

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»



А. С. Вершинин

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 7-07-0712-01
«Энергетика и электротехника»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
2026

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.311(075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией
факультета компьютерных наук и электроники
в качестве методических указаний (протокол № 10 от 22.06.2023 г.)

Кафедра энергетики и электроники

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Производство электроэнергии» А. С. Вершинина использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Технические требования:

1 оптический диск.

Системные требования:

PC с процессором не ниже Core 2 Duo;

2 Gb RAM; свободное место на HDD 2 Mb;

Windows XP/7/8/8.1/10

привод CD-ROM/DVD-ROM;

мышь

ВЕРШИНИН Александр Сергеевич

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 7-07-0712-01
«Энергетика и электротехника»

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Подписано к использованию 06.05.2026.

Объем издания 1,1 Мб. Заказ 221.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	5
Лабораторная работа 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В НАГРУЖЕННОМ РЕЖИМЕ СО СМЕШАННОЙ НАГРУЗКОЙ	17
Лабораторная работа 3 ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ СИНХРОНИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕЖДУ СОБОЙ И СЕТЬЮ.....	29
Лабораторная работа 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД И ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ И ВЕЛИЧИНЕ НАГРУЗКИ	42

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Цель работы: изучить поведение характеристик холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) как функциональных зависимостей и приобрести практические навыки экспериментального снятия этих характеристик.

Основные теоретические положения

Синхронная машина (СМ) – машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора постоянна (скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора) и не зависит от нагрузки. СМ обратима, т.е. она может работать и в режиме генератора, и в режиме двигателя.

В режиме генератора постоянную скорость должен поддерживать первичный двигатель независимо от электрической нагрузки. В режиме двигателя постоянная скорость поддерживается автоматически независимо от механической нагрузки на его валу.

Между частотой тока f и скоростью вращения ротора синхронного генератора (СГ) n_0 существует жесткая связь:

$$f = \frac{n_0 p}{60},$$

где p – число пар полюсов СГ; n_0 измеряется в оборотах в минуту.

Для получения источника тока частотой f необходимо, чтобы первичный двигатель (ПД) вращал ротор СГ со скоростью $n_0 = 60 f/p$, т.е. с синхронной скоростью. Если $f = 50$ Гц, а $p = 1$, то $n_0 = 3000$ об/мин; $p = 2$, $n_0 = 1500$ об/мин; $p = 3$, $n_0 = 1000$ об/мин и т.д.

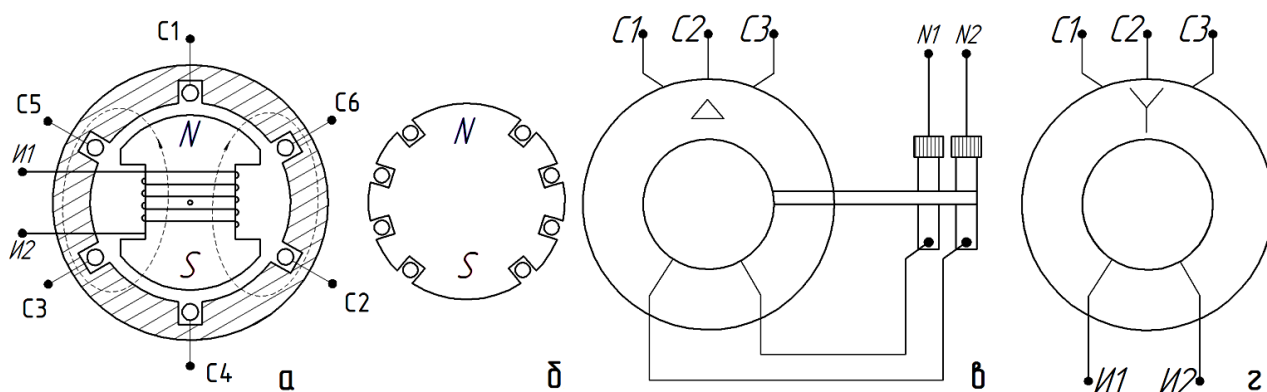
Устройство трехфазного синхронного генератора

Конструктивно трехфазный СГ состоит из неподвижного статора (якоря) и вращающегося внутри него ротора (индуктора).

Статор СГ вместе с обмотками аналогичен статору асинхронной машины. Трехфазная обмотка статора СГ является источником трехфазной ЭДС, к которой подключаются потребители электрической энергии.

Ротор представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения (ОВ) которого питается постоянным током от независимого источника. Он может иметь явно выраженные полюсы (рисунок 1, а) или быть неявнополюсным (рисунок 1, б).

Явнополюсные роторы имеют, например, синхронные генераторы, первичными двигателями для которых служат тихоходные гидротурбины со скоростями не более 1000 об/мин, а более прочный неявнополюсный ротор используется в быстроходных турбогенераторах со скоростями 1500 или 3000 об/мин.



а – основные конструктивные элементы и обмотки; *б* – неявнополюсный ротор; *в* – схема подключения обмотки возбуждения; *г* – условные графические обозначения

Рисунок 1. – Синхронная машина

Ротор и статор могут иметь несколько пар полюсов, но число пар полюсов должно быть одинаковым.

Ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает от сети постоянного тока через неподвижные щетки и контактные кольца, закрепленные на втулке изолятора и вращающиеся вместе с ротором (см. рисунок 1, в).

Условное графическое обозначение СМ показано на рисунке 1, г.

Принцип действия трехфазного синхронного генератора

В режиме генератора обмотка возбуждения подключается через контактные кольца к источнику постоянного тока. В качестве источника применяется отдельный генератор постоянного или переменного тока, возбудитель, который подключается к обмотке возбуждения ОВ через управляемый выпрямитель. Возбудитель монтируется на одном валу с ротором генератора. Обмотка возбуждения может также питаться от сети переменного тока, подключенной к статору через управляемый выпрямитель.

Ротор генератора вместе с обмоткой возбуждения, создающей магнитное поле, приводится во вращение первичным двигателем (паровой или гидравли-

ческой турбиной, дизелем и т.п.) с постоянной синхронной скоростью $n_0 = \frac{60f}{p}$, об/мин, где p – число пар полюсов. Для этого первичные двигатели оборудуются автоматическими регуляторами скорости.

При вращении ротора магнитное поле, создаваемое ОВ, наводит в неподвижных проводниках обмотки статора симметричную трехфазную систему ЭДС:

$$e_a = E_m \sin \omega t; e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); e_c = E_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

где E_m – амплитуда ЭДС;
 ω – круговая частота;
 t – время.

Этот трехфазный источник питания может индивидуально питать электрическую нагрузку или быть подключен на параллельную работу с сетью.

Действующее значение фазной ЭДС, как и в асинхронных машинах,

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 K_{об} f w_1 \Phi_0,$$

где $K_{об}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора;
 f – частота генерируемых ЭДС;
 w_1 – число витков обмотки одной фазы статора;
 Φ_0 – магнитный поток.

Характеристики автономного трехфазного СГ в режимах холостого хода и короткого замыкания

Характеристика холостого хода – зависимость ЭДС E_0 от тока возбуждения при токе статора $I_c = 0$, и оборотах $n_0 = \text{const}$ (рисунок 2).

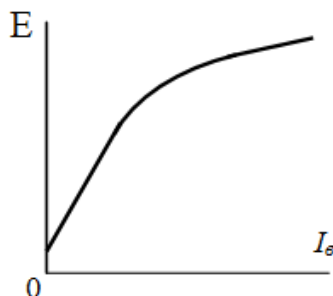


Рисунок 2. – Характеристика холостого хода синхронного генератора

Характеристика $E = f(I_e)$ в начальной части при небольших токах возбуждения линейна, а затем из-за насыщения магнитопровода принимает вид кривой намагничивания. Иначе говоря, в другом масштабе это характеристика магнитной цепи машины. При изменении тока возбуждения от нуля до максимального значения увеличивается магнитный поток Φ_0 , а следовательно, и ЭДС обмотки статора. Эта кривая является магнитной характеристикой СМ и повторяет кривую намагничивания

Характеристика короткого замыкания — зависимость тока статора от тока возбуждения $I_c = f(I_B)$ 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 $1,2 \cdot I_{\text{ном}}$. Эта зависимость линейная, т.к. генератор не насыщен (рисунок 3).

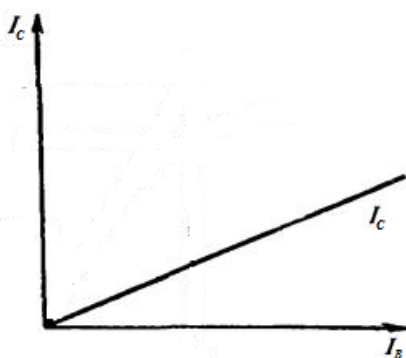


Рисунок 3. — Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

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 $X = 1,0-2,5$).

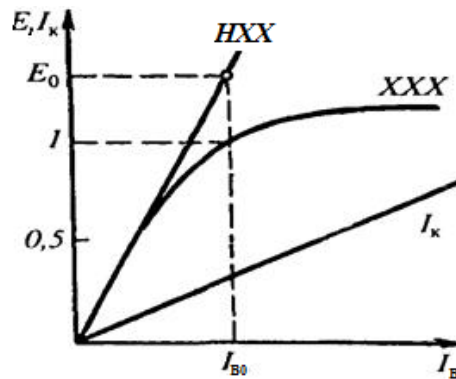
Ток короткого замыкания может быть определен как

$$I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \text{ А}, \quad (1)$$

где E_0 — ЭДС, соответствующая току возбуждения I_{B0} , которая определяется по характеристике холостого хода.

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

$$I_k = \frac{E_0}{X}, \text{ А.} \quad (2)$$



HXX – ненасыщенная характеристика холостого хода;
 XXX – насыщенная характеристика холостого хода

Рисунок 4. – Характеристики холостого хода и короткого замыкания

Таким образом, по характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания можно определить опытным путем значение индуктивного сопротивления обмотки статора X (см. рисунок 4):

$$X = \frac{E_0}{I_k}. \quad (3)$$

Кратность тока короткого замыкания представляет собой отношение тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению при холостом ходе, к току возбуждения, соответствующему номинальному току статора при опыте короткого замыкания:

$$K_{OKЗ} = \frac{I_{B0ном}}{I_{BKном}}. \quad (4)$$

Характеристики холостого хода и короткого замыкания дают возможность определить значения токов возбуждения двух составляющих (рисунок 5): одна компенсирует падения напряжения в цепи статора $I_{вх}$, а другая – размагничивающее влияние реакции статора $I_{вд}$.

Кратность тока короткого замыкания, также как и индуктивное сопротивление обмотки статора X , определяет перегрузочную способность синхронной

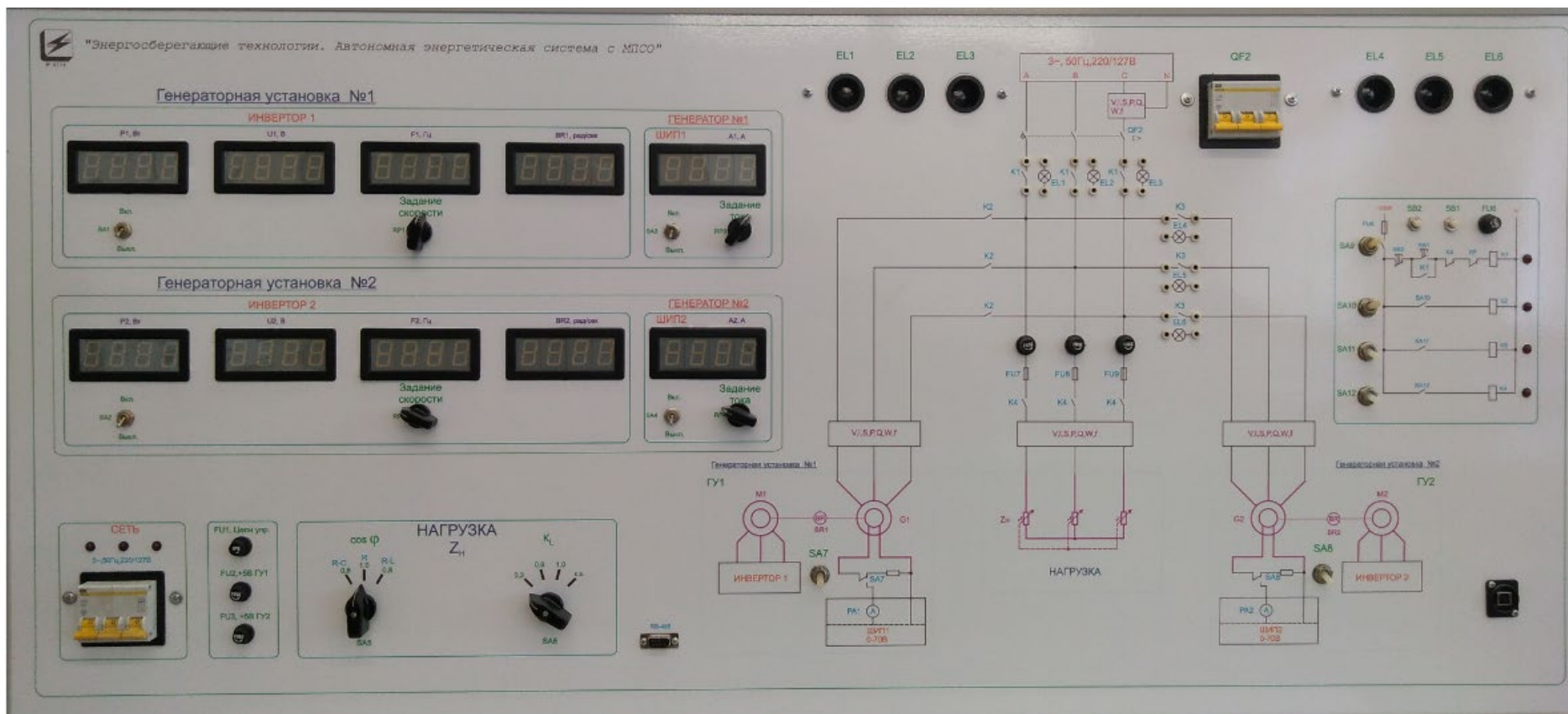


Рисунок 6. – Общий вид панели стенда НТЦ-48

и скорость вращения СГ. При этом изменяется и частота генерируемого напряжения. Аналогично инвертор 2 выполняет такие же функции в ГУ2. Управляемые источники питания ШИП1 и ШИП2 служат для задания токов возбуждения в генераторных установках ГУ1 и ГУ2 соответственно. Трехполюсный автомат «Сеть» подключает общее питание стенда. Трехполюсный автомат QF2 служит для подключения генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы.

Реле К1, К2, К3 и К4 своими контактами позволяют подключать выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы, выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 между собой на параллельную работу и к нагрузке. Имеется возможность дискретно изменять величину нагрузки $K_L = 0,3; 0,6; 1,0$ и $\cos \varphi$. Две группы ламп EL1, EL2, EL3 и EL4, EL5, EL6 используются для синхронизации генераторов между собой и имитируемой сетью. USB-разъем служит для подключения компьютера с целью вывода результатов измерения фазных напряжений, токов и мощностей генераторов и нагрузки.

Задание

1. Экспериментально снять характеристику холостого хода синхронного генератора $E_0 = f(I_B)$, где E_0 – ЭДС (напряжение) холостого хода фазы статора СГ; I_B – ток возбуждения в роторе СГ. При этом все обмотки фаз статора СГ отключены от нагрузки.

2. Экспериментально снять характеристику короткого замыкания синхронного генератора $I_C = f(I_B)$, где I_C – ток в обмотке фазы статора СГ; I_B – ток возбуждения в роторе СГ. При этом все обмотки фаз статора СГ замкнуты накоротко.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением основных узлов и элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2. Перед подключением стенда к питающей сети убедиться, что все тумблеры находятся в положении «Выкл», ручки потенциометров в крайнем левом положении (против часовой стрелки), переключатель SA5 ($\cos \varphi$) в положении R 1,0, а переключатель SA6 (K_L) в положении 0,3.

3. Включить стенд автоматическим выключателем «Сеть». Проконтролировать наличие напряжения по свечению светодиодов, расположенных над автоматическим выключателем. После прохождения приветственной надписи и появления на

всех цифровых приборах нулевых показаний измеряемых величин стенд готов к работе. Подключить МПСО к персональному компьютеру проводом USB. Запустить программу OSC 32 и загрузить профиль 1.

4. Для разгона генератора G1 включить инвертор 1 тумблером SA1. Затем, плавно вращая ручку PR1 по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора G1 равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR1).

5. Для питания релейных схем управления включить тумблер SA9 (перевести тумблер в верхнее положение). Затем подключить обмотку ротора генератора G1 к ШИП1 тумблером SA7 (перевести тумблер в верхнее положение). Включить ШИП1 – перевести тумблер SA3 в положение «Вкл». Выходное напряжение генератора G1 и ток нагрузки контролировать в соответствующих окнах программы OSC32 на экране компьютера.

6. Для снятия характеристики холостого хода $E_0 = f(I_B)$ при $n = \text{const}$ постепенно увеличивать ток возбуждения генератора G1 ручкой тока возбуждения A1 (рекомендуется увеличивать ток возбуждения с шагом 0,5–0,7 А до номинального в 9 А), поддерживая скорость вращения генератора G1 постоянной. Корректировать скорость вращения ручкой RP1.

Для каждой точки характеристики необходимо измерить ток возбуждения I_B и напряжения во всех фазах СГ. ЭДС холостого хода генератора следует находить как среднее арифметическое из трех измеренных фазных напряжений U_A , U_B и U_C по формуле

$$E_0 = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C).$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1

I_B , А	U_A , В	U_B , В	U_C , В	E_0 , В
0,0				
0,5				
1,0				
1,5				
...				
9,0				

7. Уменьшить ток возбуждения генератора G1 до нуля – перевести ручку RP3 в крайнее левое положение (против часовой стрелки). Проверить и, если нужно, подкорректировать обороты генератора до 102 рад/с.

8. Для снятия характеристики короткого замыкания генератора $I_C = f(I_B)$ при $n = \text{const}$ необходимо при токе возбуждения генератора $I_B = 0$ выполнить короткое замыкание, для этого переключатель SA6 перевести в положение КЗ.

9. Подключить нагрузку к генератору G1 – перевести тумблеры SA10 и SA12 в положение «Вкл». Поддерживая частоту вращения генератора G1 ручкой RP1 (скорость контролируется прибором BR1), ручкой RP3 постепенно увеличивать ток возбуждения генератора G1 до значения, при котором ток короткого замыкания $I_{К.З.} = 1,2 I_{ном} (1,2 \text{ A})$. При этом через приблизительно 0,5–0,7 А одинаковые интервалы изменения тока возбуждения (амперметр A1) измерить ток статора (в соответствующем окне программы OSC32).

Для каждой точки характеристики необходимо измерить ток возбуждения I_B и токи статора во всех фазах СГ. Ток статора генератора следует находить как среднее арифметическое из трех измеренных фазных токов $I_{\Phi A}$, $I_{\Phi B}$ и $I_{\Phi C}$ по формуле

$$I_C = \frac{1}{3}(I_{\Phi A} + I_{\Phi B} + I_{\Phi C}).$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2

$I_B, \text{ A}$	$I_{\Phi A}, \text{ A}$	$I_{\Phi B}, \text{ A}$	$I_{\Phi C}, \text{ A}$	$I_C, \text{ A}$
0,0				
0,5				
1,0				
1,5				
...				

Примечание. При снятии характеристик генератора:

- инвертор 2 включается тумблером SA2;
- разгон G2 выполнять вращением ручки PR2;
- контроль скорости вращения по индикатору BR2;
- обмотка ротора генератора G2 подключается к ШИП2 тумблером SA8;
- ШИП2 включается тумблером SA4;
- подключение нагрузки к генератору G2 выполнять включением тумблеров SA11 и SA12 (см. схему на панели стенда).

10. Выключить стенд в следующей последовательности:

- уменьшить ток возбуждения генератора G1 до нуля – перевести ручку RP3 в крайнее левое положение (против часовой стрелки);
- выключить тумблер SA3 питания ШИП2;

- выключить тумблер SA7 (замкнуть обмотку ротора G1 на активное сопротивление);
- отключить нагрузку от генератора G1, для этого выключить тумблеры SA10 и SA12;
- снять короткое замыкание, для этого переключатель SA6 перевести в положение 0,3;
- выключить питание релейных схем управления, выключить тумблер SA9;
- плавно вращая ручку PR1 против часовой стрелки, снизить обороты приводного двигателя до нуля и остановить его (скорость контролировать по индикатору BR1);
- выключить тумблер SA1 питания ШИП1;
- автоматический выключатель «Сеть» перевести в положение «Выкл».

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по лабораторной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения.

В отчете указать цель лабораторной работы, привести таблицы данных по снятым характеристикам, построить графики характеристики холостого хода $E_0 = f(I_B)$ и характеристики короткого замыкания $I_C = f(I_B)$. Коротко пояснить характер поведения этих характеристик.

Контрольные вопросы

1. Что такое характеристика холостого хода СГ? Какой графический вид она имеет и почему?
2. Что является причиной нелинейности характеристики холостого хода СГ?
3. Что такое характеристика короткого замыкания СГ? Какой графический вид она имеет и почему?
4. Для чего и как устанавливаются контактные кольца на вал СГ?
5. Для чего сердечник статора набирается из тонких листов электротехнической стали?
6. Почему сердечник ротора выполняется из цельнометаллическойковки?

7. Почему в турбогенераторах применяются только неявнополюсные конструкции роторов?
8. Какие типы роторов СГ применяют в гидрогенераторах?
9. Для какой цели в СГ применяют автоматическую регулировку возбуждения?
10. Какие параметры СГ определяют с применением характеристик холостого хода и короткого замыкания?

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В НАГРУЖЕННОМ РЕЖИМЕ СО СМЕШАННОЙ НАГРУЗКОЙ

Цель работы: изучить поведение внешней характеристики и регулировочной характеристики синхронного генератора как функциональных зависимостей при разных видах нагрузки и приобрести практические навыки экспериментального снятия этих характеристик.

Основные теоретические положения

Синхронная машина (СМ) – машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора постоянна (скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора) и не зависит от нагрузки. СМ обратима, т.е. она может работать и в режиме генератора, и в режиме двигателя.

В режиме генератора постоянную скорость должен поддерживать первичный двигатель независимо от электрической нагрузки. В режиме двигателя постоянная скорость поддерживается автоматически независимо от механической нагрузки на его валу.

Между частотой тока f и скоростью вращения ротора синхронного генератора (СГ) n_0 существует жесткая связь:

$$f = \frac{n_0 p}{60},$$

где p – число пар полюсов СГ; n_0 измеряется в оборотах в минуту.

Для получения источника тока частотой f необходимо, чтобы первичный двигатель (ПД) вращал ротор СГ со скоростью $n_0 = 60 f/p$, т.е. с синхронной скоростью. Если $f = 50$ Гц, а $p = 1$, то $n_0 = 3000$ об/мин; $p = 2$, $n_0 = 1500$ об/мин; $p = 3$, $n_0 = 1000$ об/мин и т.д.

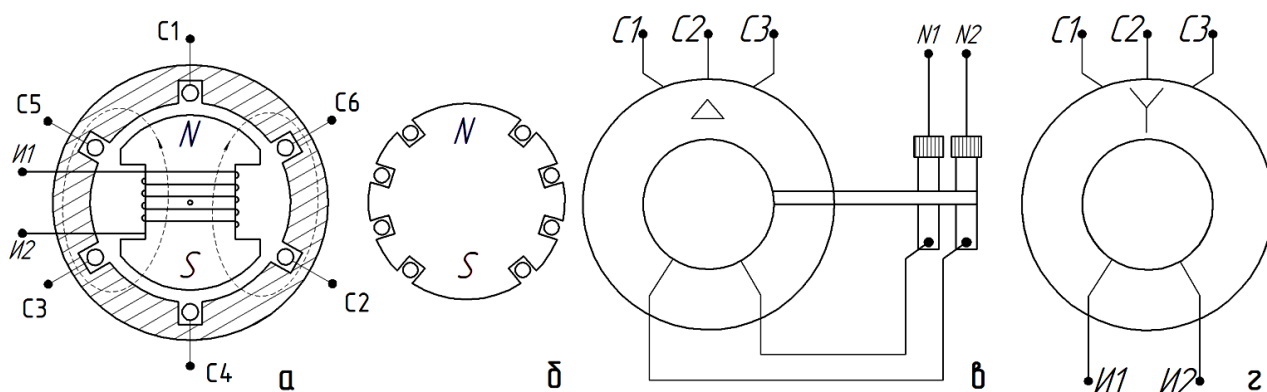
Устройство трехфазного синхронного генератора

Конструктивно трехфазный СГ состоит из неподвижного статора (якоря) и вращающегося внутри него ротора (индуктора).

Статор СГ вместе с обмотками аналогичен статору асинхронной машины. Трехфазная обмотка статора СГ является источником трехфазной ЭДС, к которой подключаются потребители электрической энергии.

Ротор представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения (ОВ) которого питается постоянным током от независимого источника. Он может иметь явно выраженные полюсы (рисунок 1, а) или быть неявнополюсным (рисунок 1, б).

Явнополюсные роторы имеют, например, синхронные генераторы, первичными двигателями для которых служат тихоходные гидротурбины со скоростями не более 1000 об/мин, а более прочный неявнополюсный ротор используется в быстроходных турбогенераторах со скоростями 1500 или 3000 об/мин.



а – основные конструктивные элементы и обмотки; *б* – неявнополюсный ротор; *в* – схема подключения обмотки возбуждения; *г* – условные графические обозначения

Рисунок 1. – Синхронная машина

Ротор и статор могут иметь несколько пар полюсов, но число пар полюсов должно быть одинаковым.

Ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает от сети постоянного тока через неподвижные щетки и контактные кольца, закрепленные на втулке изолятора и вращающиеся вместе с ротором (см. рисунок 1, в).

Условное графическое обозначение СМ показано на рисунке 1, г.

Принцип действия трехфазного синхронного генератора

В режиме генератора обмотка возбуждения подключается через контактные кольца к источнику постоянного тока. В качестве источника применяется отдельный генератор постоянного или переменного тока, возбудитель, который подключается к обмотке возбуждения ОВ через управляемый выпрямитель. Возбудитель монтируется на одном валу с ротором генератора. Обмотка возбуждения может также питаться от сети переменного тока, подключенной к статору через управляемый выпрямитель.

Ротор генератора вместе с обмоткой возбуждения, создающей магнитное поле, приводится во вращение первичным двигателем (паровой или гидравли-

ческой турбиной, дизелем и т.п.) с постоянной синхронной скоростью $n_0 = \frac{60f}{p}$, об/мин, где p – число пар полюсов. Для этого первичные двигатели оборудуются автоматическими регуляторами скорости.

При вращении ротора магнитное поле, создаваемое ОВ, наводит в неподвижных проводниках обмотки статора симметричную трехфазную систему ЭДС:

$$e_a = E_m \sin \omega t; e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); e_c = E_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

где E_m – амплитуда ЭДС;
 ω – круговая частота;
 t – время.

Этот трехфазный источник питания может индивидуально питать электрическую нагрузку или быть подключен на параллельную работу с сетью.

Действующее значение фазной ЭДС, как и в асинхронных машинах,

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 K_{об} f w_1 \Phi_0,$$

где $K_{об}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора;
 f – частота генерируемых ЭДС;
 w_1 – число витков обмотки одной фазы статора;
 Φ_0 – магнитный поток.

Уравнение напряжений и векторная диаграмма синхронного генератора

Ток в обмотке возбуждения создает основной магнитный поток Φ_0 , который, вращаясь вместе с ротором, наводит в каждой фазе обмотки статора ЭДС E_0 . Если генератор нагружен, то под действием E_0 в статоре возникает ток I , создающий свой магнитный поток Φ_c , который оказывает размагничивающее действие на основной магнитный поток. Размагничивающее действие тока статора (реакция якоря) можно учесть реактивным сопротивлением X_c , которое называется **синхронным реактивным сопротивлением**. Таким образом, фазу обмотки статора можно показать как схему замещения, представляющую собой последовательное соединение источника E_0 и синхронного сопротивления X_c . Активным сопротивлением фазы обмотки статора можно пренебречь, т.к. оно на два порядка меньше X_c . Схема замещения фазы статора вместе с нагрузкой Z_n приведена на рисунке 2.

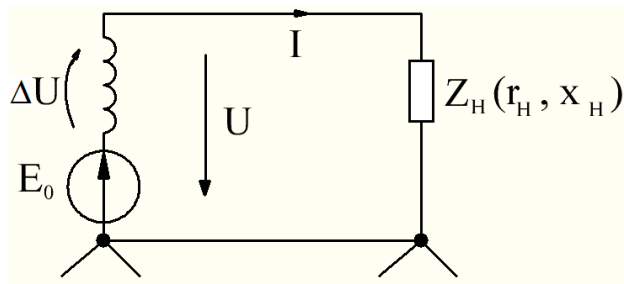


Рисунок 2. – Схема замещения фазы синхронного генератора

По второму закону Кирхгофа $\dot{E}_0 = \dot{U} + jx_c \dot{I}$. Падение напряжения на синхронном сопротивлении $\Delta \dot{U} = jx_c \dot{I}$. Тогда напряжение на фазе статора равно напряжению на фазе нагрузки: $\dot{U} = \dot{E}_0 - \Delta \dot{U}$. Напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину падения напряжения в обмотке статора. Построение векторной диаграммы начнем с вектора основного магнитного потока Φ_0 , который направляется произвольно (рисунок 3). Вектор индуцируемой ЭДС E_0 отстает от Φ_0 на 90° . Вектор тока фазы статора I отстает от ЭДС E_0 на угол ψ , определяемый активным и реактивным сопротивлениями контура.

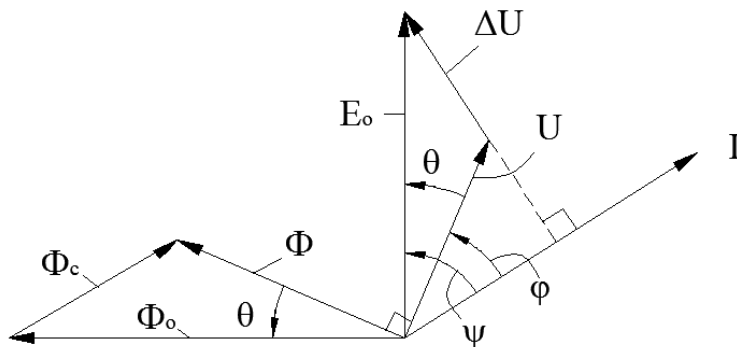


Рисунок 3. – Векторная диаграмма фазы статора синхронного генератора при активно-индуктивной нагрузке

Падение напряжения ΔU опережает ток I на 90° . Вектор напряжения U определяется из равенства $\dot{U} = \dot{E} - \Delta \dot{U}$.

Это напряжение создается суммарным магнитным потоком Φ , который складывается из основного магнитного потока Φ_0 и потока статора Φ_c :

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_c.$$

Вектор потока статора Φ_c пропорционален току I и совпадает с ним по фазе, а суммарный магнитный поток, который индуцирует напряжение U , опережает это напряжение на 90° .

Из векторной диаграммы видно, что угол θ – фазный сдвиг между основным Φ_0 и суммарным Φ магнитными потоками, равный углу сдвига фаз между напряжением U и ЭДС E_0 .

При активно-емкостной нагрузке вектор тока I опережает ЭДС E_0 на угол ψ (рисунок 4) и напряжение U по величине становится больше E_0 . Это связано с тем, что продольная составляющая реакции якоря увеличивает суммарный (результатирующий) магнитный поток и напряжение возрастает.

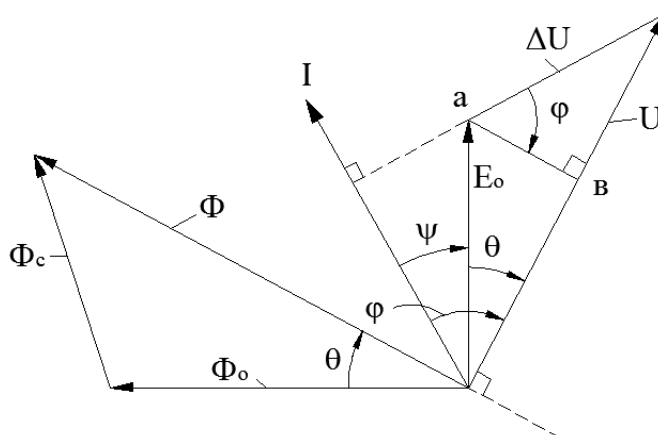
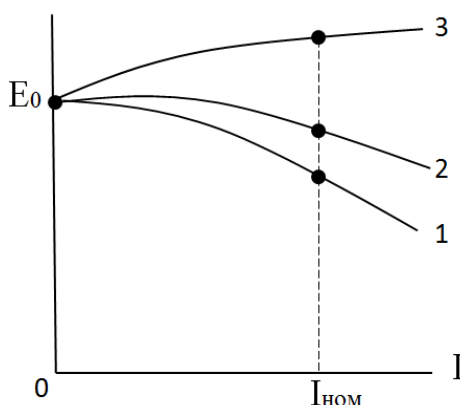


Рисунок 4. – Векторная диаграмма фазы статора синхронного генератора при активно-емкостной нагрузке

Внешняя и регулировочная характеристики автономного трехфазного СГ и влияние вида нагрузки на эти характеристики

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения генератора от тока нагрузки $U = f(I)$, при $I_e = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.



1 – $\cos \varphi = 0,8$, $\varphi > 0$; 2 – $\cos \varphi = 1$, $\varphi = 0$; 3 – $\cos \varphi = 0,8$, $\varphi < 0$

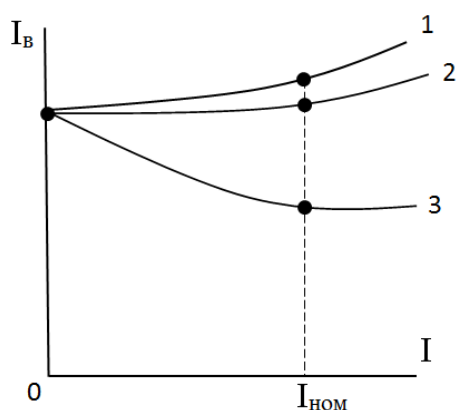
Рисунок 5. – Внешние характеристики генератора при различных $\cos \varphi$

При активно-индуктивной нагрузке напряжение генератора с ростом тока нагрузки будет уменьшаться (рисунок 5). В соответствии с векторной диаграммой с увеличением тока I возрастет ΔU , увеличивается угол θ и уменьшается U .

При активной нагрузке ($\cos \varphi = 1, \varphi = 0$) напряжение генератора также будет уменьшаться, но по сравнению с активно-индуктивной нагрузкой менее значительно.

При активно-емкостной нагрузке напряжение генератора с ростом тока нагрузки увеличивается. Этот вывод поясняется векторной диаграммой (см. рисунок 5).

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_g = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$. Регулировочная характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения, чтобы поддерживать неизменным напряжение генератора независимо от величины и характера нагрузки. При активной и активно-индуктивной нагрузке, чтобы поддерживать напряжение постоянным, с ростом тока нагрузки надо увеличить ток возбуждения, чтобы компенсировать размагничивающее действие реакции якоря (рисунок 6, кривые 1 и 2), а при активно-емкостной нагрузке подмагничивающее действие реакции якоря компенсируется, если уменьшать ток возбуждения (рисунок 6, кривая 3).



1 – $\cos \varphi = 0,8, \varphi > 0$; 2 – $\cos \varphi = 1, \varphi = 0$; 3 – $\cos \varphi = 0,8, \varphi < 0$

Рисунок 6. – Регулировочные характеристики генератора при различных $\cos \varphi$

Регулировочная характеристика помогает выбрать аппаратуру для автоматического управления режимом работы синхронного генератора.

Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд НТЦ-48 «Автономная энергетическая установка» предназначен для исследования характеристик синхронного генератора в различных режимах работы, для изучения способов синхронизации двух синхронных генераторов (СГ) между собой, а также синхронного генератора с сетью, для оценки энергетических показателей и КПД установки.

Общий вид передней панели стенда показан на рисунке 7.

В состав стенда входят две генераторные установки ГУ1 и ГУ2, каждая из которых представляет собой состыкованную пару «Асинхронный двигатель – Синхронный генератор» с элементами управления и измерения. Для разгона асинхронного двигателя ГУ1 применен трехфазный управляемый инвертор 1, позволяющий изменять скорость вращения асинхронного двигателя, а значит, и скорость вращения СГ. При этом изменяется и частота генерируемого напряжения. Аналогично инвертор 2 выполняет такие же функции в ГУ2. Управляемые источники питания ШИП1 и ШИП2 служат для задания токов возбуждения в генераторных установках ГУ1 и ГУ2 соответственно. Трехполюсный автомат «Сеть» подключает общее питание стенда. Трехполюсный автомат QF2 служит для подключения генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы.

Реле К1, К2, К3 и К4 своими контактами позволяют подключать выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы, выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 между собой на параллельную работу и к нагрузке. Имеется возможность дискретно изменять величину нагрузки $K_L = 0,3; 0,6; 1,0$ и $\cos \varphi$. Две группы ламп EL1, EL2, EL3 и EL4, EL5, EL6 используются для синхронизации генераторов между собой и имитируемой сетью. USB-разъем служит для подключения компьютера с целью вывода результатов измерения фазных напряжений, токов и мощностей генераторов и нагрузки.

Задание

1. Экспериментально снять внешнюю характеристику синхронного генератора $U = f(I)$ при $I_B = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ и заданном виде нагрузки, где U – напряжение на фазе статора СГ; I – ток нагрузки в фазе статора СГ; I_B – ток возбуждения в роторе СГ.

2. Экспериментально снять регулировочную характеристику синхронного генератора при $I_B = f(I)$ $U = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$ и заданном виде нагрузки, где I_B – ток возбуждения в роторе СГ; I – ток в обмотке фазы статора СГ (ток нагрузки); U – напряжение на фазе статора СГ.

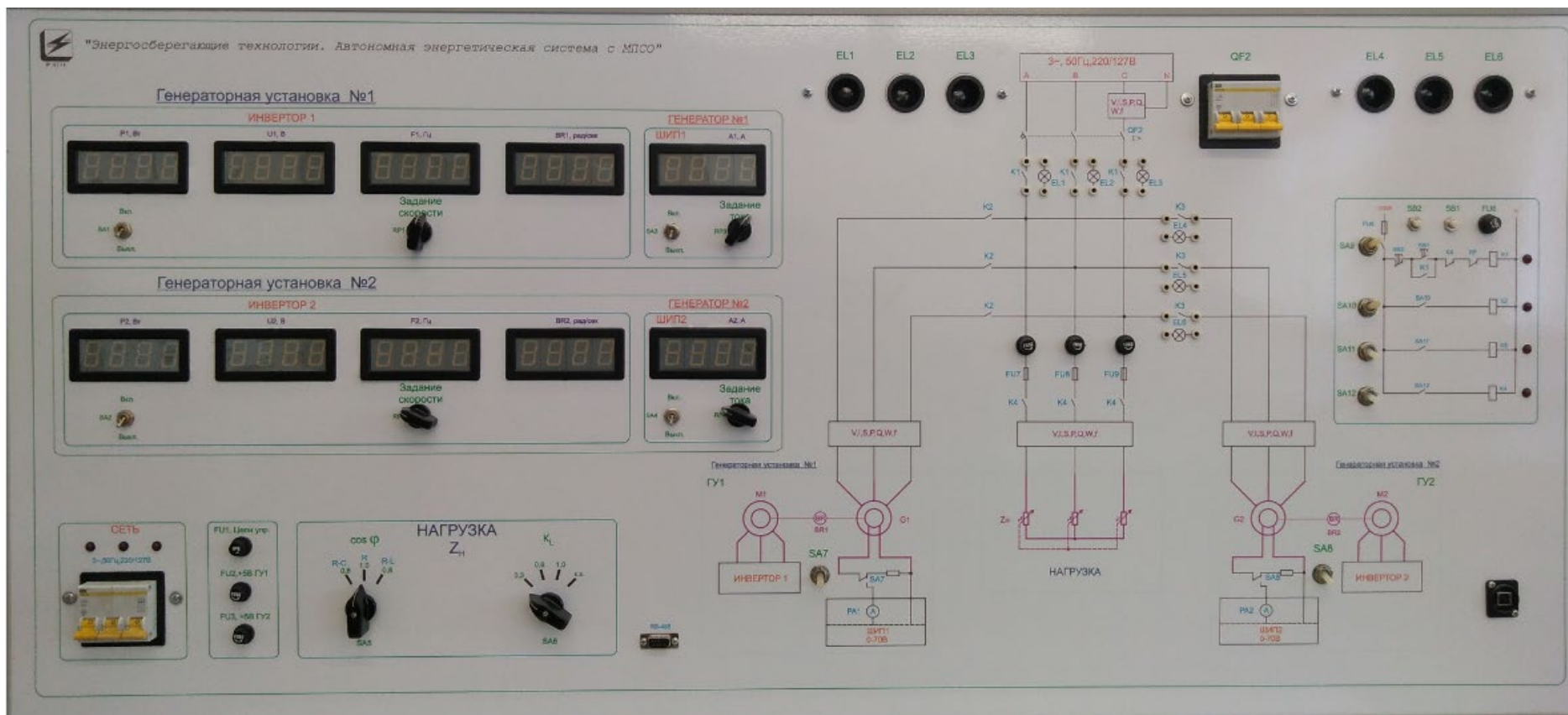


Рисунок 7. – Общий вид панели стенда НТЦ-48

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением основных узлов и элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2. Перед подключением стенда к питающей сети убедиться, что все тумблеры находятся в положении «Выкл», ручки потенциометров в крайнем левом положении (против часовой стрелки), переключатель SA5 ($\cos \varphi$) в положении $R 1,0$, а переключатель SA6 (K_L) в положении 0,3.

3. Включить стенд автоматическим выключателем «Сеть». Проконтролировать наличие напряжения по свечению светодиодов, расположенных над автоматическим выключателем. После прохождения приветственной надписи и появления на всех цифровых приборах нулевых показаний измеряемых величин стенд готов к работе. Подключить МПСО к персональному компьютеру проводом USB. Запустить программу OSC 32 и загрузить профиль 1.

4. Для разгона генератора G1 включить инвертор 1 тумблером SA1. Затем, плавно вращая ручку PR1 по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора G1 равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR1).

5. Для питания релейных схем управления включить тумблер SA9 (перевести тумблер в верхнее положение). Затем подключить обмотку ротора генератора G1 к ШИП1 тумблером SA7 (перевести тумблер в верхнее положение). Включить ШИП1 – перевести тумблер SA3 в положение «Вкл». Выходное напряжение генератора G1 и ток нагрузки контролировать в соответствующих окнах программы OSC32 на экране компьютера.

6. Установить заданный тип нагрузки для снятия внешней характеристики. Для этого переключателем SA5 выбирают $\cos \varphi = 1$ при активной нагрузке R , $\cos \varphi = 0,8$ при активно-индуктивной нагрузке RL или $\cos \varphi = 0,8$ при активно-емкостной нагрузке RC .

7. Для снятия внешней характеристики СГ $U = f(I)$, при $I_g = \text{const}$, $\cos \varphi = 1$ необходимо переключатель SA6 перевести в положение «0,3» и подключить нагрузку. Для этого, если используется СГ G1, требуется замкнуть контакты K2 и K4, тогда нужно включить тумблеры SA10 и SA12. Если же используется СГ G2, то требуется замкнуть контакты K3 и K4, тогда нужно включить тумблеры SA11 и SA12. Проконтролировать заданную скорость вращения генератора G1 (G2), при необходимости скорректировать скорость вращением ручки RP1 (RP2).

7.1. Выполнить измерения трехфазных выходных напряжений и трехфазных токов для подключенного СГ для трех значений коэффициента нагрузки K_L

(переключатель SA6): 0,3; 0,6; 1,0. Значения фазных напряжений и токов считывать с экрана монитора ПК в соответствующих окнах программы OSC32 и заносить их в таблицу 1. После каждого переключения переключателя SA6 контролировать и поддерживать постоянными обороты СГ и ток возбуждения I_e .

Таблица 1

K_L	I_A, A	I_B, A	I_C, A	U_A, B	U_B, B	U_C, B	I_ϕ, B	U_ϕ, B
0,3								
0,6								
1,0								

Для каждой точки характеристики необходимо вычислить среднее арифметическое из трех измеренных фазных токов I_A , I_B и I_C по формуле

$$I_\phi = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C).$$

И аналогично вычислить среднее арифметическое из трех измеренных фазных напряжений U_A , U_B и U_C по формуле

$$U_\phi = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C).$$

Вычисленные значения также следует занести в таблицу 1 и затем использовать их для построения графика внешней характеристики.

7.2. Снятие внешней характеристики для нагрузки RC с $\cos \phi = 0,8$. Опыт проводят также, как и предыдущий, только переключатель SA5 должен находиться в положении RC «0,8».

7.3. Снятие внешней характеристики для нагрузки RL с $\cos \phi = 0,8$. Опыт проводят также, как и предыдущий, только переключатель SA5 должен находиться в положении RL «0,8».

8. Для снятия регулировочной характеристики $I_e = f(I) U = \text{const}$ и $\cos \phi = \text{const}$ переключатель SA6 вернуть в положение $K_L = 0,3$. Переключатель SA5 переключить в положение $R \cos \phi = 1,0$. Проконтролировать заданную скорость вращения генератора G1 (G2), при необходимости скорректировать скорость вращением ручки RP1 (RP2). Установить ток возбуждения СГ $I_B = 5 A$.

8.1. Зафиксировать значения выходного напряжения в фазе A и токов нагрузки во всех фазах генератора G1 (G2) из соответствующих окон программы OSC32. Результаты измерений занести в таблицу 2.

8.2. Переключатель коэффициента нагрузки K_L (SA6) перевести в положение «0,6». Если скорость вращения генератора G1 (G2) по прибору BR1 (BR2) изменилась, скорректировать ее ручкой RP1 (RP2). Изменяя задание тока возбуждения генератора G1 (G2) ручкой RP3 (RP4), установить напряжение на выходе генератора G1 (G2) такое же, как было при коэффициенте нагрузки 0,3 (SA6 в положении «0,3»). Фиксировать значения тока возбуждения по прибору A1 (A2), а ток нагрузки в соответствующем окне программы OSC32. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

K_L	I_B, A	U_A, B	$I_{\phi A}, A$	$I_{\phi B}, A$	$I_{\phi C}, A$	I_C, A
0,3	5,0					
0,6						
1,0						

8.3. Увеличить коэффициент нагрузки – перевести переключатель SA6 в положение «1,0» и выполнить действия, аналогичные п. 8.2.

8.4. Ток статора генератора следует находить как среднее арифметическое из трех измеренных фазных токов $I_{\phi A}$, $I_{\phi B}$ и $I_{\phi C}$ по формуле

$$I_C = \frac{1}{3}(I_{\phi A} + I_{\phi B} + I_{\phi C}).$$

Вычисленные значения тока статора также следует занести в таблицу 2 и затем использовать их для построения графика регулировочной характеристики.

8.5. Снятие регулировочной характеристики для нагрузки RC с $\cos \varphi = 0,8$. Опыт проводят, как и предыдущий, только переключатель SA5 должен находиться в положении RC «0,8».

8.6. Снятие регулировочной характеристики для нагрузки RL с $\cos \varphi = 0,8$. Опыт проводят, как и предыдущий, только переключатель SA5 должен находиться в положении RL «0,8».

9. Выключить стенд в следующей последовательности:

- уменьшить ток возбуждения генератора G1 (G2) до нуля – перевести ручку RP3 (RP4) в крайнее левое положение (против часовой стрелки);
- выключить тумблер SA3 (SA4) питания ШИП1 (ШИП2);
- выключить тумблер SA7 (SA8) (замкнуть обмотку ротора G1 (G2) на активное сопротивление);
- отключить нагрузку от генератора G1 (G2), для этого выключить тумблеры SA10 (SA11) и SA12;

- переключатель SA6 перевести в положение «0,3»;
- выключить питание релейных схем управления, выключить тумблер SA9;
- плавно вращая ручку PR1 (PR2) против часовой стрелки, снизить обороты приводного двигателя до нуля и остановить его (скорость контролировать по индикатору BR1 (BR2));
- выключить тумблер SA1 (SA2) питания инвертора 1 (2);
- автоматический выключатель «Сеть» перевести в положение «Выкл».

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по лабораторной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения.

В отчете указать цель лабораторной работы, привести таблицы данных по снятым характеристикам, построить графики внешней характеристики $U = f(I)$ при $I_g = \text{const}$ и $n = \text{const}$ для заданной нагрузки и регулировочной характеристики $I_g = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$ для заданной нагрузки. Уметь пояснить характер поведения этих характеристик.

Контрольные вопросы

1. Что такое внешняя характеристика СГ? Какой графический вид она имеет и почему?
2. Почему выходное напряжение СГ уменьшается с увеличением тока нагрузки?
3. Что такое регулировочная характеристика СГ? Какой графический вид она имеет и почему?
4. Почему внешняя характеристика СГ при активно-емкостной нагрузке лежит выше характеристики при активной нагрузке?
5. Почему внешняя характеристика СГ при активно-индуктивной нагрузке лежит ниже характеристики при активной нагрузке?
6. Почему регулировочная характеристика СГ при активно-индуктивной нагрузке лежит выше характеристики при активной нагрузке?
7. Почему регулировочная характеристика СГ при активно-емкостной нагрузке лежит ниже характеристики при активной нагрузке?

Лабораторная работа 3

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ СИНХРОНИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕЖДУ СОБОЙ И СЕТЬЮ

Цель работы: изучить способы и получить практические навыки синхронизации энергетических установок между собой и с сетью методами точной синхронизации и самосинхронизации.

Основные теоретические положения

Синхронная машина (СМ) – машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора постоянна (скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора) и не зависит от нагрузки. СМ обратима, т.е. она может работать и в режиме генератора, и в режиме двигателя.

В режиме генератора постоянную скорость должен поддерживать первичный двигатель независимо от электрической нагрузки. В режиме двигателя постоянная скорость поддерживается автоматически независимо от механической нагрузки на его валу.

Между частотой тока f и скоростью вращения ротора синхронного генератора (СГ) n_0 существует жесткая связь:

$$f = \frac{n_0 p}{60},$$

где p – число пар полюсов СГ; n_0 измеряется в оборотах в минуту.

Для получения источника тока частотой f необходимо, чтобы первичный двигатель (ПД) вращал ротор СГ со скоростью $n_0 = 60 f/p$, т.е. с синхронной скоростью. Если $f = 50$ Гц, а $p = 1$, то $n_0 = 3000$ об/мин; $p = 2$, $n_0 = 1500$ об/мин; $p = 3$, $n_0 = 1000$ об/мин и т.д.

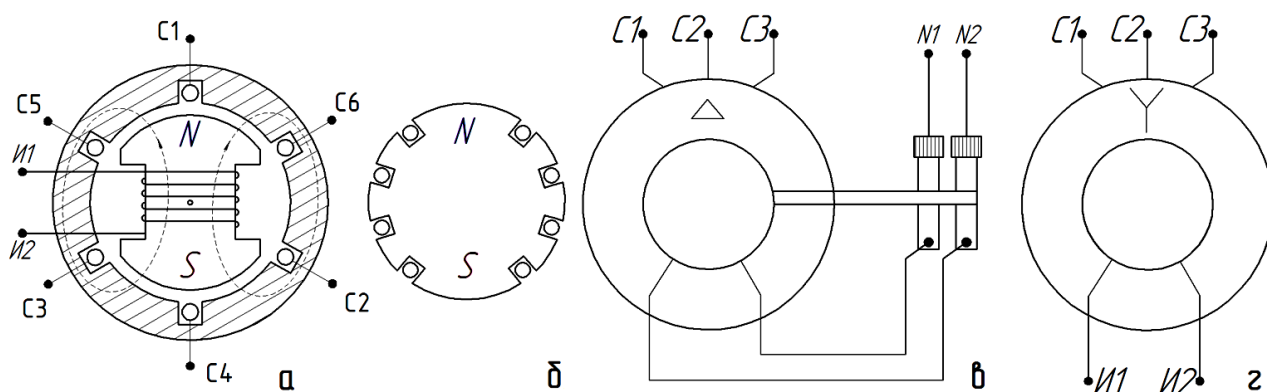
Устройство трехфазного синхронного генератора

Конструктивно трехфазный СГ состоит из неподвижного статора (якоря) и вращающегося внутри него ротора (индуктора).

Статор СГ вместе с обмотками аналогичен статору асинхронной машины. Трехфазная обмотка статора СГ является источником трехфазной ЭДС, к которой подключаются потребители электрической энергии.

Ротор представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения (ОВ) которого питается постоянным током от независимого источника. Он может иметь явно выраженные полюсы (рисунок 1, а) или быть неявнополюсным (рисунок 1, б).

Явнополюсные роторы имеют, например, синхронные генераторы, первичными двигателями для которых служат тихоходные гидротурбины со скоростями не более 1000 об/мин, а более прочный неявнополюсный ротор используется в быстроходных турбогенераторах со скоростями 1500 или 3000 об/мин.



а – основные конструктивные элементы и обмотки; *б* – неявнополюсный ротор; *в* – схема подключения обмотки возбуждения; *г* – условные графические обозначения

Рисунок 1. – Синхронная машина

Ротор и статор могут иметь несколько пар полюсов, но число пар полюсов должно быть одинаковым.

Ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает от сети постоянного тока через неподвижные щетки и контактные кольца, закрепленные на втулке изолятора и вращающиеся вместе с ротором (см. рисунок 1, в).

Условное графическое обозначение СМ показано на рисунке 1, г.

Принцип действия трехфазного синхронного генератора

В режиме генератора обмотка возбуждения подключается через контактные кольца к источнику постоянного тока. В качестве источника применяется отдельный генератор постоянного или переменного тока, возбудитель, который подключается к обмотке возбуждения ОВ через управляемый выпрямитель. Возбудитель монтируется на одном валу с ротором генератора. Обмотка возбуждения может также питаться от сети переменного тока, подключенной к статору через управляемый выпрямитель.

Ротор генератора вместе с обмоткой возбуждения, создающей магнитное поле, приводится во вращение первичным двигателем (паровой или гидравли-

ческой турбиной, дизелем и т.п.) с постоянной синхронной скоростью $n_0 = \frac{60f}{p}$, об/мин, где p – число пар полюсов. Для этого первичные двигатели оборудуются автоматическими регуляторами скорости.

При вращении ротора магнитное поле, создаваемое ОВ, наводит в неподвижных проводниках обмотки статора симметричную трехфазную систему ЭДС:

$$e_a = E_m \sin \omega t; e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

где E_m – амплитуда ЭДС;
 ω – круговая частота;
 t – время.

Этот трехфазный источник питания может индивидуально питать электрическую нагрузку или быть подключен на параллельную работу с сетью.

Действующее значение фазной ЭДС, как и в асинхронных машинах,

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 K_{об} f w_1 \Phi_0,$$

где $K_{об}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора;
 f – частота генерируемых ЭДС;
 w_1 – число витков обмотки одной фазы статора;
 Φ_0 – магнитный поток.

Включение СГ на параллельную работу с сетью или другим генератором методом точной синхронизации

Процесс подключения генератора к сети, называемый **синхронизацией**, является важной и ответственной операцией. Схема включения синхронного генератора в сеть представлена на рисунке 2.

Для анализа процессов при включении генератора воспользуемся простейшей схемой замещения одной фазы СГ (рисунок 3, а), в которой синхронный генератор представлен источником ЭДС \dot{E}_0 с внутренним сопротивлением jx_d , а сеть – эквивалентным генератором бесконечной мощности с напряжением \dot{U}_c .

За положительное направление напряжения \dot{U}_c и ЭДС \dot{E}_0 примем направление обхода контура «генератор–сеть» по часовой стрелке, тогда при разомкнутом выключателе K на его зажимах будет действовать ЭДС $\Delta \dot{E}_0 = \dot{E}_0 + \dot{U}_c$, которая определяется взаимным положением векторов \dot{E}_0 и \dot{U}_c (рисунок 3, б).

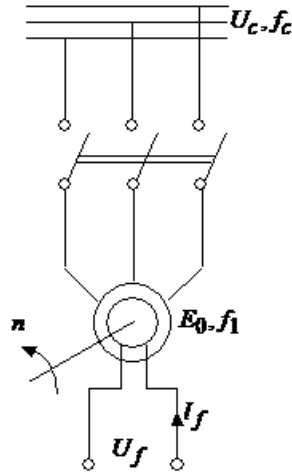


Рисунок 2. – Схема подключения синхронного генератора к сети

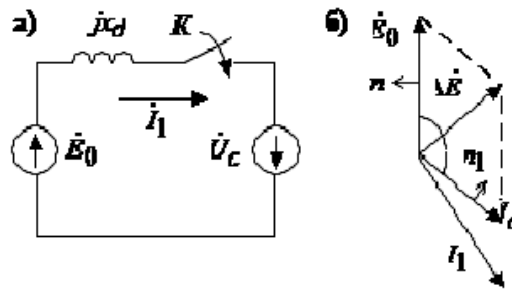


Рисунок 3. – Схема замещения фазы синхронного генератора

Если перед включением выключателя K выполнить условия:

- чередование фаз генератора и сети одинаковые (векторы \dot{E}_0 и \dot{U}_c вращаются в одну сторону);
- частоты ЭДС генератора f_1 и напряжения сети f_c равны (векторы \dot{E}_0 и \dot{U}_c неподвижны относительно друг друга);
- модули векторов \dot{E}_0 и \dot{U}_c равны, а по фазе они сдвинуты на 180° , то ЭДС ΔE между контактами выключателя K будет равна нулю. Поэтому после включения генератора в сеть ток якоря останется равным нулю,

$$i_1 = \frac{\Delta \dot{E}}{jX_c} = 0,$$

и генератор будет продолжать работать в режиме холостого хода.

Описанный способ включения генератора в сеть называется **точной синхронизацией**. Несоблюдение условий точной синхронизации может вызвать серьез-

ную аварию из-за возникновения значительного тока I_1 и связанного с ним электромагнитного момента M_e .

Существует несколько аппаратных средств, позволяющих реализовать условия точной синхронизации. Простейшим из них является ламповый синхроскоп. Схема включения генератора в сеть с помощью лампового синхроскопа представлена на рисунке 4.

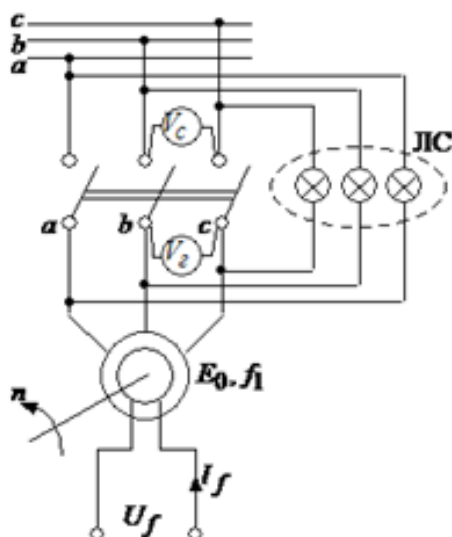


Рисунок 4. – Схема включения СГ в сеть с помощью лампового синхроскопа

Порядок включения следующий. Регулируя частоту вращения ротора, доводят ее до близкой к синхронной. Затем генератор возбуждают. Ток возбуждения I_f устанавливается близким к I_{f0} так, чтобы напряжение генератора U_1 и напряжение U_c были равны. Лампы синхроскопа находятся под напряжением, определяемым величиной ЭДС ΔE . В общем случае частота вращения ротора n отличается от синхронной, поэтому векторы \dot{E}_0 и \dot{U}_c (см. рисунок 3, б) будут вращаться относительно друг друга с частотой $\Delta f = f_1 - f_c$, что сопровождается изменением ЭДС ΔE в пределах от 0 до $2 \cdot \dot{U}_c$. Следовательно, лампы будут одновременно загораться и гаснуть с частотой Δf .

Регулируя частоту вращения ротора, добиваются того, чтобы частота мигания ламп составляла $\Delta f = 0,5-1$ Гц. Включение генератора производят в момент, когда лампы погаснут.

Ламповый синхроскоп позволяет контролировать также правильность чередования фаз. Если чередование фаз генератора и системы не совпадают, то лампы гаснут неодновременно.

Синхронизация с помощью лампового синхроскопа применяется в случае генераторов малой мощности в лабораторных условиях. На электростанциях включение генераторов в сеть осуществляется с помощью автоматических синхронизаторов электромагнитного типа. Однако автоматические устройства не всегда могут быстро включить генератор в сеть, особенно в случае какой-либо аварии в сети, когда ее напряжение и частота меняются.

Включение СГ на параллельную работу с сетью или другим генератором методом самосинхронизации

Для ускорения процесса включения генератора в сеть применяют способ грубой синхронизации, или **самосинхронизации**. При самосинхронизации невозбужденный генератор с обмоткой возбуждения, замкнутой на активное сопротивление (рисунок 5), разгоняется первичным двигателем до подсинхронной частоты вращения и включается в сеть в произвольный момент времени.

Затем подают возбуждение (ключ K_2 замыкают, а K_1 размыкают). Под действием тока возбуждения I_f возникает синхронизирующий момент и генератор втягивается в синхронизм.

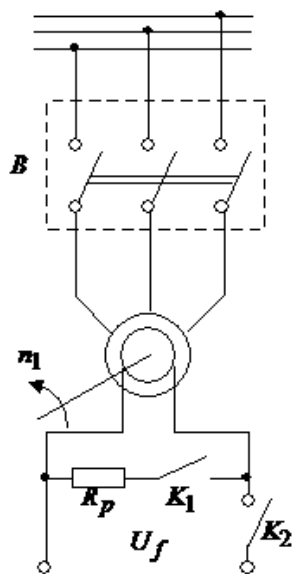


Рисунок 5. – Схема подключения СГ к сети
методом самосинхронизации

При самосинхронизации неизбежно возникают значительные толчки тока I_1 , т.к. включение невозбужденного генератора приводит к появлению ЭДС $\Delta E = U_c$. Величина тока I_1 будет ограничиваться сопротивлением самого генератора и сети. Способом самосинхронизации включаются генераторы мощностью до 500 кВт.

Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд НТЦ-48 «Автономная энергетическая установка» предназначен для исследования характеристик синхронного генератора в различных режимах работы, для изучения способов синхронизации двух синхронных генераторов (СГ) между собой, а также синхронного генератора с сетью, для оценки энергетических показателей и КПД установки.

Общий вид передней панели стенда показан на рисунке 6.

В состав стенда входят две генераторные установки ГУ1 и ГУ2, каждая из которых представляет собой состыкованную пару «Асинхронный двигатель – Синхронный генератор» с элементами управления и измерения. Для разгона асинхронного двигателя ГУ1 применен трехфазный управляемый инвертор 1, позволяющий изменять скорость вращения асинхронного двигателя, а значит, и скорость вращения СГ. При этом изменяется и частота генерируемого напряжения. Аналогично инвертор 2 выполняет такие же функции в ГУ2. Управляемые источники питания ШИП1 и ШИП2 служат для задания токов возбуждения в генераторных установках ГУ1 и ГУ2 соответственно. Трехполюсный автомат «Сеть» подключает общее питание стенда. Трехполюсный автомат QF2 служит для подключения генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы.

Реле К1, К2, К3 и К4 своими контактами позволяют подключать выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы, выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 между собой на параллельную работу и к нагрузке. Имеется возможность дискретно изменять величину нагрузки $K_L = 0,3; 0,6; 1,0$ и $\cos \varphi$. Две группы ламп EL1, EL2, EL3 и EL4, EL5, EL6 используются для синхронизации генераторов между собой и имитируемой сетью. USB-разъем служит для подключения компьютера с целью вывода результатов измерения фазных напряжений, токов и мощностей генераторов и нагрузки.

Задание

1. Выполнить практически синхронизацию заданной генераторной установки с сетью или двух генераторных установок между собой методом точной синхронизации. Составить четкую последовательность действий.
2. Выполнить практически синхронизацию заданной генераторной установки с сетью или двух генераторных установок между собой методом самосинхронизации. Составить четкую последовательность действий.

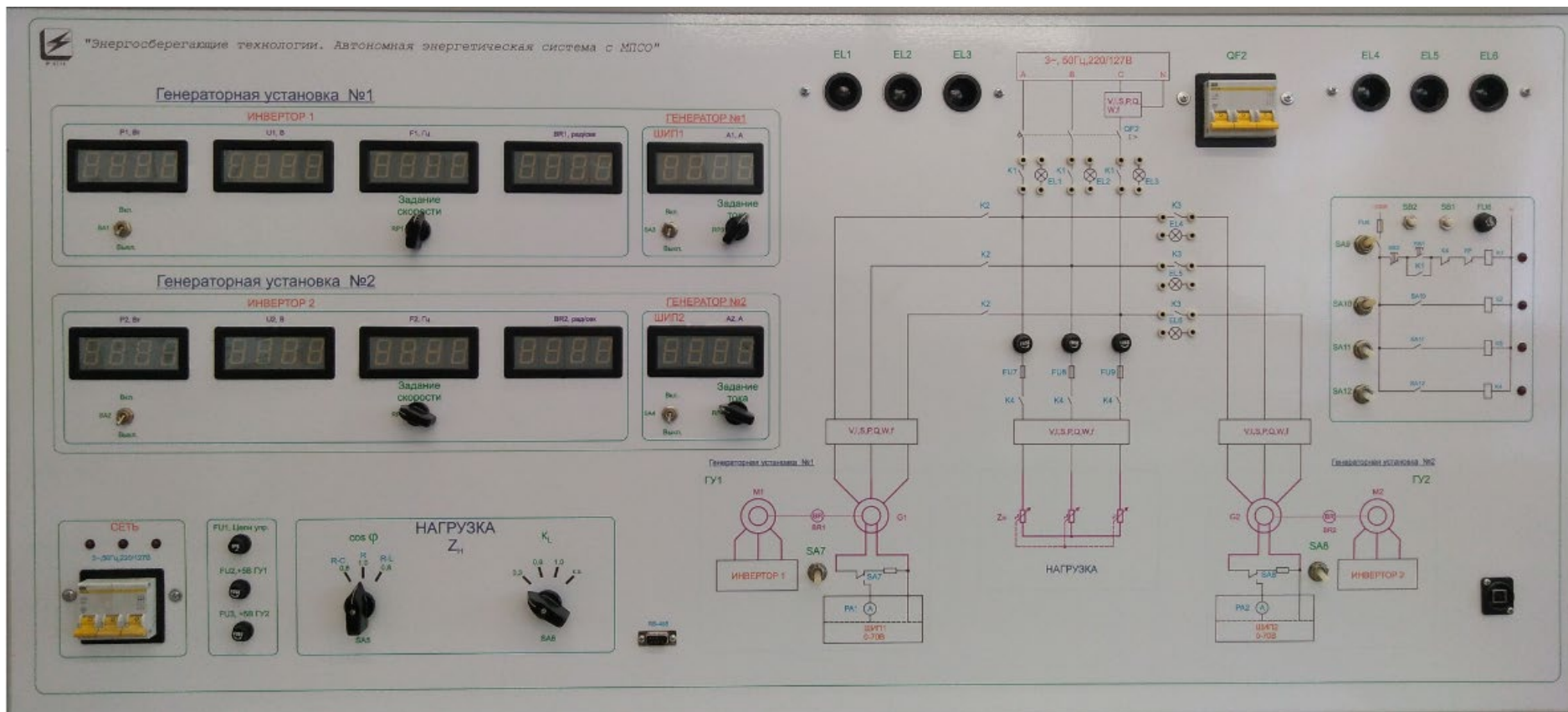


Рисунок 6. – Общий вид панели стенда НТЦ-48

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением основных узлов и элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2. Перед подключением стенда к питающей сети убедиться, что все тумблеры находятся в положении «Выкл», ручки потенциометров в крайнем левом положении (против часовой стрелки), переключатель SA5 ($\cos \varphi$) в положении $R 1,0$, а переключатель SA6 (K_L) в положении 0,3.

3. Если необходимо включить СГ на параллельную работу с сетью, то на стенде с помощью проводников нужно подключить лампы синхроскопа $EL1$, $EL2$ и $EL3$ параллельно контактам $K1$. Если же требуется подключить две генераторные установки с СГ на параллельную работу между собой, тогда с помощью проводников нужно подключить лампы синхроскопа $EL4$, $EL5$ и $EL6$ параллельно контактам $K3$.

4. Включить стенд автоматическим выключателем «Сеть». Проконтролировать наличие напряжения по свечению светодиодов, расположенных над автоматическим выключателем. После прохождения приветственной надписи и появления на всех цифровых приборах нулевых показаний измеряемых величин стенд готов к работе. Подключить МПСО к персональному компьютеру проводом USB. Запустить программу OSC 32 и загрузить профиль 1.

5. Для разгона генератора G1 (G2) включить инвертор 1 (инвертор 2) тумблером SA1 (SA2). Затем, плавно вращая ручку PR1 (PR2) по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора G1 (G2) равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR1 или BR2).

6. Для питания релейных схем управления включить тумблер SA9 (перевести тумблер в верхнее положение). Затем подключить обмотку ротора генератора G1 (G2) к ШИП1 (ШИП2) тумблером SA7 (SA8) (перевести тумблер в верхнее положение). Включить ШИП1 (ШИП2) – перевести тумблер SA3 (SA4) в положение «Вкл». Вращая по часовой стрелке ручку PR3 (PR4), задать такой ток возбуждения в роторе генератора (контролировать его по амперметру A1 или A2), чтобы выходное напряжение генератора G1 (G2) было 127–130 В (номинальное напряжение сети). Выходное напряжение генератора G1 (G2) контролировать в соответствующих окнах программы OSC32 на экране компьютера.

7. Синхронизация энергетической установки с сетью методом точной синхронизации.

7.1. Для синхронизации с сетью первой генераторной установки следует включить контактор K2 (включить тумблер SA10), а для второй генераторной установки – контактор K3 (включить тумблер SA11).

7.2. Включить автоматический выключатель QF2. При этом контакты K1 подключаются к сети, а лампы *EL1*, *EL2* и *EL3* синхроскопа начинают вспыхивать.

7.3. Плавным вращением ручки RP1 (для G1) или RP2 (для G2) по синхроскопу добиться равенства частоты напряжения генератора и частоты напряжения сети. Когда вспыхивание ламп становится настолько редкими, что пауза между ними продолжается не менее 5 с, следует в момент погасания ламп кнопкой SB1 включить пускатель K1, подключающий генератор к сети на параллельную работу.

8. После выполнения опыта выключить стенд в следующей последовательности:

- отключить пускатель K1 кнопкой SB2;
- отключить пускатель K2 (для G1) – перевести тумблер SA10 в нижнее положение, или пускатель K3 (для G2) – перевести тумблер SA11 в нижнее положение;
- уменьшить ток возбуждения генератора G1 до нуля – перевести ручку RP3 в крайнее левое положение против часовой стрелки (ручка RP4 для генератора G2);
- выключить ШИП1 – тумблер SA3 в положение «Выкл», или ШИП2 – тумблер SA4 в положение «Выкл»;
- отключить обмотку возбуждения генератора G1 от ШИП1 – тумблер SA7 в положение «Выкл». Для G2 – от ШИП2 – тумблер SA8 в положение «Выкл»;
- остановить приводной двигатель M1 – ручку RP1 или RP2 в крайнее левое положение (против часовой стрелки);
- выключить инвертор 1 (тумблер SA1) или инвертор 2 (тумблер SA2);
- обесточить стенд – тумблер «Сеть» в положение «Выкл».

9. Синхронизация энергетических установок между собой методом точной синхронизации.

9.1. Для синхронизации первой и второй генераторной установки между собой следует разогнать оба генератора G1 и G2, задать токи возбуждения и выровнять фазные напряжения на уровне 127–130 В, затем включить контактор K2 (включить тумблер SA10), при этом генератор G1 подключается к общим шинам. Лампы *EL4*, *EL5* и *EL6* синхроскопа начинают вспыхивать.

9.2. Плавным вращением ручки RP1 (для G1) или RP2 (для G2) по синхроскопу добиться равенства частоты напряжений генераторов G1 и G2. Когда вспыхивание ламп становится настолько редкими, что пауза между ними продолжается не менее 5 с, следует в момент погасания ламп тумблером SA11 включить пускатель K3, подключающий генератор G2 на параллельную работу с генератором G1.

10. После выполнения опыта выключить стенд в следующей последовательности:

- отключить пускатель КЗ – тумблер SA11 перевести в положение «Выкл»;
- далее по п.п. 4.8.

11. Синхронизация энергетической установки с сетью методом самосинхронизации.

11.1. Перед подключением стенда к питающей сети убедиться, что все тумблеры находятся в положении «Выкл», ручки потенциометров в крайнем левом положении (против часовой стрелки), переключатель SA5 ($\cos \varphi$) в положении $R 1,0$, а переключатель SA6 (K_L) в положении 0,3.

11.2. Включить стенд автоматическим выключателем «Сеть». Проконтролировать наличие напряжения по свечению светодиодов, расположенных над автоматическим выключателем. После прохождения приветственной надписи и появления на всех цифровых приборах нулевых показаний измеряемых величин стенд готов к работе. Подключите МПСО к персональному компьютеру проводом USB. Запустить программу OSC 32 и загрузить профиль 1.

11.3. Для разгона генератора G1 (G2) включить инвертор 1 (инвертор 2) тумблером SA1 (SA2). Затем, плавно вращая ручку PR1 (PR2) по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора G1 (G2) равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR1 или BR2).

11.4. Дальше выходные статорные обмотки генератора G1 (G2) нужно подключить к сети. Для этого включить автоматический выключатель QF2, тумблером SA9 включить питание релейных схем, тумблером SA10 включить контактор К2 для подключения G1 (тумблером SA11 включить контактор К3 для подключения G2) и кнопкой SB1 включить контактор К1, подключающий генератор к сети.

11.5. Подключить обмотку ротора генератора G1 к ШИП1 тумблером SA7 (перевести тумблер в верхнее положение). Если к сети подключается генератор G2, то к ШИП2 тумблером SA8 подключить обмотку ротора.

11.6. Подать ток возбуждения в обмотку ротора подключаемого генератора. Тумблером SA3 включить ШИП1 (для G1) или тумблером SA4 включить ШИП2 (для G2).

11.7. Увеличиваем ток возбуждения ротора подключаемого генератора ручкой PR3 (для G1) или ручкой PR4 (для G2), и генератор втягивается в синхронизм.

12. После проведения опыта выключить стенд, следуя указаниям п. 8.

13. Синхронизация энергетических установок между собой методом самосинхронизации.

13.1. Перед подключением стенда к питающей сети убедиться, что все тумблеры находятся в положении «Выкл», ручки потенциометров в крайнем левом положении (против часовой стрелки), переключатель SA5 ($\cos \varphi$) в положении $R 1,0$, а переключатель SA6 (K_L) в положении 0,3.

13.2. Включить стенд автоматическим выключателем «Сеть». Проконтролировать наличие напряжения по свечению светодиодов, расположенных над автоматическим выключателем. После прохождения приветственной надписи и появления на всех цифровых приборах нулевых показаний измеряемых величин стенд готов к работе. Подключите МПСО к персональному компьютеру проводом USB. Запустить программу OSC 32 и загрузить профиль 1.

13.3. Включить инвертор 1 тумблером SA1. Затем, плавно вращая ручку PR1 по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора G1 равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR1).

13.4. Включить тумблер SA9 питания релейных схем. Подключить обмотку ротора генератора G1 к ШИП1 тумблером SA7 (перевести тумблер в верхнее положение).

13.5. Включить ШИП1 – перевести тумблер SA3 в положение «Вкл». Увеличить ток возбуждения ротора генератора ручкой PR3 до 5 А.

13.6. Включить инвертор 2 тумблером SA2. Затем, плавно вращая ручку PR2 по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR2).

13.7. Включить контактор K2 тумблером SA10. Включить контактор K3 тумблером SA11.

13.9. Подключить обмотку ротора генератора G2 к ШИП2 тумблером SA8 (перевести тумблер в верхнее положение). Включить ШИП2 – перевести тумблер SA4 в положение «Вкл».

13.10. Увеличить ток возбуждения ротора генератора ручкой PR4 и добиться втягивания генераторов в синхронизм.

14. После проведения опыта выключить стенд, следуя указаниям п. 10.

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по лабораторной работе. На титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения.

В отчете указать цель лабораторной работы, привести схему включения заданного оборудования на параллельную работу, необходимые условия для такого включения и составить четкую последовательность выполняемых действий для указанного включения.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы включения СГ на параллельную работу между собой и сетью?
2. В каких случаях применяют метод точной синхронизации для включения СГ на параллельную работу между собой и сетью?
3. В каких случаях применяют метод самосинхронизации для включения СГ на параллельную работу между собой и сетью?
4. Какие условия надо выполнить для включения СГ на параллельную работу с сетью?
5. Последовательность действий при для включении СГ на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации?
6. Последовательность действий при для включении СГ на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации?
7. Поясните физический смысл условия «одинаковая последовательность фаз».
8. Поясните физический смысл условия «сдвиг по фазе между одноименными напряжениями должен быть равен нулю».
9. Что такое ламповый синхроскоп? Как он работает?
10. Как будет работать ламповый синхроскоп при неодинаковом чередовании фаз?
11. Как будет работать ламповый синхроскоп при одинаковом чередовании фаз?

Лабораторная работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД И ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ И ВЕЛИЧИНЕ НАГРУЗКИ

Цель работы: освоить методику определения КПД и потерь напряжения автономной энергетической установки; построить практическую диаграмму ЭДС синхронного генератора при различных видах нагрузки

Основные теоретические положения

Синхронная машина (СМ) – машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора постоянна (скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора) и не зависит от нагрузки. СМ обратима, т.е. она может работать и в режиме генератора, и в режиме двигателя.

В режиме генератора постоянную скорость должен поддерживать первичный двигатель независимо от электрической нагрузки. В режиме двигателя постоянная скорость поддерживается автоматически независимо от механической нагрузки на его валу.

Между частотой тока f и скоростью вращения ротора синхронного генератора (СГ) n_0 существует жесткая связь:

$$f = \frac{n_0 p}{60},$$

где p – число пар полюсов СГ; n_0 измеряется в оборотах в минуту.

Для получения источника тока частотой f необходимо, чтобы первичный двигатель (ПД) вращал ротор СГ со скоростью $n_0 = 60 f/p$, т.е. с синхронной скоростью. Если $f = 50$ Гц, а $p = 1$, то $n_0 = 3000$ об/мин; $p = 2$, $n_0 = 1500$ об/мин; $p = 3$, $n_0 = 1000$ об/мин и т.д.

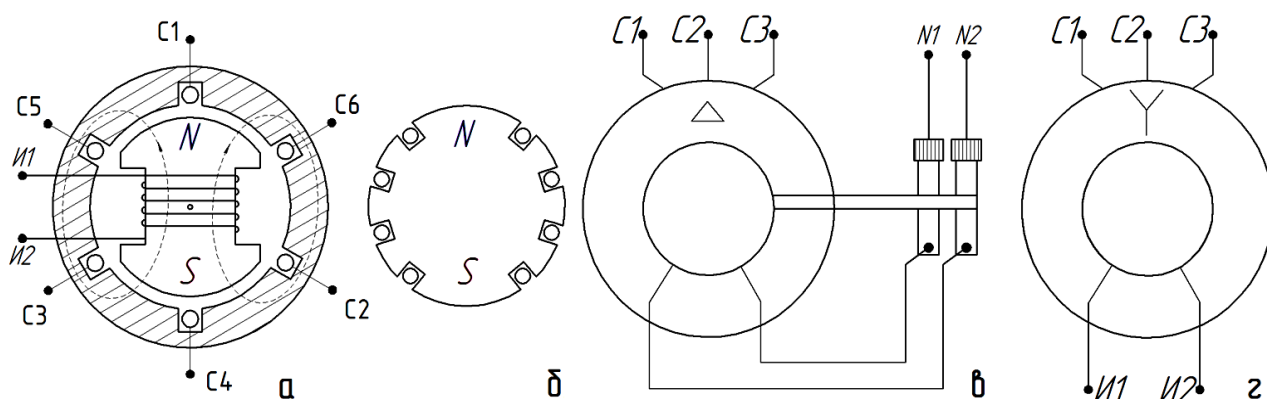
Устройство трехфазного синхронного генератора

Конструктивно трехфазный СГ состоит из неподвижного статора (якоря) и вращающегося внутри него ротора (индуктора).

Статор СГ вместе с обмотками аналогичен статору асинхронной машины. Трехфазная обмотка статора СГ является источником трехфазной ЭДС, к которой подключаются потребители электрической энергии.

Ротор представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения (ОВ) которого питается постоянным током от независимого источника. Он может иметь явно выраженные полюсы (рисунок 1, а) или быть неявнополюсным (рисунок 1, б).

Явнополюсные роторы имеют, например, синхронные генераторы, первичными двигателями для которых служат тихоходные гидротурбины со скоростями не более 1000 об/мин, а более прочный неявнополюсный ротор используется в быстроходных турбогенераторах со скоростями 1500 или 3000 об/мин.



а – основные конструктивные элементы и обмотки; *б* – неявнополюсный ротор; *в* – схема подключения обмотки возбуждения; *г* – условные графические обозначения

Рисунок 1. – Синхронная машина

Ротор и статор могут иметь несколько пар полюсов, но число пар полюсов должно быть одинаковым.

Ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает от сети постоянного тока через неподвижные щетки и контактные кольца, закрепленные на втулке изолятора и вращающиеся вместе с ротором (см. рисунок 1, в).

Условное графическое обозначение СМ показано на рисунке 1, г.

Принцип действия трехфазного синхронного генератора

В режиме генератора обмотка возбуждения подключается через контактные кольца к источнику постоянного тока. В качестве источника применяется отдельный генератор постоянного или переменного тока, возбудитель, который подключается к обмотке возбуждения ОВ через управляемый выпрямитель. Возбудитель монтируется на одном валу с ротором генератора. Обмотка возбуждения может также питаться от сети переменного тока, подключенной к статору через управляемый выпрямитель.

Ротор генератора вместе с обмоткой возбуждения, создающей магнитное поле, приводится во вращение первичным двигателем (паровой или гидравлической турбиной, дизелем и т.п.) с постоянной синхронной скоростью $n_0 = \frac{60f}{p}$, об/мин, где p – число пар полюсов. Для этого первичные двигатели оборудуются автоматическими регуляторами скорости.

При вращении ротора магнитное поле, создаваемое ОВ, наводит в неподвижных проводниках обмотки статора симметричную трехфазную систему ЭДС:

$$e_a = E_m \sin \omega t; e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); e_c = E_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

где E_m – амплитуда ЭДС;
 ω – круговая частота;
 t – время.

Этот трехфазный источник питания может индивидуально питать электрическую нагрузку или быть подключен на параллельную работу с сетью.

Действующее значение фазной ЭДС, как и в асинхронных машинах,

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 K_{об} f w_1 \Phi_0,$$

где $K_{об}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора;
 f – частота генерируемых ЭДС;
 w_1 – число витков обмотки одной фазы статора;
 Φ_0 – магнитный поток.

Определение КПД энергетической установки при различных коэффициентах загрузки

Как известно, физический смысл КПД заключается в том, что он показывает, какая доля затраченной мощности является полезной. КПД выражается в процентах и количественно оценивается выражением

$$\eta = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\text{затр}}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Поэтому под КПД энергоустановки понимается выраженное в процентах отношение мощности, отдаваемой генератором в нагрузку P_H ко всей мощности, подводимой к генератору (это и мощность первичного двигателя $P_{ДВ}$ со своим коэффициентом полезного действия, и мощность цепи возбуждения генератора P_B).

Мощность, отдаваемая генератором в нагрузку P_H (полезная мощность), может быть определена по измеренным значениям тока и напряжения в каждой фазе генератора:

$$P_{\text{полез}} = P_H = U_A \cdot I_A \cdot \cos(\varphi_A) + U_B \cdot I_B \cdot \cos(\varphi_B) + U_C \cdot I_C \cdot \cos(\varphi_C), \quad (2)$$

где U_A, U_B и U_C – действующие значения фазных напряжений генератора;
 I_A, I_B и I_C – действующие значения фазных токов генератора;
 $\cos(\varphi_A), \cos(\varphi_B)$ и $\cos(\varphi_C)$ – коэффициенты мощности в нагрузках фаз.

Мощность, подводимая к генератору (она же затраченная), складывается из мощности цепи первичного двигателя, вращающего генератор P_{BP} , и мощности цепи возбуждения генератора P_B .

Поскольку в лабораторном стенде НТЦ-48 генератор приводится во вращение асинхронным электродвигателем, то мощность, затрачиваемая на вращение синхронного генератора, вычисляется по формуле

$$P_{BP} = P_{ДВ} \cdot \eta_{ДВ}, \quad (3)$$

где $P_{ДВ}$ – мощность, измеренная ваттметром в цепи питания приводного асинхронного электродвигателя;

$\eta_{ДВ}$ – коэффициент полезного действия приводного асинхронного электродвигателя ($\eta_{ДВ} = 0,69$).

Мощность цепи возбуждения вычисляется по измеренному току возбуждения I_B и известному сопротивлению цепи возбуждения R_B (для СГ в лабораторном стенде НТЦ-48 $R_B = 2$ Ом):

$$P_B = I_B^2 \cdot R_B. \quad (4)$$

С учетом (2), (3) и (4) выражение (1) для КПД энергоустановки может быть представлено в следующем виде:

$$\eta = \frac{U_A \cdot I_A \cdot \cos(\varphi_A) + U_B \cdot I_B \cdot \cos(\varphi_B) + U_C \cdot I_C \cdot \cos(\varphi_C)}{P_{ДВ} \cdot \eta_{ДВ} + I_{\text{Возб}}^2 \cdot R_B}. \quad (5)$$

КПД энергетической установки не остается величиной постоянной, а изменяется при изменении коэффициента нагрузки. Причем зависимость КПД от коэффициента нагрузки имеет экстремальный характер, т.е. имеется максимум, после которого КПД снижается (рисунок 2).

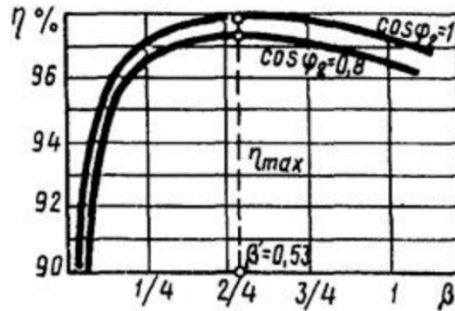


Рисунок 2. – Зависимость КПД от коэффициента нагрузки

Практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора при различных нагрузках

Практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора кроме полного тока возбуждения, соответствующего заданному значению тока статора, позволяет определить повышение напряжения на выводах генератора при резком сбросе нагрузки.

Изменение напряжения синхронного генератора $\Delta U_{ном}$ при сбросе номинальной нагрузки можно определить графически – построением практической диаграммы ЭДС. Предположим, что синхронный генератор работал в режиме номинальной нагрузки, а затем нагрузка была полностью сброшена, но частота вращения и ток возбуждения при этом остались неизменными. Напряжение генератора после сброса нагрузки возросло на $\Delta U_{ном}$.

Для построения практической диаграммы ЭДС синхронного генератора необходимо в одних осях и в относительных единицах изобразить характеристики холостого хода и короткого замыкания синхронного генератора (рисунок 3).

Затем на оси ординат построить вектор $OA = U_{1ном}^*$ и под углом φ_1 к вектору OA провести вектор тока $I_{1ном}^*$.

Прибавив к вектору $U_{1ном}$ векторы падения напряжения $I_{1ном}^* \cdot r_1$ и $j \cdot I_{1ном}^* \cdot x_1$, найти ЭДС нагруженного генератора:

$$E_{HG}^* = U_{1ном}^* + I_{1ном}^* \cdot r_1 + j \cdot I_{1ном}^* \cdot x_1. \quad (6)$$

Через конец полученного вектора E_{HG}^* провести горизонтальную линию через точку B до пересечения с характеристикой холостого хода в точке C. Из точки C опустить перпендикуляр на ось абсцисс в точку D.

Полученный на оси абсцисс отрезок OD определяет ток возбуждения I_B^* , необходимый для создания ЭДС нагруженного генератора E_{HG}^* . Но при работе

генератора без нагрузки (в режиме холостого хода) его ЭДС E_0^* больше, чем ЭДС $E_{НГ}^*$, на значение ЭДС продольной реакции якоря E_{1d}^* , т.е.

$$E_0^* = E_{НГ}^* + E_{1d}^*. \quad (7)$$

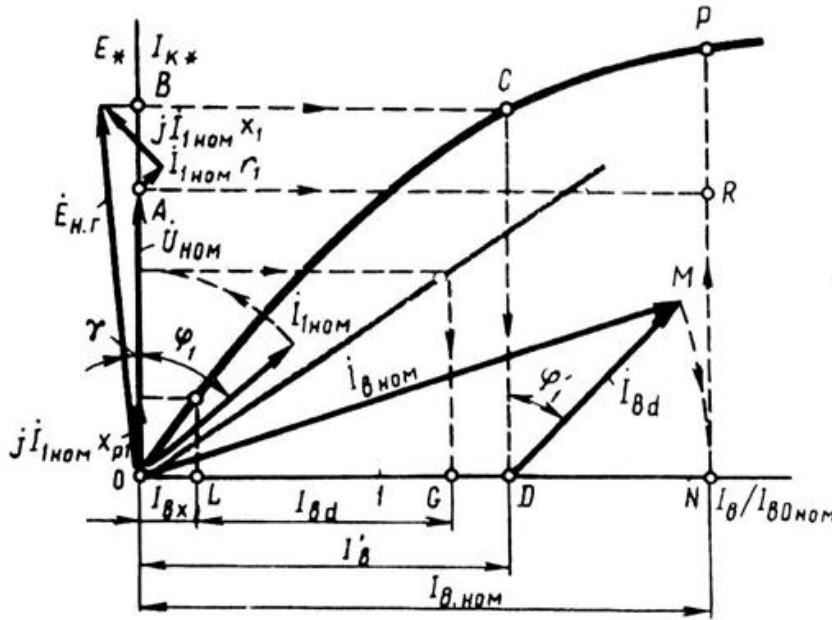


Рисунок 3. – Практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора

Для учета E_{1d}^* определить ток возбуждения I_{Bd}^* , соответствующий продольно-размагничивающему действию реакции якоря.

Для этого по оси ординат отложить падение напряжения $j \cdot I_{f,ном}^* \cdot X_1$ от начала системы координат. Из конца этого вектора провести горизонтальную линию до пересечения с характеристикой холостого хода и из точки пересечения опустить перпендикуляр на ось абсцисс. Получаем точку L.

Затем из центра O (начало системы координат) радиусом $I_{f,ном}^*$ описать дугу до пересечения с осью ординат. Из этой точки пересечения провести горизонтальную линию до пересечения с характеристикой короткого замыкания и из полученной точки пересечения опустить перпендикуляр на ось абсцисс. Получаем точку G.

Ток возбуждения I_{Bd}^* определяется длиной отрезка LG, т.е. $LG = I_{Bd}^*$.

Затем из точки D под углом $\varphi_1' = \varphi_1 + \gamma$ к CD провести вектор $DM = I_{Bd}^*$, который сложить с вектором $OD = I_{B,ном}^*$. В результате получаем вектор $OM = I_{B,ном}^*$.

Из центра O радиусом OM описать дугу до пересечения с осью абсцисс в точке N . Тогда $ON = I_{B,ном}^*$ – ток возбуждения, соответствующий ЭДС $E_0^* = NP$. Проведя из точки A параллельно оси абсцисс линию AR , получим

$$\Delta U_{ном} = \frac{NP - NR}{NR} \cdot 100\% = \frac{E_0^* - U_{1ном}^*}{U_{1ном}^*} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Выражение (7) показывает изменение напряжения синхронного генератора $\Delta U_{ном}$ при сбросе номинальной нагрузки.

Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд НТЦ-48 «Автономная энергетическая установка» предназначен для исследования характеристик синхронного генератора в различных режимах работы, для изучения способов синхронизации двух синхронных генераторов (СГ) между собой, а также синхронного генератора с сетью, для оценки энергетических показателей и КПД установки.

Общий вид передней панели стенда показан на рисунке 4.

В состав стенда входят две генераторные установки ГУ1 и ГУ2, каждая из которых представляет собой состыкованную пару «Асинхронный двигатель – Синхронный генератор» с элементами управления и измерения. Для разгона асинхронного двигателя ГУ1 применен трехфазный управляемый инвертор 1, позволяющий изменять скорость вращения асинхронного двигателя, а значит, и скорость вращения СГ. При этом изменяется и частота генерируемого напряжения. Аналогично инвертор 2 выполняет такие же функции в ГУ2. Управляемые источники питания ШИП1 и ШИП2 служат для задания токов возбуждения в генераторных установках ГУ1 и ГУ2 соответственно. Трехполюсный автомат «Сеть» подключает общее питание стенда. Трехполюсный автомат QF2 служит для подключения генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы.

Реле К1, К2, К3 и К4 своими контактами позволяют подключать выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 к имитируемой общей сети энергосистемы, выходные обмотки генераторов ГУ1 и ГУ2 между собой на параллельную работу и к нагрузке. Имеется возможность дискретно изменять величину нагрузки $K_L = 0,3; 0,6; 1,0$ и $\cos \varphi$. Две группы ламп EL1, EL2, EL3 и EL4, EL5, EL6 используются для синхронизации генераторов между собой и имитируемой сетью. USB-разъем служит для подключения компьютера с целью вывода результатов измерения фазных напряжений, токов и мощностей генераторов и нагрузки..

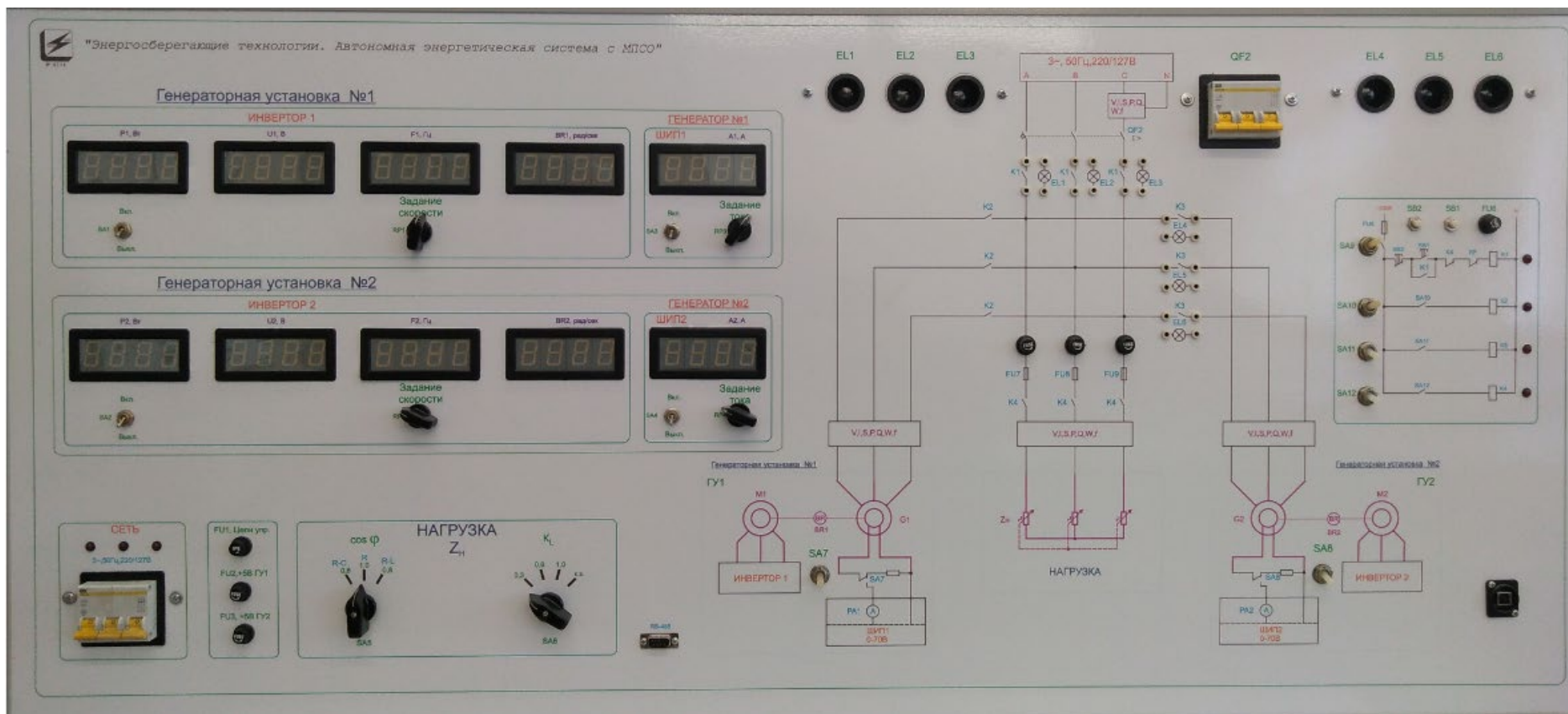


Рисунок 4. – Общий вид панели стенда НТЦ-48

Задание

1. Экспериментально снять зависимость КПД синхронного генератора от коэффициента нагрузки K_L как функцию $\eta = f(K_L)$ и представить ее графически.
2. Экспериментально в режиме с номинальной нагрузкой определить потери напряжения в энергетической установке.
3. Для режима номинальной нагрузки построить практическую диаграмму и теоретически определить потери напряжения в энергетической установке.
4. Сравнить экспериментальные и теоретические значения потерь напряжения, при наличии больших расхождений пояснить причины.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением основных узлов и элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.
2. Перед подключением стенда к питающей сети убедиться, что все тумблеры находятся в положении «Выкл», ручки потенциометров в крайнем левом положении (против часовой стрелки), переключатель SA5 ($\cos \varphi$) в положении R 1,0, а переключатель SA6 (K_L) в положении 0,3.
3. Далее описан порядок выполнения лабораторной работы при использовании первой генераторной установки (ГУ1). Если будет использована вторая генераторная установка (ГУ2), то следует использовать аналогичные тумблеры и регулировочные элементы с другими позиционными обозначениями, относящиеся ко второй генераторной установке (см. схему стенда).
4. Включить стенд автоматическим выключателем «Сеть». Проконтролировать наличие напряжения по свечению светодиодов, расположенных над автоматическим выключателем. После прохождения приветственной надписи и появления на всех цифровых приборах нулевых показаний измеряемых величин стенд готов к работе. Подключить МПСО к персональному компьютеру проводом USB. Запустить программу OSC 32 и загрузить профиль 1.
5. Для разгона генератора G1 (G2) включить инвертор 1 (инвертор 2) тумблером SA1. Затем, плавно вращая ручку PR1 по часовой стрелке, задать скорость вращения генератора G1 равной 102 рад/с (скорость контролировать по индикатору BR1).
6. Для питания релейных схем управления включить тумблер SA9 (перевести тумблер в верхнее положение). Затем подключить обмотку ротора генератора

G1 к ШИП1 тумблером SA7 (перевести тумблер в верхнее положение). Включить ШИП1 – перевести тумблер SA3 в положение «Вкл», и плавно вращая ручку PR3 (задание тока), выставить ток возбуждения генератора $I_B = 9$ А. Выходное напряжение генератора G1 и ток нагрузки контролировать в соответствующих окнах программы OSC32 на экране компьютера.

7. По указанию преподавателя переключателем SA5 выбрать требуемый вид нагрузки (RL, R или RC), и подключить ее к генератору. Если используется генератор G1, то для подключения нагрузки требуется включить контакторы K2 и K4 (см. схему стенда). Для этого необходимо включить тумблеры SA10 и SA12. При изменении скорости вращения корректировать ее вращением ручки RP1 (задание скорости). При необходимости выполнить коррекцию и тока возбуждения вращением ручки RP3 (задание тока).

7.1. Убедиться, что переключатель K_L находится в положении $K_L = 0,3$ и зафиксировать показания приборов: мощность разгонного двигателя P1, ток возбуждения генератора I_B , а также с экрана монитора значения фазных токов и напряжений.

Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

K_L	P_1 , Вт	I_V , А	U_A , В	I_A , А	U_B , В	I_B , А	U_C , В	I_C , А	U_{AX} , В	U_{BX} , В	U_{CX} , В	η , %	ΔU , %
0,3													
0,6													
1,0													

7.2. Для измерения потерь напряжения в генераторе после фиксации указанных параметров отключить нагрузку от генератора. Для этого следует выключить контактор 4 (см. схему стенда) – выключить тумблер SA12. После выдержки времени (10–20 с) и коррекции оборотов и тока возбуждения зафиксировать и занести в таблицу 1 значения фазных напряжений U_{AX} , U_{BX} и U_{CX} в режиме холостого хода.

7.3. Переключатель K_L перевести в положение $K_L = 0,6$ и выполнить действия по п.п. 4.7.1. и 4.7.2.

7.4. Переключатель K_L перевести в положение $K_L = 1,0$ и выполнить действия по п.п. 4.7.1. и 4.7.2.

8. Выключить стенд в следующей последовательности:

- отключить нагрузку, выключить тумблеры SA10 и SA12;

- уменьшить ток возбуждения генератора G1 до нуля – перевести ручку RP3 в крайнее левое положение (против часовой стрелки);
- выключить тумблер SA3 питания ШИП2;
- выключить тумблер SA7 (замкнуть обмотку ротора G1 на активное сопротивление);
- переключатель SA6 перевести в положение 0,3;
- выключить питание релейных схем управления, выключить тумблер SA9;
- плавно вращая ручку PR1 против часовой стрелки, снизить обороты приводного двигателя до нуля и остановить его (скорость контролировать по индикатору BR1);
- выключить тумблер SA1 питания ШИП1;
- автоматический выключатель «СЕТЬ» перевести в положение «Выкл».

8. Для каждого значения коэффициента нагрузки K_L вычислить значение КПД энергетической установки по формуле

$$\eta = \frac{U_A \cdot I_A \cdot \cos(\varphi_A) + U_B \cdot I_B \cdot \cos(\varphi_B) + U_C \cdot I_C \cdot \cos(\varphi_C)}{P_1 \cdot \eta_{дв} + I_V^2 \cdot R_B} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $\eta_{дв}$ – КПД разгонного двигателя ($\eta_{дв} = 0,69$);

R_B – сопротивление цепи возбуждения СГ стенда;

$\cos(\varphi)$ – указан на нагрузке стенда.

Результаты вычислений также занести в таблицу 1.

По результатам вычислений построить график зависимости $\eta = f(K_L)$.

Для каждого значения коэффициента нагрузки K_L вычислить величину потерь напряжения в СГ энергетической установки по формуле

$$\Delta U = \frac{(U_{AX} - U_A) + (U_{BX} - U_B) + (U_{CX} - U_C)}{U_A + U_B + U_C} \cdot 100\%. \quad (9)$$

10. Для случая максимальной нагрузки ($K_L = 1,0$) построить практическую диаграмму СГ и теоретически определить величину потерь напряжения в СГ в процентах. Сравнить полученное значение с измеренным. Для этого исходные характеристики холостого хода и короткого замыкания взять из первой лабораторной работы, но построить их в одних осях и в относительных единицах. Методику построения – см. в п. 1,4. Построения следует выполнять в масштабе, желательно на миллиметровке.

Отчет по работе

По результатам выполненных измерений составить отчет по лабораторной работе, на титульном листе отчета указать название лабораторной работы, ФИО исполнителей, номер группы и дату выполнения.

В отчете указать цель лабораторной работы, привести таблицы данных по измерениям и вычислениям, построить график зависимости $\eta = f(K_L)$, практическую диаграмму СГ для случая $K_L = 1,0$. Проанализировать характер поведения зависимости $\eta = f(K_L)$.

Контрольные вопросы

1. Общее понятие КПД, и как он вычисляется?
2. Как определяется полезная мощность СГ?
3. Из каких составляющих складывается полная мощность, потребляемая СГ от сети?
4. По какой формуле вычисляется мощность, расходуемая на разгон СГ?
5. По какой формуле вычисляется мощность, расходуемая на возбуждение СГ?
6. Как зависит КПД от степени загрузки СГ? Почему?
7. Характер зависимости КПД от степени загрузки СГ при активной нагрузке.
8. Характер зависимости КПД от степени загрузки СГ при активно-индуктивной нагрузке.
9. Характер зависимости КПД от степени загрузки СГ при активно-емкостной нагрузке.
10. На основе каких характеристик СГ может быть построена практическая диаграмма СГ?
11. Какая величина определяется при построении практической диаграммы СГ?