векторы падений напряжения в той последовательности, в какой они записаны в (2.9).

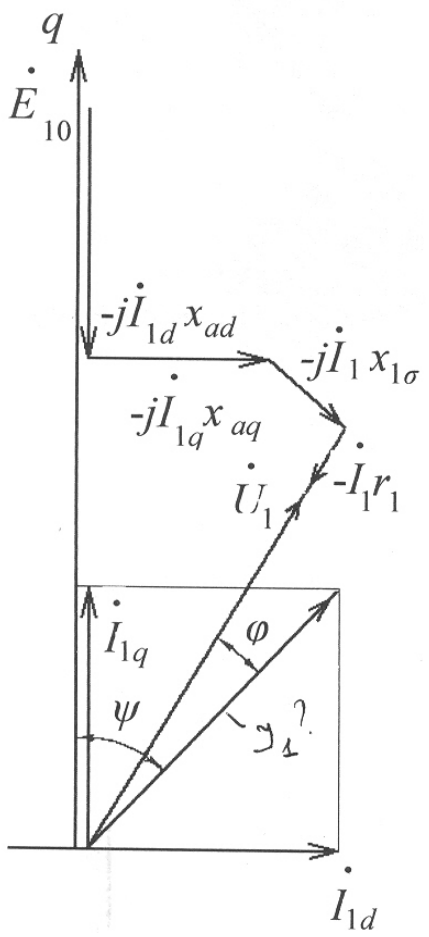


Рис. 2.7. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора без учета насыщения

Преобразуем уравнение (2.9), выразив вектор $j\dot{I}_1 x_{\sigma a}$ через составляющие тока $\dot{I}_1$:

$$-j\dot{I}_1 x_{\sigma a} = -j(\dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q})x_{\sigma a}.$$

После преобразования получим

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}(x_{ad} + x_{\sigma a}) - j\dot{I}_{1q}(x_{aq} + x_{\sigma a}) - \dot{I}_1 r_1 =$$

$$\dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_d - j\dot{I}_{1q}x_q - \dot{I}_1 r_1, \quad (2.10)$$

где x_d – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси; x_q – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси.

Известно, что индуктивное сопротивление пропорционально магнитной проводимости для потока, обусловливающего это сопротивление. Ось продольного потока якоря Φ_{ad} направлена по оси полюсов, где воздушный зазор машины минимальный, а ось поперечного потока Φ_{aq} совпадает с серединой межполюсного пространства, где воздушный зазор имеет максимальное значение. Следовательно, магнитная проводимость для потока Φ_{ad} больше, чем для потока Φ_{aq}. Отсюда такие соотношения между параметрами:

$$x_{ad} > x_{aq};\ x_d > x_q.$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ПО ГЛАВЕ 2

1. Что такое реакция якоря и как она влияет на работу синхронного генератора?
2. Что такое теория двух реакций и для чего введено это понятие?

3. Какими магнитными полями определяются индуктивные сопротивления обмотки якоря неявнополюсных СЭМП?
4. Какими магнитными полями определяются индуктивные сопротивления обмотки якоря явнополюсных СЭМП?
5. Поясните порядок построения векторной диаграммы неявнополюсного синхронного генератора.
6. Поясните порядок построения векторной диаграммы явнополюсного синхронного генератора.
7. Для чего и каким образом выполняется операция приведения МДС обмотки якоря к МДС обмотки возбуждения?

3. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

3.1. ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ

ЭДС E_{ad}, E_{aq} согласно (2.7), (2.8) можно представить в виде

$$E_{ad}=x_{ad}\,I_{1d};\;\; E_{aq}=x_{aq}\,I_{1q},$$

где x_{ad} и x_{aq} – собственные индуктивные сопротивления обмотки якоря, соответствующие полям продольной и поперечной реакции якоря при симметричной нагрузке и называемые соответственно индуктивными сопротивлениями продольной и поперечной реакции якоря.

Если сталь сердечников машины ненасыщена ($\mu_c=\infty$), то коэффициенты насыщения по продольной и поперечной осям $k_{\mu d}=k_{\mu q}=1$. Значения x_{ad} и x_{aq} при этих условиях будем называть ненасыщенными и обозначать $x_{ad\infty}$, $x_{aq\infty}$. Значения данных параметров с учетом насыщения магнитопровода:

$$x_{ad}=x_{ad\infty}/k_{\mu d};\;\; x_{aq}=x_{aq\infty}/k_{\mu q}.$$

Очевидно, что $x_{ad\infty}>x_{ad}$ и $x_{aq\infty}>x_{aq}$.

Для неявнополюсной синхронной машины ввиду равномерности воздушного зазора коэффициенты реакции якоря по продольной и поперечной осям $k_d=k_q=1$ и $x_{ad}=x_{aq}$.

Из этих двух обозначений для неявнополюсной машины сохраним обозначение x_{ad}.

Чем сильнее реакция якоря, тем больше x_{ad} и x_{aq} и тем меньше запас статической устойчивости при работе машины.

При проектировании машины с заданной мощностью, скоростью вращения и способом охлаждения величины x_{ad} и x_{aq} обратно пропорциональны величине воздушного зазора. Для ограничения влияния реакции якоря желательно, чтобы значения x_{ad} и x_{aq} не превосходили определенных пределов. Поэтому величину зазора δ в синхронных машинах приходится брать больше, чем это необходимо по механическим условиям.

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

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

Стремление к увеличению мощности машин при заданных габаритах привело к применению более интенсивных способов охлаждения (внутреннее водородное и водяное охлаждение обмоток) и к увеличению линейных нагрузок A в несколько раз (от A = (5,0 – 6,5) 10^4 А/м в машинах с воздушным охлаждением до A = (15 – 25) 10^4 А/м в машинах с водяным и водородным охлаждением). В таких машинах для ограничения величин x_{ad} и x_{aq} необходимо значительно увеличивать δ.

3.2. ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря $x_{\sigma a}$ рассчитывается по выражениям, приведенным в литературе [4]. Сделаем здесь по этому вопросу дополнительные замечания.

МДС обмотки якоря, кроме основной гармоники, содержит также высшие гармоники. При равномерном зазоре поля высших гармоник индуктируют в обмотке якоря ЭДС основной частоты, которые учитываются в виде индуктивного сопротивления дифференциального рассеяния. При неравномерном зазоре (в явнополюсной синхронной машине) поля высших гармоник МДС искажаются и поэтому индуктируют как ЭДС основной, так и ЭДС высших частот. ЭДС основной частоты при этом также учитывается в виде сопротивления дифференциального рассеяния, а высшими гармониками ЭДС пренебрегают.

Кроме дифференциального рассеяния, существуют также пазовое и лобовое рассеяния якоря. Вследствие магнитной несимметрии ротора явнополюсной синхронной машины одинаковые токи I_{1d} и I_{1q} создают различные поля и ЭДС дифференциального и лобового рассеяния. Однако эта разница невелика, и ею пренебрегают. Поэтому индуктивные сопротивления рассеяния якоря $x_{\sigma a}$ принимают для обеих осей одинаковыми. Можно также считать, что в пределах до $I_1 = (2 - 2{,}5) I_N$, $x_{\sigma a}$ = const.

Активное сопротивление фазы обмотки якоря r_1 нетрудно вычислить по известным обмоточным данным.

3.3. СИНХРОННЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Из уравнения электрического равновесия обмотки якоря явнополюсной синхронной машины (2.10)

$$E_d = E_{ad} + E_{\sigma ad} = x_{ad} I_{1d} + x_{\sigma a} I_{1d};$$

$$E_q = E_{aq} + E_{\sigma aq} = x_{aq} I_{1q} + x_{\sigma a} I_{1q},$$

или

$$E_d = x_d I_{1d}; \quad E_q = x_q I_{1q},$$

где

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}; \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma a}.$$

ЭДС E_d, E_q являются составляющими полной ЭДС самоиндукции якоря по осям d, q. Сопротивления x_d, x_q называют соответственно продольным и поперечным синхронными индуктивными сопротивлениями обмотки якоря, причем слово «синхронные» подчеркивает, что эти сопротивления соответствуют нормальному установившемуся синхронному режиму работы с симметричной нагрузкой фаз.

Величина $x_{\sigma a}$ значительно меньше x_{ad}, x_{aq}. Поэтому x_d и x_q также определяются главным образом величиной воздушного зазора машины δ.

3.4. СВЕРХПЕРЕХОДНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Помимо установившихся симметричных режимов работы для СЭМП характерны и переходные режимы. Наиболее часто интенсивные переходные процессы в энергетических системах и СЭМП вызываются короткими замыканиями в электрических сетях и линиях электропередачи. Такие замыкания происходят по разным причинам (повреждение и пробой изоляции, атмосферные перенапряжения, замыкание проводов птицами, падение опор линии электропередачи, обрыв проводов и т.д.).

Короткие замыкания, которые возникают при работе сетей, линий передач и электрических машин под напряжением и протекают очень быстро, называются **внезапными**. Одним из частных случаев короткого замыкания синхронного генератора является внезапное трехфазное короткое замыкание.

В зависимости от конструктивных особенностей СЭМП (явнополюсные – неявнополюсные, с успокоительной обмоткой в роторе – без нее) схемы замещения СЭМП при внезапном коротком замыкании выглядят следующим образом (рис. 3.1).

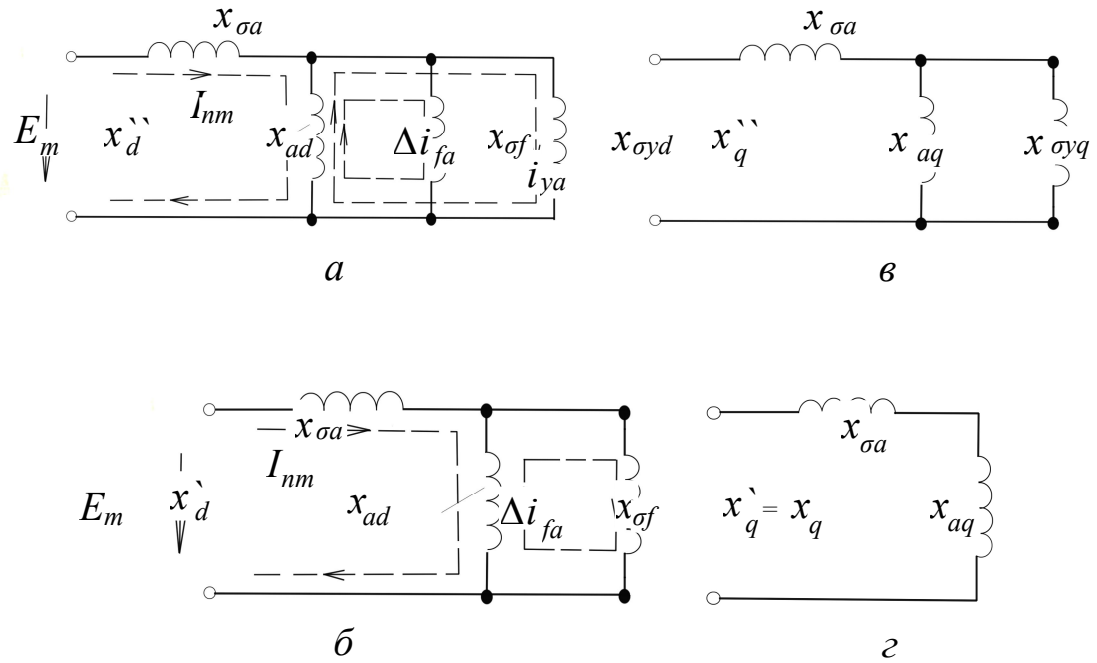


Рис. 3.1. Схемы для определения сверхпереходных (*а*, *в*) и переходных (*б*, *г*) индуктивных сопротивлений по продольной (*а*, *б*) и поперечной (*в*, *г*) осям

На этих схемах Δi_{fa}, $i_{y.a}$ – апериодические токи индуктора в обмотках возбуждения и успокоительной соответственно.

Согласно схеме рис. 3.1, *а*, амплитуда начального периодического тока якоря I_{nm}, равная также максимальному значению апериодического тока якоря I_{am}, определяется равенством

$$I_{nm} = I_{am} = E_m / x_d'', \tag{3.1}$$

где $x_d'' = x_{\sigma a} + \dfrac{1}{1/x_{ad} + 1/x_{\sigma f} + 1/x_{\sigma yd}}$ – сопротивление схемы рис. 3.1, *а* относительно зажимов цепи якоря, называемое **продольным сверхпереходным индуктивным сопротивлением** обмотки якоря.

Здесь $x_{\sigma a}, x_{\sigma f}, x_{\sigma yd}$ – соответственно индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря, возбуждения и успокоительной по продольной оси.

Так как $x_{\sigma a}$, $x_{\sigma f}$ и $x_{\sigma yd}$ малы, следовательно и x_d'' мало. Очевидно, что если бы обмотки не обладали рассеянием ($x_{\sigma a} = x_{\sigma f} = x_{\sigma yd} = 0$), то было бы $x_d''=0$ и $I_{nm} = \infty$.

Поэтому значение тока внезапного короткого замыкания ограничивается только сопротивлениями рассеяния. Можно также сказать, что поток якоря через воздушный зазор вытесняется на пути потоков рассеяния обмоток индуктора (рис. 3.2, *а*) и вследствие большого магнитного сопротивления этого пути поток якоря на единицу его тока сильно уменьшается.

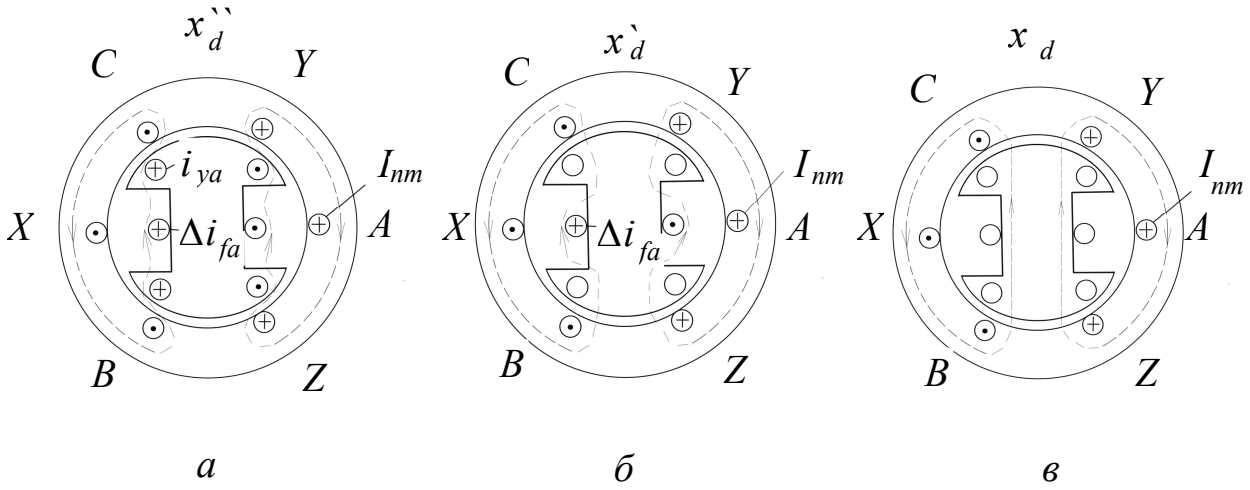


Рис. 3.2. Магнитные поля периодических токов обмотки якоря в начальный момент внезапного короткого замыкания (*а*), после затухания токов успокоительной обмотки или при ее отсутствии (*б*) и при установившемся коротком замыкании (*в*)

Если успокоительная обмотка у машины отсутствует, то это эквивалентно условию $x_{\sigma yd} = \infty$. При этом вместо схемы, показанной на рис. 3.1, *а*, получим схему, изображенную на рис. 3.1, *б*. Сопротивление этой схемы

$$x_d^{\prime} = x_{\sigma a} + \frac{1}{1/x_{ad} + 1/x_{\sigma f}}$$

называется **продольным переходным индуктивным сопротивлением** обмотки якоря. Очевидно, что $x_d^{\prime} > x_d^{\prime\prime}$. Это объясняется тем, что поток реакции якоря вытесняется только на пути потоков рассеяния обмотки возбуждения. Для этого случая также действительно равенство (3.1), если заменить в нем $x_d^{\prime\prime}$ на $x_d^{\prime}$.

Отсюда следует, что наличие успокоительной обмотки приводит к увеличению токов внезапного короткого замыкания якоря.

Для переходных процессов по поперечной оси действительны схемы, показанные на рис. 3.1, *в*, *г*. При наличии успокоительной обмотки по поперечной оси действует **поперечное сверхпереходное индуктивное сопротивление** обмотки якоря

$$x_q'' = x_{\sigma a} + \frac{1}{1/x_{aq} + 1/x_{\sigma yq}},$$

а при ее отсутствии – поперечное переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря $x_q' = x_{\sigma a} + x_{aq} = x_q$.

Здесь $x_{\sigma a}$, $x_{\sigma yq}$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря и успокоительной по поперечной оси.

3.5. СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

На практике встречаются случаи, когда мощные однофазные потребители нарушают симметричную нагрузку фаз синхронных генераторов либо несимметричная нагрузка возникает при однофазном и двухфазном коротком замыкании.

Общим методом исследования несимметричных режимов является метод симметричных составляющих, при котором несимметричная система токов раскладывается на симметричные составляющие и действие последних учитывается по отдельности.

Токи и сопротивления прямой последовательности

При симметричной нагрузке синхронного генератора существуют только токи прямой последовательности. Поэтому изложенное выше относится к работе синхронных машин с токами прямой последовательности, и введенные там синхронные сопротивления x_d и x_q являются сопротивлениями синхронной машины для токов прямой последовательности.

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

Пользуясь терминологией теории асинхронных машин, можно сказать, что скольжение s ротора синхронной машины относительно магнитного поля токов прямой последовательности статора (якоря) равно нулю. Поэтому сопротивления x_d и x_q идентичны индуктивным сопротивлениям асинхронной машины при идеальном холостом ходе ($s = s_1 = 0$).

Составляющими этого сопротивления являются индуктивное сопротивление рассеяния $x_{\sigma a}$ и индуктивное сопротивление от основной гармоники поля в воздушном зазоре (для синхронной машины x_{ad}, x_{aq}).

Токи и сопротивления обратной последовательности

Представим себе, что обмотка якоря (статор) синхронной машины питается напряжением обратной последовательности U_2.

Возникающие при этом токи обратной последовательности создают магнитное поле обратной последовательности, которое вращается по отношению к статору с синхронной скоростью в обратном направлении, а по отношению к ротору, вращающемуся с синхронной скоростью, в прямом направлении с удвоенной синхронной скоростью. Поэтому относительно этого поля скольжение ротора $s_2 = 2$ и в обмотках возбуждения, успокоительной и в массивных частях ротора индуктируются вторичные токи двойной частоты, которые вызывают соответствующие потери и нагрев ротора.

Обозначим сопротивления схем замещения СЭМП по продольной и поперечной осям при $s = 2$ буквами z_{d2} и z_{q2}.

При $z_{d2} \neq z_{q2}$ (машина явнополюсная) ток статора основной частоты представляет собой ток обратной последовательности I_2 и определяется при s=2

$$\dot{I}_2=(1/z_{d2}+1/z_{q2})\frac{\dot{U}_2}{2}=\frac{z_{d2}+z_{q2}}{2z_{d2}z_{q2}}\dot{U}_2. \qquad (3.2)$$

Сопротивление обратной последовательности синхронной машины z_2 равно отношению основных гармоник напряжения и тока обратной последовательности: $z_2=\dot{U}_2/\dot{I}_2$.

Согласно равенству (3.2)

$$z_2=r_2+j\,x_2=\frac{2z_{d2}z_{q2}}{z_{d2}+z_{q2}}. \qquad (3.3)$$

Обычно r_2 значительно меньше x_2 и $z_2 \approx x_2$, так как при s = 2 активные сопротивления схем замещения мало влияют на модули или значения сопротивлений z_{d2} и z_{q2}. При наличии успокоительных обмоток и контуров

$$z_{d2} \approx x_d''; \; z_{q2} \approx x_q'',$$

а при их отсутствии

$$z_{d2} \approx x_d'; \; z_{q2} \approx x_q.$$

Поэтому в первом случае в соответствии с равенством (3.3)

$$z_2 \approx x_2=2x_d''\,x_q''/(x_d''+x_q''), \qquad (3.4)$$

а во втором

$$z_2 \approx x_2=2x_d'\,x_q/(x_d'+x_q).$$

Сопротивление z_2 по формуле (3.4) соответствует случаю, когда напряжения статора синусоидальны, а токи несинусоидальны. Если последовательно с обмоткой статора включены значительные индуктивные сопротивления (например, сопротивления трансформаторов и линий передачи), то токи обратной последовательности синусоидальны, а напряжения обмотки статора несинусоидальны. В этом случае, как можно показать,

$$z_2=(z_{d2}+z_{q2})/2,$$

и при наличии успокоительных обмоток и контуров

$$z_2 \approx x_2 = (x_d'' + x_q'')/2, \qquad (3.5)$$

а при их отсутствии

$$z_2 \approx x_2 = (x_d' + x_q)/2.$$

Если машина имеет успокоительные обмотки и контуры, то можно принять $z_{d2} \approx z_{q2}$ и $x_d'' \approx x_q''$, и поэтому в данном случае согласно выражениям (3.4) и (3.5)

$$z_2 \approx x_2 \approx x_d'' \approx x_q''.$$

При этом высшие гармоники тока и напряжения отсутствуют.

Вследствие экранирующего влияния вторичных токов сопротивление x_2 значительно меньше x_d и x_q. Сопротивления z_2, x_2 и r_2 можно определить по измеренным значениям U_2, I_2 и потребляемой активной мощности P_2, если подключить синхронную машину к источнику с симметричной системой напряжений и вращать ротор против поля с синхронной скоростью. Во избежание перегрева ротора необходимо, чтобы $I_2 = (0{,}2 - 0{,}25) I_N$. Если машина не имеет успокоительных обмоток и контуров, то для получения более правильных результатов надо из осциллограмм выделить основные гармоники тока и напряжения.

Токи и сопротивления нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности обмотки статора I_0 создают в воздушном зазоре только пульсирующие поля гармоник $\nu = 3, 9, 15...$, а основная гармоника поля будет отсутствовать. Эти гармоники поля индуктируют в обмотках возбуждения и успокоительной токи, которые относительно невелики.

Сопротивление нулевой последовательности

$$z_0 = r_0 + j\, x_0.$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности x_0 ввиду отсутствия поля основной гармоники относительно невелико и определяется полями пазового и лобового рассеяния обмотки статора и ука-

занными выше гармониками поля в зазоре. Активное сопротивление нулевой последовательности r_0 в результате потерь, вызываемых гармониками поля в роторе, несколько больше активного сопротивления обмотки статора r_a, но этим пренебрегают и полагают $r_0 \approx r_a$. Вращающий момент, создаваемый токами I_0, практически равен нулю.

Следует отметить, что величина индуктивных сопротивлений и токов нулевой последовательности зависит от способа соединения обмотки якоря. При соединении «звезда с изолированной нейтралью», которое принято в отечественных генераторах, $x_0 = \infty$. При соединении «звезда с заземленной нейтралью» $x_0 \approx x_{\sigma a}$.

Сопротивления z_0, x_0 и r_0 можно определить опытным путем, если при вращении машины с синхронной скоростью питать последовательно включенные фазы обмотки статора током I_0.

Значения параметров синхронных электромеханических преобразователей в относительных единицах приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметр	Турбогенераторы	Явнополюсные генераторы и двигатели		Синхронные компенсаторы
		С успокоительной обмоткой	Без успокоительной обмотки	
Продольное индуктивное сопротивление реакции якоря x_{ad}	1,1 – 2,5	0,5 – 1,5	0,5 – 1,5	1,4 – 2,3
Поперечное индуктивное сопротивление реакции якоря x_{aq}	1,1 – 2,5	0,3 – 0,9	0,3 – 0,9	0,8 – 1,3
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря $x_{\sigma a}$	0,08 – 0,25	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	0,1 – 0,2
Активное сопротивление обмотки якоря r_a	0,002 – 0,008	0,002 – 0,02	0,002 – 0,2	0,002 – 0,2

Окончание табл. 3.1

Параметр	Турбогенераторы	Явнополюсные генераторы и двигатели		Синхронные компенсаторы
		С успокоительной обмоткой	Без успокоительной обмотки	
Продольное синхронное индуктивное сопротивление x_d	1,2 – 2,75	0,6 – 1,8	0,6 – 1,8	1,5 – 2,5
Поперечное синхронное индуктивное сопротивление x_q	1,2 – 2,75	0,4 – 1,2	0,4 – 1,2	0,9 – 1,5
Продольное переходное индуктивное сопротивление $x_d^{!}$	0,2 – 0,4	0,2 – 0,5	0,2 – 0,5	0,3 – 0,6
Продольное сверхпереходное индуктивное сопротивление $x_d^{!!}$	0,12 – 0,3	0,15 – 0,35	–	0,15 – 0,35
Поперечное сверхпереходное индуктивное сопротивление $x_q^{!!}$	0,12 – 0,3	0,15 – 0,35	–	0,15 – 0,35
Индуктивное сопротивление обратной последовательности x_2	0,12 – 0,3	0,15 – 0,35	0,3 – 0,8	0,15 – 0,35
Активное сопротивление обратной последовательности r_2	0,02 – 0,05	0,015 – 0,025	0,02 – 0,05	0,02 – 0,07
Индуктивное сопротивление нулевой последовательности x_0	0,02 – 0,1	0,02 – 0,2	0,04 – 0,025	0,02 – 0,02
Активное сопротивление нулевой последовательности r_0	0,002 – 0,01	0,002 – 0,02	0,002 – 0,02	0,002 – 0,02

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К ГЛАВЕ 3

1. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивных сопротивлений x_d и x_q.

2. Каково соотношение между параметрами x_d и x_q в явно- и неявнополюсных синхронных машинах и от чего это зависит?
3. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивных сопротивлений $x_d^{!}$, $x_d^{!!}$, $x_q^{!}$, $x_q^{!!}$.
4. Каково соотношение между параметрами x_d, $x_d^{!}$, $x_d^{!!}$ и от чего это зависит?
5. Каково соотношение между параметрами x_q, $x_q^{!}$, $x_q^{!!}$ и от чего это зависит?
6. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивного сопротивления x_2.
7. Как влияет на величину x_2 наличие или отсутствие в синхронном генераторе демпферной (успокоительной) обмотки?
8. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивного сопротивления x_0. Каково соотношение между x_0 и $x_{1\sigma}$?
9. Как опытным путем определить x_0?

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Рабочие свойства синхронного генератора оценивают по его характеристикам, важнейшими из которых являются характеристики холостого хода, трехфазного короткого замыкания, индукционная нагрузочная, внешние и регулировочные.

4.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

Характеристика холостого хода (ХХХ) представляет собой зависимость ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря, от тока (или МДС) возбуждения $E_{10}=f(I_f)$ при неизменной частоте вращения ротора $n = n_1 = \text{const}$ (см. рис. 4.1).

Эта характеристика позволяет оценить насыщение магнитной цепи и построить другие характеристики машины.

Характеристика холостого хода может быть получена расчетным или опытным путем. Расчетным путем характеристика холостого хода может быть получена из расчета магнитной цепи синхронной машины.

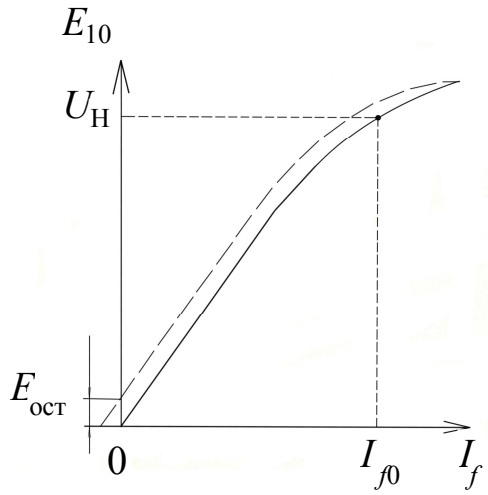


Рис. 4.1. Опытная (штриховая линия) и расчетная (сплошная линия) характеристики холостого хода

При токе возбуждения, равном нулю, в обмотке якоря индуцируется остаточная ЭДС $E_{ост}$, вызванная остаточной индукцией и составляющая 2 ÷ 3 % от номинального напряжения генератора.

На основании сравнения характеристик холостого хода различных синхронных генераторов было установлено, что эти характеристики мало отличаются друг от друга, если построение их производить в относительных единицах. При переводе ЭДС в относительные единицы ее текущее значение в вольтах делят на номинальное напряжение якоря $E_{10}^* = E_{10}/U_н$.

Относительное значение тока возбуждения находят по отношению текущего значения тока возбуждения в амперах к току, принятому за базовый $I_f^* = I_f/I_{f0}$. За базовый ток возбуждения I_{f0} принимается ток, обеспечивающий при холостом ходе номинальное напряжение на выходных зажимах генератора.

Полученные таким образом характеристики называются нормальными характеристиками холостого хода. Данные этих характеристик для явнополюсных и неявнополюсных генераторов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

I_f^*	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_{ЯСМ}$	0	0,53	1,0	1,23	1,3	-	-	-
$E_{НСМ}$	0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,45	1,51

4.2. ХАРАКТЕРИСТИКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Характеристика трехфазного короткого замыкания представляет собой зависимость тока обмотки якоря при коротком замыкании от тока возбуждения, т.е. $I_{1k}=f(I_f)$ при неизменной частоте вращения ротора $n = n_1 = \text{const}$.

Из-за относительно малого активного сопротивления r_1 обмотка якоря синхронной машины обладает практически только индуктивным сопротивлением. Следовательно, ток якоря при симметричном трехфазном коротком замыкании отстает от ЭДС на 90° и является чисто продольным, т.е. $\dot{I}_{1k} = \dot{I}_{1d}$. Этот ток создает в машине продольную размагничивающую реакцию якоря. При коротком замыкании $\dot{U}_1=0$, т.е. при $r_1 = 0$ уравнение (2.9) преобразуется к виду

$$\dot{E}_{10} = j\,\dot{I}_{1k}\,x_d\,. \qquad (4.1)$$

Поскольку при коротком замыкании машина ненасыщена, зависимости $E_{10}=f(I_f)$ и $E_{10}=f(I_{1k})$ – линейные и, следовательно, зависимость $I_{1k}=f(I_f)$ также носит линейный характер. Характеристика трехфазного короткого замыкания синхронного генератора приведена на рис. 4.2 (прямая 1).

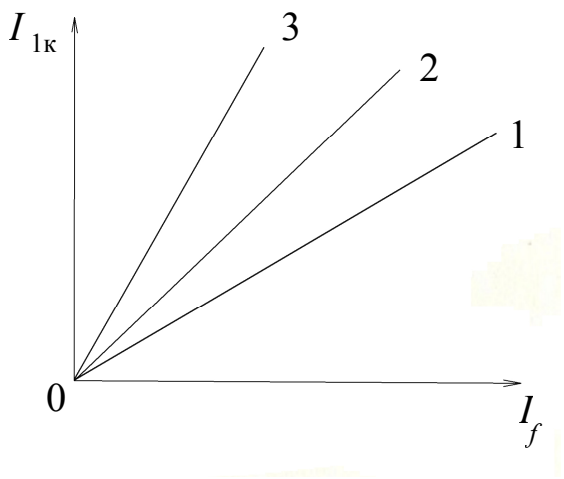


Рис. 4.2. Характеристики короткого замыкания синхронного генератора:
1 – трехфазного; 2 – двухфазного; 3 – однофазного

Следует отметить, что кроме симметричного трехфазного короткого замыкания возможны и несимметричные – двухфазное и однофазное (рис. 4.3).

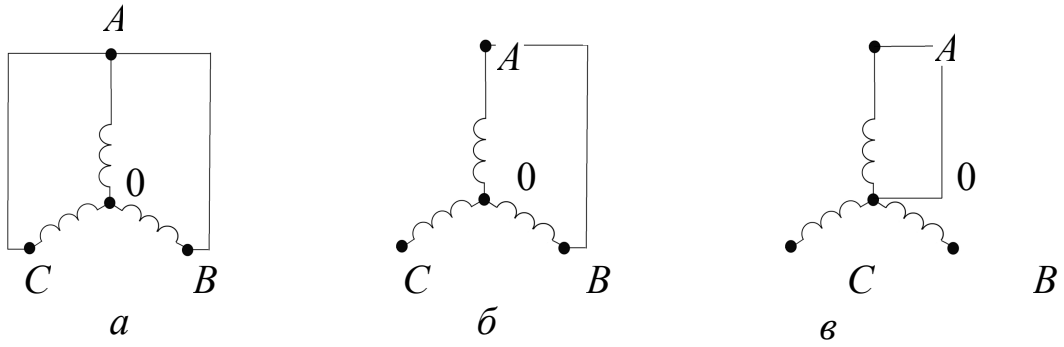


Рис. 4.3. Схемы короткого замыкания обмотки якоря:
а – трехфазного; *б* – двухфазного; *в* – однофазного

В случае двухфазного короткого замыкания ток $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_{1k}$, а ток $\dot{I}_C = 0$. Обмотка якоря создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на прямо- и обратновращающиеся поля с половинной амплитудой. При этом прямое поле неподвижно относительно ротора и создает размагничивающую реакцию якоря, а обратное поле вращается относительно ротора с двойной синхронной скоростью. Поскольку при неизменном токе I_{1k} МДС двухфазной обмот-

ки существенно меньше МДС трехфазной обмотки, размагничивание в этом случае будет слабее, чем при трехфазном замыкании. Следовательно, магнитный поток в машине и ток короткого замыкания будут больше при неизменном токе возбуждения.

В случае однофазного короткого замыкания МДС обмотки якоря и размагничивание еще меньше, чем при двухфазном коротком замыкании, что, в свою очередь, обусловливает еще больший ток I_{1k}. Так как при всех типах короткого замыкания машина размагничивается, все характеристики короткого замыкания имеют линейный характер (см. рис. 4.2).

По характеристикам трехфазного короткого замыкания и холостого хода, полученным опытным путем, можно определить ненасыщенное значение индуктивного сопротивления x_d и отношение короткого замыкания (ОКЗ). Согласно выражению (4.1)

$$x_d = E_{10} / I_{1k}. \qquad (4.2)$$

Для расчета x_d строим на одном графике характеристику холостого хода 1 и характеристику трехфазного короткого замыкания 2, как показано на рис. 4.4. Затем, проведя касательную из начала координат к характеристике холостого хода 1, получаем спрямленную характеристику холостого хода 3. Для ЭДС холостого хода, обычно соответствующей номинальному напряжению U_{1N} (отрезку *AC*), по спрямленной характеристике холостого хода 3 находим соответствующий ей ток возбуждения (отрезок *OC*). Для этого тока возбуждения по характеристике трехфазного короткого замыкания 2 определяем соответствующий ток I_{1k} (отрезок *EC*). Далее, подставив полученные значения E_{10} и I_{1k} в выражение (4.2), находим ненасыщенное значение x_d.

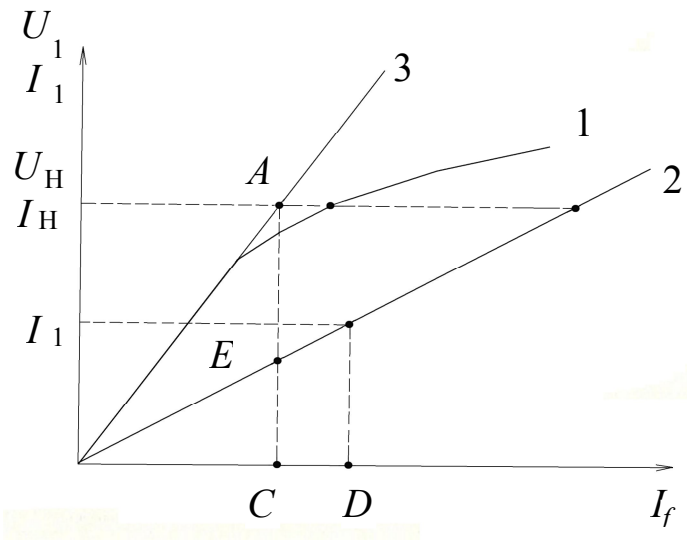


Рис. 4.4. Графические построения для определения индуктивного сопротивления x_d:

1 – характеристика холостого хода; 2 – характеристика трехфазного короткого замыкания; 3 – спрямленная характеристика холостого хода

Отношением короткого замыкания (ОКЗ) называется отношение тока короткого замыкания I_{1k}, соответствующего току возбуждения, при котором в режиме холостого хода ЭДС E_{10} равна номинальному напряжению U_{1N}, к номинальному току якоря:

$$\text{ОКЗ} = I_{1k} / I_{1H} = I_k^*. \qquad (4.3)$$

Ток I_{1k} определяют по рис. 4.4 следующим образом. Сначала по спрямленной характеристике холостого хода 3 находят ток возбуждения (отрезок *OC*), при котором $E_{10} = U_{1H}$ (отрезок *AC*). Затем по характеристике короткого замыкания 2 определяют соответствующий этому току возбуждения ток короткого замыкания I_{1k} (отрезок *EC*). Подставив полученное значение тока I_{1k} в уравнение (4.3), находят значение ОКЗ. Поскольку $x_d = AC/EC$, а ОКЗ = *EC/AC*, можно сделать вывод, что отношение короткого замыкания обратно пропорционально значению x_d.

В гидрогенераторах ОКЗ = 1 ÷ 1,4, а в турбогенераторах ОКЗ = 0,5 ÷ 0,7.

4.3. ИНДУКЦИОННАЯ НАГРУЗОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Индукционная нагрузочная характеристика представляет собой зависимость $U_1=f(I_f)$ при $I_1=\text{const}$, $n = n_1=\text{const}$ и $\cos\varphi=0$.

Эта характеристика показывает, как изменяется напряжение генератора U_1 с изменением тока возбуждения I_f при условии постоянства тока I_1 и индуктивной нагрузки (при $\cos\varphi = 0$). Обычно индукционную нагрузочную характеристику снимают при $I_1 = I_{1N}$, используя в качестве нагрузки реактор или катушку с переменной индуктивностью. Так как эти индуктивные элементы обладают определенным активным сопротивлением, они не могут обеспечить выполнение условия $\cos\varphi = 0$. Опыт показывает, что эта характеристика близка к истинной, если $\cos\varphi \leq 0{,}2$.

Индукционная нагрузочная характеристика представлена на рис. 4.5 (кривая 2). Точку D этой характеристики нельзя получить экспериментально, так как при $U_1= 0$ ток $I_1= 0$. Однако ее можно найти по характеристике трехфазного короткого замыкания. Для этого по оси ординат (см. рис. 4.4) необходимо отложить ток I_1, при котором снималась нагрузочная характеристика. Соответствующий току I_1, ток возбуждения (OD) равен току I_f в точке D индукционной нагрузочной характеристики.

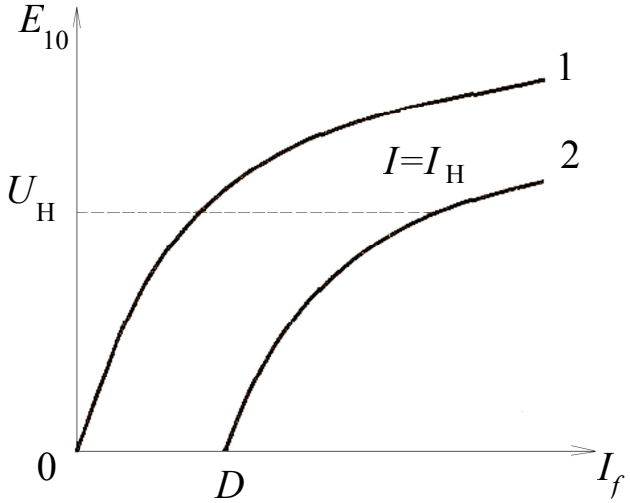


Рис. 4.5. Индукционная нагрузочная характеристика (2) и характеристика холостого хода (1) синхронного генератора

На рис. 4.5 изображена также характеристика холостого хода (кривая 1). Так как ток I_1 при $\cos\varphi \approx 0$ является практически реактивным (т.е. $I_1 = I_{1d}$), реакция якоря в этом случае будет продольной размагничивающей. Вследствие этого, а также из-за падения напряжения в цепи якоря нагрузочная характеристика проходит ниже характеристики холостого хода.

4.4. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Внешние характеристики представляют собой зависимости напряжения генератора от тока якоря $U_1 = f(I_1)$ при $I_f = \text{const}$, $n = n_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$. Это основные эксплуатационные характеристики генератора, показывающие, как изменяется напряжение U_1 на выходе генератора с ростом тока нагрузки I_1, если ток возбуждения и характер нагрузки остаются неизменными.

Внешние характеристики могут строиться (сниматься) как при увеличении нагрузки, так и при ее уменьшении (рис. 4.6). В первом случае все характеристики выходят из точки $U_1 = U_{1H}$, I_1=0, а во втором – из точки $U_1 = U_{1H}$, $I_1 = I_{1H}$. Из рисунка видно, что сильное влияние на вид внешних характеристик оказывает характер нагрузки.

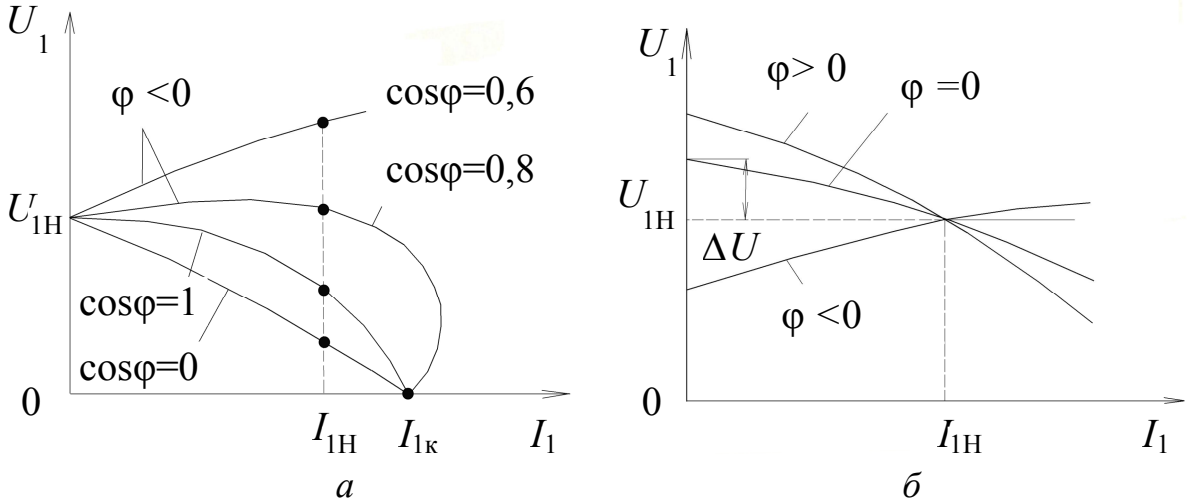


Рис. 4.6. Внешние характеристики синхронного генератора:
а – при увеличении нагрузки; *б* – при уменьшении нагрузки

При индуктивной нагрузке ($\varphi = 90°$, $\cos\varphi = 0$) реакция якоря является продольной размагничивающей, и с ростом тока якоря I_1 напряжение генератора резко уменьшается. Без учета активного сопротивления обмотки якоря r_1, такая внешняя характеристика практически линейна.

При активной нагрузке ($\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$) реакция якоря – продольно-поперечная размагничивающая, поэтому с ростом тока I_1 напряжение генератора U_1 также уменьшается. Однако поскольку продольная составляющая тока якоря I_{1d} в этом случае меньше, чем в предыдущем, уменьшение напряжения генератора также будет меньше.

При активно-емкостной нагрузке ($\varphi < 0$) реакция якоря – продольно-поперечная намагничивающая, и с ростом тока I_1 напряжение сначала увеличивается, причем его максимальное значение ограничено насыщением магнитной цепи машины. При резонансе напряжений (когда индуктивное сопротивление обмотки якоря равно емкостному сопротивлению нагрузки) ток якоря достигает максимального значения.

При дальнейшем уменьшении емкостного сопротивления нагрузки реакция якоря становится размагничивающей ($x_1 > x_н = x_C$), вследствие чего напряжение и ток I_1 начинают резко уменьшаться.

При коротком замыкании все эти внешние характеристики приходят в одну точку ($U_1 = 0$, $I_1 = I_{1k}$), как показано на рис. 4.6, *а*.

Если нагрузка является смешанной, например активно-индуктивной, то внешние характеристики проходят между соответствующими крайними ее вариантами ($\varphi = 0$ и $\varphi = 90°$).

Семейство внешних характеристик, показанное на рис. 4.6, *б*, снимается при уменьшении нагрузки – тока I_1. Эти зависимости имеют характер, обратный характеру зависимостей, показанных на рис. 4.6, *а*, т.е. напряжение U_1 увеличивается при уменьшении активной и индуктивной нагрузок и уменьшается при уменьшении емкост-

ной нагрузки. По этим характеристикам можно определить изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U^* = \Delta U / U_{1H} = (E_{10} - U_{1H}) / U_{1H} .$$

Для определения номинального изменения напряжения внешняя характеристика должна сниматься при $\cos\varphi = \cos\varphi_H$.

4.5. РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Регулировочные характеристики представляют собой зависимости $I_f = f(I_1)$ при U_1 = const, $n = n_1$ = const и $\cos\varphi$ = const. Эти характеристики определяют закон изменения тока возбуждения синхронного генератора, который необходим для поддержания напряжения на выводах машины постоянным при изменяющемся токе нагрузки и неизменном ее характере ($\cos\varphi$ = const).

На рис. 4.7 показаны регулировочные характеристики для трех значений $\cos\varphi$. При индуктивном (φ = 90°) и активном (φ = 0) характере нагрузки в машине существует продольная размагничивающая реакция якоря. Чтобы сохранить напряжение U_1 постоянным с ростом нагрузки (тока якоря I_1), необходимо компенсировать это размагничивающее действие увеличением тока возбуждения.

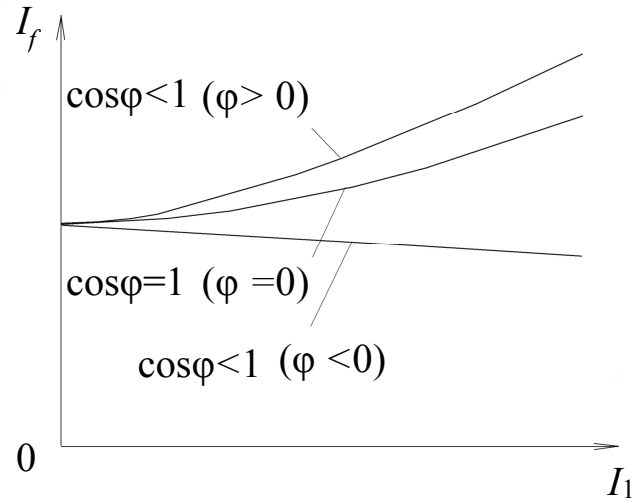


Рис. 4.7. Регулировочные характеристики синхронного генератора для разных значений $\cos\varphi$

Зависимости $I_f = f(I_1)$ при $\cos\varphi = 0$ ($\varphi = 90°$) и $\cos\varphi = 1$($\varphi = 0$) возрастающие. При емкостной нагрузке ($\cos\varphi = 0$, $\varphi = -90°$) реакция якоря является продольной намагничивающей, и для сохранения напряжения U_1 неизменным ток возбуждения необходимо уменьшать. Регулировочная характеристика в данном случае имеет падающий характер.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К ГЛАВЕ 4

1. Какой вид имеют характеристики короткого замыкания и почему зависимости $I_{1k}=f(I_f)$ являются линейными?
2. Чем отличаются внешние характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки?
3. Поясните взаимное расположение внешних характеристик синхронного генератора при различном характере нагрузки.
4. Чем отличаются регулировочные характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки?
5. Поясните взаимное расположение регулировочных характеристик синхронного генератора при различном характере нагрузки.
6. Почему индукционная нагрузочная характеристика синхронного генератора проходит ниже характеристики холостого хода?
7. Как опытным путем определить индукционную нагрузочную характеристику?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Целью учебных лабораторных испытаний является более глубокое изучение студентами вопросов теории электромеханического преобразования энергии, ознакомление с конструкцией электрических машин и их основными характеристиками, приобретение практических навыков экспериментальных исследований и обработки опытных данных.

Лабораторные работы рассчитаны на 4 часа аудиторных занятий по экспериментальному исследованию электрических машин и на 2-4 часа самостоятельной работы студентов по обработке и анализу полученных опытных данных.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Перед началом работ в лаборатории все студенты обязаны ознакомиться с правилами техники безопасности при работе с электротехническими установками и расписаться в соответствующем журнале, хранящемся у заведующего лабораторией.

При выполнении лабораторных работ по электрическим машинам следует помнить, что испытания проводятся при напряжениях до 250 В, а в некоторых случаях и выше. При неблагоприятных условиях опасные поражения электрическим током могут произойти даже при напряжении ниже 50 В, поэтому во время работы студенты должны быть внимательны, дисциплинированны и строго соблюдать следующие требования техники безопасности.

1. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, все члены студенческой бригады должны обстоятельно ознакомиться с оборудованием лабораторной установки и устройством отдельных ее частей. Студенты обязаны знать номинальные данные исследуемых электрических машин и не допускать их превышения в ходе работы, за исключением случаев, оговоренных особо.

2. К сборке электрической схемы необходимо приступать только

после разрешения преподавателя, убедившись, что ни одна из частей установки не находится под напряжением.

3. При обнаружении на лабораторном стенде неисправностей следует обратиться к дежурному лаборанту. Работа на неисправном стенде категорически запрещается.

4. Включение установки под напряжение разрешается только после проверки схемы и всей установки преподавателем.

5. В процессе выполнения лабораторной работы категорически запрещается прикасаться к находящимся под напряжением оголенным токоведущим участкам схемы и вращающимся частям электрических машин.

6. Все необходимые переключения в схемах разрешается производить лишь при полном отключении напряжения.

7.Студентам запрещается делать какие-либо переключения на главном распределительном щите и заходить за лабораторные стенды.

8. Если в ходе работы требуется сделать перерыв (для выполнения контрольных расчетов, консультации с преподавателем, на отдых и т.д.), то напряжение со стенда должно быть полностью снято.

9. Категорически запрещается оставлять без присмотра даже на короткое время лабораторную установку, находящуюся под напряжением.

10. По окончании работы в первую очередь со стенда должно быть снято напряжение. После утверждения преподавателем полученных экспериментальных данных схема разбирается, и рабочее место приводится в порядок.

Нарушение правил техники безопасности и поведения в лаборатории рассматривается как серьезное нарушение дисциплины.

ТРЕБОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Перед каждой лабораторной работой студент должен самостоятельно, используя рекомендованную литературу и настоящее руководство, подготовиться и знать следующие основные вопросы:

– устройство и принцип действия исследуемой электрической машины;

– вид ее основных характеристик;

– назначение всех элементов испытуемой установки, их взаимодействие и обозначение на электрической схеме.

Перед началом занятий преподаватель проверяет устно, письменно или при помощи контролирующих устройств знания студентов и их готовность к выполнению предстоящей работы.

К каждому следующему занятию студент представляет отчет о предыдущей работе и защищает его.

Студент, не представивший отчет о предыдущей работе, к лабораторным занятиям не допускается.

Отчет выполняется каждым студентом индивидуально на стандартных листах формата А4 (287 мм × 210 мм).

Отчет должен содержать:

1) титульный лист с названием работы, фамилией студента, указанием его факультета, курса и группы, фамилией проверяющего преподавателя и т.д.;

2) программу работы;

3) номинальные данные исследуемых машин;

4) электрическую схему (схемы) установки, выполненную в соответствии с действующими стандартами;

5) таблицы экспериментальных и расчетных данных. Каждая таблица должна иметь название и порядковый номер, в таблице обязательно должны быть указаны единицы измерения приведенных величин;

6) пример расчета данных, необходимых для построения графиков и диаграмм;

7) рисунки опытных и расчетных характеристик, выполненные на листах формата А4 с помощью графических редакторов или вручную. Рисунки должны сопровождаться названием, порядковым номером и необходимыми поясняющими надписями. На графиках должны быть четко проставлены все экспериментальные точки, имеющиеся в соответствующей таблице. Характеристики строятся в виде плавных кривых таким образом, чтобы число «выпавших» экспериментальных точек по обе стороны кривой было примерно равным;

8) выводы по проделанной работе. В выводах должно быть в краткой форме сделано заключение по каждому из проделанных опытов и по каждой опытной и расчетной характеристике.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы – овладение практическими навыками экспериментального определения характеристик холостого хода, короткого замыкания, внешней, нагрузочной, регулировочной характеристик синхронного генератора и оценки потребительских свойств этого генератора.

Программа работы

1. Изучить устройство и принцип действия синхронного генератора.
2. Определить характеристику холостого хода.
3. Определить характеристики трех-, двух- и однофазного короткого замыкания.
4. Определить нагрузочную характеристику.
5. Определить внешние характеристики.
6. Определить регулировочные характеристики.

Паспортные данные

Синхронная машина	
Номинальная активная мощность, Вт	100
Номинальное напряжение, В	230
Схема соединения обмоток статора	Y
$\cos\varphi_N$	1
Номинальный ток статора, А	0,26
Ток возбуждения холостого хода, А	1,6
Номинальное напряжение возбуждения, В	22
Номинальный ток возбуждения, А	1,85
Направление вращения	любое
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Сопротивление обмотки возбуждения, Ом	12,2

Машина постоянного тока (тип 101.2)	
Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальная частота вращения, мин$^{-1}$	1500
Возбуждение	независимое /параллельное/ последовательное
Номинальное напряжение возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
КПД, %	57,2
Направление вращения	реверсивное
Режим работы	двигательный/ генераторный

Номинальные величины и относительные единицы

Нагрузочный режим, для которого электрическая машина предназначена и при котором она должна нормально работать в течение всего срока службы, называется номинальным. Величины, которые характеризуют этот режим, считаются номинальными. К ним относятся: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальный ток и другие величины. Основные номинальные величины указываются в паспортной табличке, прикрепляемой к машине. Для двигателей номинальная мощность – это полезная механическая мощность на его валу, а для генератора – полная электрическая мощность, отдаваемая в нагрузку. Для трехфазных установок в паспортных табличках приводятся линейные величины напряжений и токов, обозначения номинальных величин снабжаются индексом Н, например, P_H, S_H, U_H, I_H, $\cos\varphi_H$ и т.д.

При сопоставлении СМ различного конструктивного исполнения, напряжения, мощности, а также многие расчеты и построения удобно вести в относительных единицах. В этой системе единиц каждая величина характеризуется ее отношением к соответствующей базисной величине. За базисный ток якоря принимается его номинальный фазный ток I_{1H}, за базисную величину напряжения обмотки якоря – номинальное фазное напряжение U_{1H}. За базисную мощность принима-

ют полную мощность машины при номинальном нагрузочном режиме $S_б = S_Н = mU_{1Н}I_{1Н}$, а за базисный момент – момент, определяемый по базисной мощности и синхронной частоте вращения $M_б = S_б / 2\pi n_1$.

За базисное сопротивление цепи принимают величину $Z_б = U_{1Н} / I_{1Н}$, за базисный ток возбуждения – такую его величину I_{f0}, при которой напряжение холостого хода (при номинальной частоте вращения) равно номинальному.

Относительные величины помечают, например, звездочкой:

$$I_1^* = I_1 / I_{1Н};\ U_1^* = U_1 / U_{1Н};\ I_f^* = I_f / I_{f0};\ X^* = X / Z_б;\ P^* = P / S_б;$$

$$Q^* = Q / S_б;\ M^* = M / M_б \ldots$$

При составлении отчетов по результатам исследований синхронных машин все расчеты и построения предлагается выполнять в относительных единицах (о.е.).

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОСТОГО ХОДА $U_{10} = f(I_f)$ при $I_1 = 0, n_Н = const$ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

1.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

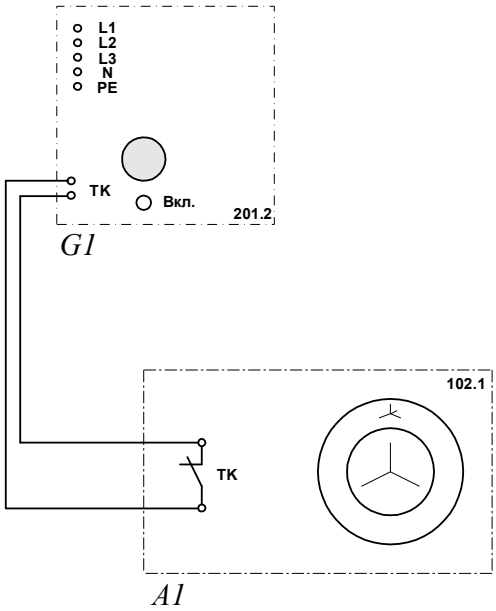


Рис. 1.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

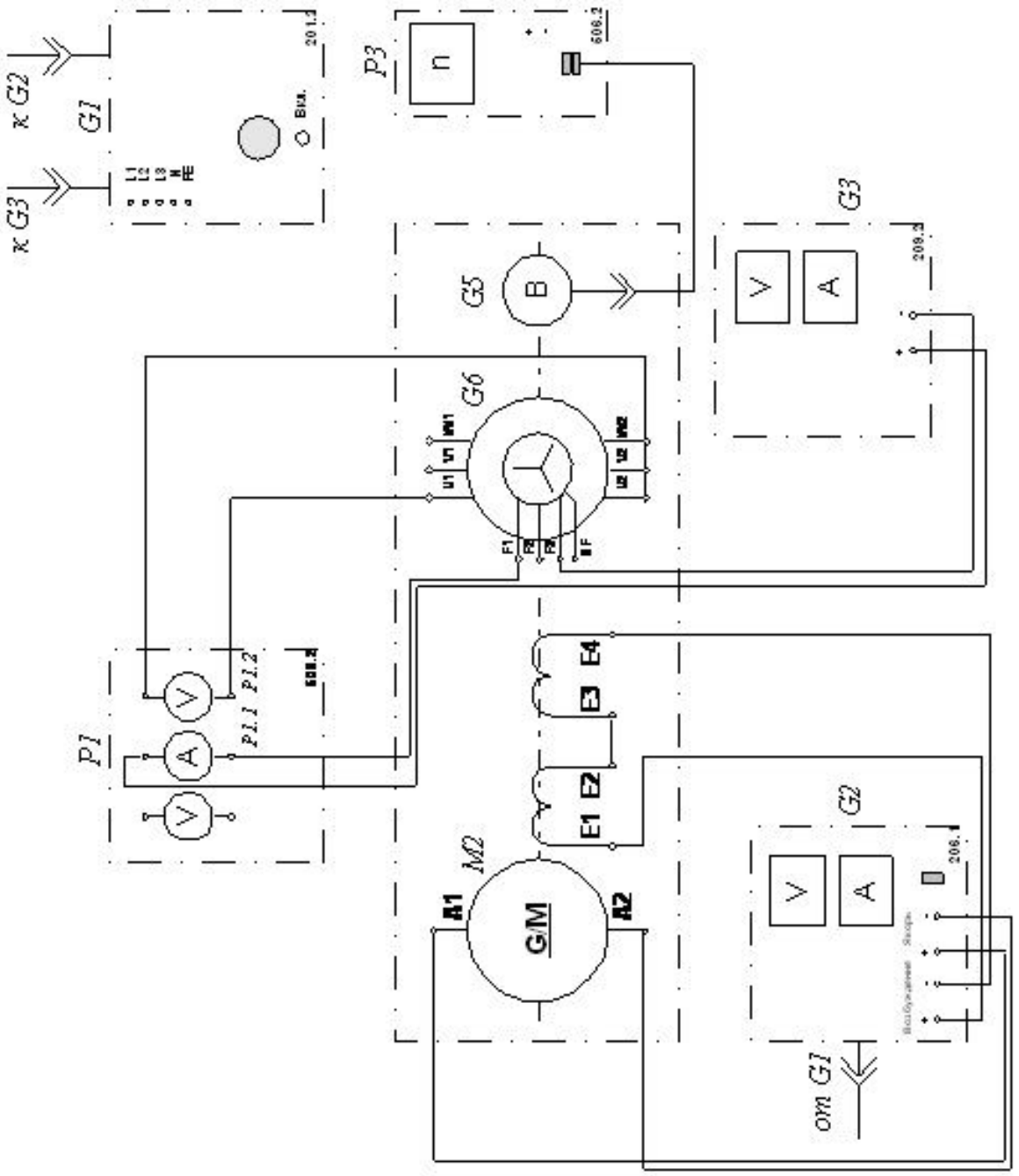


Рис. 1.2. Электрическая схема соединений для опыта холостого хода

1.1.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
*G*1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
*G*2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
*G*3	Возбудитель синхронной машины	209.2	– 0…40 В / 3,5 А
*G*5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
*G*6	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин$^{-1}$
*M*2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
*P*1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 МОм
*P*3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 мин$^{-1}$

1.1.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G*1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока *G*2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока *M*2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель *G*3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока *G*6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений *G*5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P*3 электромашинного агрегата.

С помощью мультиметров блока *P*1 контролируются ток возбуждения I_f и фазное напряжение U_{10} испытуемого генератора *G*6.

1.1.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

Соедините гнезда защитного заземления «⏚» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» трехфазного источника питания *G*1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режима работы источника *G*2 и возбудителя *G*3 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника *G*2 и возбудителя *G*3 поверните против часовой стрелки до упора.

Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 (генератор *G*6) до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя *G*3.

Вращая регулировочную рукоятку возбудителя *G*3, установите такой ток возбуждения I_f генератора *G*6, чтобы напряжение U_{10} синхронного генератора G6 было равным 170 В. Занесите показания амперметра *P*1.1 (ток I_f) и вольтметра *P*1.2 (напряжение холостого хода U_{10}) в табл. 1.2. Далее, уменьшая ток возбуждения, снимите еще 5-6 точек характеристики.

Одну точку характеристики снимите при номинальном напряжении, последнюю точку – при выключенном токе возбуждения. Ток возбуждения регулируйте плавно и только в одном направлении**.**

Таблица 1.2

I_f, А										
U_{10}, А										
I_f^*, о.е.										
U_{10}^*, о.е.										

По завершении эксперимента первоначально у возбудителя *G*3, а затем и у источника *G*2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник *G*1. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ $I_1 = f(I_f)$ ПРИ $U_1 = 0$ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

1.2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

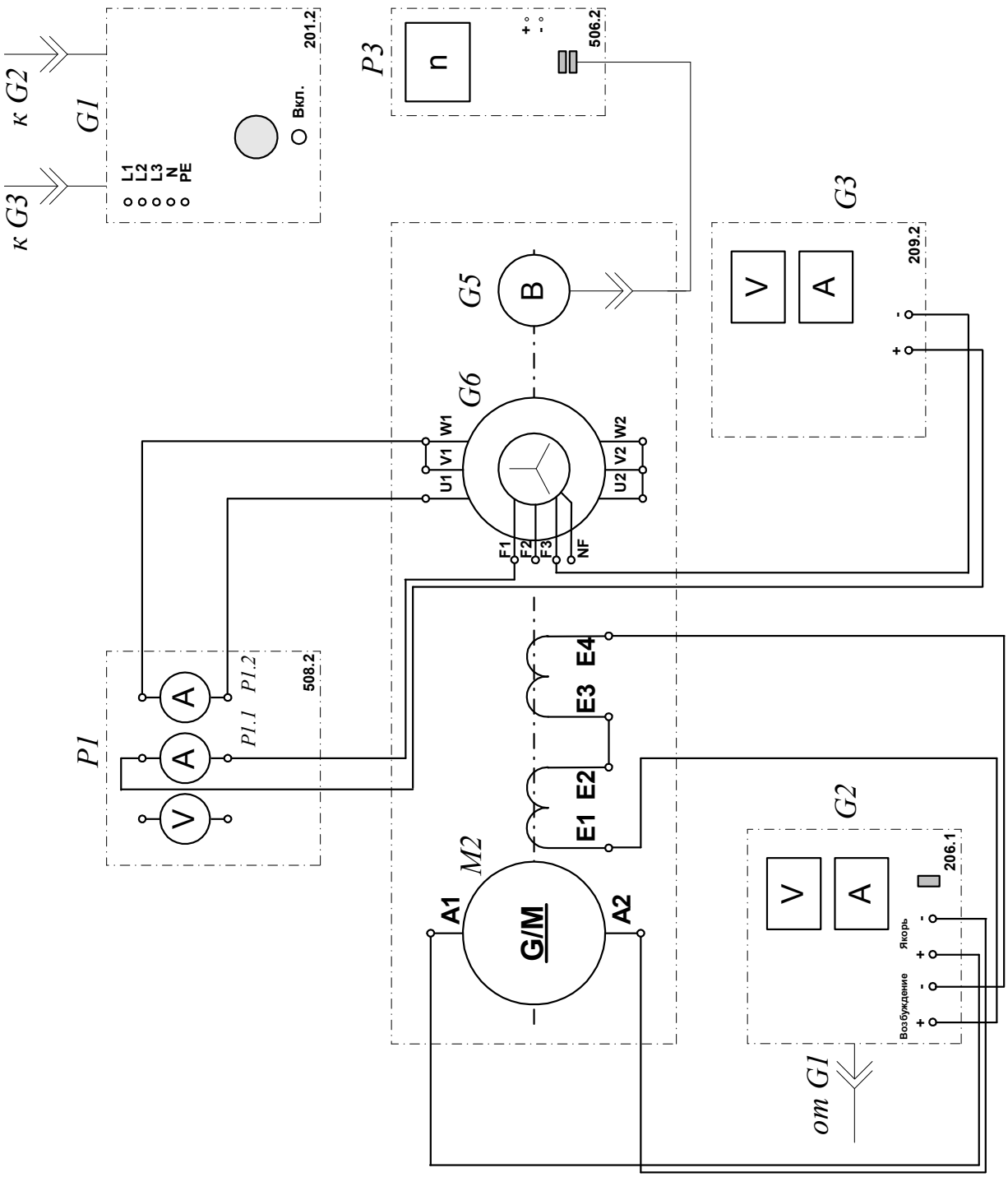


Рис. 1.3. Электрическая схема соединений для опыта трехфазного короткого замыкания

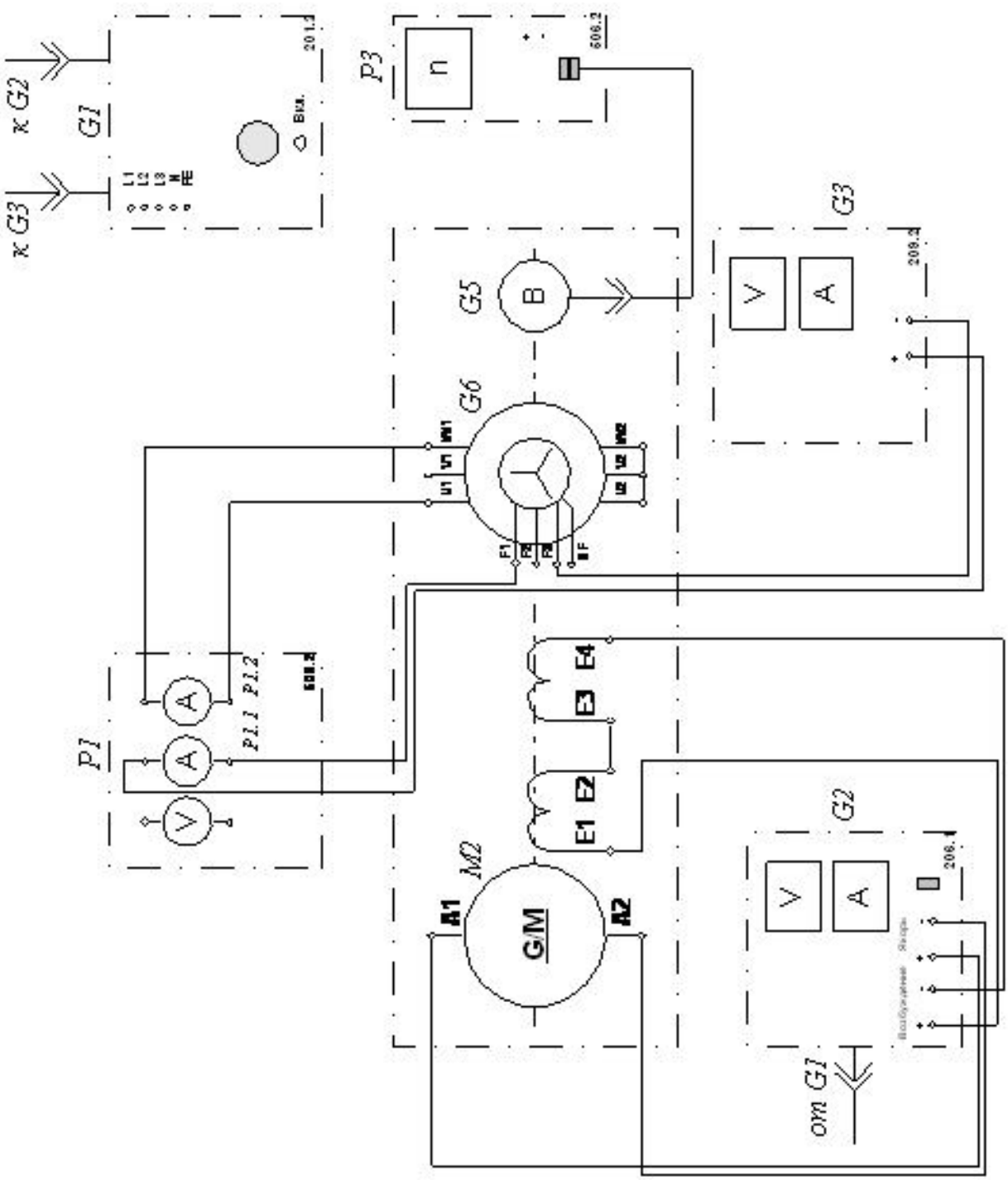


Рис. 1.4. Электрическая схема соединений
для опыта двухфазного короткого замыкания

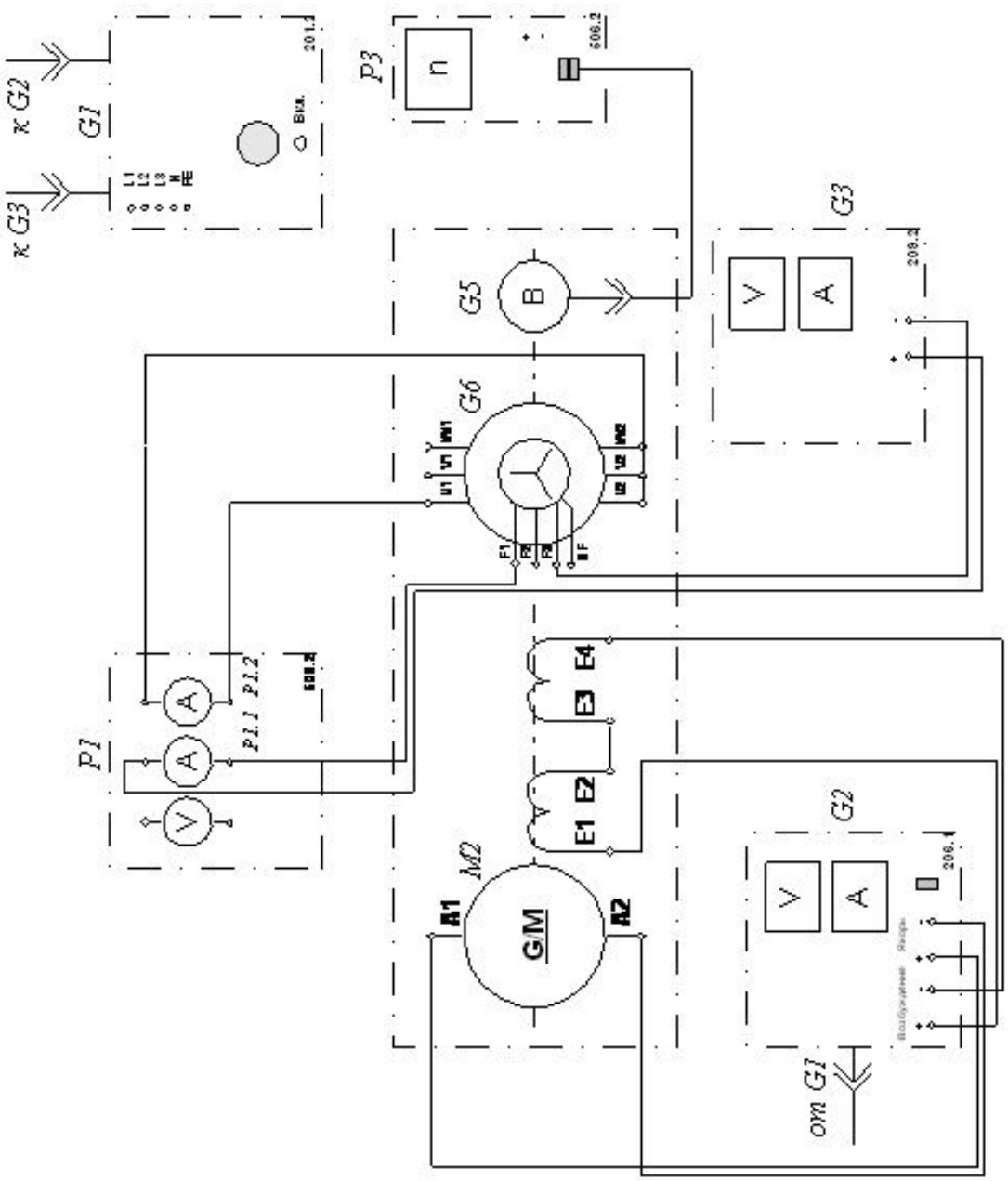


Рис. 1.5. Электрическая схема соединений
для опыта однофазного короткого замыкания

1.2.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Перечень аппаратуры приводится в п. 1.1.2, табл. 1.1.

1.2.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G*1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока *G*2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируе-

мым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока *M*2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель *G*3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений *G*5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P*3 электромашинного агрегата.

С помощью мультиметров блока *P*1 контролируются ток возбуждения I_f и ток I_1 обмотки якоря испытуемого синхронного генератора *G*6.

1.2.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений рис. 1.3 (трехфазное короткое замыкание).

Переключатели режима работы источника *G*2 и возбудителя *G*3 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника *G*2 и возбудителя *G*3 поверните против часовой стрелки до упора.

Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 (генератор *G*6) до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя *G*3.

Вращая регулировочную рукоятку возбудителя *G*3, установите такой ток возбуждения I_f генератора *G*6, чтобы ток якоря I_1 был равным 0,3А. Занесите показания амперметров *P*1.1 (ток I_f) и *P*1.2 (ток I_1 обмотки якоря синхронного генератора *G*6) в табл. 1.3. Далее, уменьшая ток возбуждения I_f генератора *G*6, снимите еще 4-5 точек характеристики.

Одну точку характеристики снимите при номинальном токе якоря, последнюю точку – при выключенном токе возбуждения. Ток возбуждения регулируйте плавно и только в одном направлении**.**

Таблица 1.3

Трехфазное короткое замыкание

I_f, А										
I_1, А										
I_f^*, о.е.										
I_1^*, о.е.										

По завершении эксперимента первоначально у возбудителя *G*3, а затем и у источника *G*2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник *G*1. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений рис. 1.4 (двухфазное короткое замыкание).

Переключатели режима работы источника *G*2 и возбудителя *G*3 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника *G*2 и возбудителя *G*3 поверните против часовой стрелки до упора.

Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 (генератор *G*6) до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя *G*3.

Вращая регулировочную рукоятку возбудителя *G*3, установите такой ток возбуждения I_f генератора *G*6, чтобы ток якоря I_1 был равным 0,3 А. Занесите показания амперметров *P*1.1 (ток I_f) и *P*1.2 (ток I_1 обмотки якоря синхронного генератора *G*6) в табл. 1.4. Далее, уменьшая ток возбуждения I_f генератора *G*6, снимите еще 4-5 точек характеристики.

Одну точку характеристики снимите при номинальном токе якоря, последнюю точку – при выключенном токе возбуждения. Ток возбуждения регулируйте плавно и только в одном направлении**.**

Таблица 1.4

Двухфазное короткое замыкание

I_f, А										
I_1, А										
I_f^*, о.е.										
I_1^*, о.е.										

По завершении эксперимента первоначально у возбудителя *G*3, а затем и у источника *G*2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник *G*1. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений рис. 1.5 (однофазное короткое замыкание).

Переключатели режима работы источника *G*2 и возбудителя *G*3 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника *G*2 и возбудителя *G*3 поверните против часовой стрелки до упора.

Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 (генератор *G*6) до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя *G*3.

Вращая регулировочную рукоятку возбудителя *G*3, установите такой ток возбуждения I_f генератора *G*6, чтобы ток якоря I_1 был равным 0,3 А. Занесите показания амперметров *P*1.1 (ток I_f) и *P*1.2 (ток I_1 обмотки якоря синхронного генератора *G*6) в табл. 1.5. Далее, уменьшая ток возбуждения I_f генератора *G*6, снимите еще 4-5 точек характеристики.

Одну точку характеристики снимите при номинальном токе якоря, последнюю точку – при выключенном токе возбуждения. Ток возбуждения регулируйте плавно и только в одном направлении.

Таблица 1.5

Однофазное короткое замыкание

I_f, А										
I_1, А										
I_f^*, о.е.										
I_1^*, о.е.										

По завершении эксперимента первоначально у возбудителя *G*3, а затем и у источника *G*2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник *G*1. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ $U_1 = f(I_1)$ ПРИ I_f, $\cos\varphi$, n_H=const, РЕГУЛИРОВОЧНОЙ $I_f = f(I_1)$, ПРИ U_1, $\cos\varphi$, n_H= const И НАГРУЗОЧНОЙ $U_1 = f(I_f)$, ПРИ I_1, $\cos\varphi$, n_H = const ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

1.3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

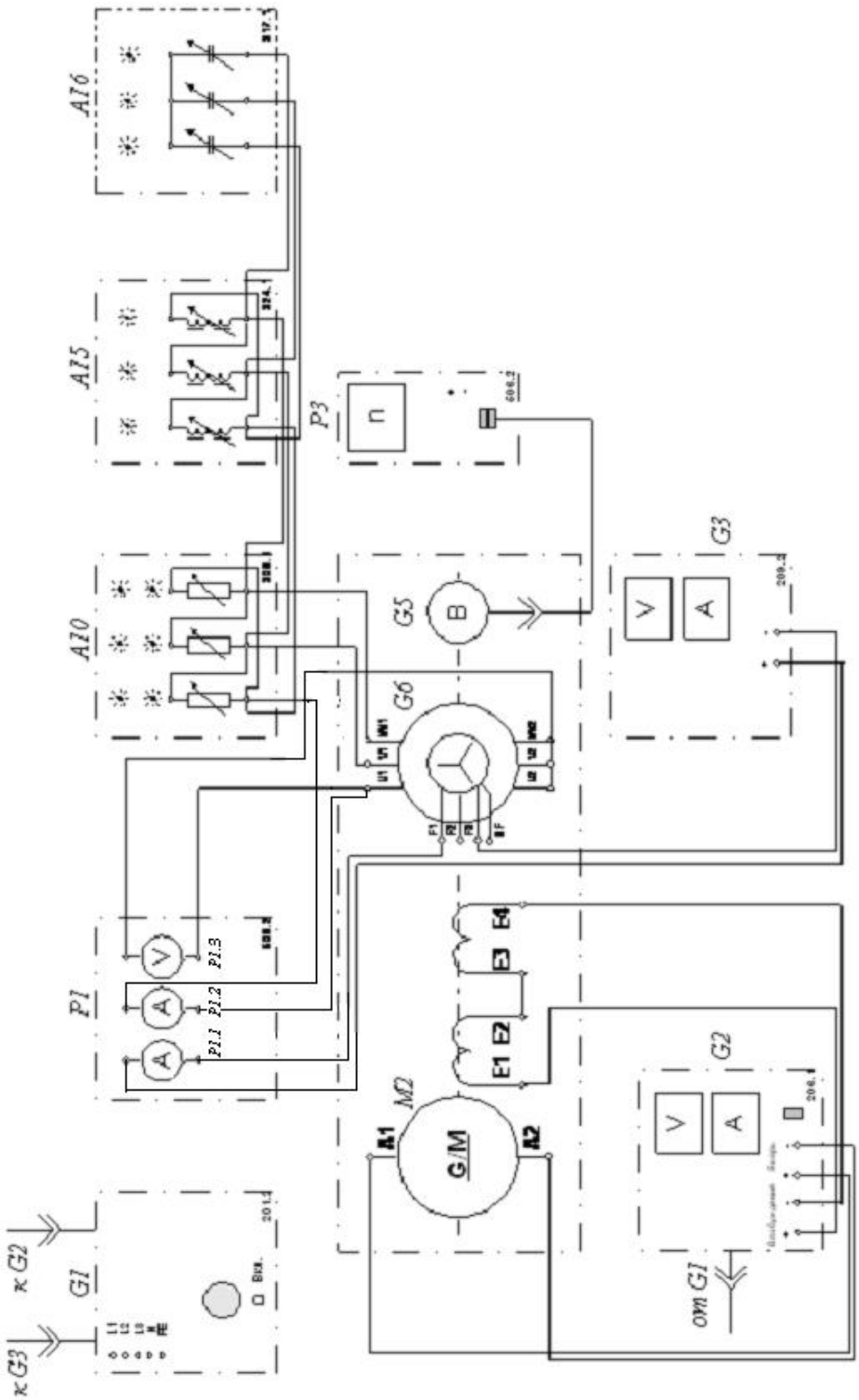


Рис. 1.6. Электрическая схема соединений для определения внешней, регулировочной, нагрузочной характеристик

1.3.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 1.6

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
*G*1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
*G*2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
*G*3	Возбудитель синхронной машины	209.2	– 0…40 В / 3,5 А
*G*5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
*G*6	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин$^{-1}$
*M*2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
*A*10	Активная нагрузка	306.1	220 В / 3×0…50 Вт;
*A*15	Индуктивная нагрузка	324.2	220 В / 3×0…40 ВАр;
*A*16	Емкостная нагрузка	317.2	220 В / 3×0…40 ВАр;
*P*1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 МОм
*P*3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 мин$^{-1}$

1.3.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G*1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока *G*2 используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока *M*2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель *G*3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока *G*6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений *G*5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P*3 электромашинного агрегата.

Нагрузки – активная *A*10, индуктивная *A*15 и емкостная *A*16 используются для нагружения синхронного генератора *G*6.

С помощью мультиметров блока *P*1 контролируются ток возбуждения I_f, ток якоря I_1 и фазное напряжение U_1 испытуемого синхронного генератора *G*6.

1.3.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режима работы источника *G*2 и возбудителя *G*3 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника *G*2 и возбудителя *G*3 поверните против часовой стрелки до упора.

Установите регулировочные рукоятки активной нагрузки *A*10 (индуктивной нагрузки *A*15 / емкостной нагрузки *A*16) в положение «0%».

Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров *P*1 и указателя частоты вращения *P*3.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 (генератор *G*6) до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя *G*3.

Вращая регулировочную рукоятку возбудителя *G*3, установите ток возбуждения I_f, при котором фазное напряжение U_1 генератора *G*6 будет равно 132 В.

Перемещая синфазно регулировочные рукоятки активной нагрузки *A*10 (индуктивной нагрузки *A*15 / емкостной нагрузки *A*16), изменяйте ток якоря I_1 генератора *G*6 в диапазоне 0…0,35 А и заносите показания амперметра *P*1.2 (ток I_1) и вольтметра *P*1.3 (напряжение U_1) в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Внешняя характеристика

I_1, А										
U_1, В										
I_1^*, о.е.										
U_1^*, о.е.										

Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки *A*10 (индуктивной нагрузки *A*15 / емкостной нагрузки *A*16) в положение «0%».

Синфазно поворачивая регулировочные рукоятки активной нагрузки *A*10 (индуктивной нагрузки *A*15 / емкостной нагрузки *A*16) и поддерживая напряжение U_1 генератора *G*4 равным 132 В путем регулирования его тока возбуждения I_f, изменяйте ток якоря I_1 генера-

тора $G6$ в диапазоне 0…0,35 А и заносите показания амперметров $P1.1$ (ток I_f) и $P1.2$ (ток I_1) в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Регулировочная характеристика

I_1, А										
I_f, В										
I_1^*, о.е.										
I_f^*, о.е.										

Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки $A10$ (индуктивной нагрузки $A15$ / емкостной нагрузки $A16$) в положение «0%».

Соедините фазы емкостной нагрузки по схеме «треугольник».

Поверните регулировочную рукоятку возбудителя $G3$ против часовой стрелки до упора.

Закоротите активную нагрузку $A10$ (индуктивную нагрузку $A15$ / емкостную нагрузку $A16$).

Увеличивая ток возбуждения I_f генератора $G3$, установите ток I_1 обмотки якоря генератора $G6$ равным, например, 0,09 А и занесите показания амперметра $P1.1$ (ток I_f) и вольтметра $P1.3$ (напряжение U_1) в табл. 1.9.

Поверните регулировочную рукоятку возбудителя $G3$ против часовой стрелки до упора.

Раскоротите активную нагрузку $A10$ (индуктивную нагрузку $A15$ / емкостную нагрузку $A16$).

Установите регулировочные рукоятки активной нагрузки $A10$ (индуктивной нагрузки $A15$ / емкостной нагрузки $A16$) в положение «100%».

Синфазно поворачивая против часовой стрелки регулировочные рукоятки активной нагрузки $A10$ (индуктивной нагрузки $A15$ / емкостной нагрузки $A16$) и поддерживая неизменным, например, равным 0,09 А ток I_1 обмотки якоря генератора $G6$ путем регулирования его тока возбуждения I_f, изменяйте напряжение U_1 якорной обмотки генератора $G6$ (не превышая значения 180 В) и заносите показания

амперметра $P1.1$ (ток I_f) и вольтметра $P1.3$ (напряжение U_1) в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Нагрузочная характеристика

I_f, А										
U_1, В										
I_f^*, о.е.										
U_1^*, о.е.										

По завершении эксперимента первоначально у возбудителя $G3$, а затем и у источника $G2$ поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ». Отключите источник $G1$. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров $P1$ и указателя частоты вращения $P3$.

1.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Выполнить эскиз поперечного сечения сердечников с обмотками якоря и возбуждения синхронного генератора. Кратко описать устройство, элементы конструкции и принцип действия синхронного генератора.

Построить на отдельном графике опытную характеристику холостого хода в относительных единицах (табл. 1.2) и характеристику холостого хода ненасыщенного генератора. Последняя представляет собой прямую линию, касательную к начальному прямолинейному участку опытной характеристики холостого хода.

По данным характеристикам вычислить коэффициент насыщения магнитной цепи по продольной оси K_{sd} для нескольких значений тока возбуждения и построить зависимость $K_{sd} = f(I_f)$ в этой же координатной сетке. Пояснить возможность и способ определения этого коэффициента по характеристике холостого хода, а также вид характеристик холостого хода.

Построить все характеристики короткого замыкания (табл. 1.3-1.5) в относительных единицах на одном рисунке и объяснить ход этих характеристик. Определить величины токов одно-, двух- и трехфазного короткого замыкания при одинаковом токе возбуждения и сравнить их между собой.

Данные табл. 1.7 представить в о.е. и построить внешние характеристики в одной координатной сетке. Вычислить и сравнить номинальное изменение напряжения при различном характере нагрузки.

Данные табл. 1.8 представить в о.е. и построить регулировочные характеристики в одной координатной сетке. Вычислить и сравнить номинальное изменение тока возбуждения при различном характере нагрузки.

Данные табл. 1.9 представить в о.е., построить нагрузочные характеристики в одной координатной сетке и пояснить ход этих характеристик.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что указывается на щитке (паспортной табличке) синхронного генератора?
2. Объясните конструкцию синхронной машины.
3. В чем конструктивное различие турбогенераторов и гидрогенераторов?
4. Объясните устройство, место расположения и назначение обмотки возбуждения, обмотки якоря и успокоительной (демпферной) обмотки в синхронном генераторе.
5. Как осуществляется возбуждение синхронных машин?
6. Объясните назначение и принцип работы синхронного генератора.
7. Как обеспечивается синусоидальность формы кривой ЭДС синхронного генератора?
8. Перечислите характеристики синхронного генератора. Поясните условия, при которых они определяются.
9. Какая характеристика синхронного генератора называется характеристикой холостого хода? Как ее определить на исследуемой машине?
10. Какая характеристика синхронного генератора называется нагрузочной? Как ее снять на исследуемой машине?
11. Объясните взаимное расположение х.х.х. и нагрузочной характеристики.
12. Какая характеристика синхронного генератора называется внешней и как ее определить на исследуемой машине?

13. Поясните ход внешних характеристик синхронного генератора при различном характере нагрузки.
14. Какая характеристика синхронного генератора называется регулировочной и как ее определить на исследуемой машине?
15. Поясните ход регулировочных характеристик синхронного генератора при различном характере нагрузки.
16. Что называется номинальным изменением напряжения?
17. Какая характеристика синхронного генератора называется характеристикой короткого замыкания и как ее определить на исследуемой машине?
18. Поясните ход характеристик короткого замыкания.
19. Что называется реакцией якоря в синхронном генераторе и как она проявляется при различном характере нагрузки?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы – овладение практическими навыками экспериментального и теоретического (по характеристикам) определения параметров обмотки якоря синхронной машины и расчета режимов работы при помощи векторных диаграмм.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Найти из опыта вращения ротора против поля якоря индуктивное сопротивление обмотки якоря токам обратного следования фаз x_2.

2. Найти из опыта индуктивное сопротивление обмотки якоря токам нулевого следования фаз x_0.

3. Определить из опыта переходные индуктивные сопротивления $x_d^{!}$ и $x_q^{!}$.

4. Вычислить по характеристикам индуктивные сопротивления токам обратного и нулевого следования фаз.

5. Определить ненасыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси x_d.

6. Найти отношение короткого замыкания K_c и ударный ток ко-

роткого замыкания I_s.

7. Построить реактивный треугольник Потье и определить расчетное индуктивное сопротивление x_p.

8. Построить векторную диаграмму ЭДС и токов (диаграмму Потье) с учетом насыщения.

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (x_2) ИЗ ОПЫТА ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ПРОТИВ ПОЛЯ ЯКОРЯ

2.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

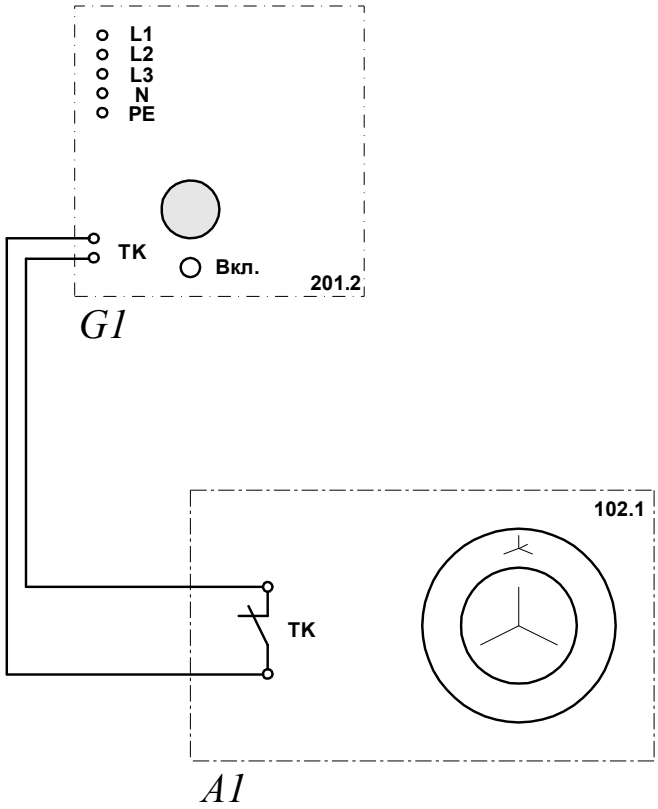


Рис. 2.1. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока

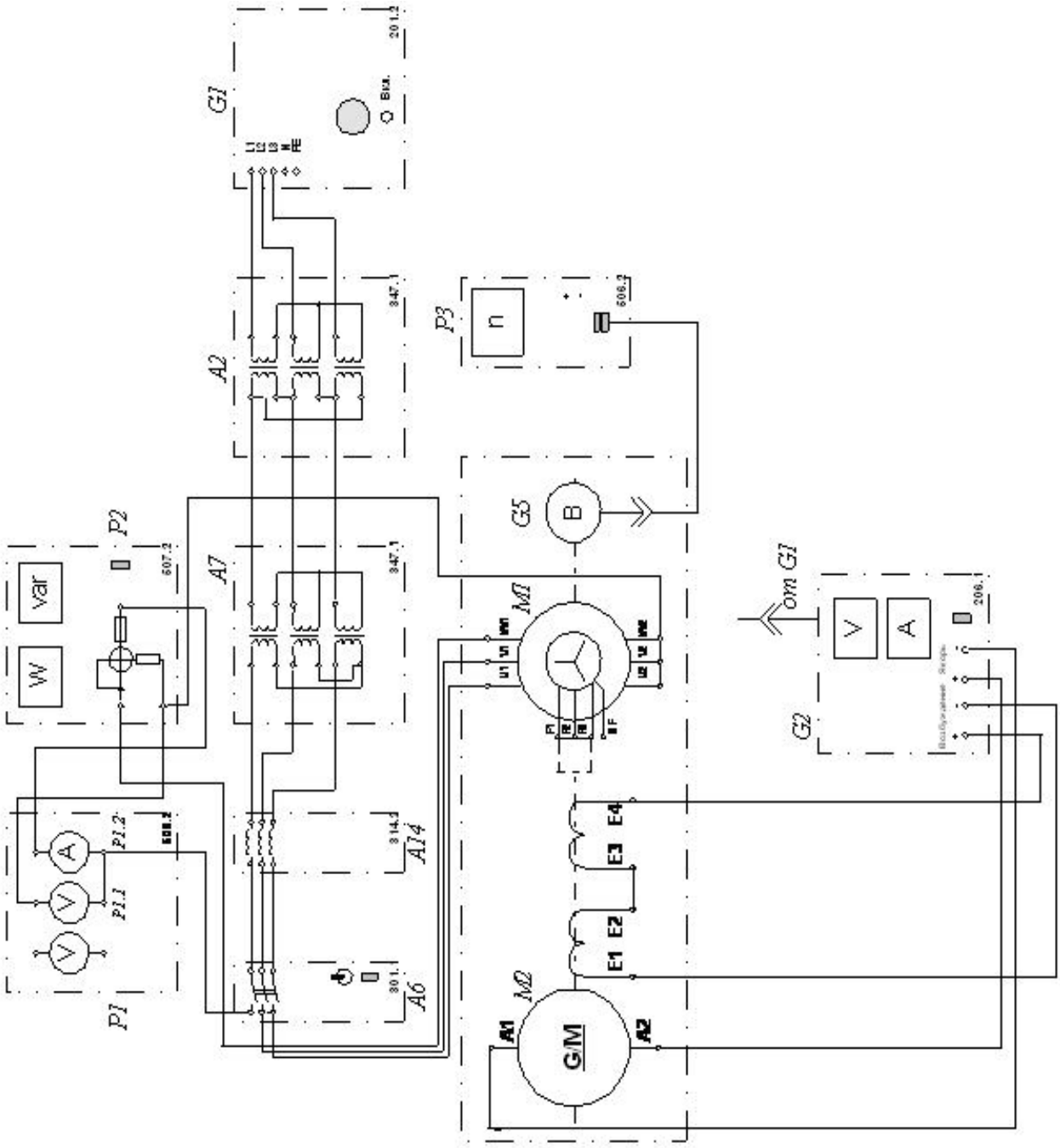


Рис. 2.2. Электрическая схема соединений для опыта определения индуктивного сопротивления обратной последовательности

2.1.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Таблица 2.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
*G*1	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
*G*2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	– 0…250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
*G*5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
*M*1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 об/мин
*M*2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
*A*2, *A*7	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
*A*6	Трехполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
*A*14	Линейный реактор	314.2	3 × 0,3 Гн / 0,5 А
*P*1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≂ 0...1000 В / ≂ 0...10 А / 0…20 МОм
*P*2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А
*P*3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000…0…2000 об/мин

2.1.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Источник *G*1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Преобразователь угловых перемещений *G*5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения *P*3 электромашинного агрегата.

Испытуемая синхронная машина *M*1 получает питание через выключатель *A*6 и трехфазные трансформаторные группы *A*2, *A*7 от трехфазного источника питания *G*1.

Линейный реактор *A*14 служит для дополнительного понижения напряжения, подводимого к испытуемой машине *M*1.

С помощью мультиметров блока *P*1 контролируются ток статорной обмотки и фазное напряжение испытуемой машины *M*1.

С помощью измерителя *P*2 контролируется активная мощность синхронной машины *M*1.

*M*2 – приводной двигатель постоянного тока.

2.1.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.

Соедините гнезда защитного заземления «⏚» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» трехфазного источника питания *G*1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режима работы выключателя *A*6, источника *G*2 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочную рукоятку источника *G*2 поверните против часовой стрелки до упора.

Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

В трехфазных трансформаторных группах *A*2 и *A*7 установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 127 В.

Осуществите пуск машины переменного тока *M*1 нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A*6 и заметьте по указателю частоты вращения *P*3 направление вращения (вариант 1).

Нажатием кнопки «ОТКЛ.» выключателя *A*6 остановите агрегат.

Включите выключатель «СЕТЬ» и нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 и по указателю частоты вращения *P*3 заметьте направление вращения (вариант 2).

У источника *G*2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.».

Если направление вращения в вариантах 1 и 2 (направление вращения магнитного поля и ротора) совпадают, измените либо порядок подключения фаз обмотки якоря машины переменного тока *M*1 к сети, либо направление вращения приводного двигателя постоянного тока *M*2.

При различном направлении вращения проведите опыт в следующем порядке.

Разомкните зажимы ротора *F*1, *F*2, *F*3.

Замкните накоротко обмотку возбуждения синхронного генератора *M*1 (зажимы *F*1, *F*2).

Нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A*6 подайте на обмотку якоря синхронного генератора *M*1 пониженное напряжение так, чтобы ток в этой обмотке был равен номинальному.

Изменение напряжения и тока якоря осуществляется с помощью варьирования положения переключателей в трансформаторных группах *A*2 и *A*7.

Снимите и запишите показания вольтметра *P*1.1 (напряжение U), амперметра *P*1.2 (ток I_1), а также ваттметра *P*2 (активная мощность P).

По завершении эксперимента поверните регулировочную рукоятку источника *G*2 против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ», отключите выключатель *A*6 и источник *G*1. Обмотку возбуждения оставьте замкнутой накоротко.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (x_0)

2.2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ

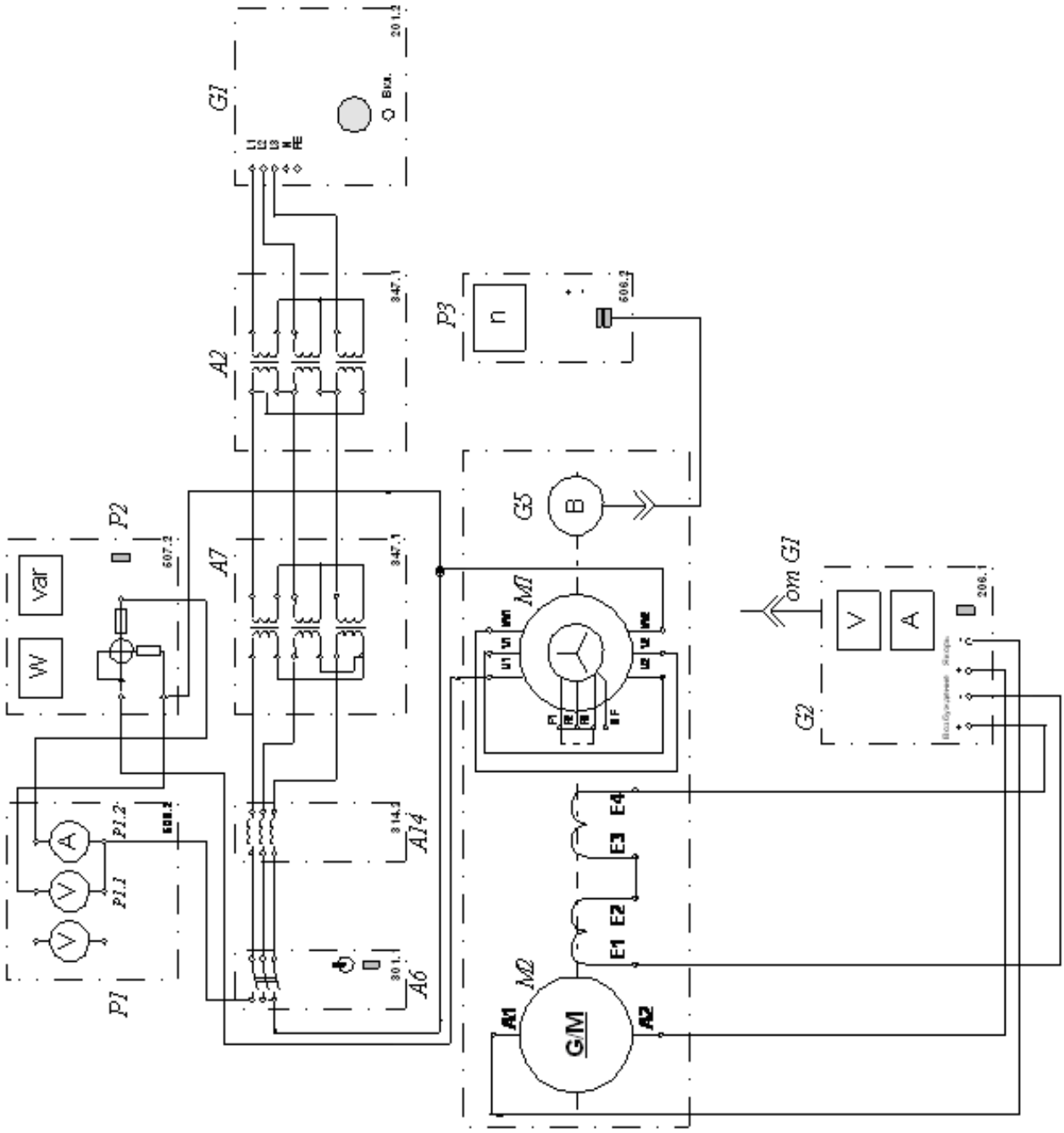


Рис. 2.3. Электрическая схема соединений для опыта определения индуктивного сопротивления нулевой последовательности

2.2.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Перечень аппаратуры приводится в п. 2.1.2, табл. 2.1.

2.2.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Описание электрической схемы соединений приводится в п. 2.1.3.

2.2.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Обмотку якоря синхронного генератора соедините по схеме разомкнутого треугольника.

Переключатели режима работы выключателя *A*6, источника *G*2 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочную рукоятку источника *G*2 поверните против часовой стрелки до упора.

Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

В трехфазных трансформаторных группах *A*2 и *A*7 установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 127 В.

Нажмите кнопку «ВКЛ.» источника *G*2.

Вращая регулировочную рукоятку источника *G*2, разгоните двигатель *M*2 до частоты 1500 мин$^{-1}$ и поддерживайте ее в ходе эксперимента неизменной.

Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A*6 подайте на обмотку якоря синхронного генератора *M*1 пониженное напряжение так, чтобы ток в этой обмотке был равен номинальному.

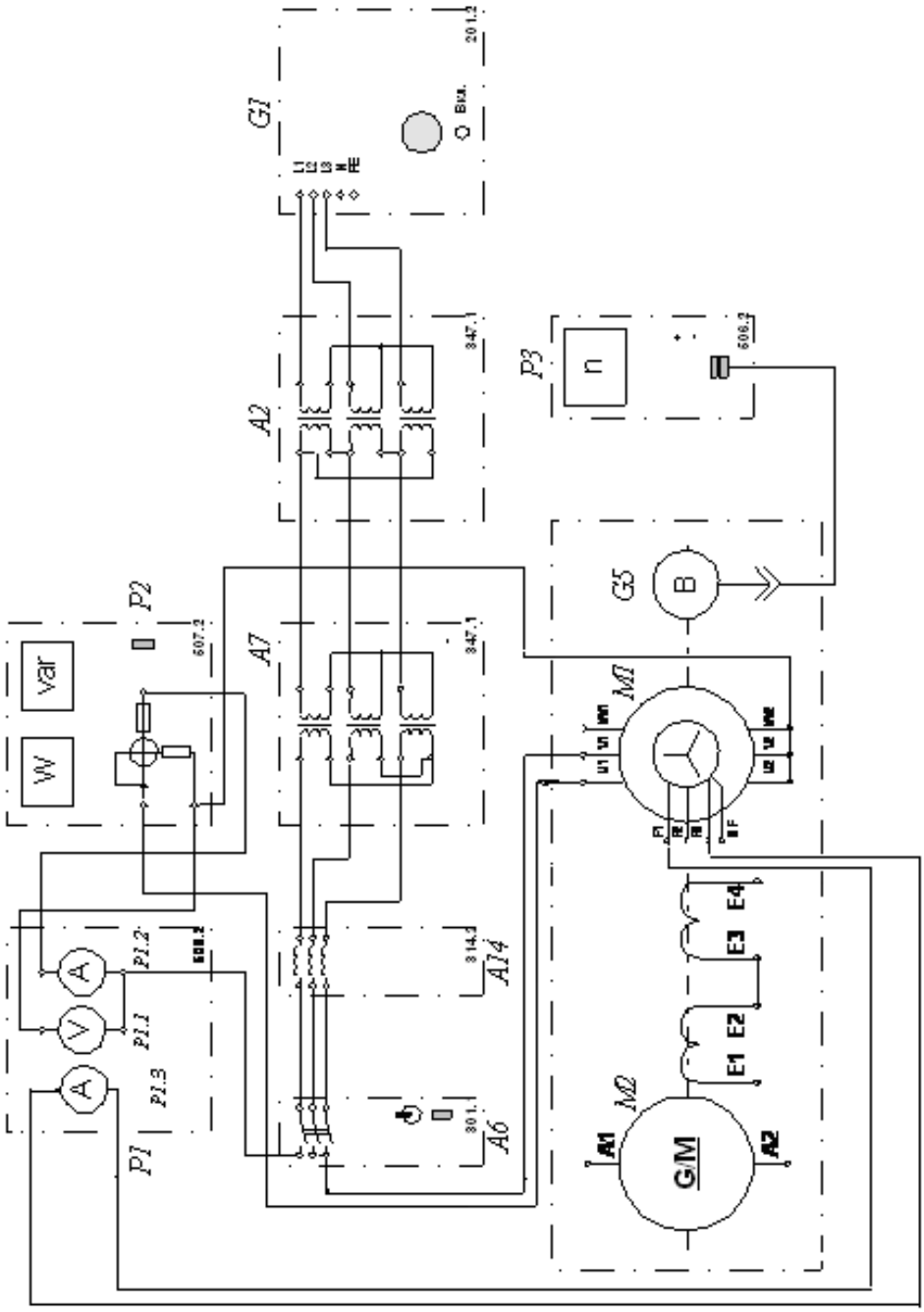
Изменение напряжения и тока якоря осуществляется с помощью варьирования положения переключателей в трансформаторных группах *A*2 и *A*7.

Снимите и запишите показания вольтметра $P1.1$ (напряжение U), амперметра $P1.2$ (ток I), а также ваттметра $P2$ (активная мощность P).

По завершении эксперимента поверните регулировочную рукоятку источника $G2$ против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель «СЕТЬ», отключите выключатель $A6$ и источник $G1$.

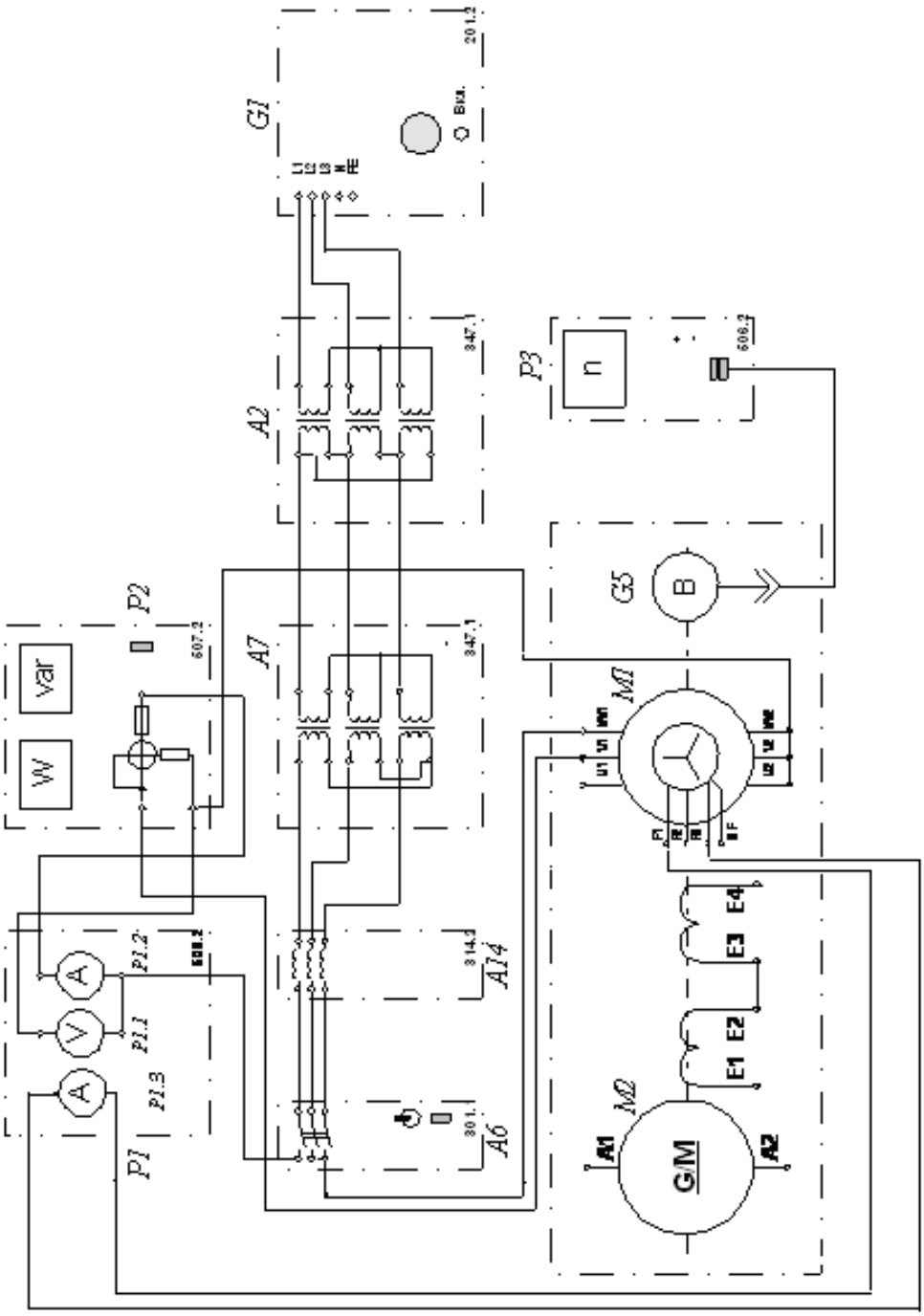
2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ПЕРЕХОДНОМУ ТОКУ ($x_d^{!}$, $x_q^{!}$)

2.3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ



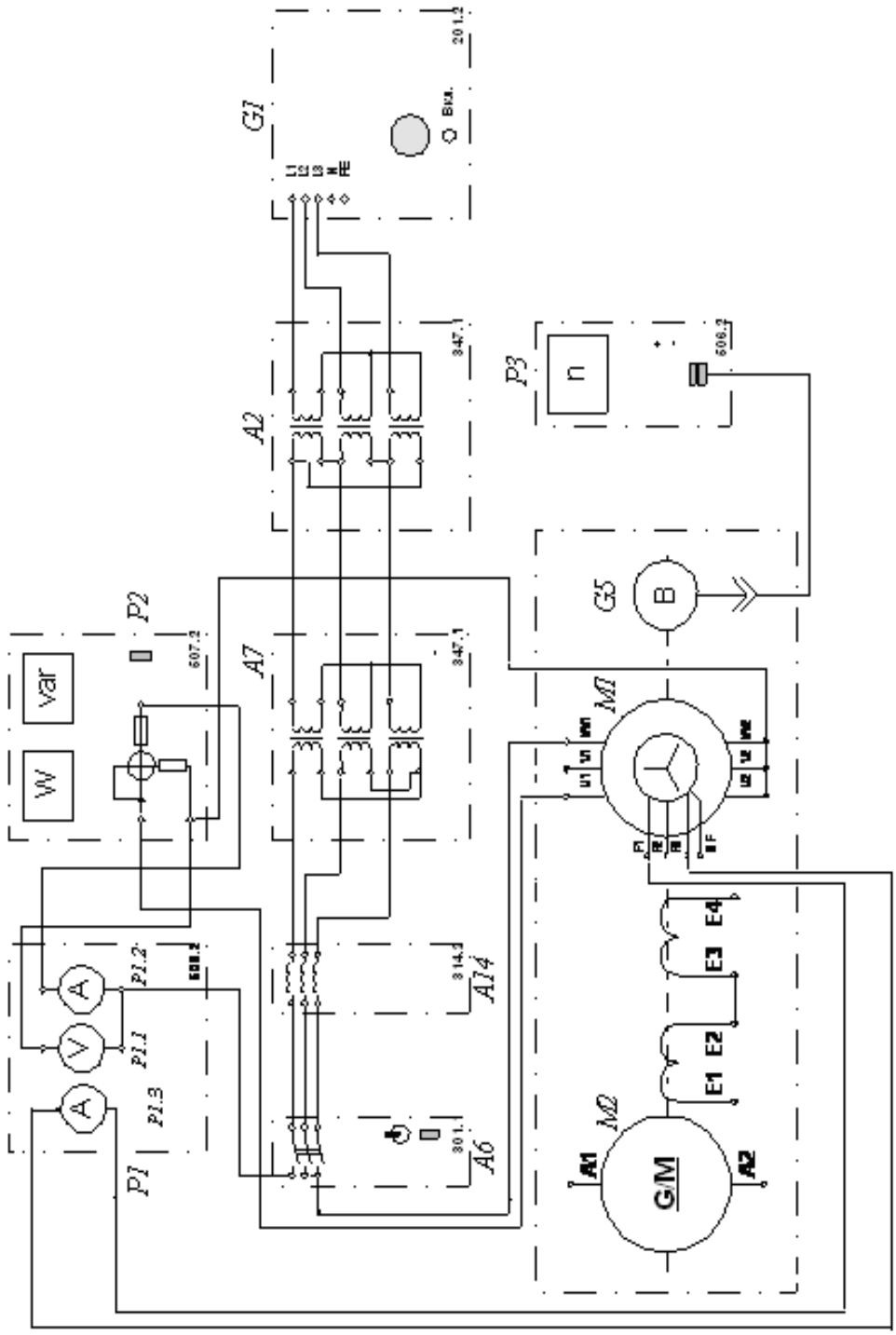
а

Рис. 2.4. Электрическая схема соединений для опыта определения переходных индуктивных сопротивлений обмотки якоря (начало)



б

Рис. 2.4. Электрическая схема соединений для опыта определения переходных индуктивных сопротивлений обмотки якоря (продолжение)



в

Рис. 2.4. Электрическая схема соединений для опыта определения переходных индуктивных сопротивлений обмотки якоря (окончание)

2.3.2. ПЕРЕЧЕНЬ АППАРАТУРЫ

Перечень аппаратуры приводится в п. 2.1.2, табл. 2.1.

2.3.3. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

Описание электрической схемы соединений приводится в п. 2.1.3.

2.3.4. УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Снимите кожух, закрывающий муфту, соединяющую вал машины постоянного тока *M*2 с валом синхронной машины *M*1, и закрепите на ней стопорное устройство.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 2.4, *а*). Обмотку возбуждения синхронной машины *M*1 замкните накоротко через амперметр переменного тока *P*1.3.

Переключатель режима работы выключателя *A*6 установите в положение «РУЧН.».

Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

Активизируйте мультиметры блока *P*1, задействованные в эксперименте.

Включите источник *G*1. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

В трехфазных трансформаторных группах *A*2 и *A*7 установите номинальные вторичные напряжения трансформаторов 127 В.

Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A*6 подайте на обмотку якоря синхронного генератора М1 пониженное напряжение так, чтобы ток в этой обмотке был равен номинальному.

Изменение напряжения и тока якоря осуществляется с помощью варьирования положения переключателей в трансформаторных группах *A*2 и *A*7.

Снимите и запишите показания вольтметра *P*1.1 (напряжение U), амперметра *P*1.2 (ток I), амперметра *P*1.3 (ток возбуждения I_f), а также ваттметра *P*2 (активная мощность P) в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Отключена фаза *W*1-*W*2					Отключена фаза *U*1-*U*2					Отключена фаза *V*1-*V*2				
U, В	I, А	P, Вт	I_f, А	x_{12}, Ом	U, В	I, А	P, Вт	I_f, А	x_{23}, Ом	U, В	I, А	P, Вт	I_f, А	x_{31}, Ом

По окончании эксперимента отключите выключатель *A*6 и источник *G*1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 2.4, *б*).

Включите источник *G*1.

Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A*6 подайте на обмотку якоря синхронного генератора М1 пониженное напряжение так, чтобы ток в этой обмотке был равен номинальному.

Изменение напряжения и тока якоря осуществляется с помощью варьирования положения переключателей в трансформаторных группах *A*2 и *A*7.

Снимите и запишите показания вольтметра *P*1.1 (напряжение U), амперметра *P*1.2 (ток I), амперметра *P*1.3 (ток возбуждения I_f), а также ваттметра *P*2 (активная мощность P) в табл. 2.2.

По окончании эксперимента отключите выключатель *A*6 и источник *G*1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (рис. 2.4, *в*).

Включите источник *G*1.

Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A*6 подайте на обмотку якоря синхронного генератора М1 пониженное напряжение так, чтобы ток в этой обмотке был равен номинальному.

Изменение напряжения и тока якоря осуществляется с помощью варьирования положения переключателей в трансформаторных группах *A*2 и *A*7.

Снимите и запишите показания вольтметра *P*1.1 (напряжение U), амперметра *P*1.2 (ток I), амперметра *P*1.3 (ток возбуждения I_f), а также ваттметра *P*2 (активная мощность P) в табл. 2.2.

Отключите источник *G*1.

Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

2.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

2.4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ТОКАМ ОБРАТНОГО, НУЛЕВОГО СЛЕДОВАНИЯ ФАЗ И ПЕРЕХОДНОМУ ТОКУ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Индуктивное сопротивление обмотки якоря токам обратного следования фаз (п. 2.1) вычислите по формуле

$$x_2 = \sqrt{(U/I_1)^2 - (P/I_1^2)^2}$$

и представьте в относительных единицах.

По результатам опыта 2.2 вычислите индуктивное сопротивление обмотки якоря токам нулевого следования фаз по формуле

$$x_0 = \frac{1}{3}\sqrt{(U/I)^2 - (P/I^2)^2}$$

и выразите в относительных единицах.

По данным испытаний табл. 2.2 вычислите индуктивные сопротивления каждой пары фаз обмотки якоря (x_{12}, x_{23}, x_{31}) по формуле

$$x = \frac{1}{2}\sqrt{(U/I)^2 - (P/I^2)^2}\,.$$

Переходное индуктивное сопротивление по продольной (поперечной) оси (п. 2.3) подсчитайте по формуле

$$x_d^{!}\ (x_q^{!}) = x_{cp} \pm \Delta x\,,$$

где

$$x_{cp} = \frac{1}{3}(x_{12} + x_{23} + x_{31});$$

$$\Delta x = \frac{2}{3}\sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}\,.$$

Определение знака перед Δx следует произвести следующим образом: плюс – если наибольшему из трех измеренных индуктивных сопротивлений якоря соответствует максимальное (минимальное) из трех значений тока в обмотке возбуждения; минус – если наибольшему из трех измеренных индуктивных сопротивлений соответствует мини-

мальное (максимальное) из трех значений тока в обмотке возбуждения. Значения параметров $x_d^{!}$ и $x_q^{!}$ выразите в относительных единицах.

По результатам расчета вычислите также индуктивное сопротивление обратной последовательности по формуле $x_2 = \frac{1}{2}(x_d^{!} + x_q^{!!})$ и сравните с результатом, полученным из опыта вращения ротора против поля якоря.

2.4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ТОКАМ ОБРАТНОГО И НУЛЕВОГО СЛЕДОВАНИЯ ФАЗ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ

На рис. 2.5 постройте в относительных единицах опытную и ненасыщенную характеристики холостого хода, а также характеристики одно-, двух- и трехфазного короткого замыкания. Перечисленные характеристики взять из предыдущей работы.

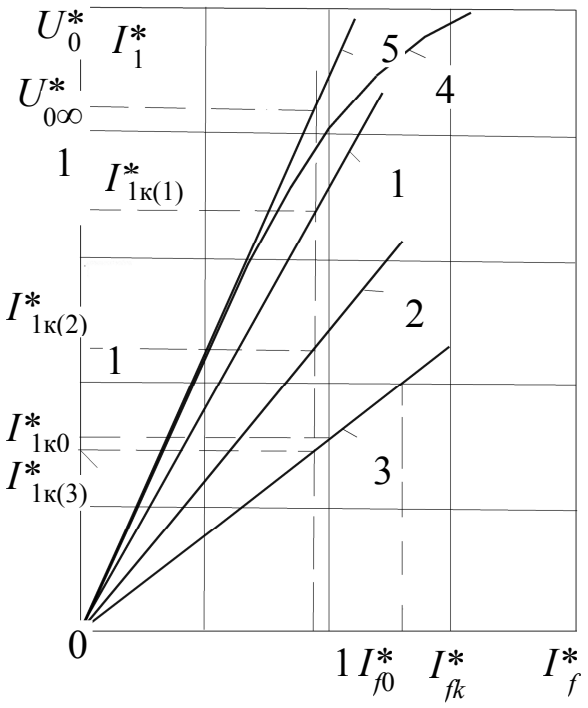


Рис. 2.5. Характеристики однофазного (1), двухфазного (2) и трехфазного (3) короткого замыкания; 4 – опытная х.х.х.; 5 – ненасыщенная х.х.х.

Индуктивное сопротивление обмотки якоря токам обратного следования фаз вычислите по формуле

$$x_2^* = \sqrt{3}\, U_{0\infty}^* \big/ I_{1k(2)}^* - U_{0\infty}^* \big/ I_{1k(3)}^*,$$

а индуктивное сопротивление обмотки якоря токам нулевого следования фаз – по формуле

$$x_0^* = 3\, U_{0\infty}^* \big/ I_{1k(1)}^* - \sqrt{3}\, U_{0\infty}^* \big/ I_{1k(2)}^*,$$

где $U_{0\infty}^*$ – напряжение по ненасыщенной х.х.х. при некотором значении тока возбуждения; $I_{1k(1)}^*$, $I_{1k(2)}^*$, $I_{1k(3)}^*$ – токи в обмотке якоря по характеристикам одно-, двух- и трехфазного короткого замыкания при том же значении тока возбуждения.

2.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИНХРОННОГО ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ненасыщенное синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси определите как частное от деления напряжения холостого хода, взятого по ненасыщенной характеристике холостого хода (см. рис. 2.5) при некотором токе возбуждения, на ток трехфазного короткого замыкания, полученный при этом же токе возбуждения:

$$x_d^* = U_{0\infty}^* / I_{1k(3)}^*.$$

2.4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (K_c) И УДАРНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (I_s)

Отношение короткого замыкания следует определять как частное от деления тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению по х.х.х. при номинальной частоте вращения (I_{f0}^*) на ток возбуждения, соответствующий номинальному току якоря по характеристике установившегося трехфазного короткого замыкания (I_{fk}^*).

Из данного определения и из рис. 2.5 следует, что $K_c = I^*_{1k0}$, т.е. отношение короткого замыкания численно равно относительному току якоря по характеристике установившегося трехфазного короткого замыкания при единичном токе возбуждения.

Ударным током короткого замыкания принято считать наибольшее возможное при данном возбуждении мгновенное значение тока в обмотке якоря синхронного генератора, которое достигается примерно полпериода спустя (через 0,01 с при f =50 Гц) после возникновения внезапного трехфазного короткого замыкания. При этом предполагается, что замыкание произошло в наиболее неблагоприятный момент, когда потокосцепление одной из фазных обмоток якоря имеет максимальное значение, и что до возникновения короткого замыкания генератор работал в режиме холостого хода.

Синхронные машины должны выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном $1{,}05U_н$. Ударный ток короткого замыкания вычислите по формуле

$$I^*_{1s} = {1{,}05K_s}\Big/{K_н x^{\prime *}_d},$$

где K_s=1,8 – ударный коэффициент, учитывающий наложение апериодической составляющей тока якоря; $K_н$=0,9 – коэффициент, учитывающий уменьшение сверхпереходного индуктивного сопротивления обмотки якоря вследствие насыщения зубцов якоря от поля пазового рассеяния.

2.4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНОГО ТРЕУГОЛЬНИКА И РАСЧЕТНОГО ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

На рис. 2.6 постройте в относительных единицах опытную и ненасыщенную х.х.х., а также индуктивную нагрузочную характеристику. Параллельно оси абсцисс проведите линию, соответствующую номинальному напряжению до пересечения с индуктивной нагрузочной характеристикой. Из точки пересечения постройте на этой линии

отрезок $CO' = I^*_{fk}$, определяемый по характеристике трехфазного короткого замыкания из рис. 2.5 при номинальном токе якоря. Из точки O' проведите прямую, параллельную ненасыщенной х.х.х. до пересечения с опытной х.х.х. Из точки пересечения проведите перпендикуляр на отрезок CO'. Построенный таким способом треугольник ABC считается реактивным треугольником Потье синхронной машины. Вертикальный катет этого треугольника определяет величину внутреннего падения напряжения на расчетном индуктивном сопротивлении обмотки якоря $AB = x^*_p\, I^*_1$.

Учитывая, что индуктивная нагрузочная характеристика определена не при номинальном токе якоря, расчетное индуктивное сопротивление в относительных единицах $x^*_p = AB/I^*_1$. Горизонтальный катет треугольника Потье определяет составляющую тока возбуждения, компенсирующую размагничивающее действие продольной реакции якоря при данном токе нагрузки ($I^*_{1И}$) и номинальном напряжении на выходных зажимах генератора (U^*=1) $I^*_{fa} = BC$.

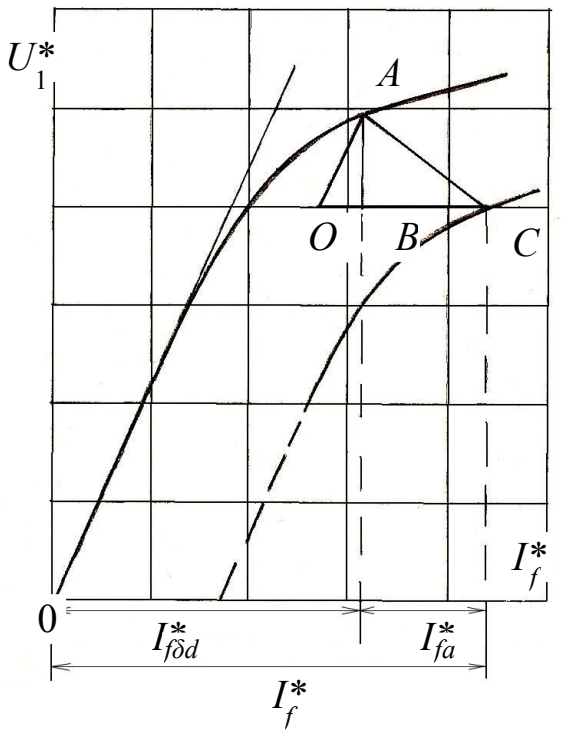


Рис. 2.6. Реактивный треугольник синхронного генератора

Из рис. 2.6 можно также найти составляющую тока возбуждения, которая идет на создание результирующего магнитного потока по продольной оси полюса $I^*_{f\delta d}$ и полный ток возбуждения I^*_f, обеспечивающий в режиме индуктивной нагрузочной характеристики, снятой при данном токе нагрузки $I^*_{1И}$, номинальное напряжение на выходных зажимах генератора.

2.4.6. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ ПОТЬЕ

Диаграмму совместите с опытной х.х.х. и выполните построения в следующем порядке. Для заданного нагрузочного режима (U, I_1, $\cos\varphi$) постройте векторы напряжения и тока, совместив первый из них с осью ординат (рис. 2.7). Из конца вектора напряжения перпендикулярно вектору тока в сторону его опережения постройте вектор $AB = jx^*_p I^*_1$ (падением напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря пренебречь). Соединив точку B с началом координат, получите вектор результирующей ЭДС E^*_δ, которая индуктируется в обмотке якоря результирующим магнитным потоком. По ЭДС E^*_δ из х.х.х. определите составляющую тока возбуждения $I^*_{f\delta} = OC$, которая идет на создание этого потока. Затем из точки C под углом ($\varphi + \gamma_1$) к вертикали (угол между вектором тока I^*_1 и вектором ЭДС E^*_δ) постройте вектор $CD = I^*_{fa} I^*_1$. Значение тока возбуждения I^*_{fa} для заданного нагрузочного режима найдите (рис. 2.6) как $I^*_{fa} = I^*_1 [BC]/I^*_{1И}$, где I^*_1 – ток якоря для заданного режима, $I^*_{1И}$ – ток якоря при определении индуктивной нагрузочной характеристики.

Соединив точку D с началом координат, определите величину полного тока возбуждения $I^*_f = OD$, соответствующего заданному нагрузочному режиму синхронного генератора. По току I^*_f из х.х.х. найдите ЭДС E^*_f, которая индуктируется в обмотке якоря после уменьшения тока нагрузки от заданного значения до нуля, и вычислите изменение напряжения, происходящее при этом.

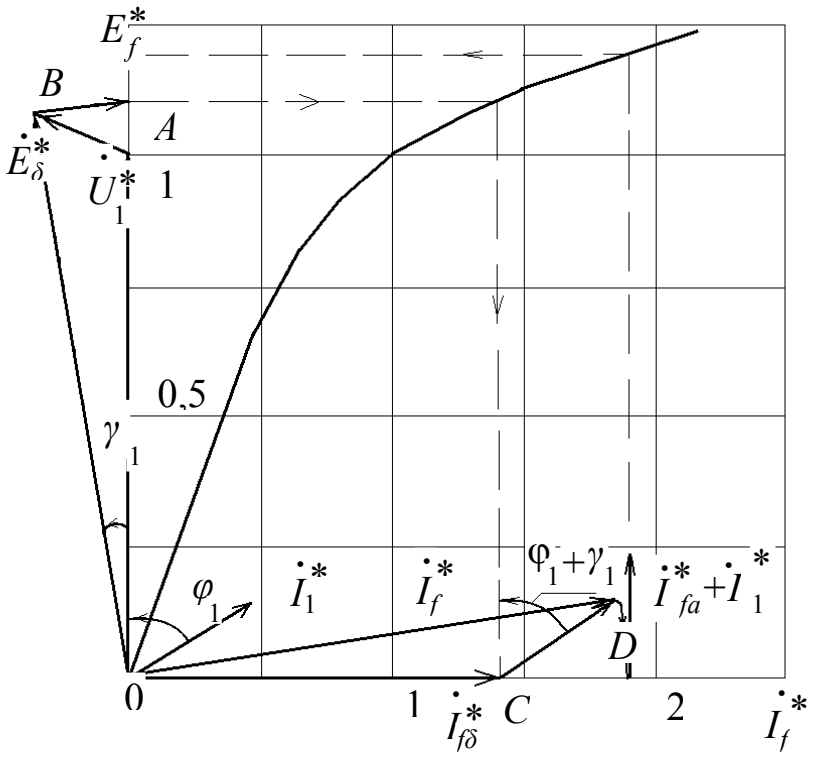


Рис. 2.7. Диаграмма Потье

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивных сопротивлений x_d и x_q.
2. Каково соотношение между параметрами x_d и x_q в явно- и неявнополюсных синхронных машинах и от чего это зависит?
3. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивных сопротивлений $x_d^{!}$, $x_d^{!!}$, $x_q^{!}$, $x_q^{!!}$.
4. Каково соотношение между параметрами x_d, $x_d^{!}$, $x_d^{!!}$ и от чего это зависит?
5. Каково соотношение между параметрами x_q, $x_q^{!}$, $x_q^{!!}$ и от чего это зависит?
6. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивного сопротивления x_2.
7. Объясните физический смысл опыта вращения ротора против поля якоря.
8. Как влияет на величину x_2 наличие или отсутствие в синхронном генераторе демпферной (успокоительной) обмотки?
9. Дайте определение и поясните физический смысл индуктивного сопротивления x_0. Каково соотношение между x_0 и $x_{1\sigma}$?

10. Как опытным путем определить x_0?
11. Как определить расчетное индуктивное сопротивление x_p?
12. Как найти индуктивные сопротивления x_d, x_2, x_0 по характеристикам?
13. Что такое отношение короткого замыкания и каково его практическое значение? Как его определить по опытным данным?
14. Почему при проведении опытов по определению x_d'', x_q'', x_2, x_0 обмотка возбуждения замыкается накоротко?
15. Что такое «ударный ток» короткого замыкания и как его найти?
16. В каком из синхронных генераторов ударный ток короткого замыкания будет больше:
    – в снабженном демпферной (успокоительной) обмоткой;
    – без нее
    и почему?
17. Поясните построение векторной диаграммы Потье.
18. Как учитывается насыщение и реакция якоря при построении векторных диаграмм синхронного генератора?
19. Как построить реактивный треугольник Потье и что характеризуют его катеты?
20. Объясните физический смысл каждого из векторов векторной диаграммы Потье.
21. Постройте:
    – диаграмму Блонделя;
    – диаграмму Потье;
    – регулированную характеристику;
    – внешнюю характеристику;
    – *V*-образную характеристику

для заданного преподавателем нагрузочного режима работы синхронного генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение устройства, принципа действия, потребительских свойств синхронных электромеханических преобразователей является необходимым для подготовки квалифицированных кадров в области проектирования и эксплуатации турбо-, гидрогенераторов, синхронных двигателей различного назначения. Данное пособие призвано помочь студентам при изучении различных аспектов теоретического и практического исследования СЭМП.

В теоретической части пособия достаточно подробно освещены вопросы устройства, принципа работы, возбуждения СЭМП. Также уделено много внимания пониманию физического смысла параметров синхронной машины. Рассмотрены основные характеристики СЭМП, влияние на их вид характера нагрузки.

Во второй (практической) части приведены практические рекомендации по определению параметров обмотки якоря и характеристик синхронного генератора. Представлены программа, цель, требования к проведению работы и рекомендации по выполнению отчета.

В обеих частях пособия присутствуют вопросы для самопроверки и контрольные вопросы для лучшего усвоения материала в процессе самостоятельного изучения СЭМП.

Данное пособие частично освещает курс по изучению СЭМП согласно рабочим программам по дисциплинам «Электрические машины», «Электромеханика», «Конструкция, расчет, проектирование, потребительские свойства ЭМУ и ЭМП». В настоящее время готовится к изданию вторая часть, в которой будут отражены вопросы параллельной работы СЭМП с сетью и рассмотрены потребительские свойства синхронных двигателей различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Синхронные машины: метод. указ. / Сост. Ю.В. Зубков, В.Н. Овсянников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2002. – 36 с.
2. Копылов, И.П. Электрические машины: учеб. / И.П. Копылов. – 5-е изд. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.
3. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
4. Гольдберг, О.Д. Электромеханика: учеб. / О.Д. Гольдберг, С.П. Хмелевская. – М.: Academia, 2007. – 504 с.
5. Беспалов, В.Я. Электрические машины: учеб. пособие / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленц. – М.: Academia, 2006. – 313 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3
ВВЕДЕНИЕ 4
1. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 5
1.1. Конструкция синхронных электромеханических преобразователей 5
1.2. Принцип действия СЭМП 10
1.3. Системы возбуждения СЭМП 12
1.4. Холостой ход синхронного генератора 16
Вопросы для самопроверки по главе 1 19
2. РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ 19
2.1. Реакция якоря 19
2.2. Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора без учета насыщения 24
2.3. Особенности реакции якоря в явнополюсном синхронном генераторе. Метод двух реакций 26
2.4. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора без учета насыщения 28
Вопросы для самопроверки по главе 2 30
3. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ 31
3.1. Индуктивные сопротивления реакции якоря 31
3.2. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря 32
3.3. Синхронные индуктивные сопротивления 33
3.4. Сверхпереходные и переходные индуктивные сопротивления обмотки якоря 34
3.5. Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности 37
Вопросы для самопроверки к главе 3 42
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА 43
4.1. Характеристика холостого хода 43
4.2. Характеристика короткого замыкания 45
4.3. Индукционная нагрузочная характеристика 49
4.4. Внешние характеристики 50
4.5. Регулировочные характеристики 52
Вопросы для самопроверки к главе 4 53
Лабораторные работы 54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 101

Учебное издание

ЗУБКОВ Юрий Валентинович

Синхронные электромеханические преобразователи
Часть 1

Редактор *Ю.А. Петропольская*
Верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Е.В. Абрамова*

Подписано в печать 22.05.13.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п. л. 6,04. Уч.-изд. л. 6,01.
Тираж 50 экз. Рег. № 111/13

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8