

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. В. Бочарова

**«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРО-
СТАНЦИЙ»**

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ для студентов магистратуры
по направлению подготовки 13.04.01 теплоэнергетика и теплотехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 621.31

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
М.С. Харитонов

Бочарова, Н. В.

Электрические машины: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ для студентов магистратуры по напр. подг. 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника / Н. В. Бочарова. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 51 с.

Учебно-методическое пособие является руководством по проведению цикла лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины тепловых электростанций» со студентами, обучающимися по направлению подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника. Лабораторные работы предназначены для формирования знаний, умений и навыков в области электрических машин.

Рис.19 , табл. 16 , список лит. – 8 наименований

Учебно-методическое пособие по проведению цикла лабораторных работ рекомендовано в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 23.12.2022 г., протокол №4

УДК 621.31

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Бочарова Н. В., 2023 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Правила техники безопасности при проведении работ.....	6
Лабораторная работа № 1	9
Лабораторная работа № 2	21
Лабораторная работа № 3	30
Лабораторная работа № 4	40
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	48
Приложение А.....	49
Приложение Б	50

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Электрические машины тепловых электростанций» является формирование навыков использования системы знаний в области теории и практики электромеханического преобразования энергии, лежащего в основе современной электроэнергетики.

Задачи изучения дисциплины:

- изучение устройства, принципа действия и характеристик электрических машин;
- изучение режимов работы, свойств и областей применения электрических машин;
- приобретение навыков подключения и испытания электрических машин, расчётов и измерений переменных величин.

На промежуточной аттестации дисциплины обучающиеся должны

знать:

принцип действия современных типов электрических машин; особенности их конструкции; уравнения, схемы замещения и характеристики электрических машин;

уметь:

использовать полученные знания при решении практических задач по эксплуатации электрических машин;

владеть:

навыками элементарных расчетов и испытаний электрических машин;

Целью лабораторного практикума является углубление и закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях, развитие навыков работы с электрооборудованием, развитие инициативы и самостоятельности в работе.

Конкретными задачами лабораторного практикума являются:

- изучение структуры и элементной базы электрических машин;
- приобретение навыков определения основных параметров электрических машин;
- приобретение навыков экспериментального исследования различных физических процессов в электрических машинах.

В процессе выполнения лабораторных работ студенты знакомятся с конкретными электроизмерительными приборами, изучают и практически осваивают различные режимы работы электрических машин.

Лабораторная работа может быть успешно выполнена в том случае, если студенты имеют хорошую предварительную теоретическую и методическую подготовку.

Теоретическая подготовка предусматривает повторение и усвоение рассмотренных на лекциях положений, осмысление основных теоретических

соотношений и зависимостей, связывающих электрические величины и характеризующих физические явления, внимательное ознакомление с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы и оформления отчета.

Методическая подготовка предусматривает наличие и выработку у студентов навыков в чтении электрических схем и сборке электрических цепей, а также проведении исследований в определенной последовательности, позволяющей сопоставлять и анализировать физические процессы и явления.

Подготовку к лабораторной работе необходимо начинать с повторения теоретического материала по учебнику и только после этого знакомиться с описанием лабораторной работы, заканчивая разбор контрольных вопросов. В процессе подготовки должна быть вычерчена принципиальная схема лабораторной установки и подготовлены таблицы для записи полученных данных в процессе выполнения работы.

Готовность студента к выполнению лабораторной работы проверяется преподавателем путем опроса по содержанию выполняемой работы. Студенты, не подготовленные к выполнению лабораторной работы, не допускаются к выполнению работы, и при этом оставшееся до конца занятия время студент должен использовать для подготовки к данной лабораторной работе. Время на отработку пропущенной лабораторной работы согласовывается с преподавателем.

Правила техники безопасности при проведении работ

1. Общие требования охраны труда

Безопасность жизнедеятельности при проведении лабораторных работ в лабораториях кафедры энергетики обязательна для профессорско-преподавательского состава, учебно-вспомогательного персонала и студентов.

К проведению лабораторных работ допускаются лица, прошедшие инструктаж с росписью в журнале. Инженер, обслуживающий лабораторию, должен иметь группу допуска с ежегодной проверкой. В лаборатории должна быть медицинская аптечка с набором медикаментов первой медицинской помощи, а также лаборатория должна быть укомплектована средствами пожаротушения. На видном месте должна висеть инструкция по противопожарной технике безопасности.

Во время проведения занятий запрещено находиться в лаборатории в верхней одежде, либо размещать верхнюю одежду в помещении лаборатории. Перед проведением лабораторных занятий студенты обязаны изучить лабораторную работу. Перед началом работы инженер или преподаватель проверяет исправность стендов. Без разрешения преподавателя проведение лабораторных работ запрещается. Запрещается изменять схему лабораторной работы. При проведении лабораторных работ на столах не должно быть ничего из посторонних предметов. Всякие работы по устранению неисправностей под напряжением категорически запрещаются. При сборке схемы применяют только стандартные провода с наконечниками. При возникновении неисправностей стенд должен быть немедленно отключен от сети.

Запрещается оставлять без присмотра работающие стенды. При появлении запаха гари немедленно отключить стенд. В случае поражения электрическим током немедленно обесточить стенд и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

Ответственный за проведение лабораторных работ уходит последним из лаборатории, убедившись, что рабочее место убрано, а стенды отключены.

При эксплуатации действующих электроустановок запрещается использовать оборудование в условиях, не соответствующих требованиям инструкции организации-изготовителей, или оборудование, имеющее неисправности, которые в соответствии с инструкцией по эксплуатации могут привести к пожару, а также эксплуатировать провода и кабели с поврежденной или потерявшей защитные свойства изоляцией; пользоваться поврежденными розетками, рубильниками, другими электроустановочными изделиями.

2. Требования охраны труда перед началом работы

- Осмотреть состояние помещения: достаточна ли освещенность, работает ли вентиляция проветривания помещения, позволяет ли температура в помещении комфортно проводить работы без верхней одежды, не загромождено ли место проведения занятий посторонними предметами.
- Осмотреть состояние электрических соединений, рубильников, автоматов и прочих переключающих средств.
- Проверить наличие средств защиты.
- Убрать все посторонние предметы, которые могли бы создавать неудобство в сборке схемы лабораторной работы.
- Если необходимо, вывесить предупреждающие плакаты.
- Лабораторная работа проводится только с исправными приборами.
- Руководитель перед началом работы проводит инструктаж по технике безопасности и контролирует весь процесс работы.
- К моменту проведения работ все стенды должны быть проверены и готовы.
- Все студенты должны расписаться в контрольном листе.
- Студенты должны внимательно изучить описание работы, при необходимости выяснить неясные моменты.

3. Требования охраны труда во время работы

- Лабораторная работа проводится только в присутствии преподавателя.
- На проведение лабораторной работы разрешение дает лично руководитель занятий после проверки правильно собранной схемы.
- Руководитель должен следить, чтобы в схеме не было открытых оголенных проводов. При обнаружении недостатков такая работа должна быть немедленно приостановлена.
- Во время проведения лабораторной работы все проходы должны быть освобождены, доступ к стендам должен быть свободным.
- Во время проведения лабораторной работы запрещается оставлять включенный стенд без присмотра.
- При выявлении запаха гари следует немедленно обесточить стенд и доложить руководителю.

4. Требования охраны труда по окончании работы

- По окончании лабораторной работы стенд обесточивается, все приборы и соединительные провода отсоединяются и убираются.
- О выявленных неисправностях доложить руководителю занятий.
- Выключить освещение лаборатории, закрыть помещение на замок

5. Требования охраны труда в аварийных ситуациях

1) При возникновении неисправностей во время проведения лабораторной работы необходимо немедленно обесточить стенд.

2) При обнаружении пожара необходимо:

- прекратить работу, оповестить окружающих о пожаре;
- сообщить о пожаре на вахту, сообщить о возгорании в пожарную охрану по тел. **01** или по тел. **101 (112)** мобильной связи, сообщить при этом точное место пожара, что горит, свою фамилию;

- принять меры по эвакуации людей и спасению оборудования.

- отключить от сети электрооборудование;

- приступить к тушению пожара своими силами с помощью имеющихся подручных средств пожаротушения;

- если погасить очаг горения не представляется возможным, необходимо плотно закрыть окно, дверь не запирая замок и покинуть опасную зону;

3) При поражении электрическим током немедленно обесточить стенд и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему. При необходимости вызвать скорую помощь по тел. **03.** или по тел. **103 (112)** мобильной связи.

Лабораторная работа № 1

«Исследование способов соединения обмоток трансформатора»

Цель работы: формирование знаний, умений, навыков в области групп соединений трехфазных трансформаторов.

1. Краткие теоретические сведения

Для силовых трансформаторов согласно ГОСТ 11667–35 установлены стандартные обозначения начал и концов обмоток и их ответвлений.

В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначают соответственно А, В, С и Х, Y, Z начала и концы обмоток НН – а, в, с и х, у, z. Чередование фаз А, В, С принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов ВН.

Если обмотка ВН имеет регулировочные ответвления, то их обозначают теми же буквами, что начало и конец обмотки, но с цифровыми индексами 1, 2, 3 и т.д. (см., например, паспортные данные исследуемого трансформатора).

В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам «звезда», «треугольник» или «зигзаг», которые обозначают буквами Y, D, Z. При выводе нейтрали ее обозначают буквой O. В обозначении схем добавляют индекс «н» (Y_n , Z_n).

Трехфазные силовые двух обмоточные трансформаторы выполняются со следующими схемами соединения обмоток: $\frac{Y}{Y_n}, \frac{Y}{D}, \frac{Y_n}{D}, \frac{Y}{Z_n}, \frac{D}{Y_n}, \frac{D}{D}$.

Понятие начала и конца обмоток условно, но при соединении обмоток введение его является совершенно необходимым. Рассмотрим рисунок 1.1, где показаны две обмотки, расположенные на одном стержне, которые пронизываются одним и тем же потоком. Одноимённые зажимы обозначены на рисунке 1.1 звездочками. Начала и концы обмоток у однофазного трансформатора можно выбрать произвольным образом, как указано, например, на рисунках 1.1 (б, в).

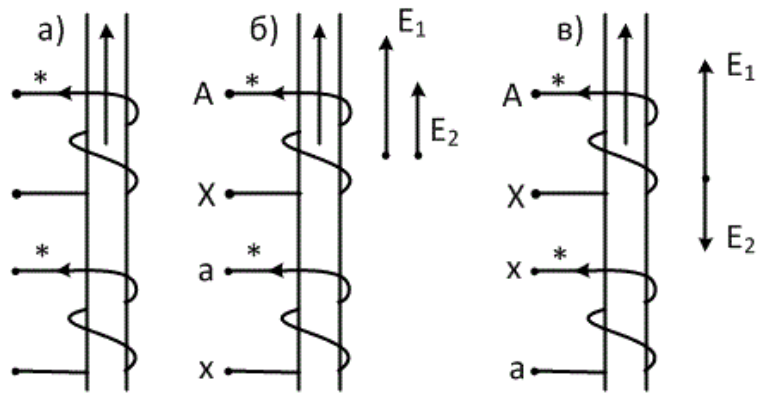


Рисунок 1.1 - Пример выбора начал и концов обмоток однофазного трансформатора

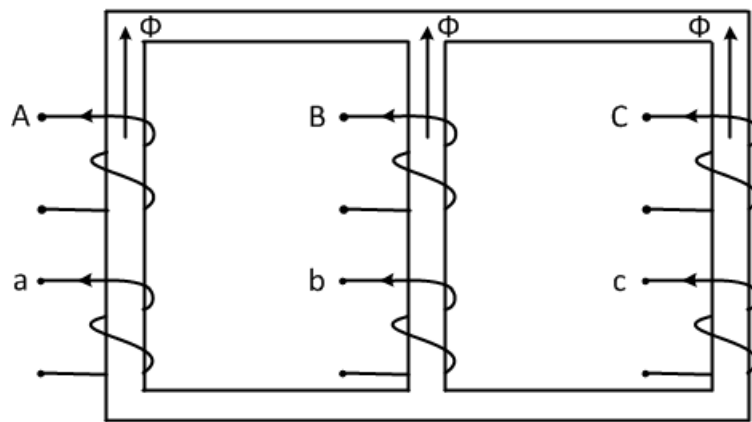


Рисунок 1.2 - Направления потоков в стержнях трехфазного трансформатора

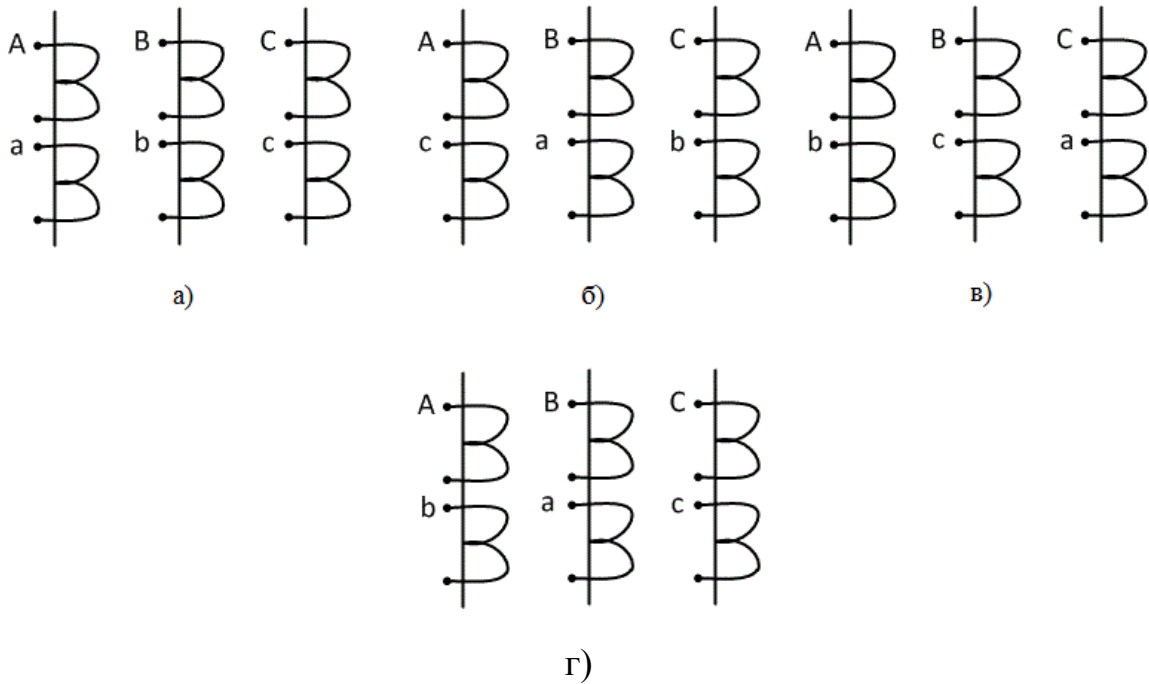


Рисунок 1.3 - Различное расположение обмоток на стержнях, принадлежащих фазам а, в, с

На рисунке 1.1в начала обмоток ВН и НН совпадают с одноименными зажимами, поэтому ЭДС E_1 и E_2 , индуцируемые в обмотках 1 и 2 будут одинаково направлены относительно начал обмотки, следовательно, совпадают по фазе (рисунок 1.1б). Если же у одной из обмоток, например, у второй, изменить обозначение начала и конца на обратное (рисунок 1.1в), то направление наведенной ЭДС E_2 по отношению к выводам обмотки изменится на противоположное. E_1 и E_2 будут сдвинуты по фазе на 180° (см. рисунок 1.1в).

Для характеристики относительного сдвига фаз линейных ЭДС обмоток ВН и НН вводится понятие группы соединения обмоток трансформатора. Группа соединений равна

$$\text{Группа} = \varphi_{\text{л}} / 30$$

где $\varphi_{\text{л}}$ - угол сдвига в градусах между линейными ЭДС на одноименных выводах обмоток ВН и НН, отсчитываемый от вектора ЭДС обмотки ВН по направлению часовой стрелки.

Так как в однофазных трансформаторах

$$E_{\text{л}} = E_{\text{ф}},$$

то для них возможны две группы соединений:

группа 0 при $\varphi_{\text{л}} = 0$ (рисунок 1.1б);

группа 6 при $\varphi_{\text{л}} = 180^\circ$ (рисунок 1.1в).

В трехфазном трансформаторе нельзя произвольно выбирать начала и концы обмоток отдельно для каждой фазы. При одинаковом направлении потока в стержнях, как на рисунке 1.2, необходимо, чтобы ЭДС были одновременно в каждой фазе ВН или НН направлены к началам либо к концам обмоток. ЭДС, индуцируемые в обмотках, находящихся на одном стержне, как и для однофазного трансформатора, совпадают по фазе, либо имеют сдвиг 180° .

В трехфазном трансформаторе группа соединения зависит:

- от схемы соединения обмоток;
- от выбора начал и концов обмоток;
- от того, на каком стержне находятся обмотки, принадлежащие фазам а, в, с.

Смысл последнего утверждения заключается в том, что на каждом стержне магнитопровода могут размещаться не только одноименные фазы, как, например, на рисунках 1.2 и 1.3а, но и разноименные (рисунок 1.3б, в).

При изменении названия фаз обязательно должен соблюдаться порядок их чередования (недопустимо чередование фаз, указанное на рисунок 1.3г).

В трехфазных трансформаторах схемы соединения Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z могут образовывать четные группы 0, 2, 4, 6, 8, 10, а схемы Y/Δ, Δ/Y, Y/Z – нечетные группы 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Стандартизированы согласно ГОСТу 11677–00 только две группы: 0; 11 (рисунок 1.4).

Все остальные группы могут быть получены из основных путем круговой перемаркировки начал обмотки НН. Например, группу 6 можно получить из 0, а группу 5 из 11, если перемаркировать начала фаз обмоток НН.

На практике для определения группы соединения часто пользуются стрелочными часами .

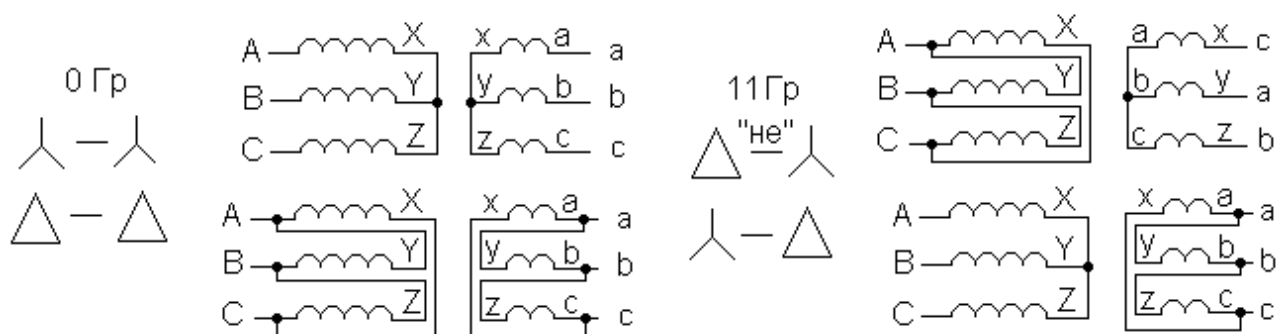


Рисунок 1.4 - Схемы соединения обмоток ВН и НН 0 и 11 групп соединения.

2. Описание лабораторного стенда

В лабораторной работе исследуется трехфазный трехстержневой трансформатор типа ТСВМ–4–74–ОМ5 (паспортные данные приведены на заводском щитке). На лицевую панель трансформатора выведена концы X_3, Y_3, Z_3 первичной обмотки трансформатора. Для испытаний трансформатора на стенде имеется симметричное трехфазное напряжение $U_a = 220 \pm 5\% \text{ В}$.

Регулируемое однофазное напряжение получают с помощью ЛАТРа. Измерение напряжений можно выполнить щитовыми вольтметрами, измерительным комплектом К505 или цифровым вольтметром. Для определения выводов обмоток используется омметр.

3. План проведения лабораторного занятия

Работа включает две стадии: подготовительную (этап 1-2) и аудиторную (этап 3-7) для непосредственного ознакомления с устройством и особенностями эксплуатации лабораторной установки. Взаимодействие с лабораторной установкой при ознакомлении проводится при отключенном питании.

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия экспериментальной установки на основе материалов лабораторной работы.

2. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии.

3. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров.

4. Ознакомиться с основными функциональными модулями лабораторной установки.

5. Ознакомиться с техническими данными оборудования и электроизмерительных приборов, записать сведения о лабораторном оборудовании и приборах.

6. Собрать схему, согласно заданию на лабораторную работу.

7. Провести экспериментальное исследование, согласно заданию на лабораторную работу.

8. Произвести обработку экспериментального материала и начать составление отчета с выводами по выполненной работе.

После выполнения каждого пункта экспериментального исследования необходимо убедиться в правильности снятых показаний и только после этого переходить к выполнению следующего пункта задания.

Обработка экспериментального материала и оформления отчета производится после выполнения всего объема лабораторной работы.

В выводах лабораторной работы следует указать на подтверждение данными эксперимента теоретических положений, а также причин расхождений. Дать анализ физических процессов и объяснения характера полученных зависимостей.

4. Алгоритмы и порядок выполнения лабораторной работы

1. Опытное определение обмоток ВН и НН и обмоток, находящихся на одном стержне

Пусть заданы выводы обмоток трехфазного трансформатора, подключим одну из обмоток, например, 1–2 к испытательному напряжению. Измерим и занесем в таблицу 1.1 напряжение на выводах остальных обмоток. Если пренебречь падением магнитного напряжения в ярме, то при прохождении тока по любой из обмоток можно считать, что поток Φ_l , созданный этой обмоткой, распределяется поровну между другими стержнями. Учитывая это, можно, анализируя данные таблицы 1.1, определить, обмотку, находящуюся на одном стержне с обмоткой 1–2, а также обмотки ВН и НН.

Таблица 1.1 – Результаты эксперимента «Опытное определение обмоток ВН и НН и обмоток, находящихся на одном стержне»

№	1___2	3___4	5___6	7___8	9___10	11___12
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Порядок номеров выводов
Зх фазного трансформатора

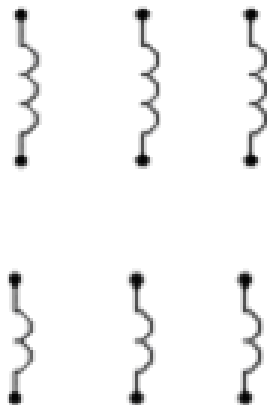


Рисунок 1.4 – Результаты эксперимента «Опытное определение обмоток ВН и НН и обмоток, находящихся на одном стержне»

Предположим, что обмотка 1–2 является обмоткой ВН. Тогда для обмотки НН, находящейся на этом стержне, напряжение

$$U_{\text{НН}} = U_{1-2}/k.$$

Для обмоток НН, находящихся на других стержнях,

$$U_{\text{НН}} \approx \frac{U_{1-2}}{(2 \cdot k)}.$$

Для обмоток ВН

$$U_{\text{ВН}} = \frac{U_{1-2}}{2}.$$

Отметим, что если $K \approx 2$, то значения $U_{\text{нн}}$ по (2) и $U_{\text{вн}}$, из (4) будут близки, и обмотки ВН и НН могут быть определены неверно. Поэтому, если в таблице 1.1 имеется более двух близких цифр, необходимо опыт повторить для обмоток НН, которые были найдены по формулам (3). После того, как определены обмотки ВН и НН, определяют для каждой обмотки ВН ту обмотку НН, которая находится на том же стержне, что и обмотка ВН. Это несложно сделать, сравнивая напряжение на обмотках НН.

2. Определение начал и концов обмоток ВН

Это можно выполнить несколькими способами. Один из них заключается в следующем. На одну из обмоток ВН подают напряжение, а две другие соединяют последовательно и измеряют напряжение U_1 и U_2 . Схема представлена на рисунке 1.5. В этом опыте потоки в стержнях, на которых находятся обмотки 2 и 3, направлены в одну сторону, и ЭДС в обеих обмотках должны быть одновременно направлены к их началам или концам.

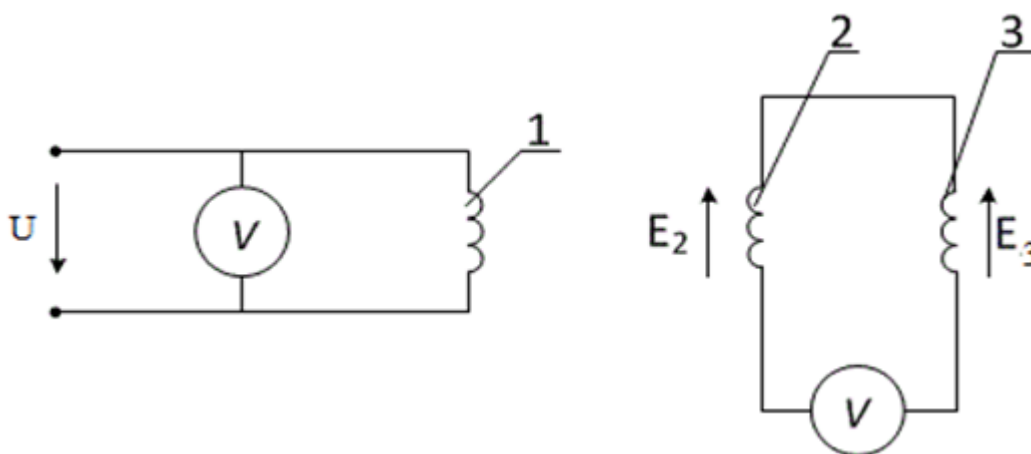


Рисунок 1.5 - Определение начал и концов обмоток ВН

Если обмотки 2 и 3 соединены началами или концами, то при обходе замкнутого контура в обоих случаях ЭДС E_2 и E_3 направлены навстречу, и показания вольтметра U_2 будут близки к нулю. В противном случае ЭДС сонаправлены, и показания вольтметров U_1 и U_2 будут близки.

Произвольно присвоим одной из обмоток, например, второй, обозначения А, Х. По показаниям вольтметра U_2 определяют начало В и концы У третьей обмотки. Зная маркировку обмоток 2 и 3, определяем аналогично начало С и конец Z оставшейся обмотки.

3. Маркировка начал и концов обмотки НН, находящейся на одном стержне с обмоткой ВН.

Маркировка обмотки зависит от групп соединения. Для групп 0, 4, 8, 11, 3, 7 она должна выполняться в соответствии с рисунком 1.1б, а для остальных - по рисунку 1.1в. На рисунке 1.6 приведена схема, по которой осуществляется маркировка обмотки НН. В зависимости от показаний вольтметров U_1 и U_2 и группы соединения представляется маркировка начала и конца обмотки.

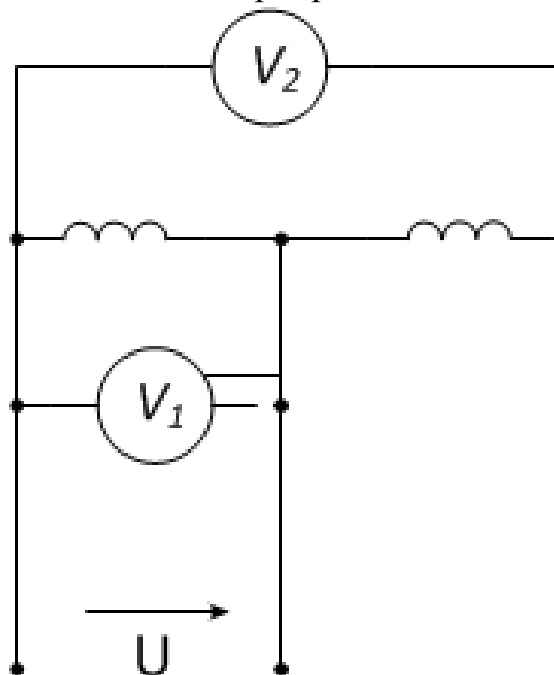


Рисунок 1.6 - Определение начал и концов обмоток НН

4. Проверка групп соединения обмоток

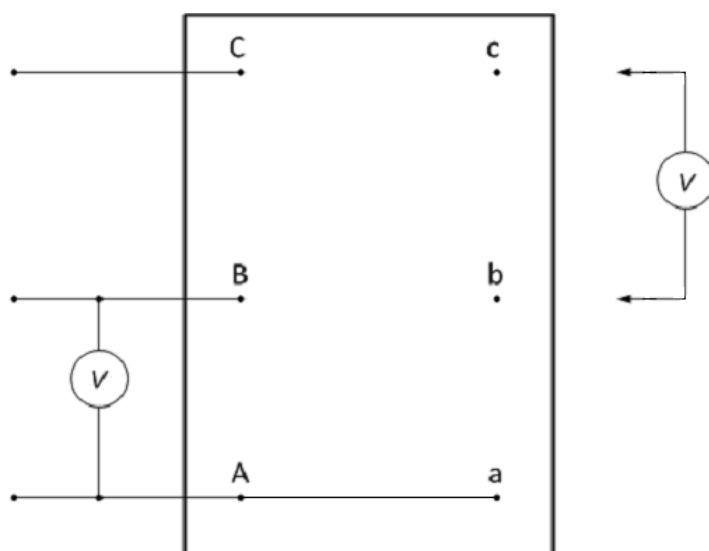


Рисунок 1.7 - Схема проверки групп соединения обмоток трехфазного трансформатора методом вольтметра

Группу соединения обмоток трансформатора в лабораторной работе определяют методом вольтметра. При использовании этого метода собирают исследуемую схему и соединяют зажимы А и а. К одной из обмоток подводят симметричное трехфазное напряжение и измеряют вольтметром U_1 . напряжения между зажимами в–В в–С, с–В. Измеренные напряжения $U_{вВ}$, $U_{вС}$, $U_{сВ}$ сравнивают с соответствующими расчетными, вычисленными по формулам.

Вывод формул для определения групп соединения обмоток. (Вариант1)

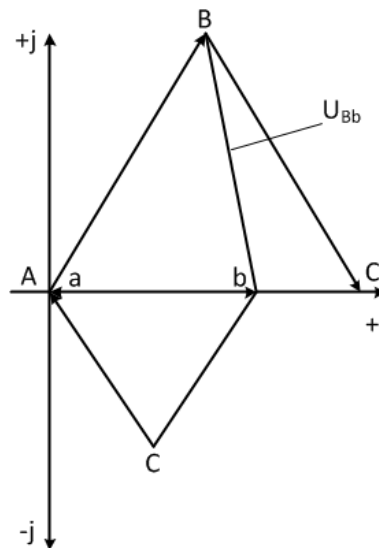


Рисунок 1.8 - Векторная диаграмма для второй группы.

В качестве примера рассмотрим вторую группу. Построим на комплексной плоскости векторную диаграмму для второй группы (рисунок 2.10). Напряжение $U_{вВ}$ равно разности векторов $U_{ав}$ и U_{AB} спроектируем эти векторы на оси и определим величину $U_{вВ}$

$$U_{вВ} = U_{AB} \cdot \cos 60 - U_{ав} + jU_{AB} \cdot \cos 30 \text{ или}$$

$$U_{вВ} = U_{AB} \cdot \left[\left(\frac{k}{2} - 1 \right) + j \cdot k \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right],$$

где K – линейный коэффициент трансформации.

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{ав}}$$

$$U_{вВ} = U_{л} \cdot \sqrt{k^2 + k + 1}$$

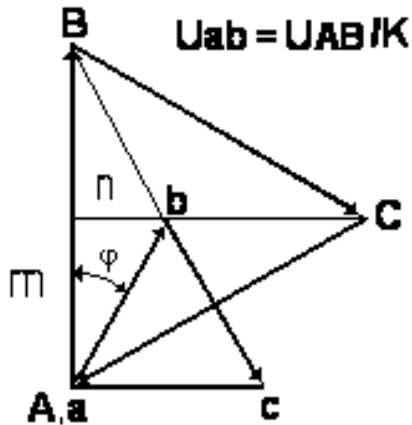
Аналогично определяем остальные напряжения

$$U_{BC} = U_{л} \cdot \sqrt{k^2 + k + 1}$$

$$U_{CB} = U_{л} \cdot (k - 1)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение на зажимах обмотки НН.

Вывод формул групп соединений (Вариант 2)



$$n = U_{ab} \cdot \sin\varphi; m = U_{ab} \cdot \cos\varphi; U_{ab} = U_{AB}/K$$

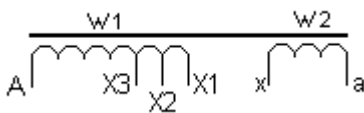
$$U_{bB} = \sqrt{\sin^2\varphi + (K - \cos\varphi)^2} \cdot U_{AB}/K$$

$$\varphi_{CB} = \varphi_{bB} + 60^\circ, \varphi_{bC} = \varphi_{bB} - 60^\circ$$

Для трехфазных понижающих трансформаторов 380/220/127 ($\frac{W_{1H}}{W_2} = K_{ТрН} = \sqrt{3}$) номинальный линейный коэффициент $U_{ВВ}$ зависит от схемы соединения:

$$(\Delta - Y) K_H = 1, (\Delta - \Delta, Y - Y) K_H = \sqrt{3}, (Y - \Delta) K_H = 3.$$

Так как вторичное напряжение может несколько отличаться от номинального до $\pm 5\%$ то линейный коэффициент $K = K_H \cdot K_{П}$, где $K_{П}$ - коэффициент поправки, величина которого зависит от используемых отводов первичных обмоток трансформатора.



(Для применяемых в работе трансформаторов)

$$K_{П1} = 127/127 \approx 1$$

$$K_{П2} = 127/130 \approx 0,977$$

$$K_{П3} = 127/133 \approx 0,955$$

Таблица 2.2 - Значения U_{bB}, U_{cB}, U_{bC} при $K_{II} = 0,955$ и $U_{AB} = 220$ В

φгр	φрад	Гр	Кп	$\sqrt{3}K_{II}$	3Кп	Sinφ	Cosφ	U_{bB}, U_{cB}, U_{bC}
		$U_{AB}=220$ В	0,955	1,654109	2,865			$U_{ab}=U_{AB}/K$
0	0	0		87		0	1	$U_{ab}(K-1)$.
30	0,5236	1	117		158	1/2	$\sqrt{3}/2$	$U_{ab}\sqrt{(K^2-K\sqrt{3}+1)}$
60	1,0472	2		192		$\sqrt{3}/2$	1/2	$U_{ab}\sqrt{(K^2-K+1)}$
90	1,5708	3	319		233	1	0	$U_{ab}\sqrt{(K^2+1)}$
120	2,0944	4		309		$\sqrt{3}/2$	(-)/2	$U_{ab}\sqrt{(K^2+K+1)}$
150	2,618	5	435		289	1/2	(-) $\sqrt{3}/2$	$U_{ab}\sqrt{(K^2+K\sqrt{3}+1)}$
180	3,1416	6		353		0	(-)/1	$U_{ab}(K+1)$
210	3,6652	7	435		289	(-)/2	(-) $\sqrt{3}/2$	$U_{ab}\sqrt{(K^2+K\sqrt{3}+1)}$
240	4,1888	8		309		(-) $\sqrt{3}/2$	(-)/2	$U_{ab}\sqrt{(K^2+K+1)}$
270	4,7124	9	319		233	(-)/1	0	$U_{ab}\sqrt{(K^2+1)}$
300	5,236	10		192		(-) $\sqrt{3}/2$	1/2	$U_{ab}\sqrt{(K^2-K+1)}$
330	5,7596	11	117		158	(-)/2	$\sqrt{3}/2$	$U_{ab}\sqrt{(K^2-K\sqrt{3}+1)}$

$\Delta - Y \quad Y - Y, \Delta - \Delta \quad Y - \Delta$

При соединении выводов «А» и «а» первичной и вторичной обмоток трансформатора по напряжению U_{bB} можно проверить группу соединения.

Напряжение U_{cB} опережает U_{bB} на 2 группы (60^0), например: $7гр+2=9$ гр, а напряжение U_{bC} отстает на 2 группы, например: $7гр-2=5$ гр.

То есть соответствующие группе напряжения находятся в соответствующих графах таблицы.

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Определить:

- выводы каждой обмотки;
- обмотки ВН и НН;
- обмотки, находящиеся на одном стержне;
- начала и концы обмоток ВН и НН;
- собрать заданную преподавателем группу соединения и измерить напряжения, которые позволяют определить группу соединений.

2. Для заданной группы соединения вывести формулу расчета напряжений рассчитать их по полученным формулам и сравнить с экспериментальными данными.

6. Общие указания по оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название лабораторной работы;
2. Цель лабораторной работы;
3. Принципиальные схемы лабораторной установки с указанием номинальных данных исследуемого электрооборудования, а также номиналы выбранных для выполнения работы электроизмерительных приборов;
4. Таблицы для занесения экспериментальных результатов;
5. Расчеты и графики, предусмотренные в пункте «Обработка результатов измерений»;
6. Выводы по выполненной работе.

Отчеты по лабораторным работам студенты представляют преподавателю в конце занятия и в особых случаях в срок по указанию преподавателя.

Зачет по лабораторной работе выставляется после представления отчета, его проверки и устранения замечаний. При проверке отчета преподаватель путем опроса устанавливает понимание студентом физических принципов и методики проведения лабораторной работы.

7. Контрольные вопросы

1. Как можно изменить сдвиг по фазе между ЭДС в однофазном трансформаторе, не изменяя маркировку зажимов?
2. Объяснить, что такое левая и правая намотки обмоток.
3. Что понимается под группой соединения обмоток?
4. Каким образом можно определить обмотки, находящиеся на одном стержне трехфазного трансформатора?
5. Как определить начала и концы обмоток ВН?
6. Как определить начала и концы обмоток НН?
7. Какие методы используются для определения групп соединения?
8. Предложить другие (не рассмотренные в работе) способы маркировки обмоток, находящихся на разных стержнях.

Лабораторная работа № 2

«Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов»

Цель работы: формирование навыков в области параллельной работы трехфазных трансформаторов

1. Краткие теоретические сведения

Параллельная работа трансформаторов применяется для обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей в случае аварии или необходимости ремонта трансформаторов. Кроме того, это позволяет увеличить КПД трансформаторов путем включения на параллельную работу такого их числа, при котором каждый будет работать с максимальным КПД.

При параллельном включении трансформаторов их первичные и вторичные обмотки присоединяются соответственно к общим шинам питающей сети и потребителям (рисунок 2.1).

Для того, чтобы включить трансформаторы на параллельную работу, необходимо выполнить три условия:

- 1) трансформаторы должны иметь одинаковые группы соединения обмоток;
- 2) иметь равные первичные и вторичные номинальные напряжения или равные коэффициенты трансформации при равенстве первичных напряжений;
- 3) иметь одинаковые относительные значения напряжений короткого замыкания (U_k).

ГОСТ 11677– 45 допускает параллельную работу при неравенстве коэффициентов трансформации не более, чем на 0,5 % и напряжений короткого замыкания не более чем на 10 % от их средних арифметических значений.

При разных группах соединений между одноименными зажимами вторичных обмоток трансформаторов возникает разность ЭДС (ΔE), за счет которой возникает уравнивающий ток. Величина тока определяется величиной ΔE и сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов. Так как эти сопротивления малы, то уже для ближайших групп (например, одиннадцатой) уравнивающие токи превышают в несколько раз номинальные значения. Поэтому включение на параллельную работу трансформаторов, принадлежащим разным группам недопустимо.

При включении трансформаторов с различными коэффициентами трансформации на параллельную работу имеем:

$$\begin{aligned}U_1 &= -E_1 + I_1 \cdot Z_1 \\U_2 &= E_2 - I_2 \cdot Z_2\end{aligned}$$

уравнения для токов трансформатора

$$I_1 = I_c + (-I_2)$$

и токов нагрузки

$$I = \sum I_{2i},$$

где I – ток нагрузки; I_{2i} – вторичный ток i -того трансформатора.

Пренебрегая токами намагничивания и приводя первичную обмотку ко вторичной для двух параллельно включенных трансформаторов, получим:

$$-U_1 \cdot k_1 = I_{21} \cdot Z_{k1} + U_2$$

$$-U_{1k_2} = I_{22} \cdot Z_{k2} + U_2$$

$$I = I_{21} + I_{22},$$

где I_{21} , I_{22} – векторы вторичных токов соответственно первого и второго трансформаторов; Z_{k1} Z_{k2} – сопротивление короткого замыкания соответственно первого и второго трансформаторов, приведенные ко вторичной обмотке; K_1 K_2 – фазные коэффициенты трансформации.

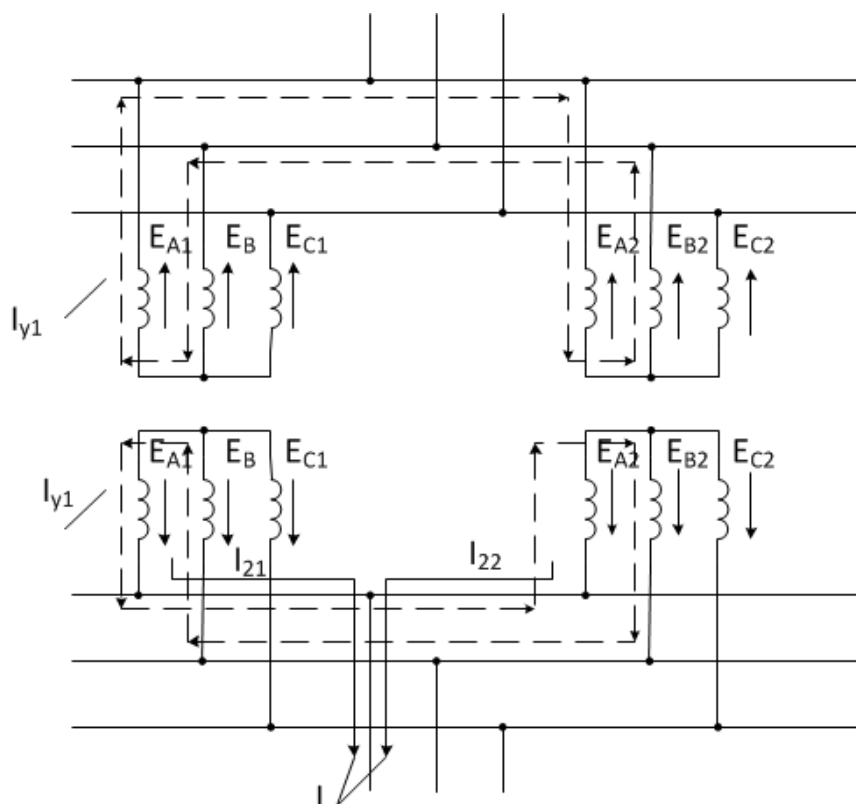


Рисунок 2.1 - Схема соединения обмоток трансформатора при параллельной работе

$$K_1 = \left(\frac{E_{21}}{E_{11}} \right) \quad K_2 = \left(\frac{E_{22}}{E_{12}} \right)$$

$$I_{21} = \left(\frac{(U_1 \cdot (K_1 - K_2))}{Z_{k1} + Z_{k2}} \right) + \left(\frac{I \cdot Z_{k2}}{Z_{k1} + Z_{k2}} \right)$$

$$I_{22} = -\frac{U_1 \cdot (K_1 - K_2)}{Z_{k1} + Z_{k2}} + \frac{I \cdot Z_{k1}}{Z_{k1} + Z_{k2}}$$

Токи каждого трансформатора при неравных коэффициентах трансформации имеют две составляющие:

- первая составляющая обусловлена неравенством коэффициентов трансформации и представляет собой уравнительный ток, протекающий в цепи трансформаторов даже при холостом ходе, когда $I = 0$;

- вторая составляющая пропорциональна току нагрузки,

Формулы выражают зависимость вторичных токов трансформаторов от первичного напряжения U_1 и тока нагрузки I . В некоторых случаях, как, например, в лабораторной работе, известны напряжение U_2 и характер нагрузки. Тогда удобно выразить токи I_{11} и I_{22} через напряжение U_2 .

Выражение для токов при неравенстве напряжений U_k можно получить, приравняв коэффициенты трансформации.

$$S_1^* : S_2^* : S_3^* = \left(\frac{1}{(U_{k1} \%)} \right) : \left(\frac{1}{(U_{k2} \%)} \right) : \left(\frac{1}{(U_{k3} \%)} \right)$$

Из предыдущего уравнения следует, что больше загружается тот трансформатор, у которого меньше напряжение U_k .

2. Описание лабораторного стенда

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.2. В работе исследуется параллельная работа двух трансформаторов типа ТСВМ–4–74 0МЗ. Их паспортные данные приведены на заводских табличках. Дополнительные данные для расчетов следует определить из опыта короткого замыкания. Схема опыта к.з. приведена на рисунке 2.3, данные опыта - в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Экспериментальные данные опыта короткого замыкания

$U_{ка}, В$	$U_{кв}, В$	$U_{кс}, В$	$I_{ка}, А$	$I_{кв}, А$	$I_{кс}, А$	$P_{ка}, Вт$	$P_{кв}, Вт$	$P_{кс}, Вт$
5,9	6,1	6,2	6,1	6,0	6,4	34,2	35	37

Трехфазное симметричное напряжение подведено на клеммы А, В, С стенда и включается кнопкой К1 ($U_n = 220 \pm 5 \% В.$)

Группа соединения трансформаторов - первая, а схема соединения обмоток – Δ/Y .

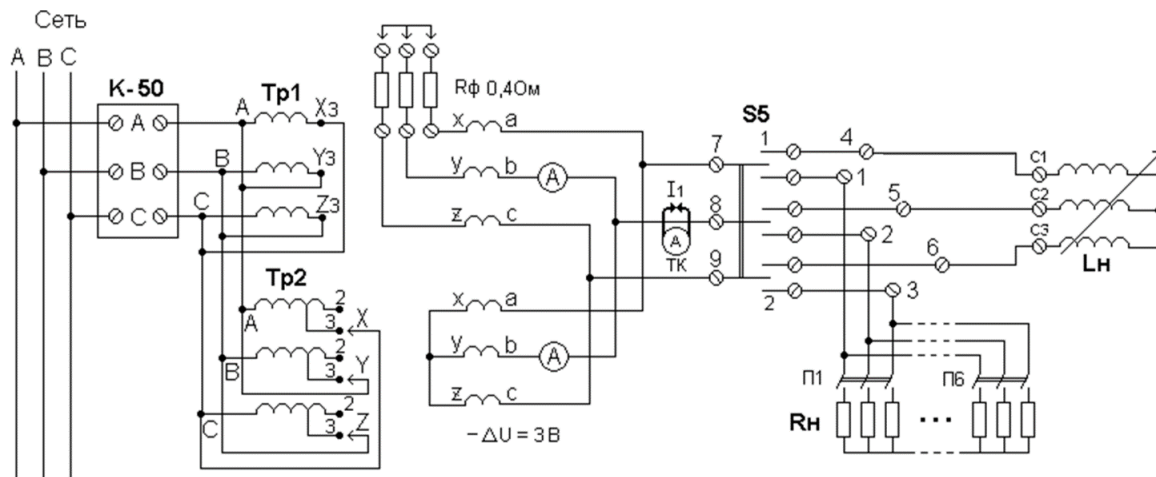


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема лабораторной установки для исследования параллельной работы трехфазных трансформаторов

Вторичные токи каждого из трансформаторов и напряжение питания измеряют щитовыми приборами или токовыми клещами.

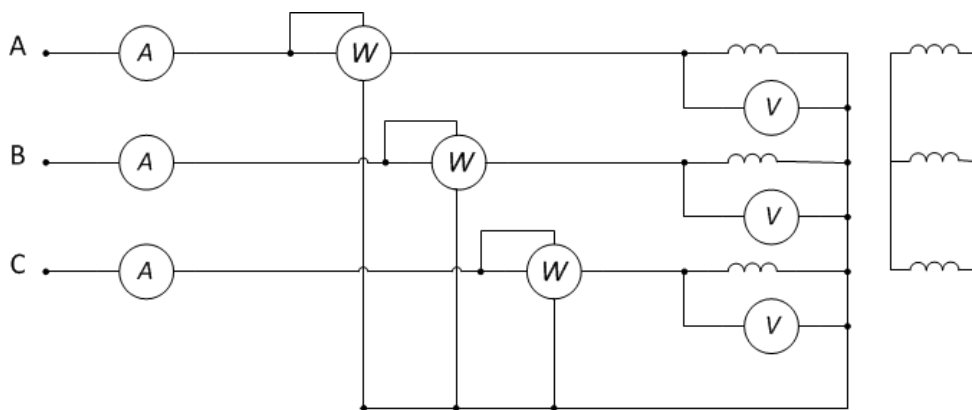


Рисунок 2.3 – Схема опыта короткого замыкания трансформатора

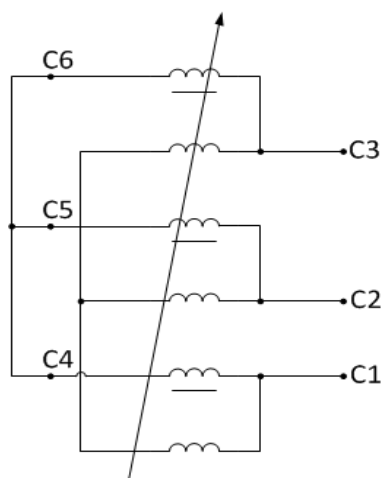


Рисунок 2.4 - Схема регулятора напряжения.

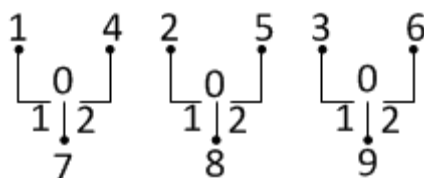


Рисунок 2.5 - Принципиальная схема выключателя S5.

3. План проведения лабораторного занятия

Работа включает две стадии: подготовительную (этап 1-2) и аудиторную (этап 3-7) для непосредственного ознакомления с устройством и особенностями эксплуатации лабораторной установки. Взаимодействие с лабораторной установкой при ознакомлении проводится при отключенном питании.

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия экспериментальной установки на основе материалов лабораторной работы.

2. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии.

3. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров.

4. Ознакомиться с основными функциональными модулями лабораторной установки.

5. Ознакомиться с техническими данными оборудования и электроизмерительных приборов, записать сведения о лабораторном оборудовании и приборах.

6. Собрать схему, согласно заданию на лабораторную работу.

7. Провести экспериментальное исследование, согласно заданию на лабораторную работу.

8. Произвести обработку экспериментального материала и начать составление отчета с выводами по выполненной работе.

После выполнения каждого пункта экспериментального исследования необходимо убедиться в правильности снятых показаний и только после этого переходить к выполнению следующего пункта задания.

Обработка экспериментального материала и оформления отчета производится после выполнения всего объема лабораторной работы.

В выводах лабораторной работы следует указать на подтверждение данными эксперимента теоретических положений, а также причин расхождений. Дать анализ физических процессов и объяснения характера полученных зависимостей.

4. Алгоритмы и порядок выполнения лабораторной работы

1. Исходя из паспортных данных трансформаторов, подобрать измерительные приборы.

2. Собрать схему согласно рисунку 2.2.

3. Работа трансформаторов при одинаковых коэффициентах трансформации выполняется при подключении питания к концам X3, Y3, Z3 обоих трансформаторов. Произвести измерения при равных значениях напряжений короткого замыкания $U_{K1}=U_{K2}$ и коэффициентах трансформации $K_1=K_2$, активной и индуктивной нагрузках.

Для создания активной нагрузки используется трехфазный шестиступенчатый резистор R_H . Ступени сопротивлений подключаются выключателями П1–П6. Индуктивная нагрузка создается регулятором напряжения (РН), схема которого приведена на рисунке 3.4. Индуктивную нагрузку следует включить через выключатель S5 (нумерация зажимов приведена на рисунке 3.5.)

Перед сборкой схемы необходимо переключатель S5 и указатель РН установить в нулевое положение. Результаты измерений занести в таблицы 2.2 и 2.3

Таблица 2.2 - При активной нагрузке, $U_{K1}=U_{K2}$ и $K_1=K_2$.

Данные измерений								Расчетные данные			
№ п/п	U_Φ (В)	I_1 (А)	P_1 (Вт)	I_{21} (А)	I_{22} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (В)	P_{21} (Вт)	P_{22} (Вт)	P_2 (Вт)	η (кпд)
1											
2											
3											
4											
5											
6											

Таблица 2.3 - При индуктивной нагрузке, $U_{K1}=U_{K2}$ и $K_1=K_2$.

Данные измерений								Расчет			
№ п/п	U_Φ (В)	I_1 (А)	P_1 (Вт)	I_{21} (А)	I_{22} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (В)	$\cos(\varphi)$	P_2 (Вт)	η (кпд)	φ (гр)
1											
2											
3											
4											
5											
6											

$$P_2 = U_{2\Phi} \cdot I_{2C} \cdot \cos(\varphi); \quad P_2 = P_1.$$

4. При исследовании влияния неравенства напряжений короткого замыкания в каждую фазу вторичной обмотки одного из трансформаторов следует включить дополнительное активное сопротивление, выводы которого

находятся на панели стенда. Величина сопротивления $R = 0,4 \text{ Ом}$. Произвести измерения при разных напряжениях короткого замыкания $U_{K1} \neq U_{K2}$ и равных коэффициентах трансформации $K_1 = K_2$. Результаты измерений занести в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - При активной нагрузке, разных $U_{K1} \neq U_{K2}$ и $K_1 = K_2$.

Данные измерений								Расчет		
№ п/п	U_{Φ} (В)	I_1 (А)	P_1 (Вт)	I_{21} (А)	I_{22} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (В)	P_2 (Вт)	I_{22}/I_{21}^*	P_2/P_1 (кпд)
1										
2										
3										
4										
5										
6										

* или при $I_{21} > I_{22}$ I_{21}/I_{22}

5. При исследовании работы с различными коэффициентами трансформации следует снять верхнюю крышку одного из трансформаторов и переключить на нем питание на выводы X_2 , Y_2 , Z_2 . Произвести измерения при равных напряжениях короткого замыкания $U_{K1} = U_{K2}$ и разных коэффициентах трансформации $K_1 \neq K_2$. Результаты измерений занести в таблицу 2.5

Таблица 2.5 - При активной нагрузке, разных $K_1 \neq K_2$ и $U_{K1} = U_{K2}$

Данные измерений								Расчет		
№ п/п	U_{Φ} (В)	I_1 (А)	P_1 (Вт)	I_{21} (А)	I_{22} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (В)	P_2 (Вт)	I_{22}/I_{21}^*	P_2/P_1 (кпд)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Примечание. Знак (направление) тока I_{22} меняется при увеличении нагрузки (от – до +), проходя через нулевое значение. * или при $I_{21} > I_{22}$: I_{21}/I_{22}

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. По данным таблицы 2.1 определить активное и реактивное сопротивления короткого замыкания.

2. По паспортным данным рассчитать фазный коэффициент трансформации K_1 и K_2 при подключении питания соответственно к выводам X_2, Y_2, Z_2 и X_3, Y_3, Z_3

3. Определить при разных коэффициентах трансформации токи вторичных обмоток трансформаторов и построить зависимость I_{21} и $I_{22} = f(I)$. Расчёт провести для пяти–шести точек и окончить, если ток одного из трансформаторов превышает номинальное значение. Нагрузку принять чисто активной. Изменением напряжения U_2 при увеличении тока пренебречь.

4. Рассчитать и построить зависимость вторичных токов от тока нагрузки при одинаковых коэффициентах трансформации и разных значениях напряжения U_k . Нагрузку принять чисто активной.

5. В тех же системах координат построить экспериментальные зависимости I_{21} и $I_{22} = f(I)$ при разных коэффициентах трансформации и равных значениях напряжений короткого замыкания, а также при равных коэффициентах трансформации и разных значениях напряжений короткого замыкания.

6. Общие указания по оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название лабораторной работы;
2. Цель лабораторной работы;
3. Принципиальные схемы лабораторной установки с указанием номинальных данных исследуемого электрооборудования, а также номиналы выбранных для выполнения работы электроизмерительных приборов;
4. Таблицы для занесения экспериментальных результатов;
5. Расчеты и графики, предусмотренные в пункте «Обработка результатов измерений»;
6. Выводы по выполненной работе.

Отчеты по лабораторным работам студенты представляют преподавателю в конце занятия и в особых случаях в срок по указанию преподавателя.

Зачет по лабораторной работе выставляется после представления отчета, его проверки и устранения замечаний. При проверке отчета преподаватель путем опроса устанавливает понимание студентом физических принципов и методики проведения лабораторной работы.

7. Контрольные вопросы

1. Какие условия необходимо выполнить для включения трансформаторов на параллельную работу?
2. К чему может привести несоблюдение условий, необходимых для включения трансформаторов на параллельную работу?
3. Как можно проверить правильность включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу?
4. В каких случаях возникает уравнивающий ток?

5. Если два трансформатора разной мощности работают параллельно, то какое должно быть соотношение сопротивлений к.з.?

6. Объяснить, почему в опыте с различными коэффициентами трансформации с увеличением тока нагрузки вначале уменьшается ток одного из трансформаторов.

7. Какое неравенство коэффициентов трансформации допускается по ГОСТу? Оценить при допустимом неравенстве коэффициентов относительное значение уравнивающего тока для исследуемых трансформаторов.

Лабораторная работа № 3 «Характеристики синхронного генератора»

Цель работы: формирование знаний, умений и навыков в области испытаний автономно работающих синхронных генераторов и их свойств на основании снимаемых основных характеристик.

1. Краткие теоретические сведения

Синхронные генераторы (СГ) служат для преобразования механической энергии в электрическую и являются основными источниками электроэнергии в мире.

Среди разнообразных характеристик СГ отдельную группу составляют характеристики, которые определяют зависимость между напряжением на зажимах якоря U , током якоря I и током возбуждения I_f при $f = f_H$ ($\omega = \omega_H$) и $\phi = const$ в установившемся режиме работы.

Эти характеристики дают наглядное представление о ряде основных свойств СГ, позволяют рассчитать ряд параметров СГ.

Характеристики СГ могут быть построены по расчетным данным с помощью векторных диаграмм или по данным соответствующих испытаний. Для синхронных машин программы испытаний устанавливает ГОСТ 183–74.

При испытании электрических машин удобно выражать параметры и характеристики в относительных единицах, в качестве базисных значений принимают номинальное значение линейного напряжения U_H и полной мощности S_H , тогда базисное значение тока

$$I_G = I_H = \frac{S_H}{(\sqrt{3} \cdot U_H)} \quad (1)$$

Базисное значение полного сопротивления при соединении обмоток статора звездой

$$Z_G = \frac{U_H}{(\sqrt{3} \cdot I_H)} \quad (2)$$

При соединении обмоток статора в треугольник

$$Z_G = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_H)}{I_H} \quad (3)$$

За базисные значения частоты тока или напряжений и угловой скорости машины принимают их номинальные значения $f_G = f_H \omega_G = 2 \cdot \pi \cdot f_H$. За базисное значение тока возбуждения при вычислении характеристик и построении диаграмм принимают ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению по характеристике холостого хода.

Характеристика холостого хода (х.х.х.) представляет собой зависимость напряжения обмотки якоря от тока возбуждения при холостом ходе ($I = 0$) и номинальной частоте вращения СГ. При снятии характеристики измеряют ток возбуждения, линейное напряжение и частоту (или частоту вращения). Чтобы

иметь возможность оценить третью гармоническую составляющую при соединении обмотки статора в звезду, измеряют также фазное напряжение (U_ϕ), а при соединении в треугольник (если выведены начала или концы всех фаз) – фазный ток

$$U_{\phi 3} = \sqrt{U_\phi^2 - \left(\frac{U_\phi}{\sqrt{3}}\right)^2}, \quad (4)$$

где $U_{\phi 3}$ – 3-я гармоническая фазного напряжения обмотки статора.

Известно, что вследствие явления гистерезиса характеристика холостого хода не проходит через начало координат, поэтому для определенности условились снимать характеристику холостого хода, начиная с наибольшего значения тока возбуждения. Чтобы полученную характеристику, провести через начало координат, необходимо сместить ее на величину ΔI_f по оси абсцисс. Значение ΔI_f получают путем графической экстраполяции характеристики для пересечения с осью абсцисс (рис. 3.1).

Наряду с реальной криволинейной х.х.х. рассматривают также спрямленную ненасыщенную х.х.х. (ОВ, рис. 10.1). Она является касательной к действительной х.х.х. в начале координат.

В режиме холостого хода оценивают также симметричность напряжения СГ. Оценка симметричности производится по отношению разности между наибольшим и наименьшим измеренными в режиме холостого хода линейными напряжениями, к среднему его значению. Линейные напряжения измеряют одновременно приборами одного класса.

$$K_{\text{неб}} = \frac{(U_{\text{нб}} - U_{\text{нм}})}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (5)$$

Характеристика короткого замыкания (х.к.з.) снимается при замыкании зажимов всех фаз обмотки якоря накоротко (симметричное короткое замыкание) и определяет зависимость $I = f(I_f)$ при $U = 0$ и $f = f_n$. Если пренебречь незначительным активным сопротивлением якоря, то сопротивление цепи якоря короткого замыкания будет чисто индуктивным.

Поэтому

$$I_q = 0 \quad I_d = I,$$

и тогда

$$E = jX_d \cdot I, \quad (6)$$

где X_d - продольное синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря.

При коротком замыкании реакция якоря является практически чисто размагничивающей, ЭДС E_ϕ , индуцируемая результирующим магнитным потоком воздушного зазора, равна

$$E_\phi = E - X_{ad} \cdot I = X_{\phi a} \cdot I \approx U_\phi, \quad (7)$$

где X_{ad} – продольное индуктивное сопротивление реакции якоря; $X_{\sigma a}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Из выражения (7) следует, что E_6 мала, вследствие чего и поток Φ_6 мал. Поэтому при коротком замыкании магнитная цепь не насыщена и х.к.з. $I = f(I_f)$ прямолинейна (рисунок 3.1). Опытные х.х.х. и х.к.з. позволяют определить опытное значение продольного индуктивного сопротивления X_d .

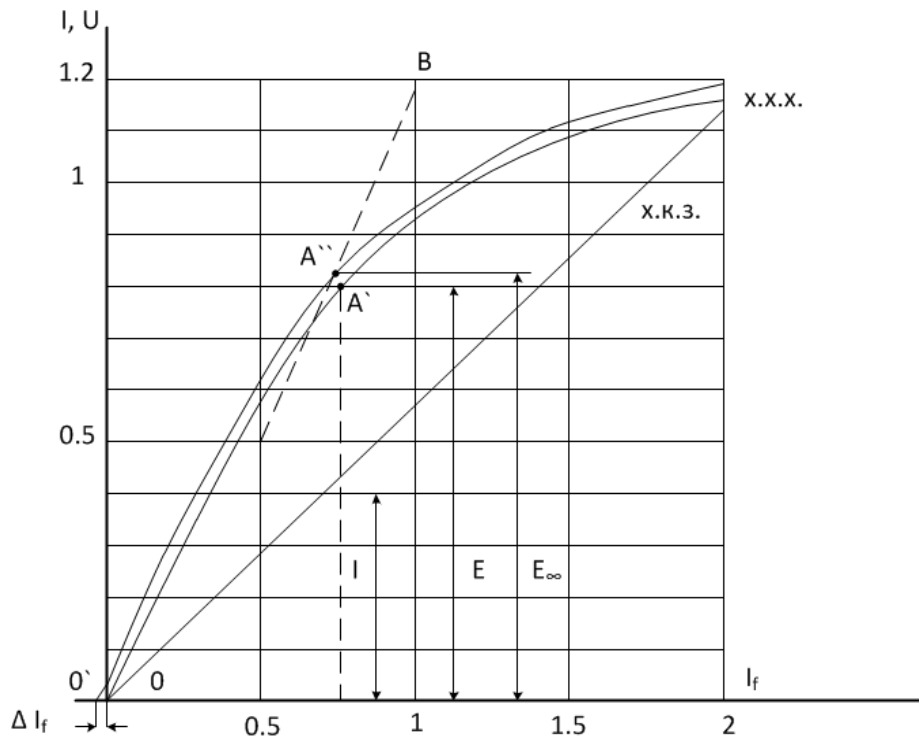


Рисунок 3.1 - Х.х.х. и х.к.з. синхронного генератора

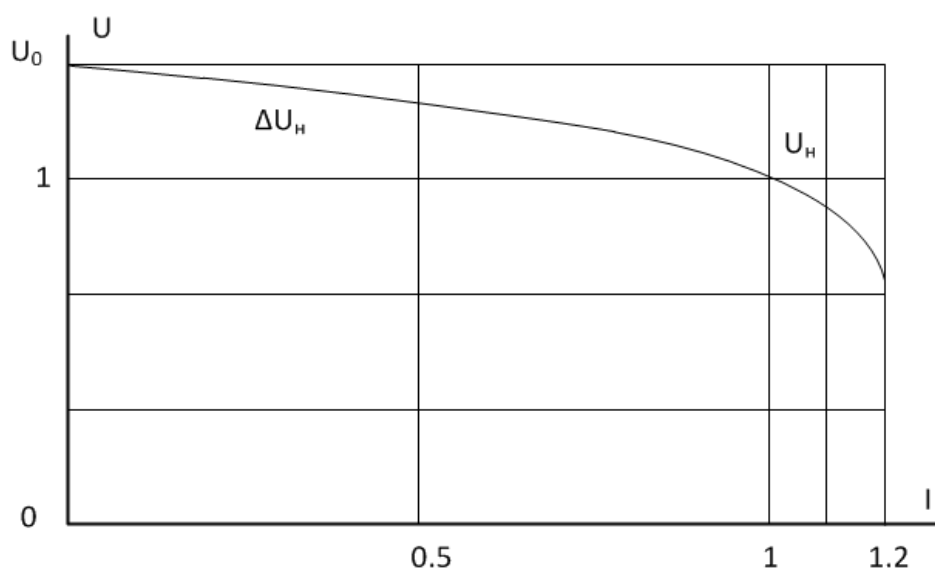


Рисунок 3.2 - Внешняя характеристика синхронного генератора

Обычно находят ненасыщенное значение этого сопротивления $X_{d\infty}$, которое, в отличие от насыщенного значения X_d , для каждой машины вполне определенное. Чтобы определить $X_{d\infty}$, для какого-либо значения тока возбуждения, например, $I_f = OA$ (рисунок 3.1), по спрямленной ненасыщенной характеристике холостого хода находят $E_\infty = AA''$, а по х.к.з. ток I , тогда

$$X_{d\infty} = \frac{E_\infty}{I}. \quad (8)$$

Если вместо E_∞ в равенство (6) подставить значение $E = AA''$ для той же величины I_f , то отношение

$$X_d = \frac{E}{I} \quad (9)$$

будет определять насыщенное значение X_d при таком насыщении магнитной цепи, которое соответствует данному значению E .

Важное значение для синхронных машин имеет величина – отношение короткого замыкания (о.к.з.). Отношением короткого замыкания $K_{о.к.з.}$ согласно ГОСТ 183–66 называется отношение установившегося тока короткого замыкания $I_{ко}$ при токе возбуждения, который при холостом ходе и $n = n_H$ дает $E = U_H$ к номинальному току якоря I_H .

$$K_{скз} = \frac{I_{ко}}{I_H} = \frac{U_H}{I_H \cdot X_d}. \quad (10)$$

$$X_d^* = \frac{X_d}{Z_H}.$$

Отношение короткого замыкания так же, как и X_d , определяет перегрузочную способность синхронной машины.

Внешняя характеристика СГ определяет зависимость $U = f(I)$ при $I_f = const$, $\cos(\phi) = const$, $f = f_H$ и показывает, как изменяется напряжение машины U при изменении величины нагрузки и неизменном токе возбуждения. Изменение напряжения на зажимах СГ с ростом тока нагрузки обусловлено падением напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря и влиянием реакции якоря. По внешней характеристике (рисунок 3.2) определяют номинальное изменение напряжения СГ. ΔU_H – это изменение напряжения на зажимах генератора при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и при неизменном токе возбуждения

$$\Delta U_H = \frac{U_c - U_H}{U_H} \cdot 100. \quad (11)$$

При $\cos(\phi_H) = 0,8$ ΔU_H обычно равно 20–30 %. ΔU_H тем больше, чем выше X_d .

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока якоря $I_f = f(I)$ при постоянном напряжении, постоянной частоте

вращения и неизменном $\cos(\varphi)$ нагрузки. Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах СГ оставалось неизменным.

2. Описание лабораторного стенда

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 3.3. Установка содержит исследуемый синхронный генератор, который приводится в действие асинхронным двигателем (АД). Технические параметры СГ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Технические параметры СГ

Тип	P_n кВт		I_n А		I_f А	n_n об/мин	R_a Ом
			$\cos(\varphi)=1$	$\cos(\varphi)=0,8$			
ГА6-4Т/230-М2	4	230	10	12,6	5,9	3000	0,47

В состав установки входят также автотрансформатор (ЛАТР), выпрямитель для питания постоянным током обмотки возбуждения СГ, переключатели S3, S4, S5 для коммутации электрических цепей, измерительные приборы. В качестве нагрузки СГ используются активные сопротивления и регулятор напряжения (РН).

3. План проведения лабораторного занятия

Работа включает две стадии: подготовительную (этап 1-2) и аудиторную (этап 3-7) для непосредственного ознакомления с устройством и особенностями эксплуатации лабораторной установки. Взаимодействие с лабораторной установкой при ознакомлении проводится при отключенном питании.

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия экспериментальной установки на основе материалов лабораторной работы.

2. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии.

3. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров.

4. Ознакомиться с основными функциональными модулями лабораторной установки.

5. Ознакомиться с техническими данными оборудования и электроизмерительных приборов, записать сведения о лабораторном оборудовании и приборах.

6. Собрать схему, согласно заданию на лабораторную работу.

7. Провести экспериментальное исследование, согласно заданию на лабораторную работу.

8. Произвести обработку экспериментального материала и начать составление отчета с выводами по выполненной работе.

После выполнения каждого пункта экспериментального исследования необходимо убедиться в правильности снятых показаний и только после этого переходить к выполнению следующего пункта задания.

Обработка экспериментального материала и оформления отчета производится после выполнения всего объема лабораторной работы.

В выводах лабораторной работы следует указать на подтверждение данными эксперимента теоретических положений, а также причин расхождений. Дать анализ физических процессов и объяснения характера полученных зависимостей.

4. Алгоритмы и порядок выполнения лабораторной работы

1. На основании технических данных СГ выбрать необходимые измерительные приборы.

2. Собрать схему установки согласно рисунку 3.3. Установить переключатели S4 и S5 в положение «0», а S3 в положение «Вкл.».

3. Посредством пускателя К1 произвести пуск асинхронного двигателя, приводящего в действие СГ.

4. Снять характеристику холостого хода. Для этого необходимо изменять ток возбуждения от наибольшего значения, при котором напряжение СГ равно $(1,08-1,3) U_n$, до $I_f=0$, снимая при этом значения тока возбуждения, линейное и фазное напряжения обмотки якоря. Полученные данные занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Характеристика холостого хода

Опытные данные	I_f, A							0
	U_l, B	240	230	200	150	100	50	
	U_ϕ, B							
Расчет	U_ϕ, B							

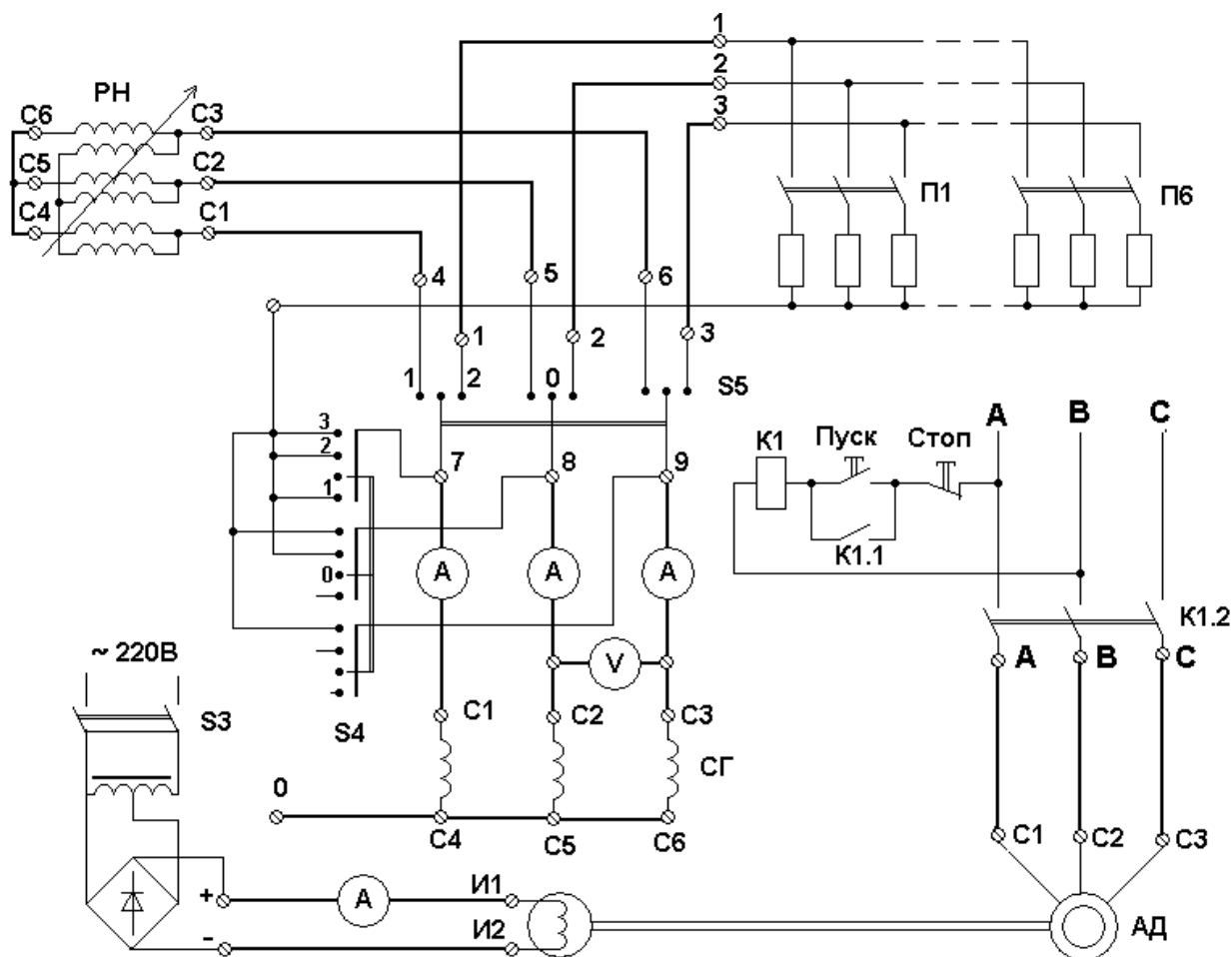


Рисунок 3.3 - Принципиальная схема лабораторной установки

5. Далее установить напряжение на зажимах обмотки якоря СГ близким к номинальному и несколько раз измерить линейные напряжения обмотки якоря с целью оценки симметричности напряжения СГ (таблица 3.3)

Таблица 3.3 - Напряжения на зажимах обмотки якоря СГ

Опытные данные	$U_{ав}, В$	200	220	230
	$U_{вс}, В$			
	$U_{са}, В$			
Расчетные данные	$K_{неб}\%$			

6. Снять характеристику трехфазного короткого замыкания. Переключатель S4 перевести в положение "3", что соответствует режиму трехфазного к.з. **Нуль генератора отключить от стенда.** Изменяя ток возбуждения от нуля до значения, при котором ток якоря будет не более номинального, снять не более 4–6 опытных точек. Измерить ток возбуждения, токи статора, напряжение одной из фаз СГ – U_{ϕ} . Опытные данные занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - Характеристика короткого замыкания СГ

U_{ϕ}, B				
I_f, A				
I_A, A	3	5	6	8
I_B, A				
I_C, A				

7. Снять внешнюю характеристику при работе СГ на активную нагрузку. Для этого установить переключатель S4 в положение «0», переключатель S5 в положение П. Установить напряжение СГ равным номинальному $U = U_n$. Далее изменять нагрузочные сопротивления, подключенные к якорю СГ таким образом, чтобы ток якоря менялся от $I = 0$ до $I \approx I_n$, поддерживая при этом ток возбуждения неизменным. Результаты измерений занести в таблицу 10.5.

8. Снять внешнюю характеристику при работе СГ на активно-индуктивную нагрузку. Перед проведением опыта необходимо убедиться, что указатель РН находится в нулевом положении, что соответствует максимальной величине индуктивного сопротивления РН. Переключатель S5 установить в положение «I», при котором якорь СГ подключается к РН. Изменяя посредством ручного привода индуктивное сопротивление РН, снимите внешнюю характеристику СГ. Результаты измерений занести в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 - Внешние характеристики СГ при активной и активно-индуктивной нагрузке

Параметры	Активная нагрузка					Активно-индуктивная нагрузка				
	0					4	5	6	7	8
I_A, A	0									
I_B, A	0									
I_C, A	0									
U, B	230									
I_f, A										

9. Снять регулировочную характеристику СГ. Установить переключатель S5 в положение «П». Эту характеристику снимают только для активной нагрузки.

Установить при $I = 0$ напряжение СГ, равное $(0,75-0,8)U_n$, и изменяя ток статора от нуля до значения, близкого к номинальному, поддерживать посредством изменения I_f неизменным напряжение на зажимах СГ. Измерить I_f , токи статора в трех фазах и напряжение СГ. Результаты опытов занести в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 - Регулировочная характеристика СГ при активной нагрузке

I_A, A	0					
I_B, A	0					
I_C, A	0					
U, B	180	180	180	180	180	180
I_f, A						

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Построить х.х.х. и экстраполировать её в случае необходимости до пересечения с осью абсцисс т. 0 (рисунок 3.1.). В этой же системе координат построить х.к.з. Рассчитать продольное индуктивное сопротивление обмотки якоря;

2. Рассчитать третью гармонику фазного напряжения обмотки якоря;

3. Построить векторную диаграмму СГ, работающего в режиме трехфазного к.з. Рассчитать величины X_{ad} и $X_{аб}$ с учетом выражений (6) и (7).

4. Построить в одной системе координат внешние характеристики СГ при активной и активно-индуктивной нагрузке. Определить из графиков изменение напряжения генератора ΔU при изменении тока якоря от нуля до номинального значения.

5. Построить регулировочную характеристику СГ при активной нагрузке.

6. Общие указания по оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название лабораторной работы;

2. Цель лабораторной работы;

3. Принципиальные схемы лабораторной установки с указанием номинальных данных исследуемого электрооборудования, а также номиналы выбранных для выполнения работы электроизмерительных приборов;

4. Таблицы для занесения экспериментальных результатов;

5. Расчеты и графики, предусмотренные в пункте «Обработка результатов измерений»;

6. Выводы по выполненной работе.

Отчеты по лабораторным работам студенты представляют преподавателю в конце занятия и в особых случаях в срок по указанию преподавателя.

Зачет по лабораторной работе выставляется после представления отчета, его проверки и устранения замечаний. При проверке отчета преподаватель путем опроса устанавливает понимание студентом физических принципов и методики проведения лабораторной работы.

7. Контрольные вопросы

1. Почему характеристика холостого хода нелинейна, а характеристика короткого замыкания имеет линейную зависимость?
2. Чем вызвано появление гармонических составляющих напряжения или тока в обмотках якоря СГ?
3. К каким физическим явлениям в СГ приводит несимметричность напряжений в обмотках якоря СГ?
4. Каким образом рассчитываются ненасыщенное и насыщенное значения продольного синхронного индуктивного сопротивления обмотки якоря синхронной машины?
5. Каков физический смысл имеет параметр – отношение короткого замыкания (о.к.з.)?
6. Почему внешняя характеристика СГ при индуктивной нагрузке располагается ниже, а при емкостной нагрузке выше, чем характеристика при активном токе?

Лабораторная работа № 4

«Параллельная работа синхронного генератора с электрической сетью»

Цель работы: формирование знаний, умений, навыков в области параллельной работы синхронных генераторов и способов регулирования активной и реактивной мощности синхронного генератора при его параллельной работе с электрической сетью неограниченной мощности.

1. Краткие теоретические сведения

В состав электростанции обычно входят несколько синхронных генераторов (СГ), которые включаются на параллельную работу в общую электрическую сеть. Благодаря этому достигается большая надежность электроснабжения потребителей, снижение мощности аварийного и ремонтного резерва.

Все параллельно работающие СГ должны отдавать в сеть ток одинаковой частоты. Поэтому они должны вращаться строго синхронно, т. е. их скорости вращения n_1, n_2, n_3 должны быть в точности обратно пропорциональны числу пар полюсов:

$$\begin{aligned}n_1 &= \frac{f}{P_1} \\n_2 &= \frac{f}{P_2} \\n_3 &= \frac{f}{P_3}.\end{aligned}\tag{1}$$

При включении СГ на параллельную работу с другими генераторами необходимо избежать чрезмерно большого толчка тока и возникновения ударных электромагнитных моментов и сил, способных вызвать повреждение генератора и другого оборудования, а также нарушить работу электрической системы. Поэтому необходимо перед включением на параллельную работу отрегулировать СГ на холостом ходу и в надлежащий момент времени включить его в сеть. Совокупность этих операций называется синхронизацией генератора.

Для включения СГ на параллельную работу используются методы точной и грубой синхронизация.

Для включения генераторов методом точной синхронизации необходимо выполнить следующие условия:

- напряжение включаемого генератора U_r должно быть равно напряжению сети U_c и быть в фазе;
- частота генератора f_r должна равняться частоте сети f_c ;
- чередование фаз СГ и сети должно быть одинаковым.

При указанных условиях векторы напряжений СГ и сети совпадают и вращаются с одинаковой скоростью, разности напряжений между контактами выключателя при включении СГ равны

$$\begin{aligned}U_{Г_a} - U_{C_a} &= 0 \\U_{Г_b} - U_{C_b} &= 0 \\U_{Г_c} - U_{C_c} &= 0,\end{aligned}\tag{2}$$

и поэтому при включении не возникает никакого толчка тока.

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения СГ. Изменение частоты и фазы напряжения СГ достигается изменением скорости вращения ротора СГ со стороны первичного двигателя. Для того чтобы судить о равенстве частот и совпадении фаз, применяют стрелочный или ламповый синхроскоп.

Синхронизация с помощью лампового синхроскопа осуществляется по схеме на «погасание» или «вращение света». Схема синхронизации на «погасание света» представлена на рис. 4.3.

Каждая из ламп этого синхроскопа включена между контактами одной и той же фазы или полюса магнитного пускателя «К». При соблюдении приведенных выше условий и равенства (2), напряжения на всех лампах равны нулю и лампы не светятся, что и указывает на возможность включения СГ с помощью магнитного пускателя «К» на параллельную работу.

Включение на параллельную работу методом грубой синхронизации производится не прямо, а через реактор, который после вхождения генератора в синхронизм шунтируется. Введение сопротивления между генератором и сетью ограничивает величину уравнивающих токов даже при значительных сдвигах напряжений генераторов по фазе и поэтому не требует выбора момента включения генератора. Считается, что в процессе грубой синхронизации провалы напряжения не должны превышать 20–25 % от номинального значения, а броски токов в начальный момент в 2–2,5 кратных от номинального. При включении через реактивное сопротивление могут быть допущены следующие отклонения от условий синхронизма: разность частот до 3–4 %, несовпадение фаз – фактически любое, отклонения в напряжениях генераторов – любое в пределах точности работы системы автоматического регулирования напряжения.

Режим работы синхронной машины параллельно с сетью при синхронной скорости вращения называется синхронным. Для того, чтобы в этом режиме осуществить регулирование реактивного тока и реактивной мощности СГ, необходимо изменять ток возбуждения. При $E_r > U_c$ синхронная машина называется перевозбужденной, а при $E_r < U_c$ невозбужденной (рисунок 4.1). Изменение тока возбуждения не вызывает появления активной нагрузки или ее

изменение. Чтобы включенная на параллельную работу машина приняла на себя активную нагрузку и работала в режиме генератора, необходимо увеличить движущий механический вращающий момент на ее валу, увеличив, например, подачу топлива в дизель.

Ряд особенностей параллельной работы СГ с сетью может быть оценен на основании снятия и анализа V-образных характеристик СГ, представляющих собой зависимости тока статора I_a от тока возбуждения для различных значений активных мощностей P , отдаваемых СГ в сеть (рисунок 4.1).

$$I_a = f(I_f) \text{ при } P = \text{const.} \quad (3)$$

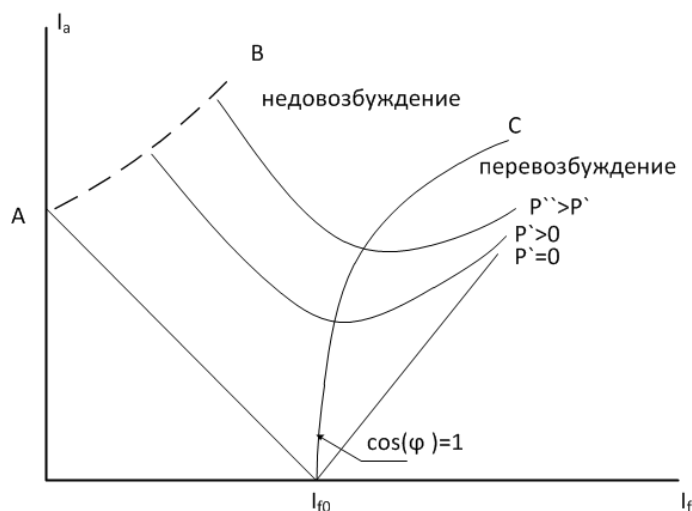


Рисунок 4.1 – V-образные характеристики синхронного генератора

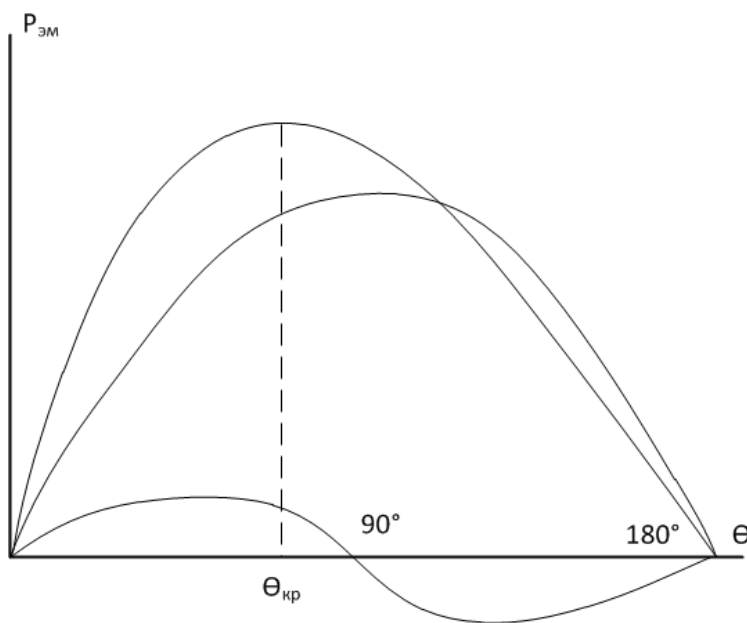


Рисунок 4.2 - Угловые характеристики синхронного генератора

Минимальное значение тока для каждой кривой определяет активную составляющую тока якоря и величину активной мощности. Нижняя кривая (рисунок 4.1) соответствует $P=0$, причем I_f – значение тока возбуждения при $E_r = U_c$. Правые части кривых соответствуют перевозбужденной машине и отдаче реактивной мощности, а левые – недовозбужденной машине и потреблению реактивной мощности.

Величину $\cos(\phi_1)$ можно определить по формуле

$$\cos(\phi_1) = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_n \cdot I_n}. \quad (4)$$

С увеличением мощности кривая $I_f = f(I)$ при $\cos(\phi) = 1$ отклоняется вправо, так вследствие падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеивания обмотки якоря $X_{ба} \cdot I_a$ возрастает E_a и необходимый ток возбуждения при $\cos(\phi) = 1$. Кривая ОС является в сущности регулировочной характеристикой машины при $\cos(\phi) = 1$. Точка А соответствует холостому ходу не возбужденной машины. При этом из сети потребляется намагничивающий ток

$$I_a = \frac{U_c}{X_d}. \quad (5)$$

Угол нагрузки (рисунок 4.2) возрастает при движении вдоль кривых (рисунок 4.1) справа налево, так как согласно равенству (6)

$$P_{эм} = \frac{m_1 \cdot E_r \cdot U_c}{X_d} \cdot \sin(\theta) + \left(\frac{m_1 \cdot U_c^2}{2} \right) \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\theta). \quad (6)$$

При меньших I_f и E_r угол θ при $P = const$ увеличивается, где m_1 - число фаз; X_d , X_q – соответственно продольное и поперечное синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря.

Линия АВ представляет собой границу устойчивости, на которой $\theta = \theta_{кр}$. При дальнейшем уменьшении I_f машина выпадает из синхронизма.

2. Описание лабораторного стенда

Лабораторная установка состоит из исследуемого синхронного генератора и приводного двигателя постоянного тока (ДПТ). Технические данные СГ приведены на стенде и в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Технические данные СГ

Тип	Р кВт	U _н В	I _н А	n _н об./мин	cos(φ)	r ₁ Ом	Обмотка возбуждения	
							I _{f ном} , А	r _f , Ом
ПНТ-5	2,5	230	7,7	1500	0,85	0,38	1,5	16,1

В состав лабораторной установки входят также измерительный комплект К-50, ламповый синхроскоп, автоматический выключатель АВ-1, магнитный

пускатель «К», частотомер, кнопки управления. Принципиальная схема приведена на рисунке 4.3.

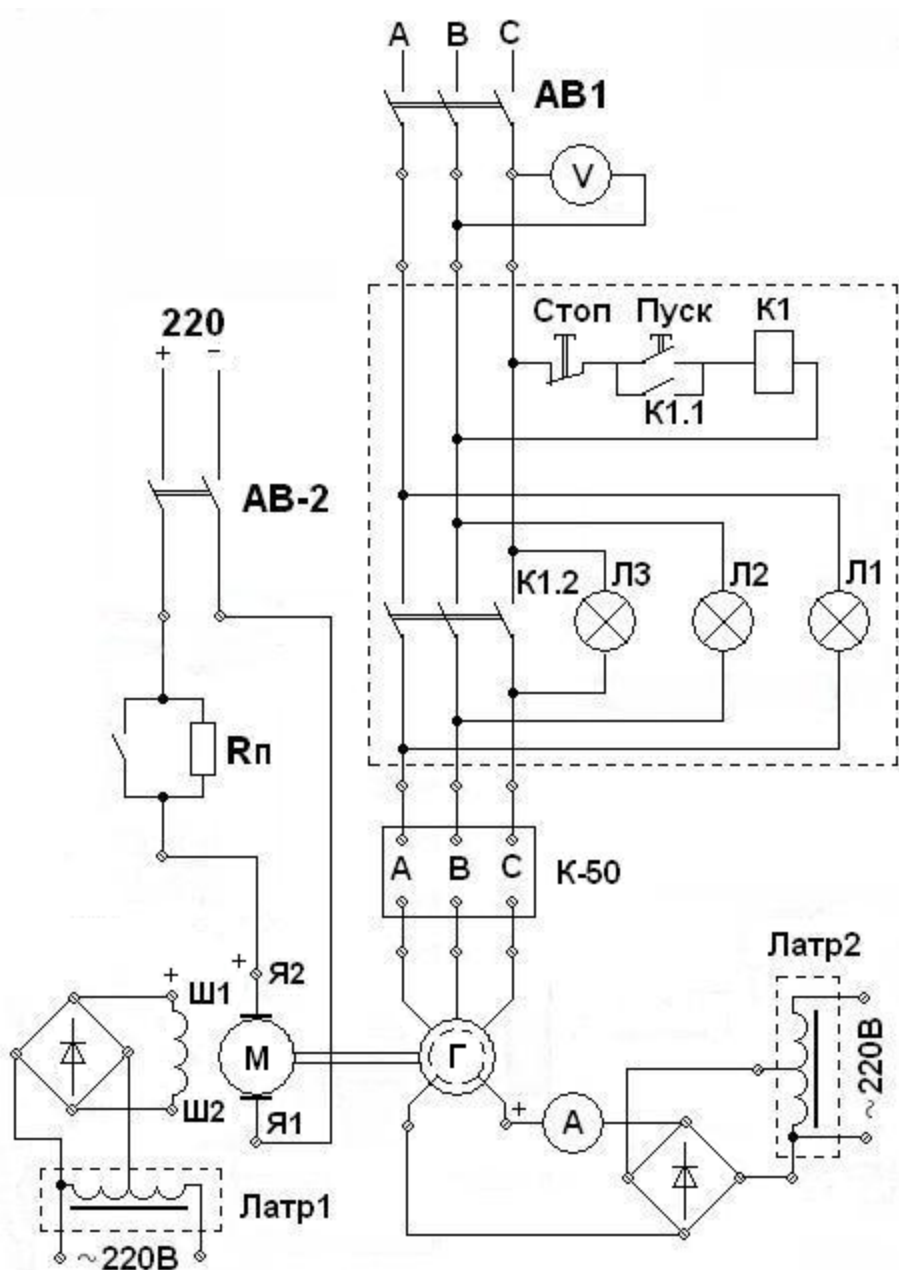


Рисунок 4.3 - Принципиальная схема лабораторной установки

3. План проведения лабораторного занятия

Работа включает две стадии: подготовительную (этап 1-2) и аудиторную (этап 3-7) для непосредственного ознакомления с устройством и особенностями эксплуатации лабораторной установки. Взаимодействие с лабораторной установкой при ознакомлении проводится при отключенном питании.

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия экспериментальной установки на основе материалов лабораторной работы.

2. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии.

3. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров.

4. Ознакомиться с основными функциональными модулями лабораторной установки.

5. Ознакомиться с техническими данными оборудования и электроизмерительных приборов, записать сведения о лабораторном оборудовании и приборах.

6. Собрать схему, согласно заданию на лабораторную работу.

7. Провести экспериментальное исследование, согласно заданию на лабораторную работу.

8. Произвести обработку экспериментального материала и начать составление отчета с выводами по выполненной работе.

После выполнения каждого пункта экспериментального исследования необходимо убедиться в правильности снятых показаний и только после этого переходить к выполнению следующего пункта задания.

Обработка экспериментального материала и оформления отчета производится после выполнения всего объема лабораторной работы.

В выводах лабораторной работы следует указать на подтверждение данными эксперимента теоретических положений, а также причин расхождений. Дать анализ физических процессов и объяснения характера полученных зависимостей.

4. Алгоритмы и порядок выполнения лабораторной работы

1. На основании технических данных СГ подобрать необходимые приборы.

2. Собрать схему согласно рисунку 4.3.

3. Включить СГ на параллельную работу методом точной синхронизации, для этого:

- подключить посредством АВ–2 ДПТ к сети постоянного тока и проверить правильность его вращения по тахометру (стрелки индикатора должны вращаться по часовой стрелке):

- включить АВ–1 и, изменяя ток возбуждения СГ, довести его ЭДС до напряжения, равного напряжению сети;

- отрегулировать частоту вращения ДПТ посредством изменения тока в цепи обмотки возбуждения ДПТ таким образом, чтобы частота тока сети и СГ стали близкими друг к другу;

- подключить СГ к сети. Кнопка "Пуск" нажимается в момент погасания лампочек. При этом магнитный пускатель «К» замыкает свои замыкающие контакты и СГ подключается к сети.

4. Снять V-образные характеристики СГ. Для этого установить по ваттметру комплекта К–50 активную мощность на выходе СГ, равную нулю и поддерживать ее в течение опыта неизменной. Изменяя ток возбуждения от нуля до $2I_{f0}$, снять зависимость тока якоря от тока возбуждения (зафиксировать минимальное значение тока якоря, при токе возбуждения, равном нулю). Результаты занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Зависимость тока якоря от тока возбуждения при $P=0$

Опытные данные	I_f, A					
	I_a, A					
Расчетные данные	$\cos\varphi$					

5. Установить величину активной мощности, отдаваемую СГ в сеть, равной $0,3 P_H$ и поддерживать ее в течение опыта неизменной. Изменяя ток возбуждения от нуля до $2I_{f0}$, снять зависимость $I_a = f(I_f)$ при $P = 0,3P_H$. Результаты занести в таблицу 4.3

Таблица 4.3 - Зависимость $I_a = f(I_f)$ при $P = 0,3P_H$

Опытные данные	I_f, A					
	I_a, A					
Расчетные данные	$\cos(\varphi)$					

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Построить зависимости $I_a = f(I_f)$ при $P=0$ и $P = 0,3P_H$. Рассчитать и построить на том же графике 1 зависимость $\cos(\phi) = f(I_f)$;

2. На кривых $I_a = f(I_f)$ указать точки, в которых в обмотке якоря отсутствуют реактивные токи.

6. Общие указания по оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название лабораторной работы;
2. Цель лабораторной работы;

3. Принципиальные схемы лабораторной установки с указанием номинальных данных исследуемого электрооборудования, а также номиналы выбранных для выполнения работы электроизмерительных приборов;

4. Таблицы для занесения экспериментальных результатов;

5. Расчеты и графики, предусмотренные в пункте «Обработка результатов измерений»;

6. Выводы по выполненной работе.

Отчеты по лабораторным работам студенты представляют преподавателю в конце занятия и в особых случаях в срок по указанию преподавателя.

Зачет по лабораторной работе выставляется после представления отчета, его проверки и устранения замечаний. При проверке отчета преподаватель путем опроса устанавливает понимание студентом физических принципов и методики проведения лабораторной работы.

7. Контрольные вопросы

1. Возможна ли параллельная работа синхронных генераторов, роторы которых вращаются с различной скоростью, например, 3000 об./мин, 1500 об./мин, 375 об./мин?

2. Какие условия необходимо выполнить при включении СГ на параллельную работу методом точной синхронизации?

3. В чем заключается отличие ламповых синхроскопов, включаемых по схеме на "погасание" или "вращение" света?

4. Что произойдет, если в момент включения СГ на параллельную работу напряжение СГ не равно напряжению сети по величине, а остальные условия выполнены?

5. Что произойдет, при включении СГ на параллельную работу, если не соблюдено чередование фаз СГ и сети?

6. Как осуществляется включение СГ на параллельную работу методом грубой синхронизации?

7. Как осуществляется регулирование реактивной мощности СГ?

8. Как осуществляется регулирование активной мощности, отдаваемой СГ в электрическую сеть?

9. Почему с ростом тока возбуждения граница устойчивости СГ, представленная на рисунке 11.1, поднимается вверх?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кобозев, В. А. Электрические машины: учебное пособие / В. А. Кобозев. - Ставрополь: Ставропольский гос аграр ун-т, 2015. - 200 с. - Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
2. Кобозев, В. А. Электрические машины: учебное пособие / В. А. Кобозев. - Ставрополь: Ставропольский гос. аграр. ун-т, 2015, 208 с. - Ч. 2. Электрические машины переменного тока. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
3. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. - Москва: Высшая школа, 2000. - 608 с.
4. Токарев, Б. Ф. Электрические машины: учеб. пособие / Б. Ф. Токарев. - Москва: Энергоатомиздат, 1990. - 624 с.
5. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины: учеб. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 1990. - 528 с.
6. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов [и др.]. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 319 с.
8. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов [и др.]. – Санкт-Петербург: Питер, 2007. - 349 с.

Форма отчета по лабораторной работе

Образец титульного листа

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства
Кафедра энергетики

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

«Наименование лабораторной работы»

по дисциплине «Электрические машины тепловых электростанций»
направления подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Работу выполнил:
студент гр. ХХ-ТЭ
Иванов И.И.

Калининград
20XX

Приложение Б

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен отражать основные результаты, полученные в ходе экспериментального и аналитического исследования, и выводы о характере и причинах полученных зависимостей. Отчет выполняется по указанию преподавателя индивидуально каждым студентом либо в форме общего отчета на бригаду студентов, совместно проводивших экспериментальное исследование на одной установке.

Отчет должен содержать (если иное не оговорено преподавателем):

- 1) Цель работы;
- 2) Описание лабораторной установки и хода эксперимента;
- 3) Численные результаты экспериментального исследования и их графическую интерпретацию;
- 4) Формулы, расчеты, численные результаты аналитического исследования и их графическую интерпретацию;
- 5) Сопоставление результатов экспериментального и аналитического исследования, в том числе графическое;
- 6) Выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов, причины зарегистрированных процессов и расхождений в экспериментальных и аналитических данных.

Отчет оформляется в электронном виде в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(рисунок 1)», «приведены в таблице 2». Подписи таблиц и рисунков выполняются по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание посередине без отступа). При подготовке рисунков и схем рекомендуется использовать редактор MS Visio. Построение диаграмм (графиков) рекомендуется выполнять посредством MS Excel, Mathcad или аналогичных программ.

Общие требования к оформлению документа:

- Шрифт Times New Roman, размер 12.
- Выравнивание текста по ширине
- Межстрочный интервал – 1,15
- Отступ первой строки абзаца – 1,25 см
- Выравнивание рисунков – по центру без отступа
- Выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа
- Внедрение формул через редактор формул

Локальный электронный методический материал

Бочарова Наталья Владимировна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Редактор И.В. Голубева

Уч.-изд. л. 3,6. Печ. л. 3,2

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1