

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Методические указания
по выполнению лабораторной работы № 7
на стенде НТЦ-23**

Казань 2013

УДК 621.313
ББК 31.261.63
И88

И88 Исследование трехфазного синхронного генератора: Метод. указания по выполнению лабораторной работы № 7 на стенде НТЦ-23 / Сост.: Ю.А. Рылов, Н.Г. Баженов, Г.С. Магданов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – 32 с.

Методические указания содержат краткое описание конструкции, основные теоретические сведения, порядок выполнения и обработки полученных данных лабораторной работы на стенде НТЦ-23.

Предназначены для студентов 3 и 4 курсов КГЭУ всех форм обучения и бакалавров, обучающихся по дисциплине «Электрические машины».

УДК 621.313
ББК 31.261.63

Цель работы

Целью работы является изучение студентами устройства синхронного генератора и приобретение практических навыков по сборке схем и снятии экспериментальных данных.

Продолжительность работы – 2 часа.

Краткие теоретические сведения

Синхронные машины – это машины переменного тока. По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Что же касается свойств, то синхронные машины отличаются от асинхронных синхронной скоростью вращения ротора ($n_2 = n_1 = \text{const}$) при любой нагрузке, а также возможностью регулирования коэффициента мощности. Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные генераторы (рис. 1) составляют основу электротехнического оборудования электростанций, т.е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами.

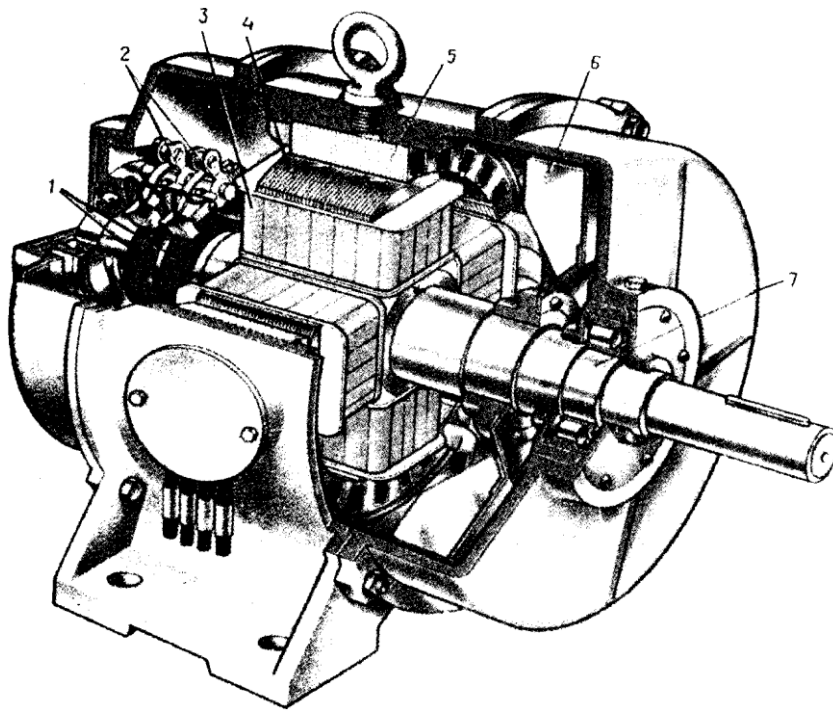


Рис. 1. Синхронный генератор:

- 1 – контактные кольца; 2 – щеткодержатели; 3 – полюсная катушка ротора;
4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник статора; 6 – вентилятор; 7 – вал

Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает миллиона киловатт и более. В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве компенсаторов – генераторов реактивной мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки.

Синхронная машина состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора. Статоры синхронных машин в принципе не отличаются от статоров асинхронных двигателей, т.е. состоят из корпуса, сердечника и обмотки.

Конструктивное исполнение статора синхронной машины может быть различным в зависимости от назначения и габаритов машины.

Так, в многополюсных машинах большой мощности при наружном диаметре сердечника статора более 900 мм пластины сердечника делают из отдельных сегментов, которые при сборке образуют цилиндр сердечника статора. Корпуса статоров крупногабаритных машин делают разъемными, что необходимо для удобства транспортировки и монтажа этих машин.

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиально различающиеся конструкции: явнополюсную и неявнополюсную.

В энергетических установках по производству электроэнергии переменного тока в качестве первичных (приводных) двигателей синхронных генераторов применяют в основном три вида двигателей: паровые турбины, гидравлические турбины либо двигатели внутреннего сгорания (дизели).

Применение любого из перечисленных двигателей принципиально влияет на конструкцию синхронного генератора. Если приводным двигателем является гидравлическая турбина, то синхронный генератор называют гидрогенератором. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60–500 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Ротор гидрогенератора имеет явнополюсную конструкцию, т.е. с явно выраженными полюсами, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Все полюсы ротора закреплены на ободке, являющемся также и ярмом магнитной системы машины в котором замыкаются потоки полюсов. Гидрогенераторы обычно изготавливаются с вертикальным расположением вала.

Паровая турбина работает при большой скорости вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый турбогенератором, является быстроходной синхронной машиной. Ротор этих генераторов выполняют либо двухполюсным ($n_1 = 3000$ об/мин), либо четырехполюсным ($n_1 = 1500$ об/мин).

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения. Сердечник неявнополюсного ротора изготавливают в виде цельной стальной поковки вместе с хвостовиками (концами вала) или же делают сборным. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь две трети его поверхности (по периметру). Оставшаяся поверхность образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (каппами), изготавливаемыми обычно из немагнитной стали.

Турбогенераторы и дизель-генераторы изготавливают с горизонтальным расположением вала. Дизель-генераторы рассчитывают на частоту вращения 600–1500 об/мин и выполняют с явнополюсным ротором. Сердечник статора, запрессованный в стальной корпус, состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для лучшего охлаждения двигателя пакеты разделены радиальными вентиляционными каналами шириной по 10 мм. Обмотка статора двухслойная с укороченным шагом.

Сердечники полюсов ротора крепятся к корпусу шпильками. Обмотка ротора состоит из полюсных катушек. Контактные кольца крепятся на конце вала. На роторе имеются лопатки центробежного вентилятора. Подшипники скольжения установлены на подшипниковых полушитах. Генератор с торцовых сторон прикрыт стальными щитами. В обшивке корпуса имеются вентиляционные окна, прикрытые жалюзи. На боковой поверхности корпуса расположена коробка выводов.

Между наружной поверхностью полюсного наконечника и внутренней поверхностью сердечника статора имеется воздушный зазор. По оси полюса этот зазор минимален, а на краях – максимален. Такая конфигурация полюсного наконечника необходима для синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Основным способом возбуждения синхронных машин является электромагнитное возбуждение. В современных синхронных генераторах получила применение бесконтактная система электромагнитного возбуждения, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе.

В качестве возбудителя и в этом случае применяют генератор переменного тока, обмотка якоря которого, где наводится ЭДС, расположена на роторе, а обмотка возбуждения расположена на статоре.

В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения синхронной машины оказываются вращающимися и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток. Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь, закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения синхронной машины и обмоткой якоря возбудителя. Питание постоянным током обмотки возбуждения возбудителя осуществляется от подвозбудителя – генератора постоянного тока. Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип самовозбуждения, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора синхронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины.

В современных синхронных двигателях для возбуждения применяют тиристорные возбудительные устройства, включаемые в сеть переменного тока и осуществляющие автоматическое управление током возбуждения во всевозможных режимах работы двигателя, в том числе и переходных. Такой способ возбуждения является наиболее надежным и экономичным, так как КПД тиристорных возбудительных устройств выше, чем у генераторов постоянного тока. Выпускаются тиристорные возбудительные устройства на различные напряжения возбуждения.

В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип возбуждения постоянными магнитами, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавить машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицита материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничивается лишь машинами мощностью не более нескольких киловатт.

Характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются следующие характеристики: холостого хода, короткого замыкания, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

1. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Характеристику холостого хода снимают при постоянной номинальной скорости вращения ротора в функции тока возбуждения $E = U = f(I_f)$ (рис. 2). При изменении тока возбуждения от нуля, ЭДС и поток сначала изменяются по линейному закону, а затем, при близких к номинальным значениям тока возбуждения и ЭДС, из-за насыщения магнитной цепи характеристика холостого хода отклоняется от линейного закона. При больших насыщениях характеристика холостого хода снова становится линейной.

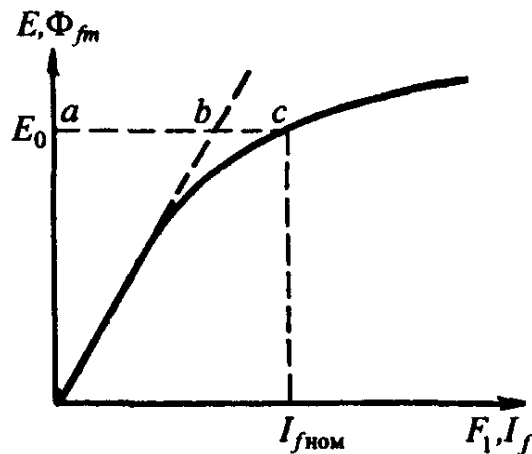


Рис. 2. Характеристика холостого хода

По характеристике холостого хода определяют коэффициент насыщения:

$$k_H = \frac{ac}{ab}. \quad (1)$$

Отрезок bc определяет МДС, приходящуюся на стальные участки магнитной системы. Если машина ненасыщенная, то характеристика холостого хода линейная. Чтобы обеспечить лучшее использование материалов, при проектировании рабочая точка выбирается на изгибе характеристики холостого хода (точка c , рис. 2). При идеальном холостом ходе ток в обмотке статора равен нулю.

Поле в воздушном зазоре создается током возбуждения, протекающим в обмотке возбуждения, и при вращении ротора в обмотке статора наводится ЭДС:

$$E_0 = 4 \cdot k_B \cdot \Phi_{fm} \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{01}. \quad (2)$$

В этой формуле не учитываются высшие гармоники. Коэффициент k_B принимается с учетом насыщения и формы воздушного зазора.

При синусоидальном поле коэффициент формы ЭДС определяется по формуле:

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11. \quad (3)$$

Полный поток возбуждения равен:

$$\Phi_{fm} = \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot B_\delta. \quad (4)$$

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия:

$$\alpha_\delta = \frac{B_{\delta, \text{cp}}}{B_\delta}, \quad (5)$$

где $B_{\delta, \text{cp}}$ – средняя индукция в воздушном зазоре.

При исследовании характеристики холостого хода сначала при увеличении тока возбуждения строят восходящую ветвь, а затем при уменьшении – нисходящую. При расчетах используется средняя кривая.

Гистерезис в синхронных машинах имеет место из-за того, что ротор не перемагничивается, и по его сердечнику замыкается постоянный поток возбуждения.

2. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

Одной из важных характеристик синхронного генератора является характеристика короткого замыкания – зависимость тока статора от тока возбуждения $I_K = f(I_B)$ при симметричном коротком замыкании на выводах статора при номинальной скорости вращения ротора.

Зависимость тока короткого замыкания в обмотке статора от тока возбуждения снимается при постепенном повышении тока возбуждения.

Ток статора изменяется от нуля до значения $1,25 \cdot I_{\text{ном}}$. Эта зависимость линейная, так как генератор не насыщен.

Индуктивный характер тока при коротком замыкании определяется индуктивным сопротивлением обмотки статора, которое значительно больше активного сопротивления обмотки (в относительных единицах $R = 0,01-0,001$, а $X = 1,0-2,5$).

Ток короткого замыкания может быть определен как:

$$I_{\text{к}} = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (6)$$

где E_0 – ЭДС, соответствующая току возбуждения $I_{\text{в0}}$, которая определяется по характеристике холостого хода (рис. 3).

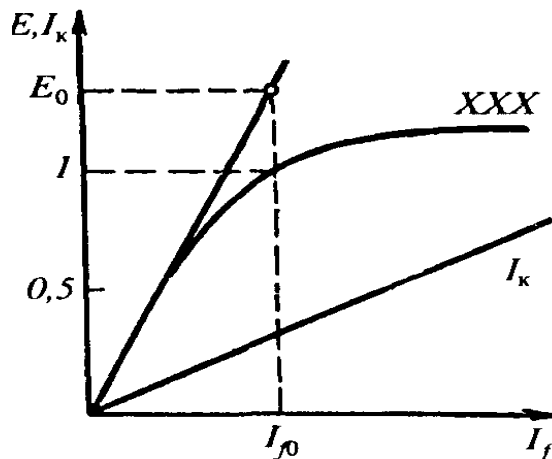


Рис. 3. Характеристики холостого хода (XXX) и короткого замыкания

Пренебрегая активным сопротивлением, ток короткого замыкания можно считать чисто индуктивным:

$$I_{\text{к}} = \frac{E_0}{X}. \quad (7)$$

Таким образом, по характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания можно определить опытным путем значение индуктивного сопротивления обмотки статора X :

$$X = \frac{E_0}{I_{\text{к}}}. \quad (8)$$

Отношение короткого замыкания представляет собой отношение тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению при холостом ходе, к току возбуждения, соответствующему номинальному току статора при опыте короткого замыкания (рис. 4).

$$K_{\text{окз}} = \frac{I_{\text{в0ном}}}{I_{\text{в.к.ном}}} \quad (9)$$

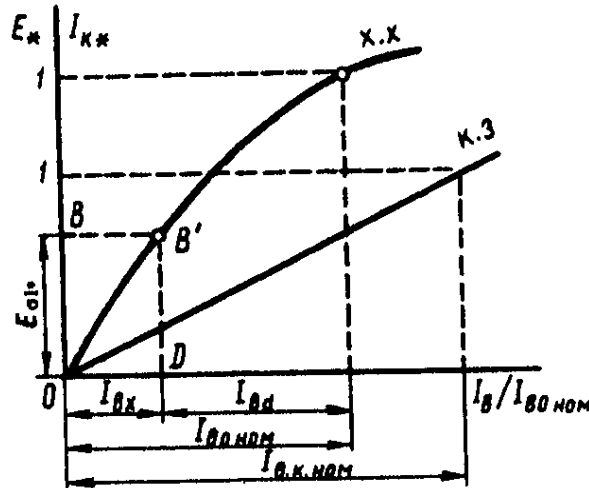


Рис. 4. Определение кратности тока короткого замыкания

Характеристики холостого хода и короткого замыкания дают возможность определить значения токов возбуждения двух составляющих: одна компенсирует падения напряжения в цепи статора $I_{\text{вх}}$, а другая компенсирует размагничивающее влияние реакции статора $I_{\text{ад}}$.

Отношение короткого замыкания также, как и индуктивное сопротивление обмотки статора X , определяет перегрузочную способность синхронной машины. Чем больше $K_{\text{окз}}$, тем больше предельная нагрузка. $K_{\text{окз}}$ тем больше, чем больше воздушный зазор, т.е. при той же мощности меньше концентрация энергии магнитного поля. Такие машины требуют больших вложений материалов, что увеличивает их стоимость. У турбогенераторов $K_{\text{окз}} = 0,4-1,0$, а гидрогенераторов $K_{\text{окз}} = 0,8-1,8$.

$$K_{\text{окз}} = \frac{U_{\text{ном}}}{X \cdot I_{\text{ном}}} = \frac{1}{X} \quad (10)$$

Отношение короткого замыкания имеет большое практическое значение при оценке свойств синхронной машины. Машины с малым $K_{\text{окз}}$

менее устойчивы при параллельной работе с сетью и имеют значительные колебания напряжения при изменениях нагрузки. Но такие машины имеют меньшие габариты и, следовательно, дешевле, чем машины с большим $K_{окз}$.

3. Внешние характеристики синхронного генератора

Внешними характеристиками синхронного генератора называются зависимости $U = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, снятые при неизменном токе возбуждения $I_B = \text{const}$.

На рис. 5 показаны внешние характеристики синхронного генератора в относительных единицах при активной (R), индуктивной (L) и емкостной (C) нагрузках.

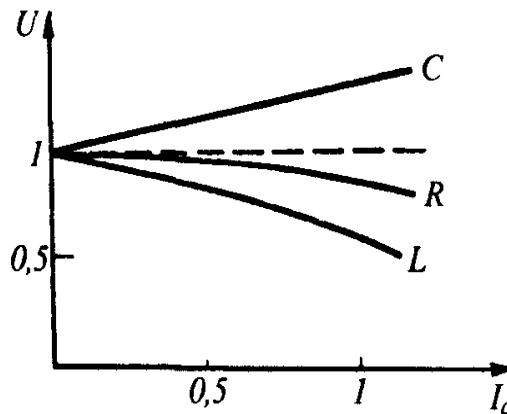


Рис. 5. Внешние характеристики синхронного генератора

При увеличении тока активной нагрузки I_a напряжение на выходе генератора уменьшается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины $z_a = r_a + jx_{\sigma a}$ и влияния поперечной реакции статора.

При индуктивной нагрузке за счет более сильного размагничивающего действия продольной реакции статора внешняя характеристика идет ниже внешней характеристики при активной нагрузке.

При емкостной нагрузке реакция статора подмагничивающая, поэтому с ростом нагрузки растет напряжение на выводах генератора.

В процентном отношении внутреннее сопротивление машины по отношению к сопротивлению нагрузки обычно составляет небольшое значение, поэтому можно реакцию статора при активной нагрузке считать без учета индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора.

В машинах небольшой мощности поперечная реакция статора (чисто активный ток), при наличии в нагрузке емкости, будет компенсировать индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора машины.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора $\Delta U_{ном}$

называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения.

Номинальное изменение напряжения определяется по формуле:

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{E_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \% \quad (11)$$

4. Регулировочная характеристика синхронного генератора

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока статора $I_f = f(I_a)$ при постоянном напряжении $U = \text{const}$, постоянной скорости вращения $n = \text{const}$ и неизменном $\cos\varphi$ нагрузки.

Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным (рис. 6).

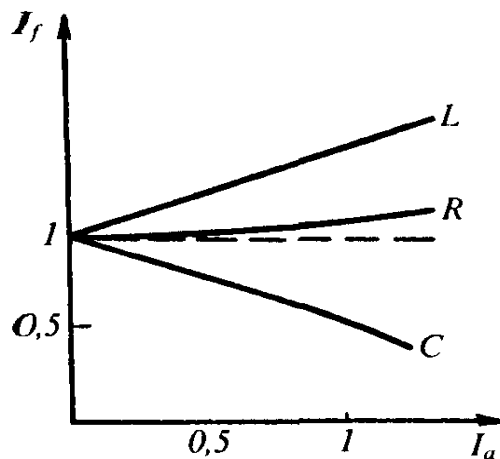


Рис. 6. Регулировочные характеристики синхронного генератора при разных видах нагрузки

Регулировочные характеристики могут быть построены, если известны внешние характеристики. При увеличении индуктивной нагрузки напряжение уменьшается. Чтобы напряжение оставалось неизменным, надо увеличивать ток возбуждения. При емкостной нагрузке при увеличении тока в статоре машины напряжение на выводах генератора растёт. Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения.

Так же, как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны. При нагрузках, близких к номинальному значению, из-за насыщения магнитопровода, регулировочные характеристики становятся нелинейными.

При работе синхронного генератора на емкостную нагрузку магнитное поле в машине создается током возбуждения и реактивными токами, протекающими в статоре. При небольших зазорах в синхронной машине, работающей на емкостную нагрузку, может наступить самовозбуждение, когда при отключенной обмотке возбуждения ($I = 0$) на выводах генератора появится напряжение. Это явление называется самовозбуждением синхронной машины.

5. Нагрузочная характеристика синхронного генератора

Нагрузочная характеристика – это зависимость напряжения на генераторе от тока возбуждения $U = f(I_f)$ при постоянных значениях тока статора $I = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$ нагрузки и скорости вращения $n = \text{const}$ (рис. 7).

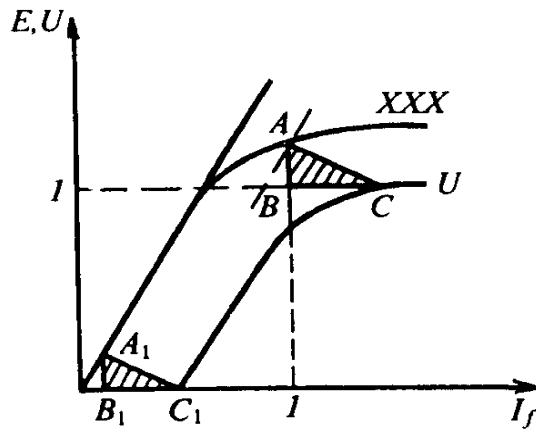


Рис. 7. Нагрузочная характеристика и реактивный треугольник

При изменении напряжения ток в статоре поддерживается неизменным путем регулирования сопротивления нагрузки. Нагрузочные характеристики снимают только при индуктивной нагрузке. Поэтому и называют зависимость $U = f(I_f)$ при $\cos\varphi = 0 = \text{const}$ индукционной нагрузочной характеристикой.

Индукционная нагрузочная характеристика является вспомогательной характеристикой и используется для определения индуктивного сопротивления рассеяния. Для этого необходимо иметь характеристику холостого хода и индукционную нагрузочную характеристику, снятые опытным путем. Имея эти характеристики, можно построить реактивный треугольник ABC . В треугольнике ABC катет AB равен падению напряжения в сопротивлении рассеяния статора ($I_a \cdot X_{\sigma a}$), а горизонтальный катет BC равен МДС реакции статора в масштабе тока возбуждения, в котором построены характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика.

Реактивный треугольник показывает, что уменьшение напряжения при снятии нагрузочной характеристики происходит вследствие падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $X_{\sigma a}$ (катет AB) и размагничивающего действия реакции статора (катет BC).

Если известны катеты реактивного треугольника, то по характеристике холостого хода (XXX) можно построить нагрузочную характеристику, передвигая реактивный треугольник параллельно самому себе (треугольник $A_1B_1C_1$). Если имеется снятые опытным путем XXX и нагрузочная характеристика, можно определить $X_{\sigma a}$, зная продольную реакцию статора (катет BC в масштабе тока возбуждения):

$$X_{\sigma a} = \frac{AB}{I_{ном}}. \quad (12)$$

Приблизленно катеты реактивного треугольника определяются по спрямленной XXX так, как это показано на рис. 7.

Рассмотренные характеристики дают возможность судить об основных электромагнитных показателях машины. Однако о КПД и о распределении тепловых полей по ним судить нельзя.

6. Потери и КПД синхронного генератора

Преобразование энергии в синхронном генераторе происходит следующим образом.

К валу синхронного генератора от первичного двигателя подводится механическая мощность P_1 . Часть этой мощности расходуется на механические потери $P_{мех}$ в генераторе, на магнитные потери в стали статора $P_{ст}$, добавочные потери в стали статора и ротора $P_{доб}$. Остальная часть мощности преобразуется в электрическую мощность и передается магнитным полем в статор.

Полная электрическая мощность, получаемая в результате преобразования механической мощности, называется электромагнитной мощностью. Магнитные потери в сердечнике статора у генератора покрываются непосредственно за счет механической мощности со стороны вала и в электромагнитную мощность не входят. Электромагнитная мощность трехфазного синхронного генератора равна:

$$P_{эм} = 3 \cdot E_0 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi. \quad (13)$$

Преобразование энергии в синхронном генераторе связано с потерями энергии. Все виды потерь в синхронной машине разделяются на основные и добавочные.

Основные потери в синхронном генераторе состояются из электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, магнитных и механических потерь.

Электрические потери в обмотке статора:

$$P_{\text{Эл1}} = 3 \cdot r_1 \cdot I_1^2, \quad (14)$$

где r_1 – активное сопротивление одной фазы обмотки статора при расчетной рабочей температуре:

$$r_1 = r_1 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)), \quad (15)$$

где r_1 – активное сопротивление одной фазы обмотки статора при температуре T_1 , отличающейся от расчетной рабочей; $\alpha = 0,004$.

Потери на возбуждение:

а) при возбуждении от отдельного возбуждательного устройства:

$$P_f = I_{f\text{НОМ}}^2 \cdot R_f + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_B, \quad (16)$$

где R_f – активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной рабочей температуре; $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$ – падение напряжения в контакте щеток.

Сопротивление обмотки возбуждения без учета вытеснения тока определяют по формуле и приводят к расчетной температуре:

$$R_f = R_f' \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)), \quad (17)$$

где R_f' – активное сопротивление при температуре T_1 , отличающейся от расчетной рабочей;

б) при возбуждении от генератора постоянного тока (возбудителя), сочлененного с валом синхронной машины:

$$P_f = \frac{I_{f\text{НОМ}}^2 \cdot R_f + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{f\text{НОМ}}}{\eta_f}, \quad (18)$$

где η_f – КПД возбудителя ($\eta_f = 0,8-0,85$).

Если обмотка возбуждения питается от собственного возбудителя, расположенного на валу приводного двигателя, то мощность, идущая на возбуждение генератора, а также на потери в возбудителе, следует прибавить к мощности P_1 . При независимом возбуждении к P_1 прибавляется мощность, расходуемая в обмотке возбуждения генератора. Для схем с самовозбуждением мощность возбуждения вычитается из $P_{ЭМ}$, так как на возбуждение машины расходуется часть электрической мощности.

Если возбуждение бесконтактное, эта составляющая потерь отсутствует. Магнитные потери в синхронном генераторе происходят в сердечнике статора, который подвержен перемагничиванию вращающимся магнитным полем. Эти потери состоят из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов:

$$P_{СТ} = P_{ЭМ} - P_{Эл} - P_{ДОБ} - P_2. \quad (19)$$

Механические потери (Вт), равные сумме потерь на трение в подшипниках и потерь на вентиляцию (при самовентиляции машины):

$$P_{МЕХ} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{g_2}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{10^3 \cdot l_1}, \quad (20)$$

где $g_2 = \frac{\pi \cdot n_1 \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta)}{60}$ – окружная скорость на поверхности полюсного наконечника ротора, м/с; l_1 – конструктивная длина сердечника статора, мм.

Добавочные потери при нагрузке $P_{ДОБ}$ в синхронном генераторе определяют в процентах от полезной мощности генератора. Для синхронных машин мощностью до 1000 кВт добавочные потери при нагрузке принимают равными 0,5 %, а для машин мощностью более 1000 кВт : 0,25–0,4 %.

Суммарные потери в синхронном генераторе:

$$\Sigma P = P_{МЕХ} + P_f + P_{СТ} + P_{Эл1} + P_{ДОБ}. \quad (21)$$

Оставшаяся мощность отдается генератором в сеть (активная мощность, отбираемая от генератора при его номинальной нагрузке). Мощность P_2 является полезной мощностью генератора:

$$P_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi, \quad (22)$$

здесь U_1 и I_1 – фазные значения напряжения и тока статора.

КПД синхронного генератора:

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}. \quad (23)$$

КПД синхронного генератора зависит от величины нагрузки $\beta = P_2/P_{\text{ном}}$ и от ее характера ($\cos\varphi$). Графики этой зависимости представлены на рис. 8.

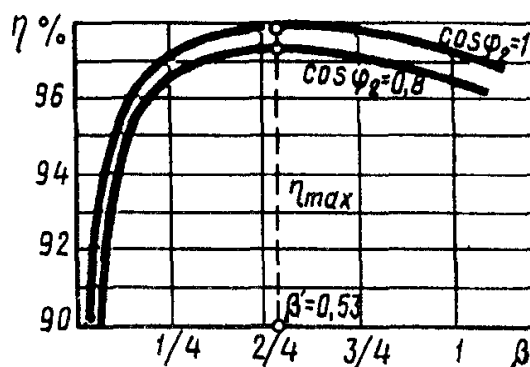


Рис. 8. График зависимости КПД и $\cos\varphi$ от величины нагрузки β

КПД синхронных машин мощностью до 100 кВт составляет (80–90) %, у более мощных машин КПД достигает (92–99) %. Более высокие значения КПД относятся к турбо и гидрогенераторам мощностью в десятки и даже сотни тысяч киловатт.

Подводимая механическая мощность P_1 определяется по формуле:

$$P_1 = P_2 + \sum P. \quad (24)$$

Практическая часть

Задание на выполнение лабораторной работы

1. Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
2. Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.
3. Снять и построить характеристику холостого хода синхронного генератора. Определить коэффициент насыщения при номинальном значении тока возбуждения.
4. Снять и построить характеристику короткого замыкания синхронного генератора. По характеристике холостого хода и характеристике короткого

замыкания определить опытным путем значение E_0 и рассчитать значение индуктивного сопротивления обмотки статора X . Определить отношение короткого замыкания синхронного генератора $K_{\text{окз}}$ при $E_0 = U_{\text{ном}}$.

5. Снять и построить внешние характеристики синхронного генератора. Определить номинальное изменение напряжения синхронного генератора.

6. Снять и построить регулировочные характеристики синхронного генератора.

7. Снять и построить нагрузочную характеристику синхронного генератора. Построить реактивный треугольник. Определить индуктивное сопротивление рассеяния $X_{\text{са}}$.

8. Рассчитать потери синхронного генератора при различных значениях тока нагрузки и построить график зависимости КПД от тока нагрузки. Определить потери и КПД синхронного генератора при номинальной нагрузке.

Порядок работы с лабораторной установкой

ПРИМЕЧАНИЕ 1

1. Перед началом работы необходимо тщательно изучить настоящие методические указания и подробно ознакомиться со схемой предстоящей лабораторной работы.

2. Приступая к работе, следует установить все тумблеры в нижнее положение, соответствующее их отключенному состоянию, а ручки регуляторов (резисторов) установить в крайнее левое положение («0») – против часовой стрелки. Ручки регуляторов при работе поворачивать плавно, без резких движений.

3. Сборку схемы производить только при отключенном питании стенда. После окончания сборки схемы совместно с преподавателем тщательно проверить правильность соединений на соответствие рисункам, прилагаемым к лабораторным работам. Убедиться в отсутствии коротких замыканий в монтаже схемы.

ПРИМЕЧАНИЕ 2

При включении автоматического выключателя «СЕТЬ»:

1) по двум нижним рядам цифровых табло лицевой панели стенда должна пробежать бегущая строка «HELLO»;

2) на всех цифровых табло должны установиться нули («0»).

Если какое-либо из этих пунктов не выполняется – отключить выключатель «СЕТЬ», выполнить п. 2 Прим. 1 и включить его снова!

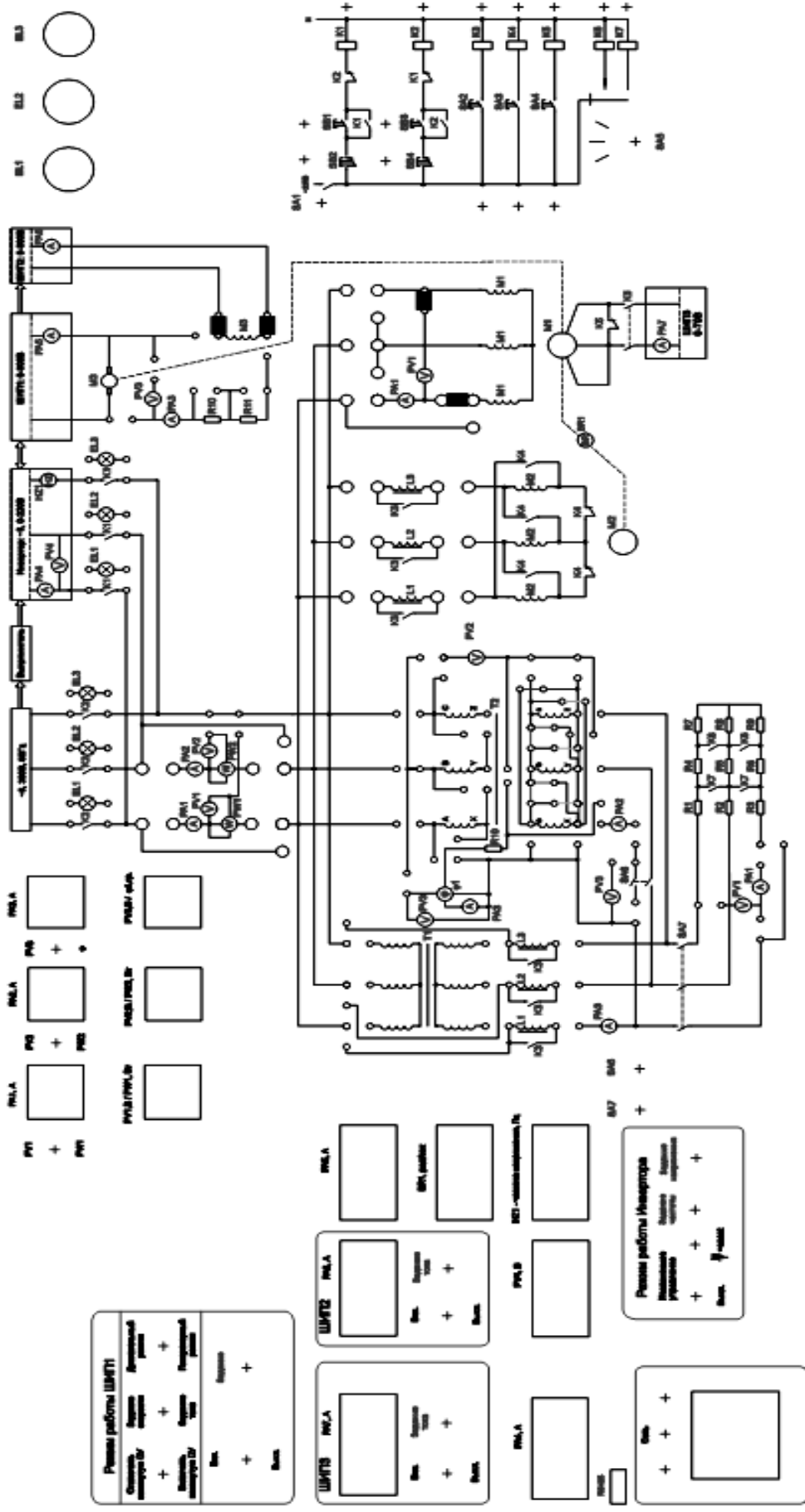


Рис. 9. Схема коммутации опыта холостого хода

1. Опыт холостого хода синхронного генератора

Изучить принципиальную схему стенда.

Для исследования синхронного генератора (машина М1) собрать схему, представленную на рис. 9.

Опыт проводить в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1;
- установить переключатель SA4 в положение «Включено», подключив обмотку возбуждения машины М1 к источнику постоянного тока (ШИП3);
 - с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 установить значение равное нулю (контролировать по прибору РА7);
 - включить ШИП2 и установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный 0,4 А (контролировать по прибору РА6);
 - включить режим работы ШИП1: «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ»;
 - включить ШИП1;
 - с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения ротора машины М1 равную 104 рад/с (контролировать по прибору BR1);
 - с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 увеличивать значение тока возбуждения машины М1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = 1,3U_H$ (контролировать по прибору PV1), а затем постепенно уменьшать ток возбуждения машины М1 до нуля (контролировать по прибору РА7, см. табл. 1);
 - измерить ЭДС синхронного генератора (машины М1) при разных значениях тока возбуждения машины М1 (при намагничивании и размагничивании);
 - данные занести в табл. 1.

Таблица 1

Данные опыта холостого хода:

$$(PV1) = E_0 = U_{\text{НОМ}} = 170 \text{ В}; I_{\text{В НОМ}} = 5,5 \text{ А.}$$

№	НАГНИЧИВАНИЕ			
	Установка	Замер	Расчет	
	РА7	PV1		
	$I_B, \text{ А}$	$E_0, \text{ В}$	I_B^*	E_0^*
1	0,3			
2	1,7			
3	2,5			
4	3,4			
5	4,4			
6	5,4			

№	РАЗМАГНИЧИВАНИЕ			
	Установка	Замер	Расчет	
	РА7	PV1		
	I_B, A	E_0, B	I_B^*	E_0^*
1	5,4			
2	4,4			
3	3,4			
4	2,5			
5	1,7			
6	0,3			

Завершив эксперимент, необходимо:

– с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1 равную нулю (контролировать по прибору BR1);

– выключить ШИП1;

– установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный нулю (контролировать по прибору РА6);

– выключить ШИП2;

– выключить выключатель SA1;

– выключить выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений и вычислений построить характеристики холостого хода.

Снятые показания приборов при увеличении тока возбуждения (при намагничивании) соответствуют восходящей ветви характеристики холостого хода, а при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании) – нисходящей ветви.

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС генератора в режиме холостого хода E_0 от тока возбуждения I_B при номинальной скорости вращения $n_2 = n_1$.

Характеристику холостого хода принято строить в относительных единицах:

$$E_0^* = f(I_B^*), \quad (25)$$

$$\text{где } E_0^* = \frac{E_0}{U_{\text{НОМ}}}, \quad I_B^* = \frac{I_B}{I_{B,\text{НОМ}}}.$$

За характеристику холостого хода принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями характеристики.

ВНИМАНИЕ!

При снятии данных восходящей ветви характеристики холостого хода необходимо, чтобы изменение тока возбуждения происходило только в направлении нарастания, при снятии данных нисходящей ветви – только в направлении убывания.

2. Опыт короткого замыкания синхронного генератора

Опыт проводить по схеме на рис. 10 в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1;
- установить переключатель SA4 в положение «Включено» и подключить обмотку возбуждения машины M1 к источнику постоянного тока (ШИПЗ);
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИПЗ установить значение, равное нулю (контролировать по прибору PA7);
- включить ШИП2 и установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины M3, равный 0,4 А (контролировать по прибору PA6);
- включить режим работы ШИП1: «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ»;
- включить ШИП1 и с помощью регулятора «Задание скорости» установить синхронную скорость вращения ротора машины M1, равную 104 рад/с (по прибору BR1);
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИПЗ увеличивать значение тока возбуждения машины M1 до значения, при котором ток статора достигнет значения $1,25I_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PA7);
- через приблизительно одинаковые интервалы тока возбуждения (контролировать по прибору PA7) измеряют ток статора (контролировать по прибору PA1). Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

Данные опыта короткого замыкания: $I_{1 \text{ ном}} = 1,5 \text{ А}$.

№	Установка		Замер		Расчет	
	РА7		РА1			
	$I_{\text{В}}, \text{ А}$		$I_{1\text{К}}, \text{ А}$		$I_{\text{В}}^*$	$I_{1\text{К}}^*$
1	0,4					
2	1,9					
3	2,8					
4	4,5					
5	5,5					

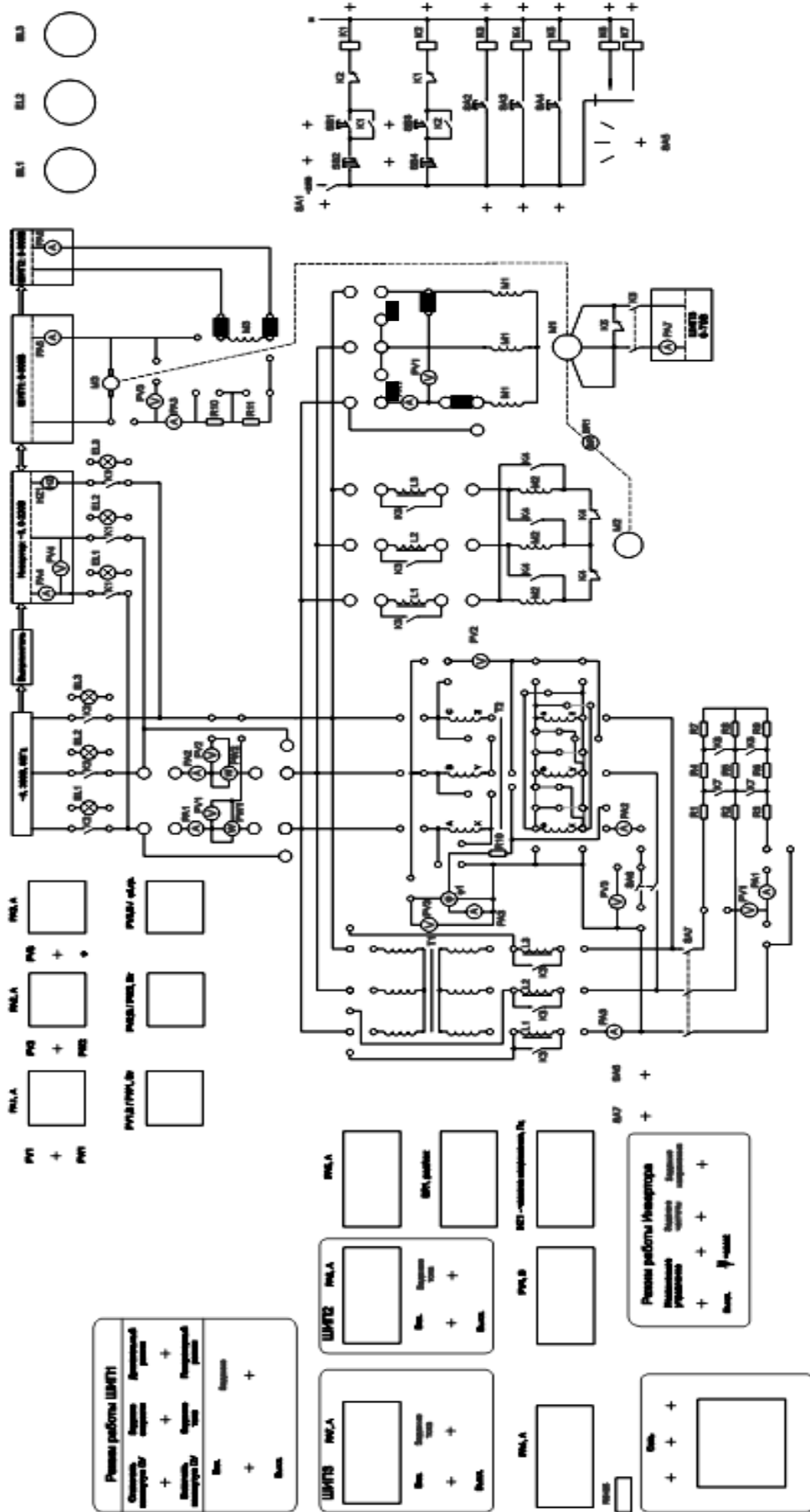


Рис. 10. Схема коммутации опыта короткого замыкания

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1, равную нулю (контролировать по прибору ВР1);
- выключить ШИП1;
- установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный нулю (контролировать по прибору РА6);
- выключить ШИП2;
- выключить выключатель SA1;
- выключить выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить характеристику короткого замыкания.

По характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания определить $K_{окз}$ (отношение короткого замыкания) и значение индуктивного сопротивления обмотки статора X .

ВНИМАНИЕ!

Ток статора не должен превысить $1,5 \cdot I_H$ исследуемого синхронного генератора. Продолжительность каждого отсчета не должна превышать 10 с. Опыт требует хорошей организации и слаженной работы студентов.

3. Исследование внешних характеристик синхронного генератора

Для исследования внешних характеристик синхронного генератора (машина М1) собрать схему, представленную на рис. 11.

Опыт проводить в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1;
- установить переключатель SA4 в положение «Включено» и подключить обмотку возбуждения машины М1 к источнику постоянного тока (ШИП3);
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 установить значение, равное нулю (контролировать по прибору РА7);
- включить ШИП2 и установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный 0,4 А (контролировать по прибору РА6);

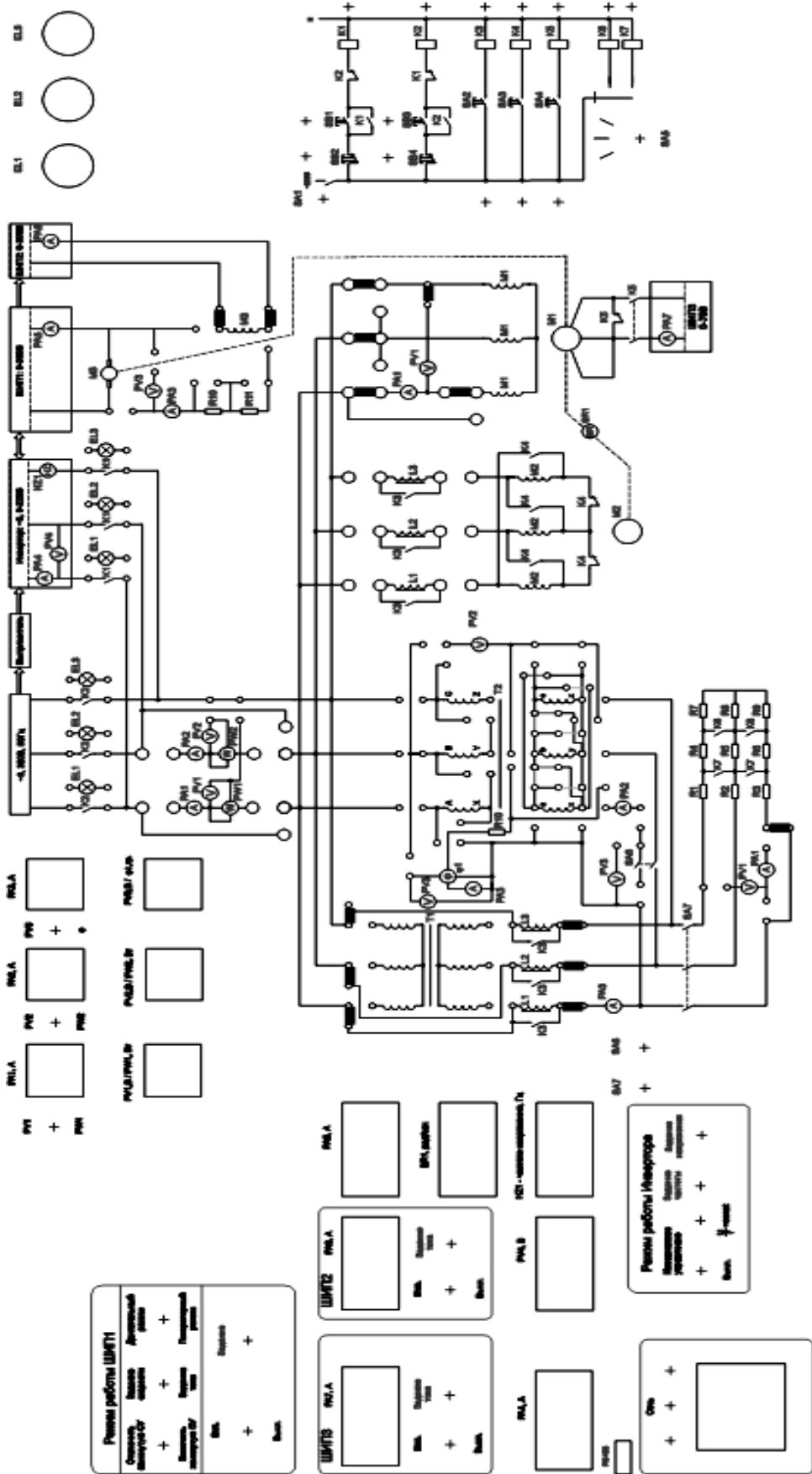


Рис. 11. Схема коммутации опыта снятия внешней характеристики

– включить режим работы ШИП1: «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ», включить ШИП1;

– с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения ротора машины М1, равную 104 рад/с (контролировать по прибору BR1);

– с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 увеличить значение тока возбуждения машины М1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = U_{ном}$ (контролировать по прибору PV1);

– с помощью переключателей (SA7, SA5, SA2) изменять величину активной нагрузки и измерять ток (контролировать по прибору PA1) и напряжение синхронного генератора (машины М1), контролировать по прибору PV1 (см. табл. 3);

– с помощью переключателя SA2 изменять величину индуктивной нагрузки и измерять ток (контролировать по прибору PA1) и напряжение синхронного генератора (машины М1) (контролировать по прибору PV1);

– данные занести в табл. 3.

Таблица 3

Данные опыта внешней (рабочей) характеристики

АКТИВНАЯ НАГРУЗКА								
№	Переключатель			Установка	Замер			Расчет
	SA7	SA5	SA2	PA7	PV1	PA1	PA3	
				I_B, A	U_1, B	I_1, A	I_1, A	$P_2, Вт$
1	0	0	1	5,5		0	0	
2	1	0	1	5,5				
3	1	1	1	5,5				
4	1	2	1	5,5				

ИНДУКТИВНАЯ НАГРУЗКА								
№	Переключатель			Установка	Замер			Расчет
	SA7	SA5	SA2	PA7	PV1	PA1	PA3	
				I_B, A	U_1, B	I_1, A	I_1, A	$P_2, Вт$
1	0	0	0	3,6		0	0	
2	1	0	0	3,6				
3	1	1	0	3,6				
4	1	2	0	3,6				

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1, равную нулю (контролировать по прибору BR1);
- выключить ШИП1;
- установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный нулю (контролировать по прибору РА6);
- выключить ШИП2;
- выключить выключатель SA1;
- выключить выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить внешние характеристики синхронного генератора.

По внешним характеристикам определить номинальное изменение напряжения синхронного генератора в % по формуле (11).

4. Исследование регулировочных характеристик синхронного генератора

Для исследования регулировочных характеристик синхронного генератора собрать схему, представленную на рис. 11.

Опыт проводить в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1;
- установить переключатель SA4 в положение «Включено» и подключить обмотку возбуждения машины М1 к источнику постоянного тока (ШИП3).
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 установить значение, равное нулю (контролировать по прибору РА7);
- включить ШИП2 и установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный 0,4 А (контролировать по прибору РА6);
- включить режим работы ШИП1 «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ»;
- включить ШИП1;
- с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения ротора машины М1, равную 104 рад/с (контролировать по прибору BR1);
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 увеличить значение тока возбуждения машины М1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = U_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PV1);
- с помощью переключателей SA7, SA5 (см. табл. 4) изменять величину **активной** нагрузки синхронного генератора (машины М1);

– с помощью регулятора «Задание тока» ШИПЗ изменять значение тока возбуждения машины М1 так, чтобы напряжение на выходе генератора в течение опыта оставалось неизменным и равным номинальному $U_1 = U_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PV1);

– измерить ток нагрузки (контролировать по прибору PA1) и ток возбуждения синхронного генератора (контролировать по прибору PA7), данные занести в табл. 4;

– с помощью переключателей SA7, SA5 (см. табл. 4) изменять величину **индуктивной** нагрузки синхронного генератора (машины М1);

– с помощью регулятора «Задание тока» ШИПЗ изменять значение тока возбуждения машины М1 так, чтобы напряжение на выходе генератора в течение опыта оставалось неизменным и равным номинальному $U_1 = U_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PV1);

– измерить ток нагрузки (контролировать по прибору PA1) и ток возбуждения синхронного генератора (контролировать по прибору PA7), данные занести в табл. 4.

Таблица 4

Данные опыта регулировочной характеристики

АКТИВНАЯ НАГРУЗКА							
№	Переключатель		Установка			Замер	
	SA7	SA2	SA5	PA7	PV1	PA1	PA3
				I_B, A	U_1, B	I_1, A	I_1, A
1	0	1	0	2,8	95		
2	1	1	0	4,0	95		
3	1	1	1	4,6	95		
4	1	1	2	5,4	95		

ИНДУКТИВНАЯ НАГРУЗКА							
№	Переключатель		Установка			Замер	
	SA7	SA2	SA5	PA7	PV1	PA1	PA3
				I_B, A	U_1, B	I_1, A	I_1, A
1	0	0	0	3,2	105		
2	1	0	0	4,4	105		
3	1	0	1	4,7	105		
4	1	0	2	4,9	105		

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1, равную нулю (контролировать по прибору BR1);

- выключить ШИП1;

- установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный нулю (контролировать по прибору РА6);

- выключить ШИП2;

- выключить выключатель SA1;

- выключить выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить регулировочные характеристики.

По регулировочным характеристикам определить номинальное изменение тока возбуждения в % :

$$\Delta I_{В.НОМ} = \frac{I_{В.НОМ} - I_{В.0.НОМ}}{I_{В.0.НОМ}} \cdot 100 \%, \quad (26)$$

где $I_{В.0.НОМ}$ и $I_{В.НОМ}$ – значения токов возбуждения, соответствующие номинальному напряжению генератора $U_{НОМ}$ при номинальной нагрузке и в режиме холостого хода соответственно.

5. Исследование индукционной нагрузочной характеристики синхронного генератора

Опыт проводить по схеме на рис. 11 в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;

- включить выключатель SA1;

- установить переключатель SA4 в положение «Включено» и подключить обмотку возбуждения машины М1 к источнику постоянного тока (ШИП3).

- с помощью регулятора «Задание тока» ШИП3 установить значение, равное нулю (контролировать по прибору РА7);

- включить ШИП2 и установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный 0,4 А (контролировать по прибору РА6);

- включить режим работы ШИП1 «Задание скорости» и «Включить замкнутую СУ»;

- включить ШИП1;

- с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить синхронную скорость вращения ротора машины М1, равную 104 рад/с (контролировать по прибору BR1);

– с помощью регулятора «Задание тока» ШИПЗ увеличить значение тока возбуждения машины М1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $U_1 = U_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PV1);

– с помощью индуктивной нагрузки (см. табл. 5) нагрузить генератор (машину М1) до значения, при котором ток статора станет равным $I_1 = 0,5I_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PA1);

– затем, постепенно уменьшая ток возбуждения (РА7) генератора (машины М1), измерить напряжение генератора (контролировать по прибору PV1) при разных значениях тока возбуждения (по прибору РА7), поддерживая постоянным с помощью индуктивной нагрузки (переключателями SA7 и SA5) ток статора равным $I_1 = 0,5I_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PA1), данные занести в табл. 5.

Таблица 5

Данные опыта индукционной нагрузочной характеристики:

SA2 = 0 (не включать); SA7 = 1 (включить); $I_{\text{н}} = 1,3 \text{ А}$.

№	Переключатель	Установка		Замер	
	SA5	PA1	PA3	PA7	PV1
		$I_1 = 0,5I_{\text{н}}, \text{ А}$		$I_{\text{в}}, \text{ А}$	$U_1, \text{ В}$
1	$U_1 = U_{\text{н}} (\text{XX})$			5,5	170
2	2	0,6	0,6		
3	1	0,6	0,6		
4	0	0,6	0,6		

Завершив эксперимент, необходимо:

– с помощью регулятора «Задание скорости» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1, равную нулю (контролировать по прибору BR1);

– выключить ШИП1;

– установить с помощью регулятора «Задание тока» ток в обмотке возбуждения машины М3, равный нулю (контролировать по прибору PA6);

– выключить ШИП2;

– выключить выключатель SA1;

– выключить выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить индукционную нагрузочную характеристику и реактивный треугольник. Определить по формуле (12) индуктивное сопротивление рассеяния $X_{\text{са}}$.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
2. Объясните назначение тиристорного преобразователя в системе самовозбуждения синхронного генератора.
3. Объясните устройство явнополюсных и неявнополюсных роторов.
4. Объясните устройство синхронного генератора.
5. Какие применяются способы крепления полюсов в явнополюсных синхронных машинах?
6. Чем обеспечивается неравномерный воздушный зазор в синхронных машинах?
7. Из каких участков состоит магнитная цепь явнополюсной синхронной машины?
8. Опишите явление реакции статора?
9. Каково действие реакции статора синхронного генератора при активной, индуктивной и емкостной нагрузках?
10. Почему характеристика короткого замыкания синхронной машины имеет вид прямой линии?
11. Что такое ОКЗ и как влияет этот параметр на свойства синхронного генератора?
12. Что такое номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки и почему при емкостной нагрузке его величина отрицательна?
13. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
14. Можно ли регулировать напряжение синхронного генератора изменением скорости вращения ротора?
15. Почему характеристики холостого хода синхронного генератора при намагничивании и размагничивании не совпадают?
16. Почему внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора, снятые при разных видах нагрузки, не совпадают?

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы № 7
на стенде НТЦ-23

Составители: **Рылов Юрий Анатольевич,
Баженов Николай Георгиевич,
Магданов Геннадий Саяфович**

Кафедра электрического транспорта КГЭУ

Редактор издательского отдела *Т.В. Андреева*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 08.07

Формат 60×84/16. Бумага «Business». Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,06. Тираж 500 экз. Заказ 4641

Редакционно-издательский отдел КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51