

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

Н. В. Бочарова, М. С. Харитонов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ для студентов бакалавриата
по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
И. Е. Кажекин

Бочарова, Н. В., Харитонов, М. С.

Электрические машины: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ для студентов бакалавриата по напр. подг. 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Н. В. Бочарова, М. С. Харитонов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 128 с.

Учебно-методическое пособие является руководством по проведению цикла лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины» со студентами, обучающимися по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Лабораторные работы предназначены для закрепления теоретического материала и приобретения практических навыков в области электрических машин.

Рис. 51, табл. 55, список лит. – 8 наименований

Учебно-методическое пособие по проведению цикла лабораторных работ рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 30.09.2022 г., протокол № 01

УДК 621.31

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2022 г.
© Бочарова Н. В., М. С. Харитонов, 2022 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Правила техники безопасности при проведении работ.....	6
Лабораторная работа № 1	9
Лабораторная работа № 2	18
Лабораторная работа № 3	30
Лабораторная работа № 4	39
Лабораторная работа № 5	48
Лабораторная работа № 6	56
Лабораторная работа № 7	64
Лабораторная работа № 8	73
Лабораторная работа № 10	92
Лабораторная работа № 11	102
Лабораторная работа № 12	110
Лабораторная работа № 13	119
Рекомендуемая литература.....	125
Приложение А.....	126
Приложение Б	127

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электрические машины» обеспечивает формирование у обучающихся готовности к участию в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования, определение параметров оборудования объектов профессиональной деятельности.

Целью освоения дисциплины является знакомство обучающихся с основными принципами работы электрических машин.

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;
- режимы работы трансформаторов.

уметь:

- использовать полученные знания при решении практических задач по эксплуатации электрических машин;
- применять полученные знания о режимах работы и характеристиках трансформаторов и вращающихся электрических машин при решении поставленных задач.

владеть:

- навыками элементарных расчетов и испытаний электрических машин;
- навыками анализа режимов работы трансформаторов и электрических машин различных типов в профессиональной деятельности.

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;
- формирование умений в области регулирования режимов работы электрических машин;

- приобретение навыков определения основных параметров электрических машин;

- приобретение навыков экспериментальной регистрации и 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 разбором 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

«Испытание двухобмоточного однофазного трансформатора»

Цель работы: Освоить методы испытаний трансформатора, рассчитать параметры и построить ряд характеристик трансформатора.

1. Краткие теоретические сведения

В силовых электрических сетях широко используются однофазные двухобмоточные трансформаторы. Исследование этого простого по устройству трансформатора позволяет в основном понять физику процессов, происходящих в трансформаторах, измерить их параметры и характеристики.

При исследовании электромагнитных процессов в магнитосвязанных цепях с большим удобством для расчетов используют метод электрических схем замещения, при котором магнитные связи между цепями заменяются электрическими (рисунок 1.1). Для этого вместо реального трансформатора рассматривают эквивалентный ему так называемый приведенный трансформатор, первичные и вторичные обмотки которого имеют одинаковое число витков $w_1 = w_2$

При этом число витков вторичной обмотки изменится $K = \frac{w_1}{w_2}$ раз. В результате такой замены или приведения, параметры вторичной обмотки трансформатора также изменятся

$$\begin{aligned}U_2' &= U_2 \cdot K \\E_2' &= E_2 \cdot K \\I_2' &= \frac{I_2}{K} \\r_2' &= r_2 \cdot K^2 \\X_2' &= X_2 \cdot K^2.\end{aligned}$$

Рабочие процессы в трансформаторах описываются с учетом следующих уравнений:

$$U_1 = -E_1 + I_1 \cdot (r_1 + jX_1)$$

$$E_2' = U_2' + I_2' \cdot (r_2' + jX_2')$$

$$I_1 = I_m + (-I_2'),$$

где U_1 – подводимое к первичной обмотке трансформатора напряжение; E_1 – ЭДС, наведённая в первичной обмотке основным магнитным потоком трансформатора; U_2, E_2 – соответственно напряжение и ЭДС наведенные во вторичной обмотки; I_1 – первичный ток; I_2 – приведенный вторичный ток; I_m – намагничивающий ток; r, X_1 – соответственно активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; r_2', X_2' – приведенное активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки; r_m, X_m – активное и индуктивное сопротивления намагничивающей цепи схемы замещения трансформатора; Z_H – приведенное полное сопротивление нагрузки.

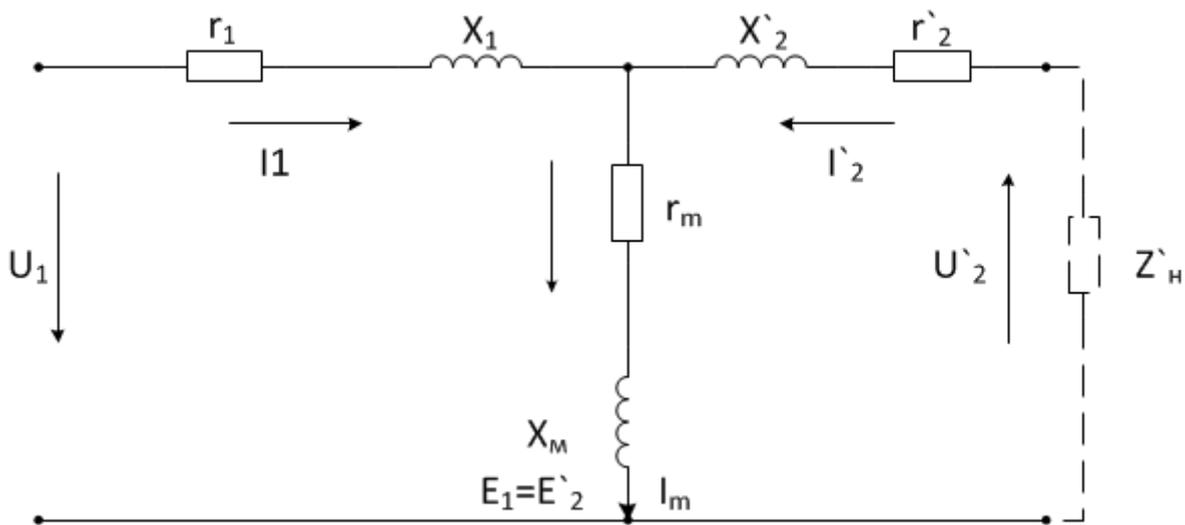


Рисунок 1.1 - Схема замещения приведенного трансформатора

Опытное определение параметров схемы замещения, параметров и характеристик трансформатора осуществляют по данным опыта холостого хода, короткого замыкания и исследования работы трансформатора под нагрузкой.

Опыт холостого хода проводят по схеме, показанной на рисунке 1.2а. Синусоидальное напряжение подводится к вторичной обмотке трансформатора, а первичная обмотка разомкнута.

Измеряется вторичное $U_0 = U_{20}$ и первичное U_{10} напряжения, ток холостого хода $I_0 = I_2$ и мощность $P_0 = P_2$. По данным опыта холостого хода определяют:

$$P_m = P_0 - I_0^2 \cdot r_2$$

$$r_m = \frac{P_m}{\left(\frac{I_2}{K}\right)^2}$$

$$Z_M = \left(\frac{U_{20}}{I_0} \right) \cdot K$$

$$K = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - r_M^2},$$

где P_M – магнитные потери в сердечнике трансформатора.

Опыт короткого замыкания проводят по схеме (рисунок 1.2б). Вторичная обмотка замыкается на амперметр или накоротко, а к первичной обмотке по избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы токи в обмотках были в пределах номинальных. По данным этого опыта определяют:

U_K , мощность короткого замыкания P_K и параметры схемы замещения X_1 , X_2 , r_1 , r_2 (рисунок 1.1), коэффициент мощности при к.з. $\cos \phi_K$

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}$$

$$r_K = \frac{P_K}{I_K^2}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}$$

$$\cos \phi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K}$$

$$r_1 = r_2 = \frac{r_K}{2}$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_K}{2}$$

Напряжение $U_K = U_{KH}$, при котором ток короткого замыкания равен номинальному $I_K = I_N$, носит название напряжения короткого замыкания и обозначается u_K . Величина u_K выражается на практике также в процентах:

$$u_k \% = \frac{U_{кн}}{U_H} \cdot 100 \%$$

Работа трансформатора под нагрузкой (рисунок 1.2в). Этот опыт проводится, как правило, при $U_1 = U_{1н}$ при изменении тока нагрузки от 0 до $1,1I_{1н}$. На основании этого опыта определяют изменение напряжениями ΔU и КПД трансформатора.

Изменением напряжения трансформатора называется арифметическая разность между вторичными напряжениями трансформатора при холостом ходе и при номинальном токе нагрузки, когда первичное напряжение постоянно и равно номинальному, а частота также постоянная и равна номинальной. Изменение напряжения представляет собой важную эксплуатационную характеристику трансформатора. С целью более высокой точности вычисление ΔU производят аналитически по формуле:

$$\Delta U \% = U_{ка} \% \cdot \cos \phi_2 + U_{кр} \% \cdot \sin \phi_2$$

$$U_{ка} \% = \frac{I_1 \cdot r_k}{U_{1н}} \cdot 100\%$$

$$U_{кр} \% = \frac{I_1 \cdot X_k}{U_{1н}} \cdot 100\%$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_0 + K_{нг}^2 \cdot P_k}{K_{нг} \cdot S_H \cdot \cos \phi_2 + P_0 + K_{нг}^2 \cdot P_k} \right),$$

где P_0 – потери холостого хода при $U_1 = U_{1н}$; P_k – мощность короткого замыкания при $I_k = I_{кн}$; $K_{нг} = \frac{I_2}{I_{2н}}$ – коэффициент загрузки трансформатора; S_H – полная мощность трансформатора.

2. Описание лабораторного стенда

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 1.2. Она содержит исследуемый трансформатор, паспортные данные которого приведены в таблице 1.1.

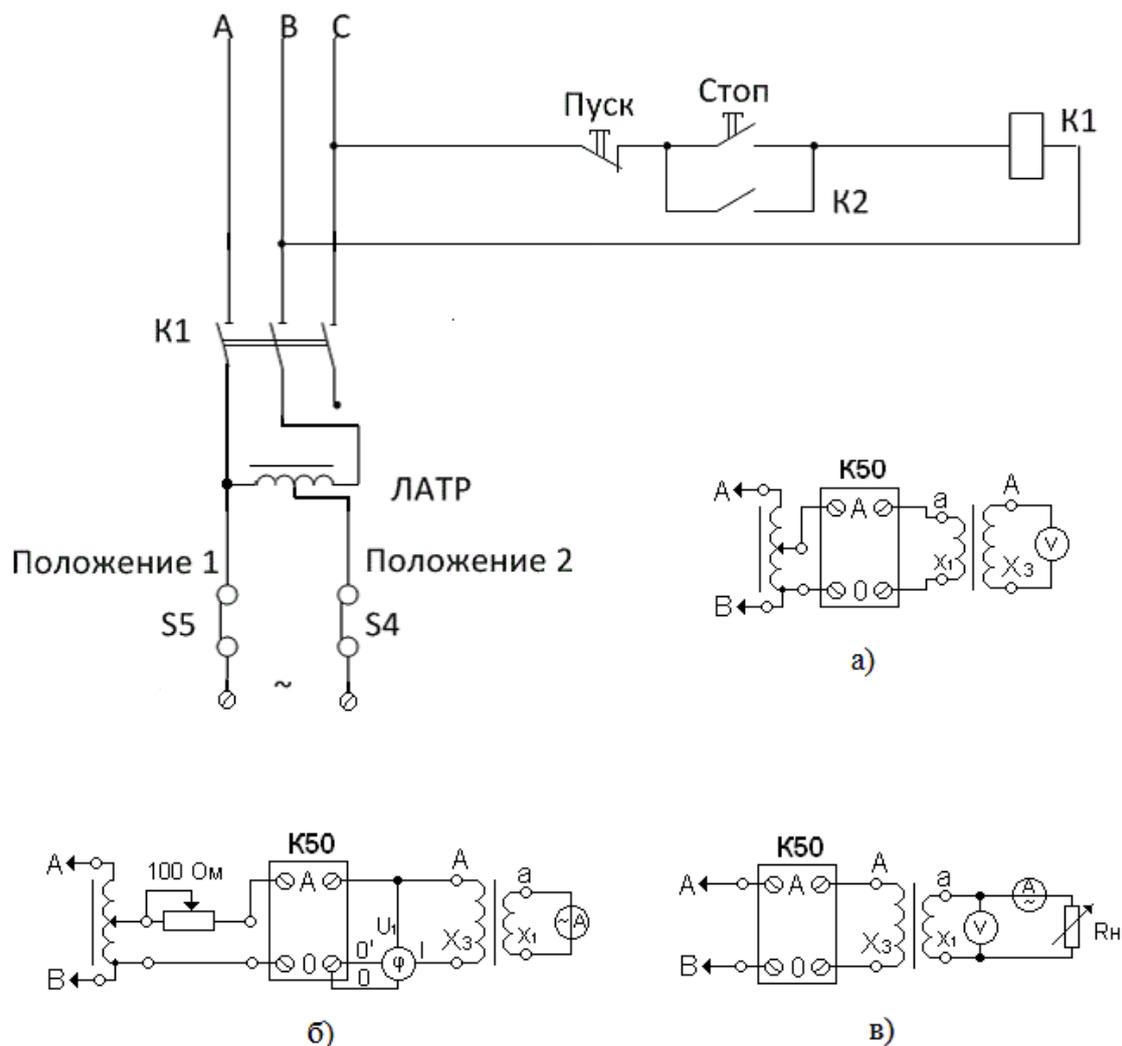


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема лабораторной установки

Таблица 1.1 - Паспортные данные трансформатора

Тип	S_H ВА	$U_{1H}, В$			$U_{2H}, В$		f, Гц	Примечание
		AX1	AX2	AX3	ax1	ax2		
ОСВМ– 0,25– 740М5	250	231	226	220	133	115	50	

$$I_{1H} = 1.14A; I_{2H} = 1.88A$$

В качестве нагрузки, подключаемой к трансформатору посредством переключателей П1–П6, используются нагрузочные сопротивления R_H . В состав установки входят также: измерительный комплект К505, амперметр, вольтметр, автотрансформатор – ЛАТР переключатели S4 и S5 для коммутации цепи питания трансформатора.

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. Опыт холостого хода. Для проведения этого опыта собрать схему согласно рисунку 1.2а. Переключатели S4 установить в положение 2, S5 в положение 1. Посредством пускателя К1 подключить схему к сети переменного тока. Изменяя подводимое напряжение $U_0 \approx 0.3 \cdot U_{2н}$ до $U_0 \approx 1.1 \cdot U_{2н}$, измерить вторичное $U_0 = U_{20}$ и первичное U_{10} напряжения, ток холостого хода $I_0 = I_2$ и подводимую мощность $P_0 = P_2$. Результаты измерений занести в таблицу 1.2

Таблица 1.2 – Результаты экспериментальных исследований
«Опыт холостого хода»

Опытные данные	$U_{20}, В$	60	80	100	127	133	140
	$U_{10}, В$						
	$I_0, А$						
	$P_0, Вт$						
Расчетные данные	$\cos \varphi_0$						
	K						

2. Опыт короткого замыкания. Собрать схему (рисунок 1.2б). Вторичная цепь трансформатора должна быть разомкнута. Подобрать соответствующие приборы и установить переключатели вольтметра и амперметра К505 в необходимые положения. Ручку ЛАТРа установить в крайнее левое положение. Подключить схему к электрической сети и убедиться, что на первичную обмотку трансформатора подается напряжение, близкое к нулю. Отключить схему, замкнуть вторичную обмотку трансформатора на амперметр. Изменять подводимое напряжение $U_k = U_1$ так, чтобы ток короткого замыкания изменялся в пределах $I_k = I_1 \approx (0.5 - 1.5)I_{1н}$. Измерить подводенное напряжение $U_k = U_1$, вторичный ток I_2 , подводимую мощность $P_k = P_1$. Результаты занести в таблицу 1.3. Опыты следует проводить быстро, ограничиваясь тремя – четырьмя отсчетами.

Таблица 1.3 – Результаты экспериментальных исследований «Опыт короткого замыкания»

Опытные данные	$U_k, В$				
	$I_k, А$	0.57	0.7	0.9	1.71
	$P_k, Вт$				
	$I_2, А$				
Расчетные данные	$\cos(\varphi_k)$				
	$Z_k, Ом$				
	$r_k, Ом$				
	$X_k, Ом$				

3. Работа трансформатора под нагрузкой. Собрать схему, приведенную на рисунке 1.2в. Установить и поддерживать в течение опыта $U_1 = U_{1н} = 220В$.

Изменять нагрузку трансформатора посредством подключения переключателями П1–П6 нагрузочных сопротивлений R_H таким образом, чтобы ток нагрузки менялся в пределах от $I_2 = 0$ до $I_2 \approx 1.1 \cdot I_{2H}$

Измерить подводимое напряжение U_1 , мощность P_1 , токи I_1 , I_2 и напряжение U_2 . Результаты опытов занести в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты экспериментальных исследований «Работа трансформатора под нагрузкой»

Опытные данные	U_1 , В	220	220	220	220	220
	I_1 , А					
	P_1 , Вт					
	U_2 , В					
	I_2 , А	0	0.5	1	1.5	2
Расчетные данные	$\frac{(U_{2H}-U_2)}{U_{2H}} \cdot 100\%$					
	$\Delta U\%$					

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Вычислить: коэффициент трансформации K и коэффициент мощности холостого хода $\cos \phi_0$ для всех опытных точек.

2. Построить графики зависимости $P_0, I_0, \cos \phi_0 = f(U_{20})$. По данным характеристикам холостого хода установить номинальные значения при $U_{20} = U_{2H}$.

3. По данным опыта холостого хода и короткого замыкания, снятых соответственно при номинальном напряжении и номинальном токе, рассчитать параметры T-образной схемы замещения трансформатора (рис. 1).

4. Построить зависимости $P_K, U_K, \cos \phi_K = f(I_K)$, определить номинальные значения $P_{KH}, \cos \phi_{KH}, U_K$ соответствующие номинальному значению тока $I_K = I_{1H}$;

5. Построить опытную и расчетную зависимости $\Delta U = f\left(\frac{I_1}{I_H}\right)$ при $\cos \phi_2 = 1$.

6. Определить КПД трансформатора для значений $K_{HT} = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25$ при двух значениях $\cos \phi_2 = 0.8$ и 1 . Построить графики зависимости $\eta = f(K_{HT})$ при $\cos \phi_2 = 1$ и $\cos \phi_2 = 0.8$. Определить степень загрузки трансформатора, при которой достигается наибольший КПД.

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. Объяснить устройство и принцип действия трансформатора.
2. Дать расшифровку типа и паспортных данных исследуемого трансформатора.
3. Какие параметры определяются из опыта холостого хода.
4. Можно ли трансформатор, рассчитанный на 220 В включать в режиме холостого хода на напряжение 380 В?
5. Чем объясняется малая величина тока холостого хода трансформатора?
6. С какой целью проводится опыт короткого замыкания?
7. Можно ли включать трансформатор на постоянное напряжение?
8. Каким образом характер нагрузки $\cos \phi_2$ влияет на характер зависимости $\Delta U = f(I_2)$ и $\eta = f(K_{\text{нр}})$?
9. Почему измерение коэффициента трансформации должно производиться с высокой точностью?
10. На какие параметры трансформатора влияет качество сборки сердечника?
11. Почему, без нагрузки трансформатор работает бесшумно, а под нагрузкой «гудит»?

Лабораторная работа № 2

«Исследование способов соединения обмоток трансформатора»

Цель работы: Изучить методы экспериментального определения обмоток высшего ВН и низшего НН напряжений, начал и концов обмоток и обмоток, находящихся на одном стержне. Ознакомиться со схемами соединения обмоток ВН и НН и получить практические навыки по определению групп соединения 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 У, Д, Z. При выводе нейтрали ее обозначают буквой О. 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 2.1, где показаны две обмотки, расположенные на одном стержне, которые пронизываются одним и тем же потоком. Одноимённые зажимы обозначены на рисунке 2.1 звездочками. Начала и концы обмоток у однофазного трансформатора можно выбрать произвольным образом, как указано, например, на рисунках 2.1 (б, в).

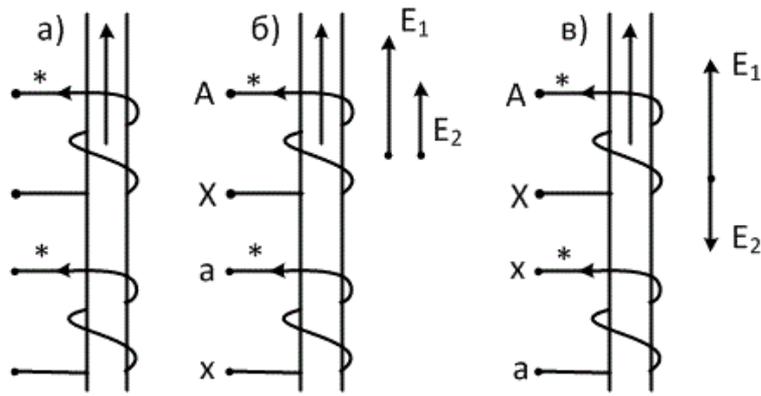


Рисунок 2.1 - Пример выбора начал и концов обмоток однофазного трансформатора

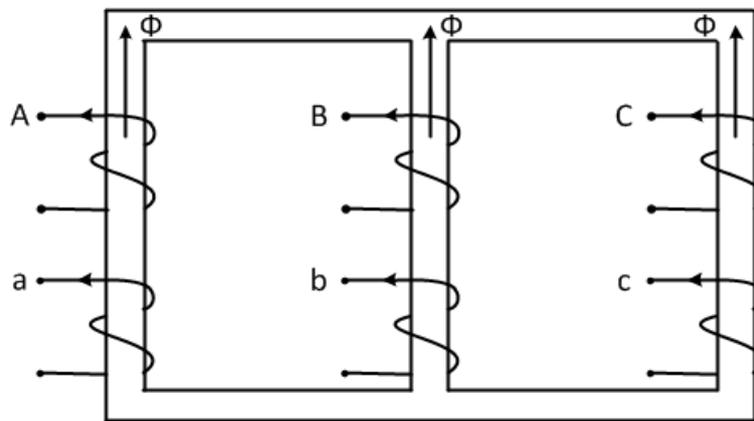


Рисунок 2.2 - Направления потоков в стержнях трехфазного трансформатора

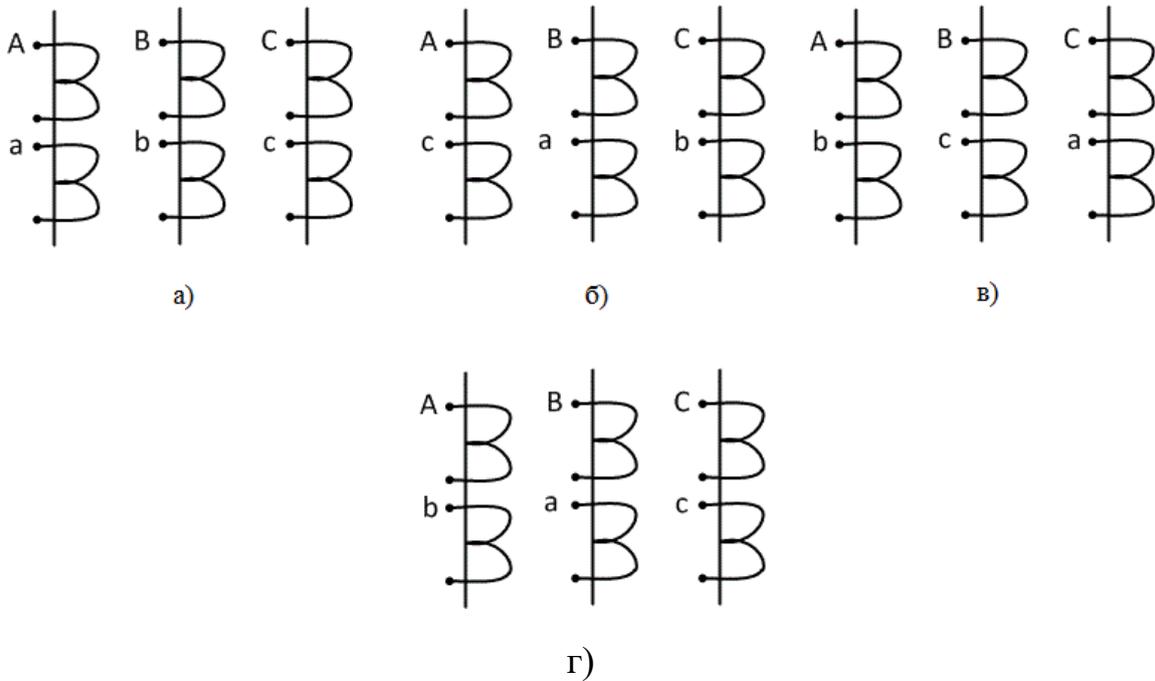


Рисунок 2.3 - Различное расположение обмоток на стержнях, принадлежащих фазам а, в, с

На рисунке 2.1в 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 2.1б). Если же у одной из обмоток, например, у второй, изменить обозначение начала и конца на обратное (рисунок 2.1в), 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 2.1в).

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 2.1б);

группа 6 при $\varphi_{\text{л}} = 180^\circ$ (рисунок 2.1в).

В трехфазном трансформаторе нельзя произвольно выбирать начала и концы обмоток отдельно для каждой фазы. При одинаковом направлении потока в стержнях, как на рисунке 2.2, 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 2.2 и 2.3а, но и разноименные (рисунок 2.3б, в).

При изменении названия фаз обязательно должен соблюдаться порядок их чередования (недопустимо чередование фаз, указанное на рисунок 2.3г).

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 2.4).

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 .

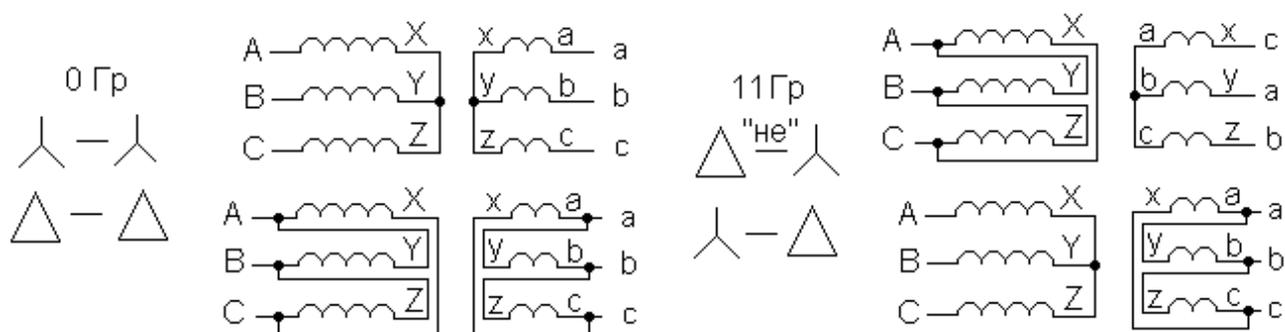


Рисунок 2.4 - Схемы соединения обмоток ВН и НН 0 и 11 групп соединения.

2. Описание лабораторного стенда

В лабораторной работе исследуется трехфазный трехстержневой трансформатор типа ТСВМ–4–74–ОМ5 (паспортные данные приведены на заводском щитке). 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 2.1 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 , созданный этой обмоткой, распределяется поровну между другими стержнями. Учитывая это, можно, анализируя данные таблицы 2.1, определить, обмотку, находящуюся на одном стержне с обмоткой 1–2, а также обмотки ВН и НН.

Таблица 2.1 – 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
3х фазного трансформатора

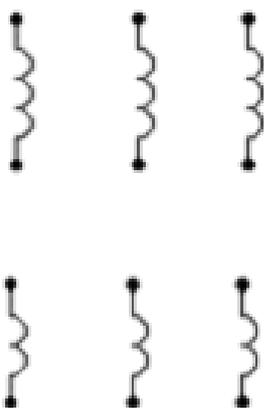


Рисунок 2.4 – Результаты эксперимента «Опытное определение обмоток ВН и НН и обмоток, находящихся на одном стержне»

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 2.1 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 2.5. 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.

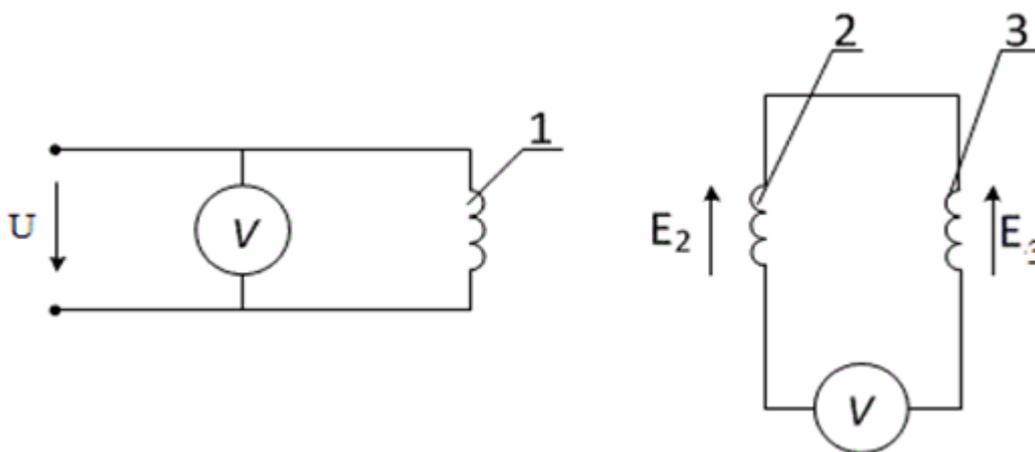


Рисунок 2.5 - Определение начал и концов обмоток ВН

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 2.1б, а для остальных - по рисунку 2.1в. На рисунке 2.6 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.

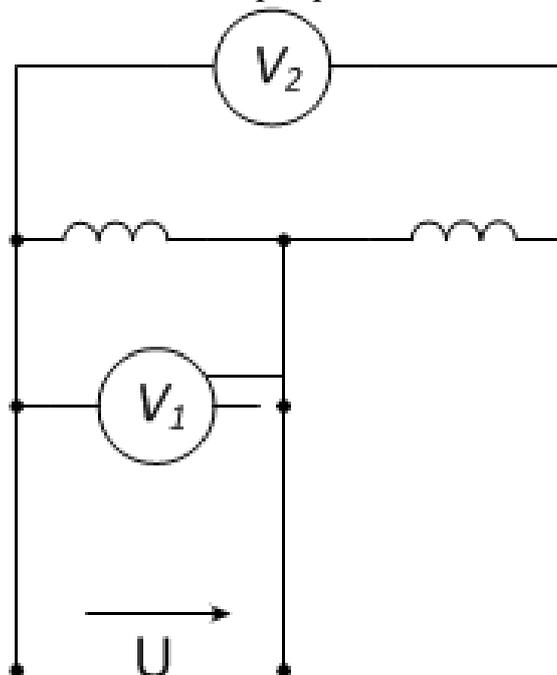


Рисунок 2.6 - Определение начал и концов обмоток НН

4. Проверка групп соединения обмоток

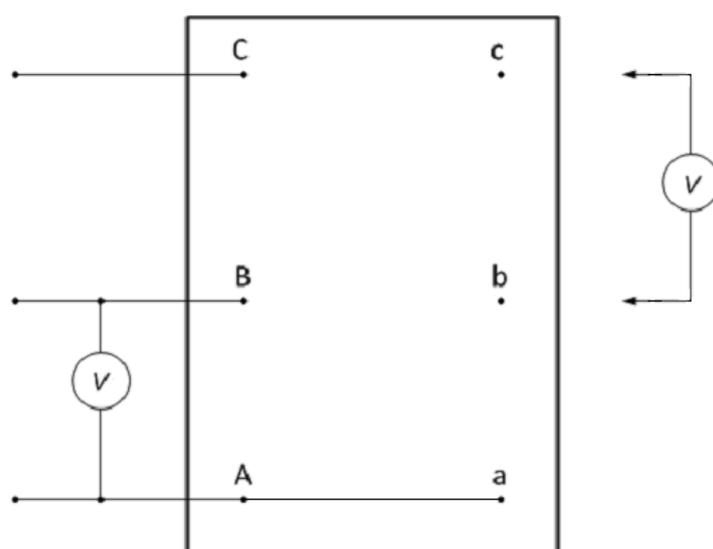


Рисунок 2.7 - Схема проверки групп соединения обмоток трехфазного трансформатора методом вольтметра

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)

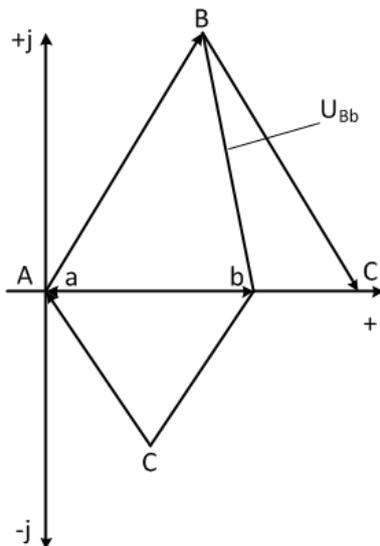


Рисунок 2.8 - Векторная диаграмма для второй группы.

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.

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{ав}}$$

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

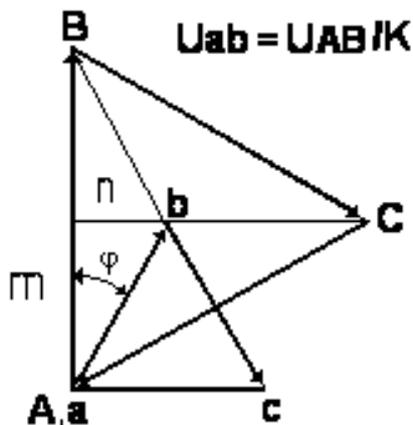
Аналогично определяем остальные напряжения

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

$$U_{cB} = U_{\text{л}} \cdot (k - 1)$$

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

Вывод формул групп соединений (Вариант 2)



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

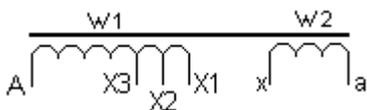
$$U_{bB} = \sqrt{\sin^2\varphi + (K - \cos\varphi)^2} \cdot U_{AB}/K$$

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

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

$$(\Delta - Y) K_{\text{Н}} = 1, (\Delta - \Delta, Y - Y) K_{\text{Н}} = \sqrt{3}, (Y - \Delta) K_{\text{Н}} = 3.$$

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



(Для применяемых в работе трансформаторов)

$$K_{\text{П1}} = 127/127 \approx 1$$

$$K_{\text{П2}} = 127/130 \approx 0,977$$

$$K_{\text{П3}} = 127/133 \approx 0,955$$

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

φгр	φрад	Гр	Кп	$\sqrt{3}K_{II}$	$3K_{II}$	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	$\sqrt{3}/2$	$U_{ab}\sqrt{(K^2-K\sqrt{3}+1)}$

Δ - Y Y - Y, Δ - Δ Y - Δ

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: $7_{гр}+2=9$ гр, а напряжение U_{bC} отстает на 2 группы, например: $7_{гр}-2=5$ 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 № 3

«Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов»

Цель работы: Изучить условия включения трансформаторов на параллельную работу и исследовать влияние неравенства коэффициентов трансформации и внутренних сопротивлений на распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

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 3.1).

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:

$$U_1 = -E_1 + I_1 z_1 \quad U_2 = E_2 - I_2 z_2 \quad (1)$$

Уравнения токов трансформатора:

$$I_1 = I_0 + (-I_2')$$

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 к вторичной для двух параллельно включенных трансформаторов, получим:

$$-U_1 \cdot k_1 = I_{21} \cdot z_{k1} + U_2 \quad -U_1 = I_{22} \cdot z_{k2} + U_2 \quad (2)$$

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

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.

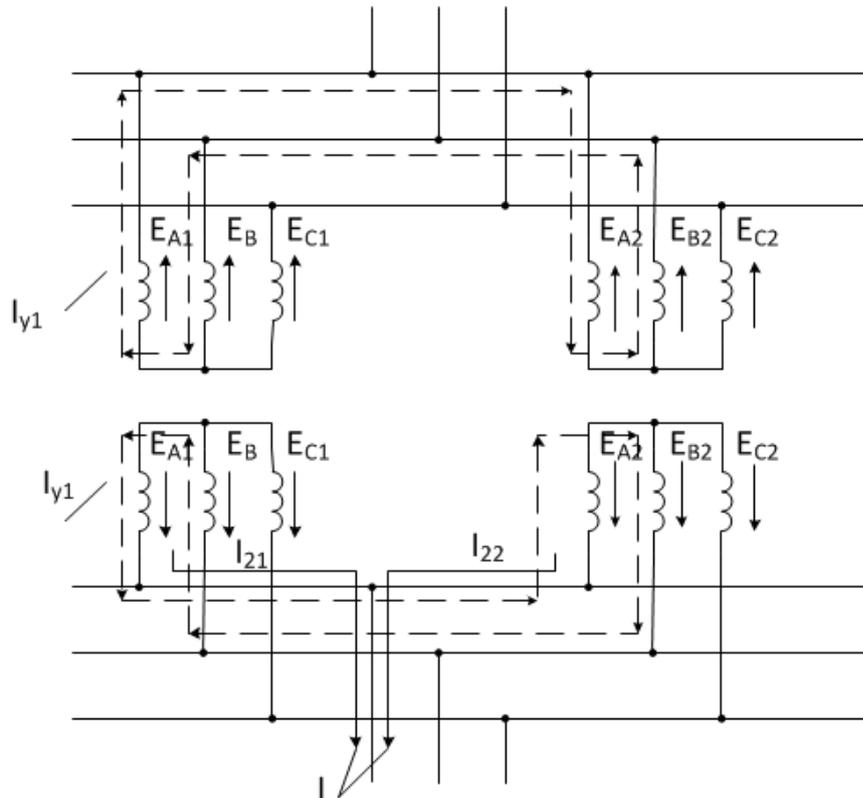


Рисунок 3.1 - Схема соединения обмоток трансформатора при параллельной работе

$$k_1 = \frac{E_{21}}{E_{11}}; \quad k_2 = \frac{E_{22}}{E_{21}} \quad (3)$$

$$I_{21} = \frac{U_1(k_1 - k_2)}{z_{k1} + z_{k2}} + \frac{Iz_{k2}}{z_{k1} + z_{k2}}; \quad I_{22} = -\frac{U_1(k_1 - k_2)}{z_{k1} + z_{k2}} + \frac{Iz_{k1}}{z_{k1} + z_{k2}} \quad (4)$$

Токи каждого трансформатора при неравных коэффициентах трансформации имеют две составляющие:

- первая составляющая обусловлена равенством коэффициентов трансформации и представляет собой уравнивающий 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 . Для этого необходимо из (2) определить U_1 и подставить в выражения (4) для токов I_{21} и I_{22} .

Выражение для токов при равенстве напряжений U_k можно получить, приравняв коэффициенты трансформации в выражении (4).

Из уравнения:

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

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 3.3, данные опыта - в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - 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.

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

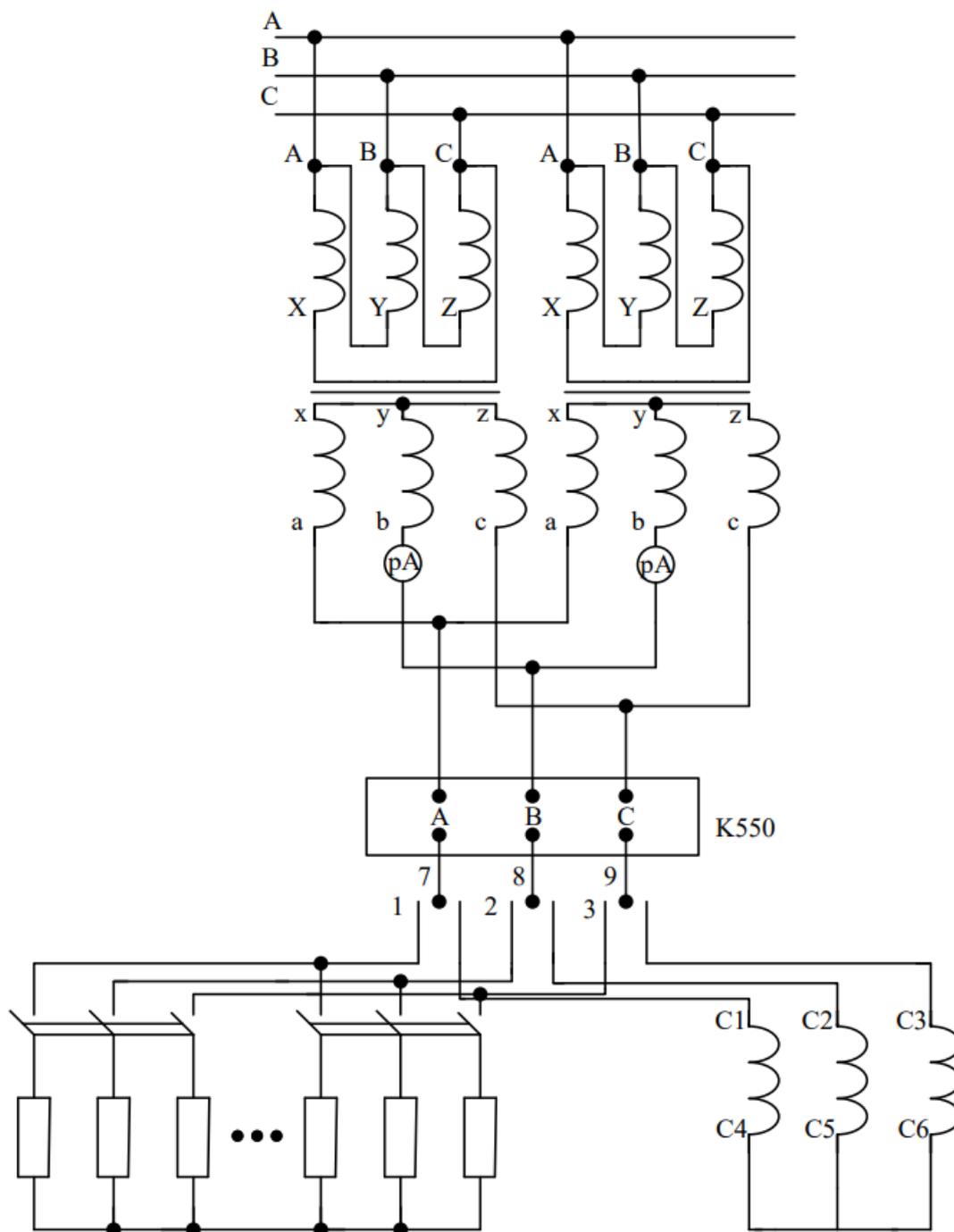


Рисунок 3.2 - Принципиальная схема лабораторной установки для исследования параллельной работы трехфазных трансформаторов

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

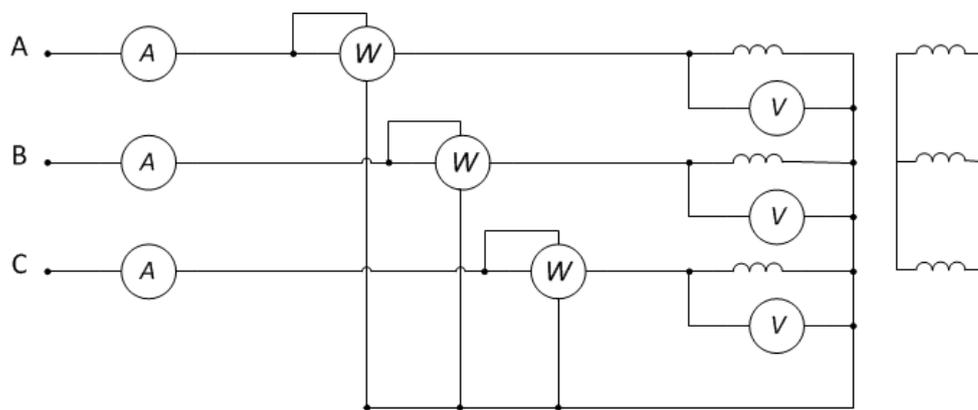


Рисунок 3.3 Схема опыта короткого замыкания трансформатора

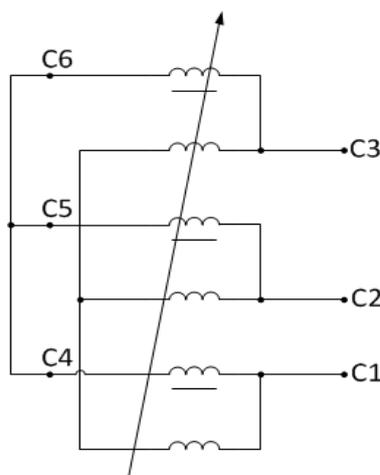


Рисунок 3.4 - Схема регулятора напряжения.

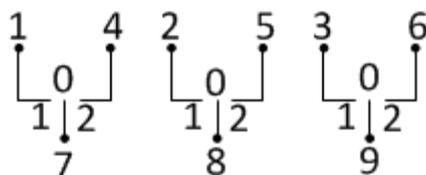


Рисунок 3.5 - Принципиальная схема выключателя S5.

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 3.2.

3. Работа трансформаторов при одинаковых коэффициентах трансформации выполняется при подключении питания к концам X_3 , Y_3 , Z_3 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 3.2 и 3.3

Таблица 3.2 - При активной нагрузке, $u_{k1} = u_{k2}$ и $k_1 = k_2$.

$U_2, В$							
$P_2, Вт$							
$I_{21}, А$							
$I_{22}, А$							
$I = I_{2c}, А$							

Таблица 3.3 - При индуктивной нагрузке, $u_{k1} = u_{k2}$ и $k_1 = k_2$.

$U_2, В$							
$P_2, Вт$							
$I_{21}, А$							
$I_{22}, А$							
$I = I_{2c}, А$							

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 $R = 0,48 \text{ Ом}$. 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 3.4.

Таблица 3.4 - При активной нагрузке, разных $u_{k1} \neq u_{k2}$ и $k_1 = k_2$.

$U_2, В$							
$P_2, Вт$							
$I_{21}, А$							
$I_{22}, А$							
$I = I_{2c}, А$							

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 3.5

Таблица 3.5 - При активной нагрузке, разных $k_1 \neq k_2$ и $u_{k1} = u_{k2}$

$U_2, В$							
$P_2, Вт$							
$I_{21}, А$							
$I_{22}, А$							
$I = I_{2c}, А$							

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. По данным таблицы 3.1 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 (в первом случае 220/133; во втором 226/133);

3. По данным таблицы 3.5 построить графики зависимости I_{21} и $I_{22} = f(I)$. при разных коэффициентах трансформации и равных напряжениях короткого замыкания

4. Рассчитать зависимость вторичных токов от тока нагрузки при разных коэффициентах трансформации и равных значениях напряжения U_k . Нагрузку принять чисто активной (смотреть п.1). В отчете привести вывод формул для определения I_{21} и I_{22} в зависимости от U_2 .

5. По данным таблицы 3.4 построить графики зависимости I_{21} и $I_{22} = f(I)$ при равных коэффициентах трансформации и разных напряжениях короткого замыкания.

6. Рассчитать зависимость вторичных токов от тока нагрузки при равных коэффициентах трансформации и разных напряжениях короткого замыкания. Привести выражения для расчета токов (смотреть п.1).

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 № 4 «Испытание автотрансформаторов»

Цель работы: Провести испытания однофазного и трехфазного автотрансформаторов. Ознакомиться с особенностями их конструкции и эксплуатации.

1. Краткие теоретические сведения

Автотрансформатором называют трансформатор, в котором, кроме магнитной, имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками.

Автотрансформаторы получили широкое применение в высоковольтных сетях для связи между системами с близкими уровнями напряжения: ПО и 220; 220 и 500; 330 и 750 кВ.

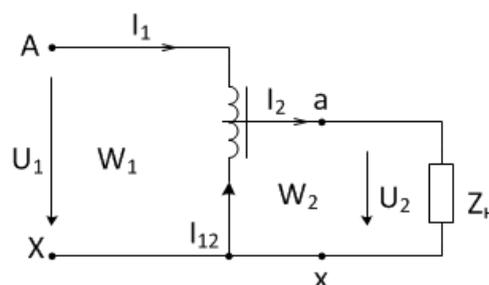
В тех случаях, когда по условиям эксплуатации требуется передача электрической энергии с незначительным изменением напряжения и тока, экономичней применять автотрансформатор, у которого в отличие от обычного трансформатора обмотки связаны между собой не только магнитно, но и электрически. Автотрансформатор, как и трансформатор, может быть понижающим (рисунок 4.1а) и повышающим (рисунок 4.1б). Если число витков между А и Х обозначить через W_1 , а число витков между а и х – через W_2 , то в автотрансформаторе соотношение между напряжениями и токами получаются такими же, как в обычном трансформаторе

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{W_1}{W_2} = K.$$

По сравнению с трансформатором автотрансформатор имеет ряд особенностей, для выявления которых обратимся к рисунку 4.1. Ток I_{12} , протекающий по обмотке а–х, равен геометрической сумме первичного и вторичного токов

$$I_{12} = -I_1 + I_2. \quad (1)$$

а) Понижающий



б) Повышающий

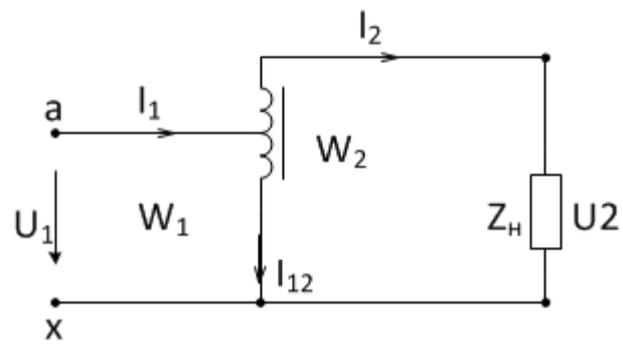
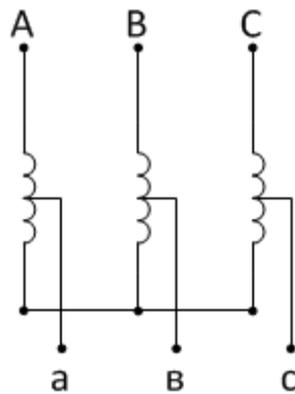
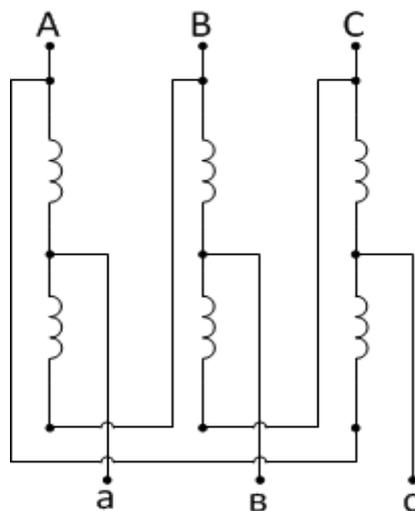


Рисунок 4.1 - Однофазные автотрансформаторы

а) Соединение Y



б) Соединение Δ



в) Соединение Δ с продолженными сторонами

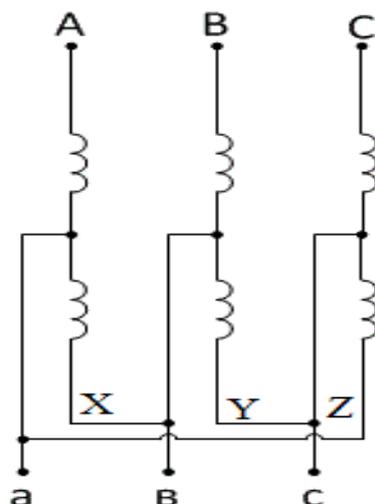


Рисунок 4.2 - Трёхфазные автотрансформаторы

Пренебрегая током холостого хода, можно считать, что токи I_1 и I_2 находятся в противофазе, и их геометрическая сумма равна арифметической разности. В понижающем автотрансформаторе $I_2 > I_1$ и $I_{12} = I_2 - I_1$ (2)

В повышающем $I_1 > I_2$ (рис. 4.1б) и $I_{12} = I_1 - I_2$ (3)

Дальнейший анализ будем проводить для понижающего автотрансформатора.

Учитывая, что при допущении

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = -I_2 \cdot \left(\frac{W_2}{W_1} \right)$$

получим

$$I_{12} = I_2 \cdot \left(1 - \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \right) = I_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K} \right). \quad (4)$$

В автотрансформаторах обмотки А-а и а-х – магнитоуравновешены, т. е. их МДС равны и противоположно направлены, что видно из следующего:

$$I_{12} \cdot W_2 = I_2 \cdot \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right) \cdot W_2 = -I_1 \cdot (W_1 - W_2). \quad (5)$$

Решив уравнение (2) относительно I_2 и умножив полученное выражение на U_2 , получим

$$I_2 \cdot U_2 = I_1 \cdot U_2 + I_{12} \cdot U_2 = I_1 \cdot U_2 + I_2 \cdot U_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K} \right), \quad (6)$$

или

$$S_2 = S_{эл} + S_{эм}, \quad (7)$$

где S_2 – полная (номинальная) мощность автотрансформатора, которая поступает из первичной сети во вторичную (проходная мощность); $S_{эл}$ – электрическая мощность автотрансформатора, которая поступает из первичной сети во вторичную электрическим путем (передается по проводам); $S_{эм}$ – электромагнитная мощность автотрансформатора, которая поступает из первичной сети во вторичную электромагнитным путем (расчетная мощность).

Таким образом, в автотрансформаторе часть мощности из первичной во вторичную цепь передается электрическим путем, часть электромагнитным.

Размеры автотрансформатора определяются мощностью, которая передается электромагнитным путем.

$$S_{эм} = S_2 - S_{эл} = S_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \quad (8)$$

Снижение расчетной мощности в автотрансформаторе по сравнению с двухобмоточным трансформатором можно пояснить на примере понижающего автотрансформатора (рисунок 4.1а). Обмотку, обтекаемую током первичной сети, рассчитывают на разностное напряжение первичной и вторичной сети, а не на полное напряжение, как в обычном трансформаторе. Соответственно обмотка, к которой приложено выходное напряжение, обтекается разностным током первичной и вторичной сети, а не полным током, как в обычном трансформаторе.

Автотрансформаторы находят широкое применение для соединения высоковольтных электрических сетей для пуска двигателей переменного тока большой мощности, в схемах автоматики и т. д.

В автотрансформаторах за счёт уменьшения массы металла обмоток и стали магнитопровода по сравнению с трансформатором такой же номинальной мощности потери и изменение напряжения меньше, а КПД выше.

В то же время автотрансформатор по сравнению с трансформатором имеет ряд недостатков. Так, напряжение к.з. автотрансформатора $U_{кз\text{авто}}$ меньше U_k обычного трансформатора, поэтому ток к.з. автотрансформатора превышает во столько же раз ток к.з. трансформатора

$$\frac{U_{кз\text{авто}}}{U_k} = \frac{1}{1 - \frac{1}{K}}. \quad (9)$$

При использовании трехфазных автотрансформаторов его обмотки могут иметь те же соединения, что и трехфазные трансформаторы (рисунок 4.2).

Наиболее распространенной схемой соединения обмоток трехфазных автотрансформаторов является звезда (рисунок 4.2а). При этом для устранения третьих гармоник в потоках и ЭДС фаз применяется третичная обмотка малой мощности с соединением в треугольник. Если при соединении обмоток треугольником требуется большее значение линейного коэффициента трансформации, то рекомендуют использовать схему треугольника с продолженными сторонами (рисунок 4. 2в).

2. Описание лабораторного стенда

В работе проводится исследование однофазного трансформатора (таблица 4.1) и трехфазного, соединенного по схеме автотрансформатора (таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Однофазный трансформатор

Тип	S_n , ВА	U_{1n} , В	I_{1n} , А	U_{2n} , В	
ЛАТР	1000	220	4	0–250	

Таблица 4.2 – Автотрансформатор

Тип	S_n , ВА	U_{1n} , В	U_{2n} , В	U_k , %	P_k , Вт	P_0 , Вт	Соединение обмоток
ТСВМ–4	4	220	133	3			Δ/Δ

В состав установок входят: измерительный комплект К505, нагрузочные сопротивления и измерительные приборы.

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

Исследование однофазного трансформатора

1. Собрать схему согласно рисунку 4.3. и подключить автотрансформатор к сети.

2. Установить в первичной обмотке 220В и в течение опыта поддерживать неизменным.

3. Во вторичной обмотке установить также 220 В.

4. Снять показание приборов: U_1 , U_2 , P_1 , I_1 , I_2 , I_{12} (индексация напряжений и токов приведена на рисунке 1а) и занести их в таблицу 4.3.

5. Посредством переключателей подключить к вторичной цепи автотрансформатора нагрузку близкую к 4 А.

6. Уменьшая напряжение на вторичной автотрансформатора до минимума и поддерживая нагрузку во вторичной цепи посредством подключения нагрузочных сопротивлений R_n , посредством переключателей, проведем еще 4–5 опытов, а полученные опытные данные занесем в таблицу 4.3.

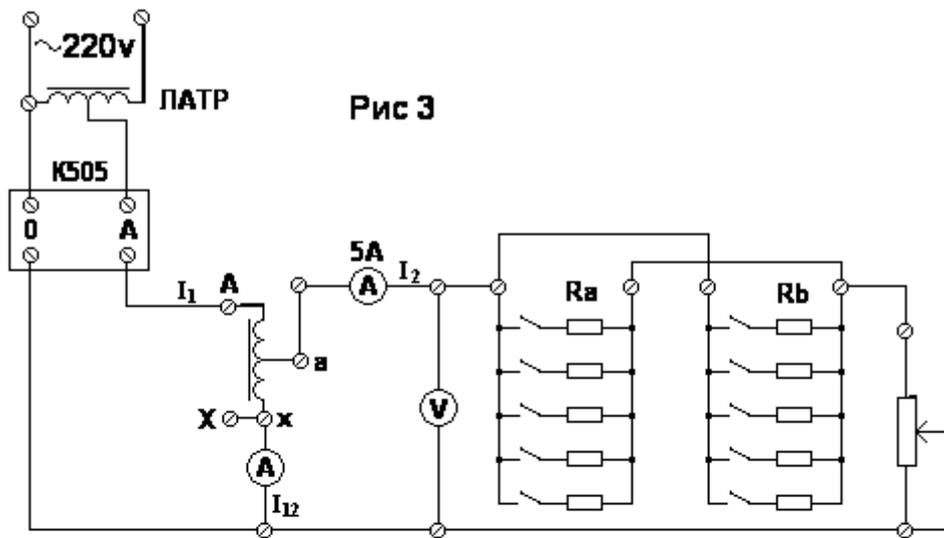


Рис 3

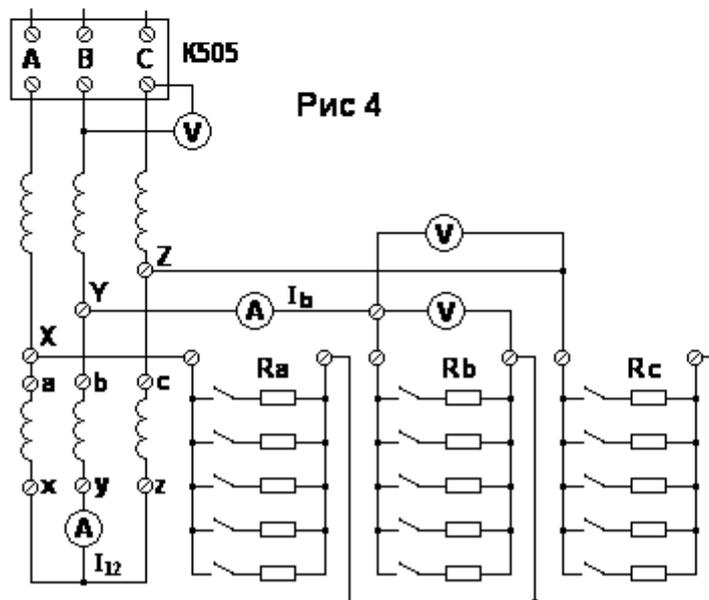


Рис 4

Рисунок 4.3 - Принципиальные схемы исследования однофазного и трехфазного трансформаторов.

Таблица 4.3 - Исследование однофазного автотрансформатора

№	Опытные данные						Расчетная часть			
	U ₁ , В	I ₁ , А	P ₁ , Вт	U ₂ , В	I ₂ , А	I ₁₂ , А	К	S ₂ , ВА	S _{эл} , ВА	S _{эм} , ВА
	Первичная цепь			Вторичн. цепь						
1	220			220	0					
2	220			180	4					
3	220			150	4					
4	220			120	4					
5	220			100	4					
6	220			50	4					

Исследование трехфазного автотрансформатора

1. Собрать схему, приведенную на рисунке 4.3;
2. Подключить автотрансформатор к сети;
3. Записать опытные данные в таблице 4.4 (первую точку снять при токе нагрузки равном нулю).

Таблица 4.4 - Исследование трехфазного трансформатора

Первичная цепь			Вторичная цепь				Расчетные данные		
$\Sigma P,$ Вт	$I_B,$ А	$U_B,$ В	$U_{BC},$ В	$I_B,$ А	$U_B,$ В	$U_{BC},$ В	$I_{12},$ А	К	$\Delta U = \frac{(U_{BC}^0 - U_{BC})}{U_{BC}} * 100\%$
				0					

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. По данным табл. 3 рассчитать коэффициент трансформации, полную S_2 , электрическую $S_{эл}$ и электромагнитную $S_{эм}$ мощности однофазного автотрансформатора. Построить зависимости:

$$S_2 = f(K)$$

$$S_{эл} = f(K)$$

$$S_{эм} = f(K).$$

2. По данным холостого хода ($I_2 = 0$) трехфазного автотрансформатора (табл. 4) рассчитать коэффициент трансформации, величину ΔU и построить график зависимости $\Delta U\% = f(U_2)$;

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. Где применяются автотрансформаторы?

2. Что такое полная (проходная), электрическая и электромагнитная мощности автотрансформатора? Выведите формулу, устанавливающую связь между этими мощностями.

3. Почему автотрансформатор, имеющий точно такую же мощность, что и обычный трансформатор, имеет меньшую массу, меньшие потери и изменения напряжения, а КПД выше?

4. Во сколько раз электромагнитная (расчетная) мощность автотрансформатора меньше такой же мощности двухобмоточного трансформатора?

5. Почему при коротком замыкании обмотки (а–х) или (А–Х) (рисунок 4.1а) наблюдается значительное перенасыщение магнитопровода автотрансформатора и увеличение его тока холостого хода?

6. Почему изоляция сети низкого напряжения автотрансформатора должна быть такой же, как и высокой?

Лабораторная работа № 5

«Испытание двигателя постоянного тока параллельного возбуждения»

Цель работы: Изучить конструкцию и принцип действия двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Экспериментально снять характеристики двигателя. Ознакомиться с особенностями эксплуатации двигателей постоянного тока.

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.

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках, где требуется широкое и плавное регулирование скорости вращения (электропривод лебедок и т. д.).

Уравнения, описывающие работу двигателя постоянного тока (ДПТ):

$$U_a = E_a + I_a \cdot R_a; \quad E_a = c \cdot \Phi \cdot \omega; \quad (1)$$

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_a; \quad \omega = \frac{U}{c \cdot \Phi} - \frac{M}{c^2 \cdot \Phi^2} \cdot (R_a + R_{\text{доб}}),$$

где U_a – подводимое к якору ДПТ напряжение; E_a – противоэлектродвижущая сила якоря; I_a – ток якоря; R_a – полное сопротивление цепи якоря; Φ – магнитный поток; M , ω – соответственно момент и угловая скорость на валу якоря ДПТ.

Энергетическая диаграмма ДПТ изображена на рисунке 5.1. Первичная мощность P_1 является электрической и потребляется из питающей сети. За счет этой мощности покрываются потери на возбуждения ΔP_b и электрические потери в цепи якоря $\Delta P_э$, а оставшаяся часть составляет электромагнитную мощность якоря $P_{эм}$, которая превращается в механическую мощность. Магнитные потери $\Delta P_{ст}$ механические и добавочные $\Delta P_{доб}$ потери покрываются за счет механической мощности.

Остальная часть мощности представляет собой полезную механическую мощность P_2 на валу

$$P_1 = U \cdot (I_a + I_b); \quad (2)$$

$$\Delta P_э = I_a^2 \cdot R_a$$

Эксплуатационные свойства ДПТ можно оценивать на основе рабочих, механических, регулировочных и нагрузочных характеристик.

Рабочие характеристики – это зависимости скорости n , тока якоря I_a потребляемой мощности P_1 , момента M и КПД от мощности на валу P , при дополнительном сопротивлении в цепи якоря $R_{доб} = 0$ и постоянной величине тока возбуждения $I_b = I_{b\text{ ном}}$. Величина нагрузочного момента на валу ДПТ создается электромагнитным тормозом. Измерив величину момента и скорость вращения, можно определить мощность на валу:

$$P_2 = M \cdot \omega; \omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (3)$$

где – ω угловая скорость ДПТ.

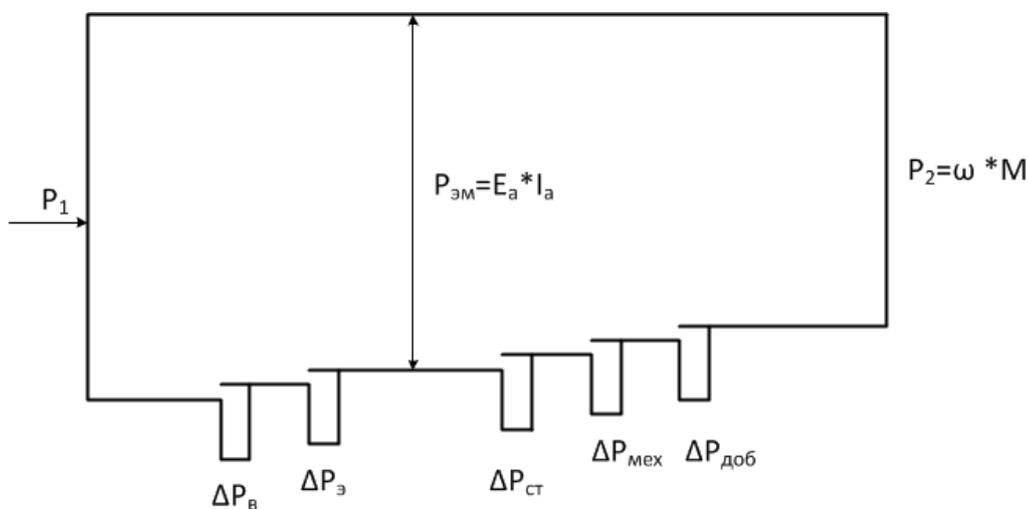


Рисунок 5.1 - Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

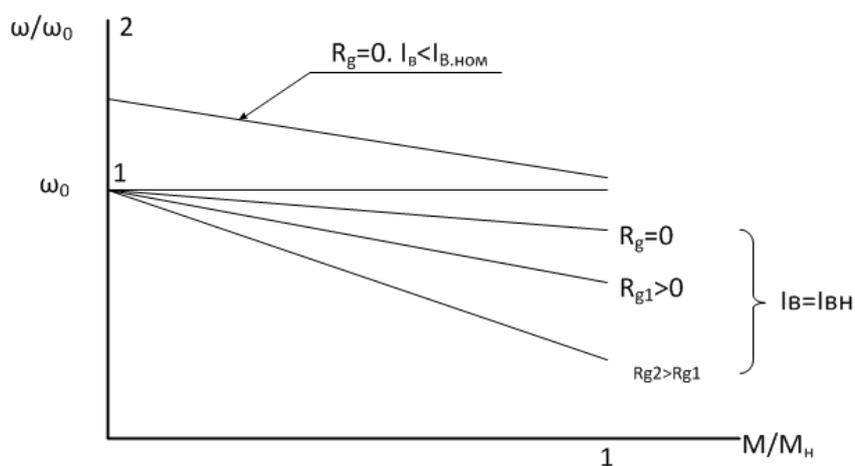


Рисунок 5.2 - Механические характеристики ДПТ

КПД определится по выражению

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} + U_b I_b + I_a^2 \cdot R_a} \quad (4)$$

$$\Delta P_{доб} = 0,01 \cdot P_1 \cdot (I_a \cdot I_{a \text{ ном}})^2.$$

Механическая характеристика – это зависимость угловой скорости от момента $\omega = f(M)$. Как следует из уравнения (1) скорость ДПТ можно регулировать путем изменения подводимого к якору напряжения, магнитного потока (тока возбуждения) или включения последовательно с якорем добавочного сопротивления.

На рисунке 5.2 показаны механические характеристики при различных значениях магнитного потока и величин добавочных сопротивлений в цепи якоря ДПТ.

2. Описание лабораторного стенда

Лабораторная установка (рисунок 5.3) состоит из испытуемого двигателя, электромагнитного тормоза ТЭМ, со стороны которого создается момент сопротивления на валу ДПТ. Величина этого момента регулируется путем изменения тока в обмотке ТЭМ ЛАТРом. В таблице 5.1 приведены технические данные ДПТ.

Таблица 5.1 – Технические данные ДПТ

Тип	КПД %	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	I_n , А	R_a , Ом	R_b , Ом	n_n , об./мин	$\Delta P_{ст}$, Вт	$\Delta P_{мех}$, Вт
П42	77	2,2	220	13,1	0,8	0,67	255	1000	150	150

В цепь якоря включено пусковое сопротивление R_n , которое шунтируется контактом пускового реле (РП) во время пуска. Добавочные сопротивления R_1 и R_2 можно подключать последовательно с якорем.

В состав лабораторного стенда входят реостат R_b , для регулирования тока возбуждения ДПТ, электроизмерительные приборы и переключатели S4 и S5.

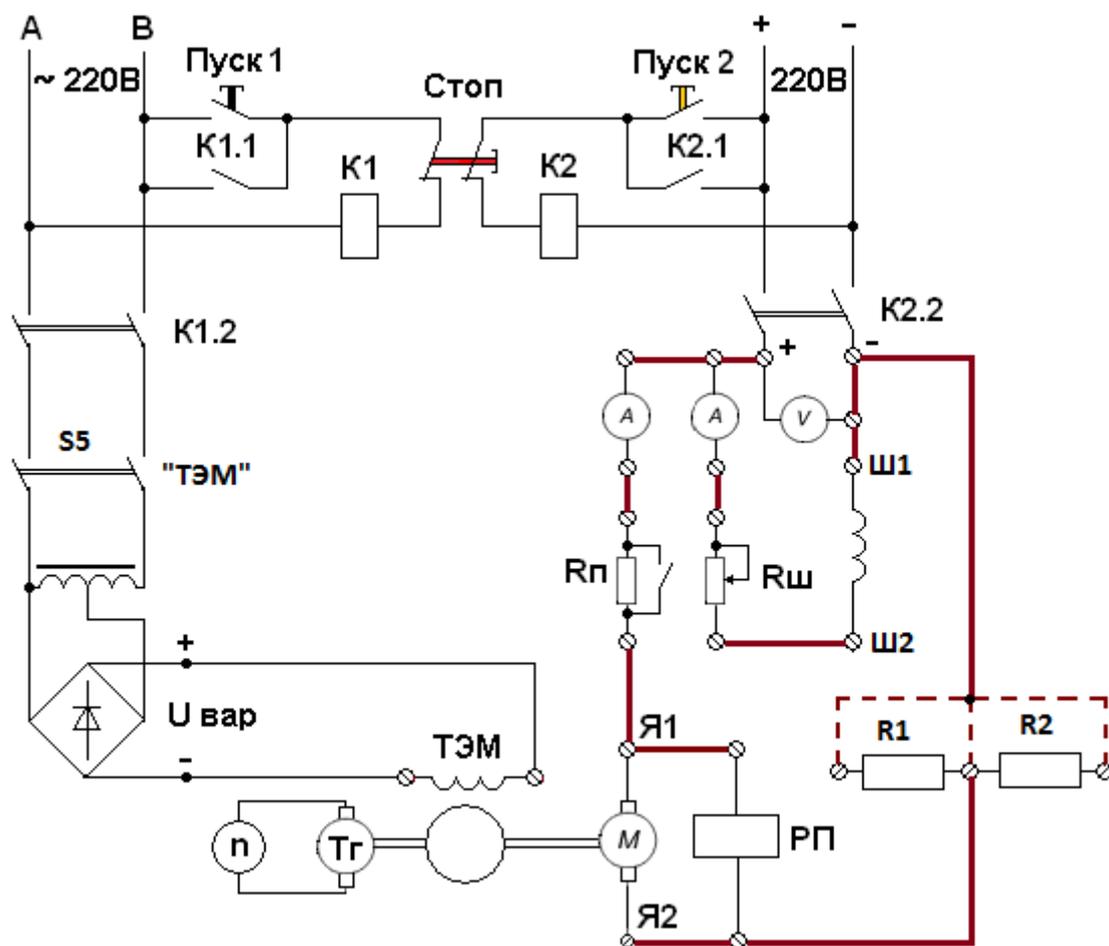


Рисунок 5.3 - Принципиальная схема лабораторной установки

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. Перед сборкой схемы ознакомиться с техническими данными ДПТ и рассчитать его номинальный момент M_n .

2. На основе технических данных ДПТ подобрать необходимые для испытаний электроизмерительные приборы.

3. Собрать схему, приведенную на рис.5.3. Переключатель S4 установить в положение ТЭМ, а S5 в положение «Пуск». После проверки схемы преподавателем кнопками К1 и К2 подключить схему к сети.

4. Снять рабочие характеристики ДПТ. Для этого установить и поддерживать постоянным номинальный ток возбуждения $I_b = 0,8$ А при $R_{доб} = 0$. Далее посредством нагрузочного устройства создать момент сопротивления на валу ДПТ близкий по величине номинальному $M \approx M_n$. Изменяя момент на валу двигателя от $M = M_n$ до $M = 0$, измерить напряжение подаваемое на двигатель U , ток якоря I_a , момент M , частоту вращения. Опытные данные занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 - Механическая характеристика ДПТ при $R_{доб}=0$ и постоянном $I_b=0,8$ А

№ п/п	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	M (кгм)	U (В)	I _a (А)	I _b (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1.75			0,8				
2	1.5			0,8				
3	1.25			0,8				
4	1			0,8				
5	0.5			0,8				
6	0			0,8				

5. Снять механическую характеристику ДПТ при пониженном значении тока возбуждения (потока) и $R_{доб.}=0$. Для этого установить ток возбуждения $I_b \approx 0.8 \cdot I_{bн}$ и поддерживать его в течение опыта постоянным. Изменяя момент на валу от $M = M_n$ до $M=0$, снять опытные значения U, I_a, n, M . Результаты занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 - Механическая характеристика ДПТ при $R_{доб.}=0$ и постоянном $I_b=0,6$ А

№ п/п	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	Ia (А)	Iв (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1.75			0,6				
2	1.5			0,6				
3	1.25			0,6				
4	1			0,6				
5	0.5			0,6				
6	0			0,6				

5. Снять механические характеристики при различных значениях

$$R_{доб} = R_1 + R_2; R_{доб} = R_1$$

Для этого включить последовательно в цепь якоря добавочное сопротивление $R_{доб} = R_1 + R_2$. Установить момент на валу ДПТ близкий к номинальному при $I_b = I_{bн}$ и уменьшая момент от M_n до $M=0$ снять механическую характеристику. Экспериментальные данные занести в таблицу 5.4. Далее уменьшить величину добавочного сопротивления до $R_{доб} = R_1$ и повторить измерения. Результаты опытов занести в таблицу 5.5.

Таблица 5.4 - Механическая характеристика ДПТ при $R_{доб.}=R_1+R_2$

№ п/п	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	Ia (А)	Iв (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1.25			0,8				
2	1			0,8				
3	0.5			0,8				
4	0			0,8				

Таблица 5.5 - Механическая характеристика ДПТ при $R_{доб.}=R_1$

№ п/п	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	Ia (А)	Iв (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1.5			0,8				
2	1.25			0,8				
3	1			0,8				
4	0.5			0,8				
5	0			0,8				

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. На основе опытных данных, приведенных в таблице 5.2, вычислить подводимую к двигателю и отдаваемую им мощность P_1 и P_2 и КПД. Построить рабочие характеристики ДПТ: n , I_n , P_1 , M и КПД $f(P_2)$, отметив них значения n_n , I_n , M_n , η_n , соответствующие номинальной мощности двигателя P_n , и значение P_2 , при котором η двигателя достигает наибольшего значения. Определить ток якоря при холостом ходе I_{a0} .

2. На основании данных таблиц 5.2 и 5.3 построить две механические характеристики ДПТ при разных токах возбуждения $I_b = I_{bn}$, $I_b \approx 0.8 * I_{bn}$ и $R_{доб} = 0$.

3. На основе данных таблиц 5.2, 5.4 и 5.5 построить механические характеристики ДПТ $n=f(M)$ при $R_{доб} = 0$; $R_{доб} = R_1 + R_2$; $R_{доб} = R_1$ и номинальном токе возбуждения.

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. Объясните устройство и принцип действия ДПТ с параллельным возбуждением.
2. Какими способами можно регулировать скорость вращения ДПТ?
3. Как изменить направление вращения двигателя?
4. Уравнение моментов двигателя.
5. Сущность рабочих характеристик ДПТ параллельного возбуждения.

6. Что произойдет с ДПТ параллельного возбуждения, если во время работы двигателя оборвется обмотка возбуждения: а) на холостом ходу; б) под нагрузкой?
7. Как осуществляется пуск ДПТ?

Лабораторная работа № 6

«Испытание двигателя последовательного возбуждения»

Цель работы: Ознакомиться с конструкцией, методами пуска и регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Освоить методы испытаний и расчета рабочих и механических характеристик данного двигателя.

1. Краткие теоретические сведения

Двигатели постоянного тока (ДПТ) последовательного возбуждения имеют существенные преимущества в случае тяжелых условий пуска и изменения момента в широких пределах. Для них менее опасны перегрузки по моменту, поэтому они широко используются для электрической тяги (трамвай, метро, троллейбусы, электровозы и т. д.)

В ДПТ последовательного возбуждения ток якоря одновременно является также током возбуждения $I_a = I_b$. Поэтому магнитный поток Φ_δ изменяется в широких пределах

$$\Phi_\delta = K_\phi \cdot I_a. \quad (1)$$

Коэффициент K_ϕ при $I_a < I_n$ является практически постоянным, и лишь при $I_a > (0,8-0,9)I_n$ вследствие насыщения магнитной цепи машины K_ϕ начинает несколько уменьшаться (рисунок 6.1).

Учитывая формулу (1), получим:

$$M = C \cdot \Phi_\delta \cdot I_a = c \cdot K_\phi \cdot I_a^2 \quad (2)$$

$$E_a = C \cdot \Phi_\delta \cdot \omega; \quad (3)$$

$$\omega = \frac{U}{c \cdot \Phi_\delta} - \frac{I_a \cdot R_a}{c \cdot \Phi_\delta} = \frac{U}{c \cdot \Phi_\delta} - \frac{M}{c^2 \cdot \Phi_\delta^2} \cdot R_a, \quad (4)$$

где R_a – сопротивление якоря; C – конструктивная постоянная.

Скоростная характеристика ДПТ последовательного возбуждения (рисунок 6.2) является мягкой и имеет гиперболический характер. При $K_\phi = \text{const}$ вид кривой показан штриховой линией.

При малых I_a скорость ДПТ последовательного возбуждения становится недопустимо большой. Поэтому работа их, за исключением микромашин, на холостом ходу не допускается.

Для ДПТ последовательного возбуждения $M \sim I_a^2$ и при пуске допускается $I_a = (1,5 - 2,0)I_H$, поэтому они развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с ДПТ параллельного возбуждения.

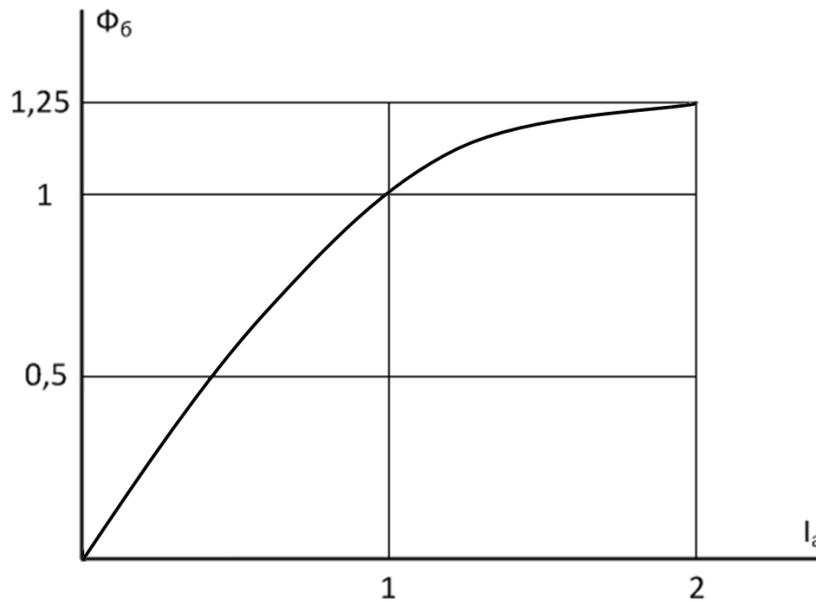


Рисунок 6.1 - Зависимость магнитного потока от тока якоря ДПТ последовательного возбуждения

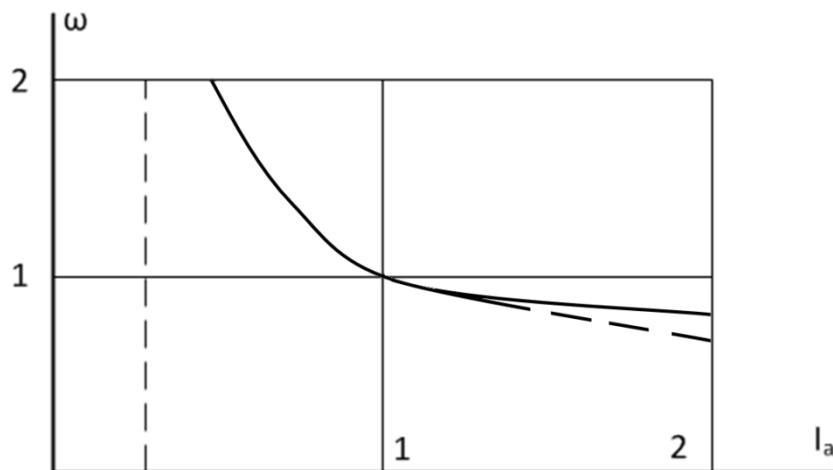


Рисунок 6.2 - Естественная скоростная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

Схемы регулирования скорости вращения двигателя

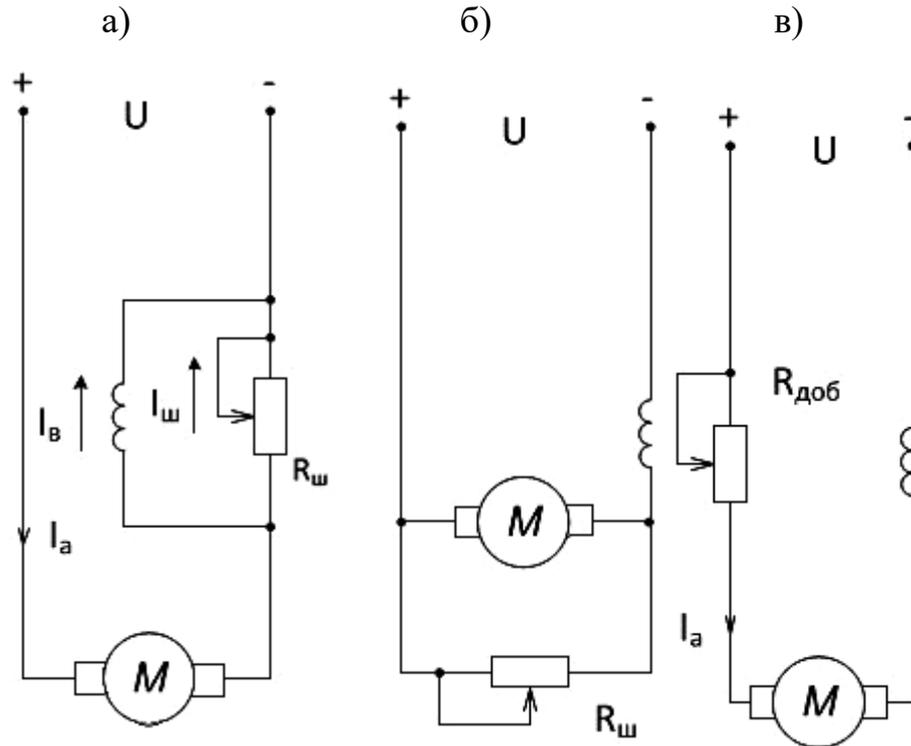


Рисунок 6.3 - Схемы регулирования скорости вращения двигателя

Отметим, что при превышении скорости вращения ДПТ последовательного возбуждения в режим генератора не переходит. На рисунке 6.2 это отражено тем, что $\omega = f(I_a)$ оси ординат не пересекает. Для перевода ДПТ последовательного возбуждения в режим генератора необходимо переключить концы обмотки возбуждения.

Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения осуществляется:

- посредством ослабления поля. Это производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением (рисунок 6.3а), либо уменьшением числа включенных в работу витков обмотки возбуждения. Так как сопротивление обмотки возбуждения R_b и падение напряжения малы, то $R_{ш}$ также должно быть мало;

- путем шунтирования якоря (рисунок 6.3б). При шунтировании якоря ток и поток возбуждения возрастают, а скорость уменьшается. Шунтирование якоря эффективно только тогда, когда магнитная цепь не насыщена. В связи с этим шунтирование якоря на практике применяется редко;

- включением сопротивления в цепь якоря (рисунок 6.3в). Этот способ позволяет регулировать ω вниз от номинального значения. Так как при этом значительно уменьшается КПД, то такой способ регулирования находит ограниченное применение;

- регулирование скорости изменением напряжения. Этот способ широко применяется в транспортных установках.

Как известно, работу двигателей характеризуют его рабочие характеристики P_1 , η , I_a , $M=f(P_2)$, где P_1 , P_2 – соответственно потребляемая из сети и отдаваемая двигателем мощность; M – момент на валу двигателя. Расчет этих характеристик можно осуществить по формулам:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}; \quad P_2 = \omega \cdot M$$

$$P_1 = U_{\text{сети}} \cdot I_a; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

2. Описание лабораторного стенда

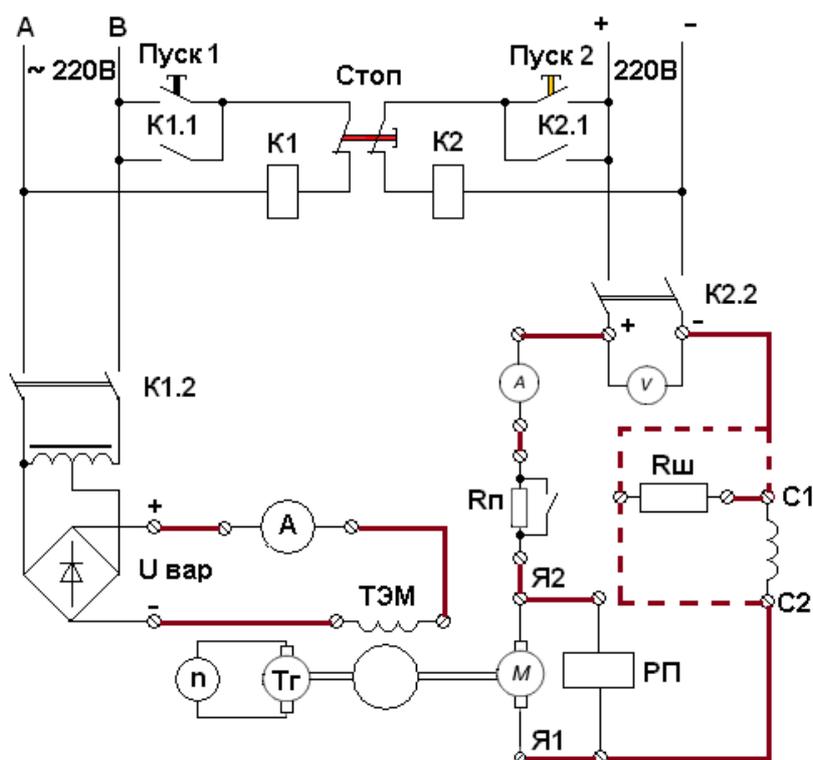


Рисунок 6.4 - Принципиальная схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рисунке 6.4 и на лабораторном стенде. Установка содержит исследуемый ДПТ последовательного возбуждения и электромагнитный тормоз (ТЭМ), посредством которого создается тормозной момент на валу двигателя. Технические данные ДПТ последовательного возбуждения приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Технические данные ДПТ последовательного возбуждения

Тип	P_n , кВт	I_n , А	U_n , В	η	n_n , об/мин	R_a , Ом	R_{c1-c2} , Ом
П42–УХЛ4	2,2	13,1	220	0,77	1000	0,68	1,58

В состав установки входят также: пусковое реле (РП), работающее в функции противо-ЭДС (при достижении определенной ЭДС якоря РП шунтирует пусковое сопротивление R_n); сопротивление $R_{ш}$; тахогенератор; электроизмерительные приборы.

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 основе технических данных ДПТ подобрать необходимые измерительные приборы.

2. Собрать схему установки согласно рисунку 6.4. После проверки схемы преподавателем включить контактор К1. ЛАТРом установить ток возбуждения ТЭМ не менее 1 А, что соответствует созданию на валу ДПТ необходимого минимального момента сопротивления.

3. Посредством пускателя К2 подключить ДПТ к сети постоянного тока.

Внимание! Если ДПТ во время пуска идет в разнос, то немедленно отключить контактор К2.

4. Снять рабочие характеристики ДПТ. Для этого изменяя ток возбуждения ТЭМ от максимального возможного значения до 1 А, снять значения U , I_a , n , M . Результаты испытаний занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты измерений рабочих характеристик ДПТ

№ п/п	Экспериментальные данные				Расчетные данные			
	М (кгм)	U (В)	I _a (А)	п (об/мин.)	ω, (с ⁻¹)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
	1.75							
	1.5							
	1.25							
	1							
	0.75							
	0.5							

5. Снять механические характеристики ДПТ при ослаблении магнитного поля. Для этого параллельно обмотке возбуждения подключить сопротивление $R_{ш}$. Снять опытные данные и занести в таблицу 6.3

Таблица 6.3 – Результаты опытных измерений механических характеристик ДПТ при ослаблении магнитного поля

№ п/п	Экспериментальные данные				Расчетные данные			
	М (кгм)	U (В)	I _a (А)	п (об/м)	ω, (с ⁻¹)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
	1.5							
	1.25							
	1							
	0.75							
	0.5							

6. Снять механическую характеристику ДПТ при включенном последовательно в цепь якоря $R_{доб} = R_{ш}$. Опытные данные занести в таблицу 6.4

Таблица 6.4 – Результаты опытных измерений механических характеристик ДПТ при включенном последовательно в цепь якоря $R_{доб} = R_{ш}$

№ п/п	Экспериментальные данные				Расчетные данные			
	M (кгм)	U (В)	I _a (А)	n (об/м)	ω , (с ⁻¹)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
	1.25							
	1.0							
	0.75							
	0.5							

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. На основе опытных данных (таблица 6.2) рассчитать P_1, P_2 и ω . Построить зависимости $n, P_1, \eta, I_a, M=f(P_2)$.
2. Построить механическую характеристику $\omega=f(M)$ (табл.6.2)
3. На основе данных, приведенных в таблицах 6.3 и 6.4, построить механические характеристики $\omega=f(M)$ при работе ДПТ с ослабленным полем и при наличии в цепи якоря добавочного резистора.

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. Устройство ДПТ последовательного возбуждения.
2. Объясните роль пускового реостата.
3. Почему с уменьшением нагрузки на валу частота вращения ДПТ последовательного возбуждения значительно увеличивается?

4. От каких параметров зависит вращающий момент рассматриваемого двигателя?

5. Каким образом перевести ДПТ последовательного возбуждения в генераторный режим?

6. Назовите способы регулирования скорости вращения ДПТ последовательного возбуждения.

7. Указать область применения ДПТ последовательного возбуждения.

Лабораторная работа № 7

«Исследование генератора постоянного тока»

Цель работы: Изучение конструкции машины постоянного тока. Исследование генераторов с независимым возбуждением, параллельным возбуждением и со смешанным возбуждением.

1. Краткие теоретические сведения

На электрических станциях генераторы постоянного тока используются в качестве источников питания обмоток возбуждения синхронных генераторов. По способу возбуждения генераторы постоянного тока подразделяются на генераторы: с независимым возбуждением и самовозбуждением. Генераторы с самовозбуждением делятся на генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Генератором с независимым возбуждением называется генератор, обмотка возбуждения которого питается от независимого источника. Генератором с параллельным возбуждением называется генератор, у которого обмотка возбуждения включается параллельно обмотке якоря. Генератором с последовательным возбуждением называется генератор, у которого обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря. Генератором со смешанным возбуждением называется генератор, у которого имеются две обмотки возбуждения. Одна обмотка включается параллельно обмотке якоря, а другая – последовательно.

ЭДС, индуктируемая в обмотке якоря, определяется выражением (1)

$$E_a = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (1)$$

$$U_a = E_a - I_a \cdot R_a, \quad (2)$$

где I_a – ток якоря, А; R_a – сумма сопротивлений в цепи якоря (сопротивление обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов, последовательной обмотки и щеточного контакта), Ом; Φ – магнитный поток, Вб; c – конструктивная постоянная машины; ω – частота вращения якоря, рад/сек.

Характеристикой холостого хода (ХХХ) называется зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при токе нагрузки равном нулю и при постоянной частоте вращения $U_a = f(I_B)$ при $I_a = 0$ и $\omega = \text{const}$.

Характеристику холостого хода (ххх) ГПТ с независимым возбуждением снимают с максимального значения тока возбуждения и максимального напряжения $U_a = (1,15-1,25) U_n$ точка «а» кривой на рисунке 7.1. При уменьшении I_B напряжение уменьшается по нисходящей ветви «аб» характеристики сначала медленно ввиду насыщения магнитной цепи, а затем

быстрее. При $I_B = 0$ на зажимах генератор напряжение - U_0 , обычно равное 2–3 % от U_n , вследствие остаточной намагниченности полюсов и ярма индуктора. Далее, дважды изменяя направление I_B , в итоге вернемся к точке «а». Ххх имеет вид неширокой гистерезисной петли вследствие явления гистерезиса в магнитной цепи индуктора. При снятии ххх ток I_B необходимо менять только в направлении, указанном на рис. стрелками, т. к. в противном случае точки не будут ложиться на данную гистерезисную петлю, а будут рассеиваться. Ххх для генераторов с параллельным и смешанным возбуждением практически не отличаются от ххх генератора с независимым возбуждением.

Внешняя характеристика генератора $U_a = f(I_a)$ при $I_B = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$ (рисунок 7.2) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки в естественных условиях, когда ток возбуждения не регулируется. При увеличении I_a напряжение U_a несколько падает по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря R_A и уменьшении E_A ввиду уменьшения результирующего магнитного потока под воздействием поперечной реакции якоря. У генератора с параллельным возбуждением добавляется третья причина – уменьшение тока возбуждения, а следовательно и потока и ЭДС вследствие уменьшения напряжения на зажимах якоря, а значит и на параллельной обмотке возбуждения по первым двум причинам. Перегиб кривой для такого генератора объясняется тем, что при токах нагрузки примерно равных (2-2,5) $I_{\text{ном}}$ напряжение на зажимах генератора начинает падать быстрее, чем уменьшается сопротивление нагрузки.

Генератор с параллельным возбуждением не боится коротких замыканий, так как ток короткого замыкания меньше номинального, и величина его определяется величиной остаточного магнетизма. Максимальный ток, соответствующей точке перегиба кривой, называется критическим током. Он соответствует критическому сопротивлению внешней цепи.

У генератора со смешанным возбуждением к трем указанным причинам изменения напряжения добавляется четвертая – магнитный поток последовательной обмотки возбуждения при согласном включении подмагничивает, а при встречном размагничивает генератор.

На рисунке 7.2 показаны внешние характеристики генераторов с независимым возбуждением (1), параллельным возбуждением (2) и смешанным возбуждением: (3) – согласное включение, (4) – встречное включение.

При изменении тока нагрузки напряжение генератора изменяется в разной степени при разных способах возбуждения. Для потребителя же необходимо постоянное напряжение. Регулировка напряжения осуществляется током возбуждения. Регулировочной характеристикой называется зависимость

тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном напряжении и постоянной частоте вращения $I_b = f(I_a)$ при $U_a = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$.

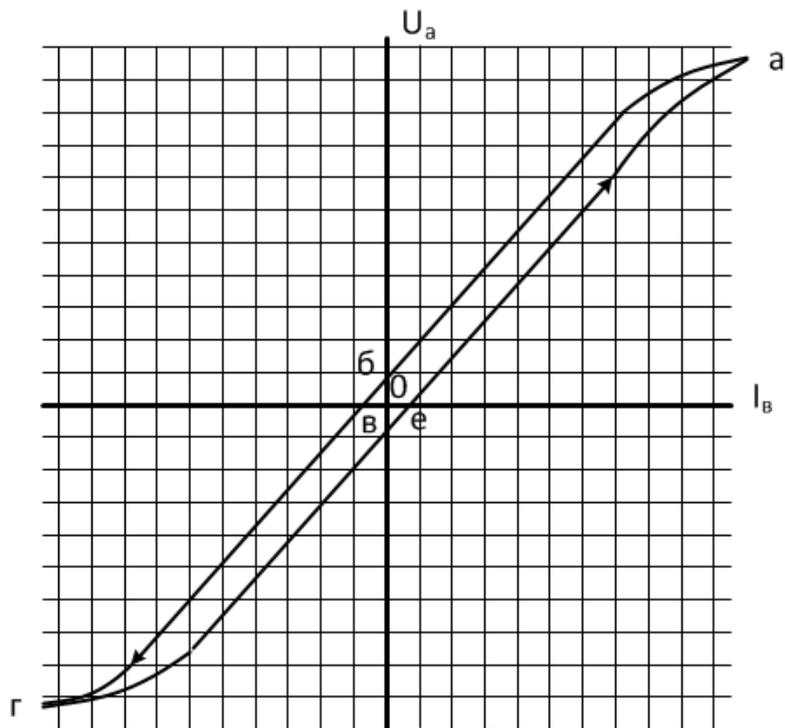


Рисунок 7.1 - Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

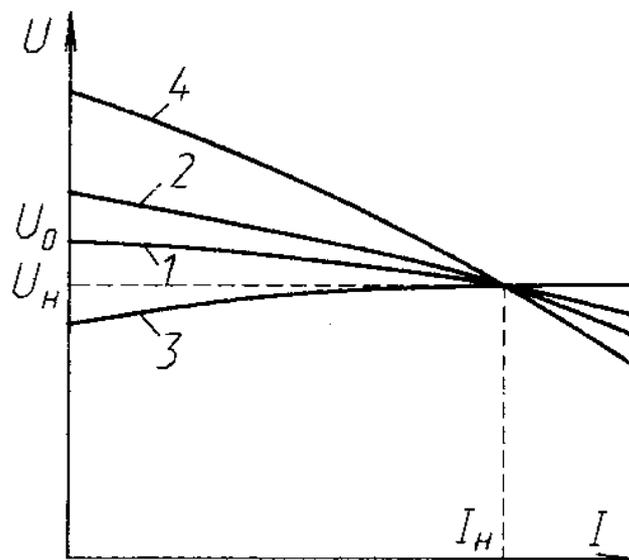


Рисунок 7.2 - Внешние характеристики генераторов постоянного тока

2. Описание лабораторного стенда

Элементы схемы лабораторной установки показаны на рисунке 7.3. Она содержит исследуемый генератор постоянного тока, приводимый во вращение

асинхронным двигателем. В таблице 7.1 приведены паспортные данные машины постоянного тока.

Таблица 7.1 - Паспортные данные машины постоянного тока

Тип	P_H кВт	U_H В	I_H А	I_{BH} А	R_a Ом	$R_{ш1-ш2}$ Ом	n_H об/мин
ПЗ1М	2,0	230	11,2		0,96	360	2850

В качестве нагрузки, подключаемой к якору машины постоянного тока посредством переключателей П1–П5, используются нагрузочные сопротивления. В состав установки входят: электроизмерительные приборы: амперметры и вольтметры, автотрансформатор ЛАТР и выпрямитель питания постоянным током обмотки возбуждения ГПТ, 3х позиционный переключатель (S-0-R) для коммутации обмоток возбуждения..

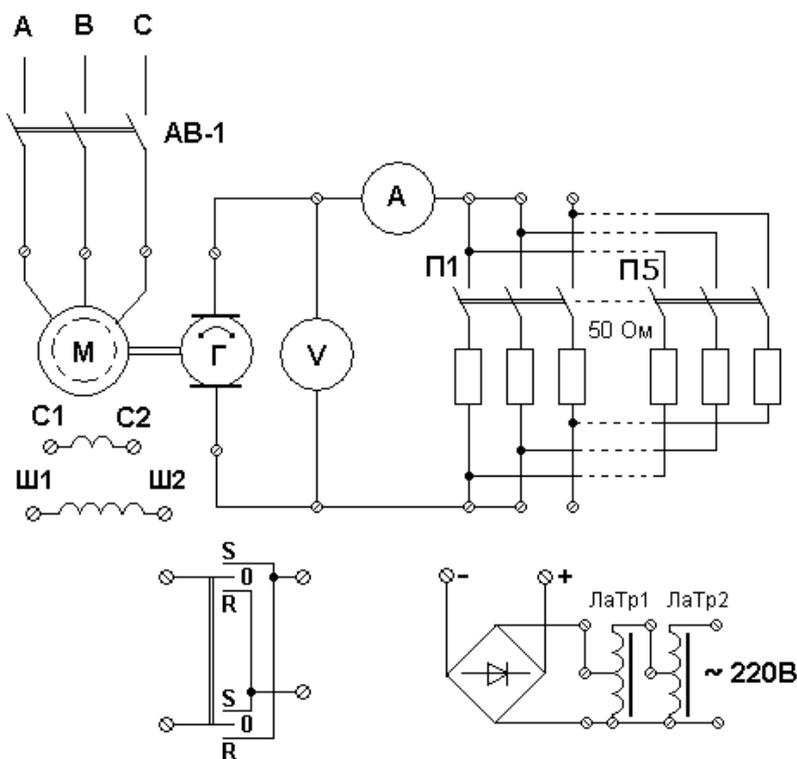


Рисунок 7.3 - Элементы схемы лабораторной установки

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 основе технических данных ГПТ подобрать необходимые измерительные приборы.

2. Согласно рисунку 7.4 собрать схему установки.

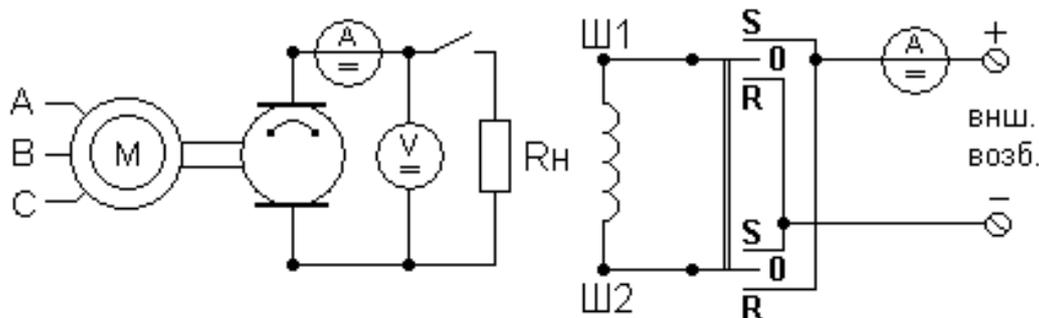


Рисунок 7.4 - Принципиальная схема для исследования ГПТ с независимого возбуждения

3. Снять характеристику холостого хода ГПТ с независимым возбуждением. Для этого посредством пускателя К1 включаем асинхронный двигатель, приводящий в действие ГПТ. Установить напряжение 220 В ЛАТРОм 2. Перевести 3х позиционным переключатель в положение «S». С помощью ЛАТРа 1 устанавливаем такой ток возбуждения, при котором $U_a \approx (1,08-1,3) U_n$.

Затем плавно снижать ток возбуждения (ЛАТР 1) до 0,25 А, а ЛАТРОм 2 снижать напряжение до нуля (переключатель устанавливается в положение «0»). Произвести реверсирование обмотки возбуждения (положение переключателя «R») и плавно увеличивать ток возбуждения от нулевого значения до значения, при котором ЭДС станет равным $(1,08-1,3)U_n$. Результаты занести в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - Характеристика хх

I _B	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25	0,0		0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	Hc
U _a								0,0							Hc
Прямая и обратная ветви петли гистерезиса															
I _B	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25		0,0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	Vc
U _a							0,0								Vc

4. Снять внешнюю характеристику ГПТ с независимым возбуждением. Для этого установить напряжение, равное номинальному при $I_a = 0$. Подключать к якорю посредством переключателей П1–П5 ступени нагрузочного устройства R_n таким образом, чтобы ток якоря менялся от $I_a = 0$ до $I_a \approx I_n$. Величину сопротивления обмотки возбуждения в течение опыта не изменять. Результаты измерений занести в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 - Внешняя характеристика ГПТ с независимым возбуждением

I _a	0					
U _a	115					
I _B						

5. Снять регулировочную характеристику ГПТ с независимым возбуждением. Установить при $I_a = 0$ напряжение ГПТ, равное $(0,85 - 0,87) U_n$, и, изменяя ток якоря от нулевого значения до значения, близкого к номинальному, поддерживать посредством изменения I_b неизменным напряжение ГПТ. Результаты занести в таблицу 7.4

Таблица 7.4 - Регулировочная характеристика ГПТ с независимым возбуждением

I_a						
I_b						
U_a	98	98	98	98	98	98

6. Снять внешнюю характеристику ГПТ с параллельным возбуждением. Для этого собрать схему (рисунок 7.5).

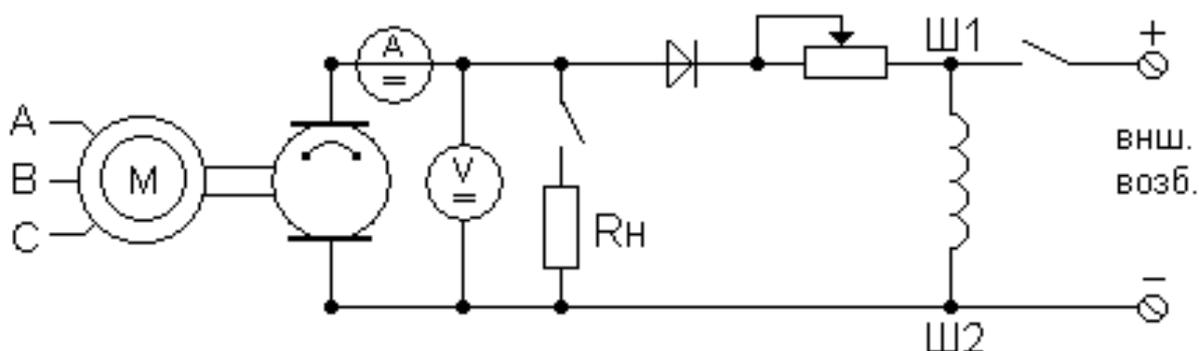


Рисунок 7.5 - Принципиальная схема для исследования ГПТ с параллельным возбуждением

При отключенной нагрузке установить на зажимах генератора номинальное напряжение. Если процесса самовозбуждения ГПТ не происходит, необходимо отключить его от сети и поменять полярность обмотки возбуждения. Далее вновь подключить генератор к сети и,

изменяя сопротивление нагрузки, снять внешнюю характеристику. Во время опыта сопротивление в цепи обмотки возбуждения не изменять. Результаты измерений занести в таблицу 7.5.

Таблица 7.5 - Внешняя характеристика ГПТ с параллельным возбуждением

I_a						
U_a						
I_b						

7. Снять внешние характеристики ГПТ со смешанным возбуждением. Для этого собрать схему (рисунок 7.6). Эти характеристики следует снять при согласном и встречном включении параллельной и последовательной обмоток возбуждения ГПТ. Результаты измерений занести в таблицу 7.6.

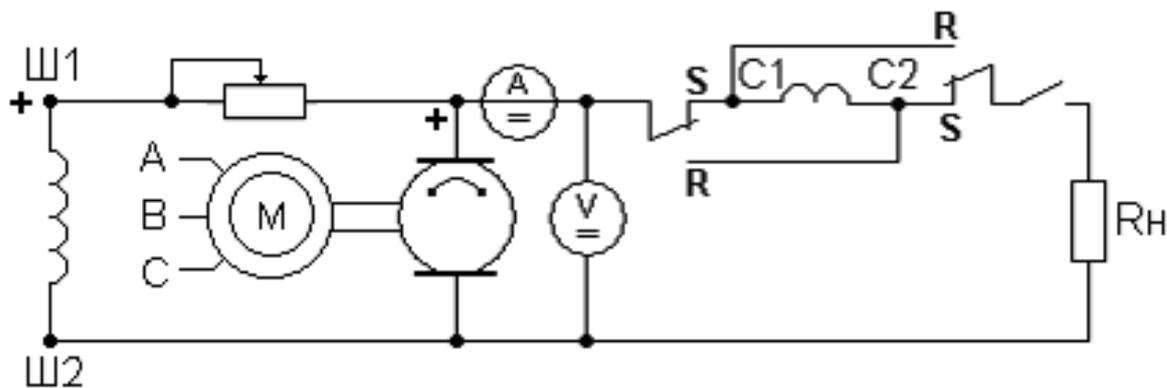


Рисунок 7.6 - Принципиальная схема для исследования ГПТ смешанного возбуждения.

Таблица 7.6 - Внешняя характеристика ГПТ со смешанным возбуждением

I_a	0					
U_a	115					
Прямое и обратное подключение обмотки послед. возбуждения						
I_a	0					
U_a	115					

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. По данным таблицы 7.2 построить Х.Х.Х. ГПТ с независимым возбуждением.
2. Построить внешние характеристики ГПТ с независимым и параллельным возбуждением. По ним определить номинальное изменение напряжения ГПТ.
3. В одной системе координат построить внешние характеристики ГПТ с разным типом возбуждения.
4. Построить регулировочную характеристику ГПТ с независимым возбуждением.

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. Объяснить устройство генератора постоянного тока.

2. Объяснить назначение главных и дополнительных полюсов.

3. Какая из характеристик позволяет судить о насыщении магнитной цепи машины?

4. Объяснить термин «критическая скорость вращения»?

5. Почему внешняя характеристика ГПТ с параллельным возбуждением падает круче, чем у ГПТ с независимым возбуждением?

6. Объяснить влияние реакции якоря на внешнюю и регулировочную характеристики ГПТ.

7. Назовите условия, которые следует выполнить, чтобы осуществить процесс самовозбуждения ГПТ?

8. Что необходимо выполнить, если произошло размагничивание ГПТ?

Лабораторная работа № 8

«Испытание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»

Цель работы: Ознакомиться с методами испытаний асинхронного двигателя. На основе испытаний построить и проанализировать характеристики асинхронного двигателя.

1. Краткие теоретические сведения

Асинхронные двигатели (АД) благодаря своей простоте и надежности в работе нашли широкое применение в промышленности.

АД состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора. На статоре размещены три одинаковые обмотки, соединенные между собой в звезду или треугольник и сдвинутые на угол 120 эл. град, одна относительно другой.

В пазах ротора находится короткозамкнутая обмотка. При подключении двигателя к электрической сети в обмотках статора и ротора будут протекать токи. Эти токи обусловят создание результирующего магнитного поля, вращающегося с угловой скоростью ω_1 , называемой синхронной

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_2} \left(\frac{\text{рад}}{\text{сек}} \right), \quad (1)$$

Где f – частота тока сети, Гц; p – число пар полюсов.

Взаимодействие тока ротора и вращающегося магнитного поля статора создает вращающий момент на роторе. Ротор двигателя будет вращаться в направлении вращения поля. Его скорость вращения ω_2 будет меньше скорости вращения поля ω_1 , так, как только в этом случае возможны наведение токов в обмотке ротора и возникновение электромагнитного вращающего момента (M_1). Относительная разность между синхронной скоростью и скоростью ротора называют скольжением АД.

$$S = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}. \quad (2)$$

Наглядное представление о распределении мощностей в АД дает его энергетическая диаграмма (рисунок 8.1)

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot I_{1л} \cdot U_{1л} \cdot \cos(\varphi_1) \quad (3)$$

$$\Delta P_{\Sigma 1} = m_1 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1 \quad (4)$$

$$P_{\Sigma 1} = M_1 \cdot \omega_1 \quad (5)$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = m_1 \cdot (I_2)^2 \cdot r_2 = S \cdot P_{\Sigma 1} \quad (6)$$

$$P_2 = m_1 \cdot (I_2)^2 \cdot r_2 \cdot \frac{1-S}{S} \quad \text{или} \quad P_2 = M_1 \cdot \omega_2 \quad (7)$$

$$\Delta P_{\text{доб}} = 0,05 \cdot P_{1н} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2 \quad (8)$$

$$P_2 = P_2' - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{доб}}, \quad (9)$$

где P_1 – подводимая к двигателю мощность; m_1 – число фаз статорной обмотки; $\Delta P_{\text{э}1}$ – электрические потери в активном сопротивлении обмотки статора; $\Delta P_{\text{ст}1}$ – магнитные потери в сердечнике статора; $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, передаваемая электромагнитным путем со статора на ротор; $\Delta P_{\text{э}2}$ – электрические потери в активном сопротивлении обмотки ротора; P_2' – механическая мощность, развиваемая на роторе; $\Delta P_{\text{ст}2}$ – магнитные потери в сердечнике ротора (в рабочих режимах пренебрежительно малы); $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери на вентиляцию, на трение в подшипниках; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; P_2 – полезная механическая мощность на валу.

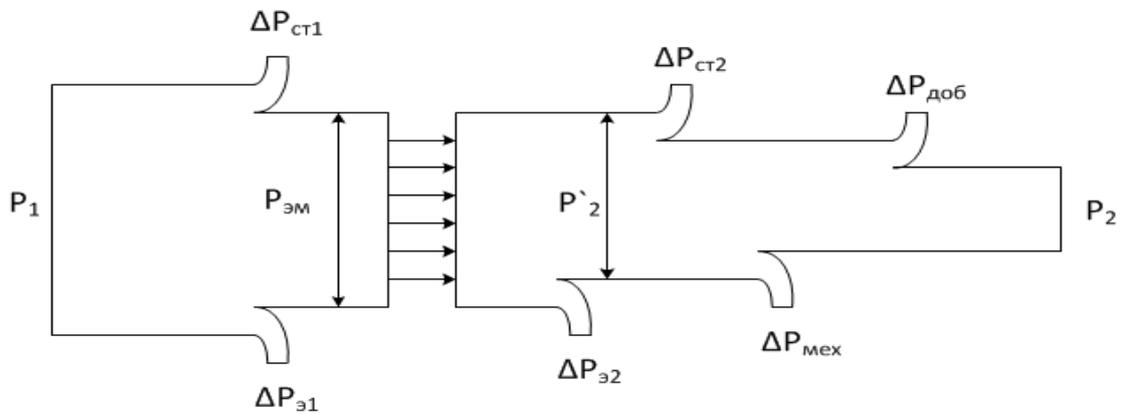


Рисунок 8.1 - Энергетическая диаграмма АД

Электрическая схема замещения АД аналогична схеме замещения трансформатора, работающего на сопротивление нагрузки (R_H), и имеет вид, показанный на рисунке 8.2. Следует отметить, что схемы замещения трехфазных электрических машин даются для одной фазы.

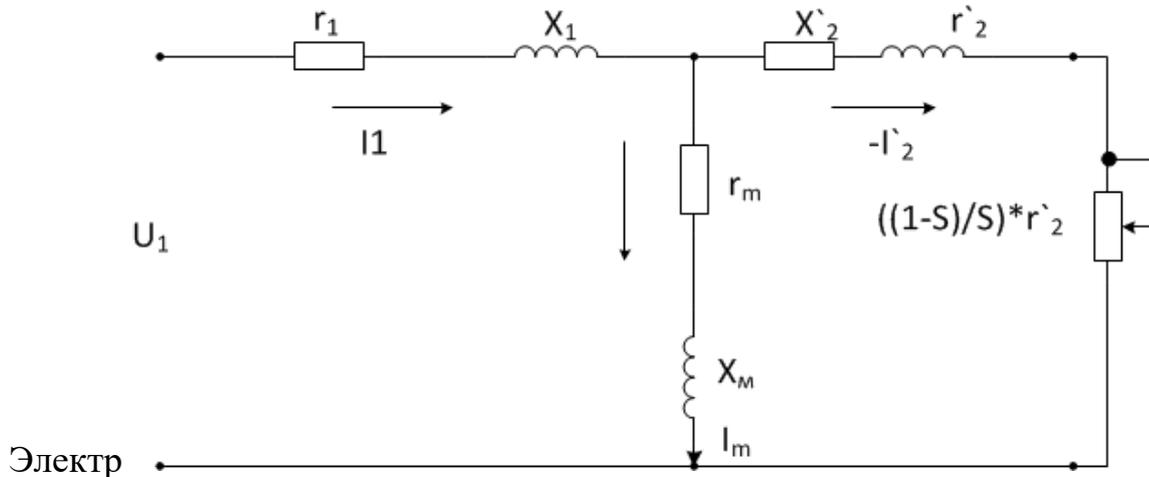


Рисунок 8.2 - Электрическая схема замещения АД.

Поэтому все величины и параметры на рис. 8.2 являются фазными, где r_1 , X_1 – соответственно активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки; r_1' , X_2' – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенные к обмотке статора; r_m , X_m – соответственно активное и индуктивное сопротивления намагничивающей цепи.

В основе экспериментального определения параметров АД лежат опыты холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода:

АД подключен к сети и работает при отсутствии нагрузки на валу ($M_2=0$). Электромагнитный момент, развиваемый при этом двигателем мал. Незначительная величина этого момента при холостом ходе свидетельствует о том, что весьма малыми должны быть скольжение S_0 и ток обмотки ротора I_2' . Мощность, потребляемая двигателем из сети P_{10} , переходит в следующие потери мощности:

$$P_{10} \approx m_1 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1 + \Delta P_{ст1} + \Delta P_{мех}. \quad (11)$$

Активная составляющая тока холостого хода $I_{10} \cdot \cos(\varphi_0)$ невелика, ибо ее величина определяется потерями двигателя. Реактивная составляющая тока холостого хода $I_{10} \cdot \sin(\varphi_0)$ напротив значительна. Объясняется это тем, что трубки поля взаимной индукции в асинхронной машине пересекают воздушный зазор.

Режим холостого хода используется для экспериментального определения параметров асинхронного двигателя с учетом рисунка 8.2.

$$r_r = \frac{\Delta P_{ст1}}{m_1 \cdot I_{10\phi}^2}; \quad X_c = X_r + X_1 \approx \sqrt{\left(\frac{U_{10\phi}}{I_{10\phi}}\right)^2 - (r_r + r_1)^2} \quad (12)$$

В опыте холостого хода измеряют мощность, потребляемую двигателем P_{10} , ток обмотки статора I_{10} и напряжение U_{10} приложенное к ней. При известном сопротивлении r_1 вычисляют мощность

$$P_{00} = P_{10} - m_1 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1 = \Delta P_{ст1} + \Delta P_{мех} \quad (13)$$

и затем на графике (рисунок 8.3) строят зависимость $P_{00} = f(U_1^2)$.

Поскольку $\Delta P_{ст1} \sim B^2 \sim E_1^2 \sim U_1^2$, а механические потери $\Delta P_{мех}$ остаются при этом неизменными, зависимость $P_{00} = f(U_1^2)$ близка к прямой (рисунок 8.3). Продолжая на графике эту прямую до пересечения с осью координат, определяем величину механических потерь мощности $\Delta P_{мех}$.

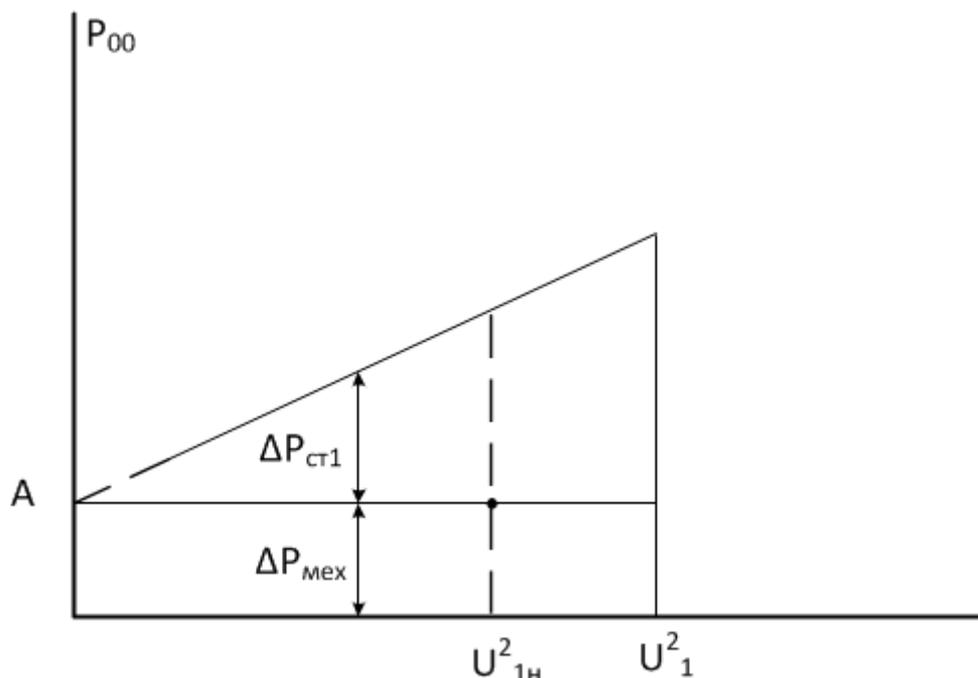


Рисунок 8.3 - Режим холостого хода

Опыт короткого замыкания:

Режим короткого замыкания двигателя возникает в том случае, когда его ротор оказывается заторможенным и, следовательно, скорость вращения машины равна нулю ($S = 1,0$). Физическая картина явлений, происходящих в режиме короткого замыкания АД такая же, как и в короткозамкнутом трансформаторе.

В опыте короткого замыкания к двигателю подводится напряжение такой величины, чтобы ток статора не превышал $2 \cdot I_n$. По измеренным величинам напряжения $U_{1к}$ тока статора $I_{1к}$ и мощности $P_{1к}$, находят параметры схемы замещения (рис. 8.2):

активное сопротивление короткого замыкания

$$r_k \approx r_1 + r_2' = \frac{P_{1к}}{m_1 \cdot I_{1кф}^2}; \quad (14)$$

индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_k \approx X_1 + X_2' = \sqrt{\left(\frac{U_{1кф}}{I_{1кф}}\right)^2 - r_k^2}. \quad (15)$$

Рабочие характеристики представляют зависимости тока статора I_1 , потребляемой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos(\varphi_1)$, скольжения и КПД от мощности на валу P_2 . Обычно эти характеристики снимают при номинальных значениях частоты и напряжения, подведенного к обмотке

статора машины. Расчет ряда рабочих характеристик можно произвести по формулам (3)–(18).

$$\eta = P_2/P_1 \quad (16)$$

$$P_1 = P_2 - \sum \Delta P(17); \quad P_2 = \omega \cdot M_2 \quad (17)$$

$$\omega_2 = \omega_1(1 - S) \quad (18)$$

2. Описание лабораторного стенда

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 8.4. Она содержит исследуемый АД, паспортные данные которого приведены в таблице 8.1.

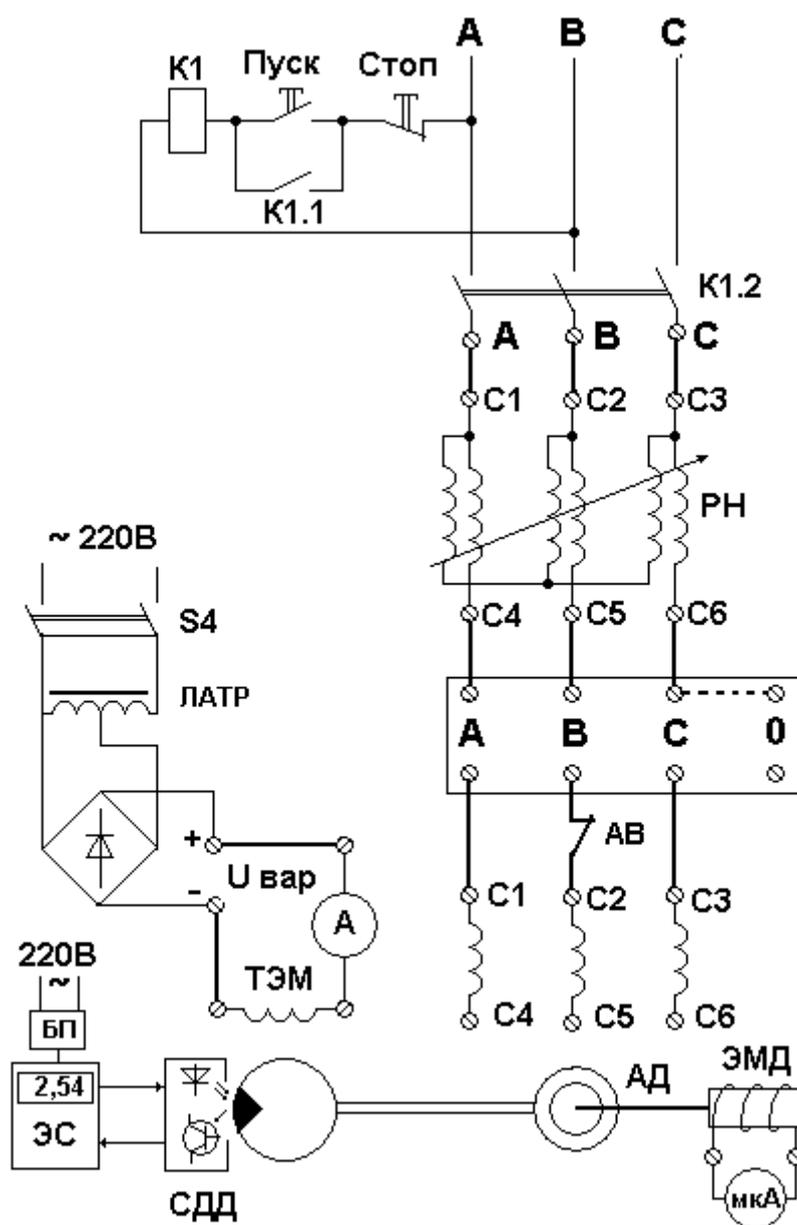


Рисунок 8.4 - Принципиальная схема лабораторной установки

Таблица 8.1 – Паспортные данные АД

№ пп	P _н кВт	n _н об/мин	U _к , В	I _к , А	Г 1ф Ом	η КПД	Cos φ _н
			Y/Δ	Y/Δ			
1	3	1410	380/220	6,7/11,4	1	0,82	0,83

Нагрузка на валу двигателя создается электромагнитным тормозом ТЭМ. Регулирование напряжения, подводимого к двигателю, осуществляется регулятором напряжения РН. Для коммутации электрических цепей применяются переключатели S4 и 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. На основании технических данных АД подобрать необходимые измерительные приборы.

2. Собрать схему лабораторной установки. Обмотки АД соединить в соответствии со схемой соединения «звезда» или «треугольник».

3. Снять **характеристику холостого хода**. Для этого соединить обмотки АД «треугольником». Рукояткой регулятора напряжения РН установить по указателю шкалы напряжение, примерно равное номинальному напряжению АД. Изменяя напряжение на зажимах обмотки статора АД от $1,1 * U_n$ до минимума, при котором ротор АД вращается, измерить напряжение U_{10} , ток I_{10} , мощность холостого хода P_{10} . Результаты занести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Результаты измерения характеристики холостого хода

№ пп	Опытные данные			Расчетные данные	
	U_{10} , В	$I_{10(а)}$, А	P_{10} , Вт	$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{ст1}}$	$\text{Cos } \varphi$
1	140				
2	127				
3	100				
4	80				
5	60				
6	40				

4. Снять **характеристику короткого замыкания АД**. Для этого соединить обмотки статора АД «звездой». Рукоятку регулятора напряжения РН перевести в нулевое положение. Посредством подачи тока в обмотку ТЭМ в течение всего опыта необходимо добиваться, чтобы ротор двигателя был неподвижен. Изменяя подводимое напряжение получить 3–4 значения тока короткого замыкания I_k в пределах от $0,4 I_{1н}$ до $I_{1н}$. Результаты испытаний занести в таблицу 8.3

Таблица 8.3 – Результаты измерения характеристики короткого замыкания

№ пп	Опытные данные			Расчетные данные			
	U_k , В	I_k , А	P_k , Вт	$\text{Cos } \varphi_k$	Z_k , Ом	r_k , Ом	X_k , Ом
1		6,7					
2		5					
3		3					

Примечание: опыт короткого замыкания необходимо проводить быстро во избежание перегрева обмоток статора.

5. Снять **рабочие характеристики АД**. Для этого подключить обмотку статора АД «треугольником». Отключить регулятор напряжения РН. АД подключить к зажимам электрической сети через измерительный комплект К-50. Пустить двигатель в ход. Изменяя нагрузку на валу (момент на валу АД) посредством изменения тока возбуждения ТЭМ, измерить фазное напряжение, ток статора, мощность и момент на валу. Данные занести в таблицу 8.4.

Таблица 8.4 – Результаты измерения рабочих характеристик АД

№	Опытные данные						Расчетные данные					
	M ₂ , КГм	U _Ф В	I _л , А	P _А , Вт	n ₃₀	T _д , сек	S %	P ₂		ΣΔP	Cos φ	η
								P _А - ΣΔP	P ₂ =ωM ₂	Вт		
А) трехфазный режим работы												
1	0,0				----				*			
2	0,5											
3	1,0											
4	1,5											
5	1,75											
Б) однофазный режим работы												
1	0.0				----				*			
2	0,5											
3			11,4									

$$S = n_{30} / 30f_1$$

6. Испытание асинхронного двигателя в однофазном режиме.

Для выполнения опыта следует использовать однофазную схему подключения К-50 (с клеммы «С» комплекта перенести концы на «О»). Изменить пределы измерения по напряжению (300В) и по току (25А).

Далее пустить в ход двигатель в качестве трехфазного, а затем отключить одну фазу, при этом двигатель перейдет в однофазный режим работы. Снять рабочие характеристики двигателя. Результаты испытаний свести в таблицу 8.4.

Формула суммы потерь $\Sigma \Delta P$ для однофазного режима:

$$\Sigma \Delta P = P_1 - M_2 \cdot \omega_2. \quad (20)$$

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Определить значения механических потерь $\Delta P_{\text{мех}}$ и потерь в стали $\Delta P_{\text{ст1}}$ при номинальном напряжении $U_{10} = U_{1н}$;

2. Построить зависимости I_{10} , P_{10} , $\cos(\phi_0) = f(U_{10})$ и $P_{00} = f(U_1^2)$, для разделения потерь $\Delta P_{\text{ст1}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$.

3. Определить по характеристикам холостого хода номинальные значения тока, мощности и коэффициента мощности холостого хода: $I_{10н}$, $P_{10н}$, $\cos(\phi_{0н})$

4. Вычислить коэффициент мощности $\cos(\phi_k)$, параметры короткого замыкания Z_k , r_k , X_k .

5. Построить кривые и I_k , P_k , $\cos(\varphi_k)$, Z_k , r_k , X_k и $Z_k = f(U_k)$.

6. Определить по характеристикам короткого замыкания номинальные значения напряжения, мощности, коэффициента мощности, а также параметры схемы замещения $I_{кн}$, $P_{кн}$, $\cos(\varphi_{кн})$, $Z_{кн}$, $r_{кн}$, $X_{кн}$ при $I_k = I_{1н}$.

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. Объяснить устройство и принцип действия асинхронного двигателя.
2. Дать определение понятия скольжения. Указать диапазон его изменения при работе асинхронной машины в режимах двигателя, генератора и электрического тормоза.
3. Какие параметры АД определяют из опыта холостого хода.
4. Почему у работающего асинхронного двигателя можно пренебречь потерями в стали ротора?
5. Какие параметры асинхронного двигателя определяют из опыта короткого замыкания?
6. Почему ток холостого хода асинхронного двигателя значительно больше тока холостого хода трансформатора?
7. Почему КПД и $\cos(\varphi)$ АД, перешедшего из трехфазного в однофазный режим уменьшается?
8. К каким последствиям приводит обрыв одной из фаз находящегося в работе трехфазного АД.?
9. С какой целью снимают рабочие характеристики асинхронного двигателя?

Лабораторная работа № 9 «Способы пуска асинхронных двигателей»

Цель работы: Ознакомиться со способами пуска асинхронных двигателей (АД). На основе испытаний и расчетных исследований проанализировать достоинства и недостатки различных способов пуска АД.

1. Краткие теоретические сведения

Современные мощные электрические сети обычно допускают прямое включение короткозамкнутых двигателей. Пусковые свойства АД характеризуют кратность начального пускового момента и пускового тока. Для короткозамкнутых АД обычного исполнения: $M_{п}/M_{ном.} = 0.9 - 1.4$; $I_{п}/I_{ном.} = 5 - 7$.

К пусковым характеристикам двигателей предъявляют следующие требования. При пуске двигатель должен развивать достаточный пусковой момент, близкий к номинальному. Схема пуска должна быть простой. Число пусков двигателя является ограниченным и определяется условиями повторного включения. Двигатель нормального исполнения мощностью 3-10 кВт допускает до 10 включений в час. Как правило, короткозамкнутые АД запускают прямым включением в сеть (прямой пуск). Если двигатель соизмерим по мощности с сетью и прямой пуск вызывает значительное снижение напряжения сети из-за большого пускового тока, то применяется пуск с пониженным напряжением.

В случае, когда начальный момент сопротивления вращению двигателя значительно меньше номинального, для уменьшения пускового тока на время пуска двигателя, имеющего шесть выводных концов обмотки статора, можно переключить статорную обмотку с «треугольника» на «звезду». При этом фазное напряжение обмотки статора становится меньше, чем при соединении в «треугольник». Пусковой момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения, т. е. в 3 раза. После того, как двигатель начнет вращаться со скоростью, близкой к номинальной, обмотку статора снова пересоединяют в «треугольник». Недостатком этого способа является то, что при переключении разрывается цепь обмотки статора и возникают добавочные переходные токи. В связи с увеличением мощности питающих сетей такой способ пуска используется редко.

В некоторых случаях в крупных АД для уменьшения пускового тока на время пуска последовательно со статором включают реактор или автотрансформатор. При этом уменьшение пускового тока двигателя приблизительно пропорционально уменьшению напряжения на статорной

обмотке, а уменьшение пускового момента пропорционально квадрату напряжения.

При реакторном пуске сопротивление реактора ограничивает пусковой ток. При достижении номинальной скорости вращения включают выключатель, шунтирующий реактор. Пусковые реакторы рассчитываются по нагреву только на кратковременную работу в период пуска.

При автотрансформаторном пуске вначале двигатель включается через автотрансформатор и на него подается пониженное напряжение. Затем, когда двигатель набирает скорость вращения, отключают выключатель и двигатель получает питание через часть обмотки автотрансформатора, работающей в данном случае как реактор. При достижении номинальной скорости вращения шунтируют автотрансформатор. При уменьшении напряжения на вторичной обмотке трансформатора и уменьшении величины пускового тока двигателя пусковой ток сети меньше, чем при реакторном пуске. Но из-за сложности аппаратуры автотрансформаторный пуск применяется реже реакторного, в основном при более тяжелых условиях пуска.

Анализ процесса пуска АД удобно проводить, используя его электрическую схему замещения, приведенную на рисунке 9.1.

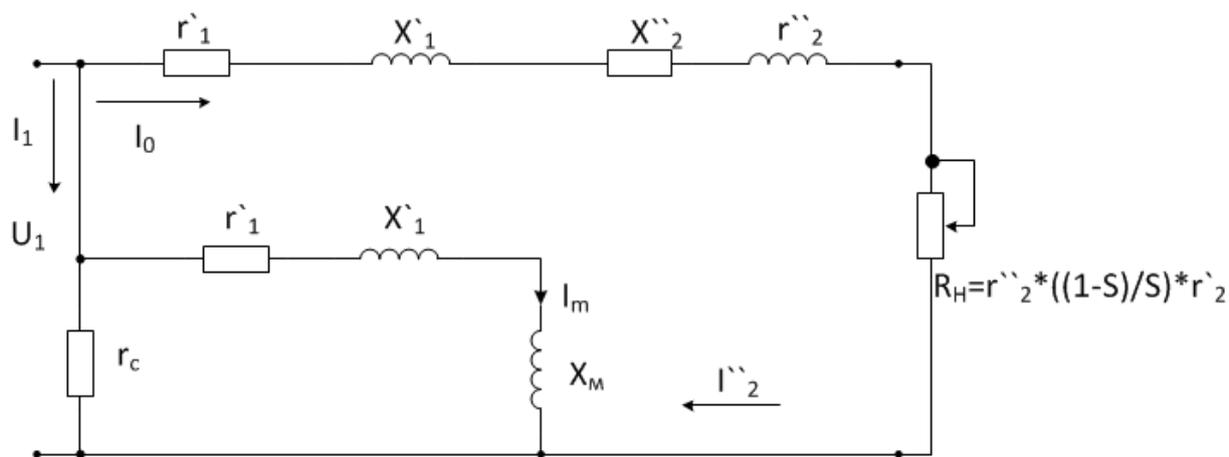


Рисунок 9.1 - Электрическая схема замещения асинхронного двигателя

где r_1 , x_1 – соответственно активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора; r_1' , x_1' – соответственно активное и индуктивное сопротивление фазной обмотки статора, полученные при преобразовании T-образной схемы замещения в Г-образную; r_1'' , x_1'' – соответственно приведенные к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора для Г-образной схемы замещения; x_m – главное индуктивное сопротивление; r_c – активное сопротивление ветви намагничивания, потери на котором равны магнитным потерям в сердечнике статора на одну фазу обмотки статора.

На основе параметров схемы замещения, которые приводятся в технических данных асинхронного двигателя (таблица 9.2) по формулам (1) и (2) определяются значения r_1 и x_1 :

$$x_1 \approx \frac{2 \cdot x_1' \cdot x_{1\pi}}{x_{1\pi} + \sqrt{x_{1\pi}^2 + 4 \cdot x_1' \cdot x_{1\pi}}} \quad (1)$$

$$r_1 = \frac{r_1' \cdot x_1}{x_1'} \quad (2)$$

Задаваясь значениями скольжения от $S=1$ до $S=0$, по формуле (3) можно рассчитать зависимость фазного тока статора I_1 от скольжения. При расчетах величиной r_1 в контуре намагничивания можно пренебречь.

$$I_1 = \left(\frac{U_1}{r_c} \right) + \frac{U_1}{j(x_1 + x_{1\pi})} + \frac{U_1}{(r_1' + r_2'') + \left(\frac{1-S}{S} \right) \cdot r_2'' + j(x_1' + x_2'')} \quad (3)$$

Величина r_c зависит от напряжения U_1 , подводимого к обмотке статора, и может быть определена по опытным данным, полученным в лабораторной работе «АД с короткозамкнутым ротором».

$$r_c = \frac{3 \cdot U_1^2}{P_c} \quad (4)$$

где P_c – потери в сердечнике статора.

При определении пускового тока и момента необходимо учитывать два явления, происходящие в двигателях с короткозамкнутым ротором, при пуске – вытеснение тока в пазах короткозамкнутой обмотки ротора и насыщение путей потоков рассеяния в зубцах статора и ротора.

Вследствие вытеснения тока увеличивается r_2'' и уменьшается x_2'' , а в результате насыщения уменьшаются x_1' и x_2'' . Поэтому расчет пускового режима следует начинать с определения сопротивлений, соответствующих этому режиму. Так, в момент пуска ($S = 1$)

$$\begin{aligned} r_2'' &= r_{2\pi}'' \\ r_1' + r_2'' &= r_1' + r_{2\pi}'' = r_{\text{кп}} \\ X_2' + X_2'' &= X_{\text{кп}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $r_{2\pi}''$ – активное сопротивление обмотки ротора при коротком замыкании ($S = 1$); $r_{\text{кп}}$, $X_{\text{кп}}$ – суммарные активное и индуктивное сопротивления обмотки статора и ротора при коротком замыкании. По мере разгона ротора величина $r_{2\pi}''$ уменьшается, $(X_2' + X_2'')$ увеличивается.

Задаваясь значениями скольжения от $S = 1$ до $S = 0$, по формуле (6) рассчитаем зависимость электромагнитного момента от скольжения (рисунок 9.2) в функции S .

$$M = \frac{(m_1 \cdot P \cdot U_1^2 \cdot r_2'')}{S \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left((r_1' + r_2'') + \frac{1-S}{S} \cdot r_2'' \right)^2 + (X_2' + X_2'')^2},$$

Где m_1 – число фаз обмотки статора;
 (6) f_1 – частота тока статора, Гц.

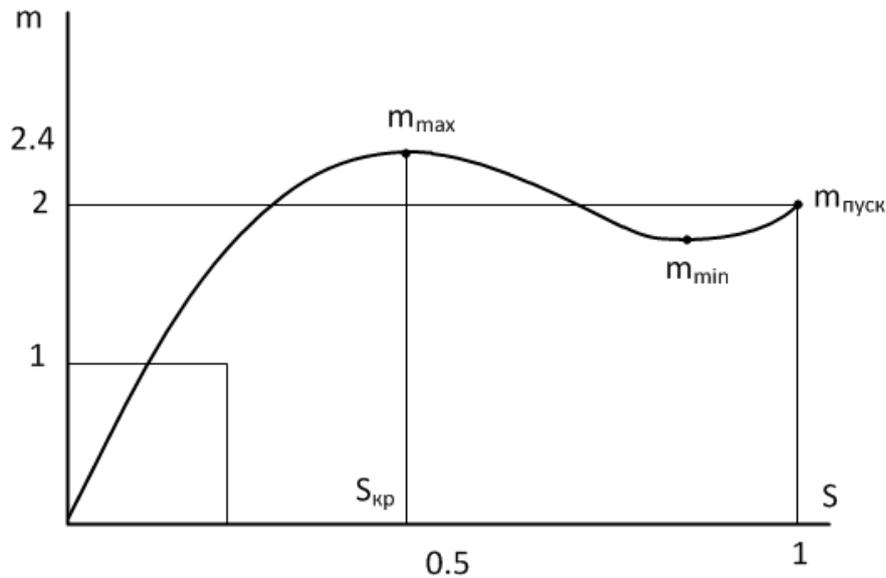


Рисунок 9.2 - Механическая характеристика АД

.Расчет по формуле (6) проводится в системе СИ, а момент здесь выражается в ньютон-метрах. При желании иметь M в килограмм-метрах необходимо разделить результат на 9,81. При расчетах зависимостей $I_1 = f(S)$, и $M = f(S)$ (3) и (6) с целью упрощения принимаем, что в течение всего пуска суммарные сопротивления обмоток статора и ротора являются неизменными и равными

$$r_1' + r_2'' = r_{кп} \tag{7}$$

$$x_1' + x_2'' = x_{кп}.$$

В ряде случаев возникает необходимость в работе трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети. Легко убедиться, что пустить в ход трехфазный асинхронный двигатель непосредственно включением в однофазную сеть невозможно (рисунок 9.3). Вращающий момент в момент пуска ($S = 1$) оказывается равным нулю. В качестве пускового элемента используют конденсатор (рисунок 9.4б). Для улучшения рабочих характеристик конденсатор определенной ёмкости оставляют включенным на весь рабочий период. Асинхронный двигатель, работающий от сети однофазного тока с конденсатором в его цепи, называется конденсаторным. Ёмкость конденсатора выбирают таким образом, чтобы вращающее магнитное поле в машине

получить близким к круговому, а в фазах статора обеспечивалась приблизительно симметрия токов и напряжений. Для схемы, приведенной на рисунке 9.4б, величина рабочей емкости определяется по выражению (8):

$$C_{p.ном} \approx 4800 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} \text{ (мкФ)} \quad (8)$$

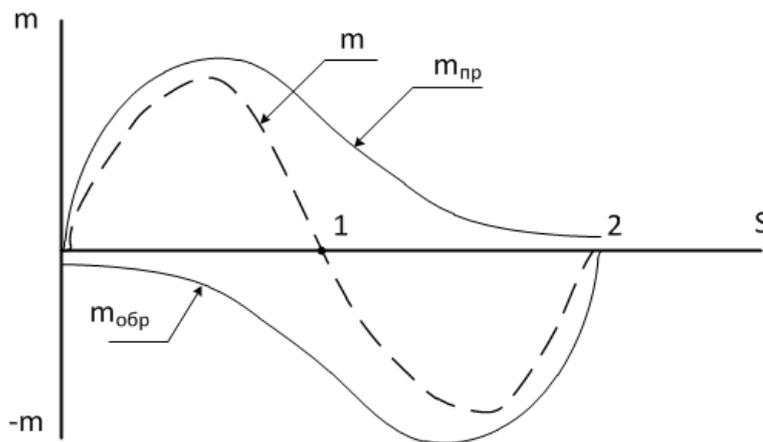


Рисунок 9.3 - Механическая характеристика однофазного АД

Номинальным напряжением и номинальным током конденсаторного двигателя называют фазные значения этих величин, указанные в паспорте машины. Рабочая емкость выбрана правильно, если фазные токи и напряжения при нагрузке становятся практически номинальными. Развиваемая полезная мощность является номинальной мощностью двигателя. Другим не менее важным вопросом является выбор конденсаторов по напряжению. Для схемы 9.4б без существенных погрешностей принимают равенство напряжения на конденсаторе при номинальной нагрузке и напряжения сети. Активная мощность между обмотками распределяется неравномерно. Наибольшую мощность при номинальной нагрузке развивают фазы С1-С4 и С3-С6. Одним из характерных свойств этой схемы является небольшая величина пускового момента.

2. Описание лабораторного стенда

Лабораторная установка содержит исследуемый асинхронный двигатель. В таблице 9.1 приведены его технические данные, а в таблице 9.2 - параметры его схемы замещения в относительных единицах.

Таблица 9.1 - Технические данные АД

Тип	P _{1н} В	U _{1н} А		I _{1н} А		cos(φ)	η _н	n _н
		Y	Δ	Y	Δ			
4AN10043	3	380	220	6,7	11,6	0,83	82	1410

Таблица 9.2 - Параметры схемы замещения АД в относительных единицах

Контур на- магничивания X_m	В номинальном режиме				При коротком замыкании		
	r_1	x_1	r_2''	x_2''	$r_{2п}''$	$r_{кп}$	$X_{кп}$
2,2	0,078	0,07	0,053	0,13	0,057	0,14	0,14

В состав установки входят три реактора (L), электроизмерительные приборы: амперметры и вольтметр, блок конденсаторов С и переключатели S1, S2, S3 для коммутации электрических цепей.

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.

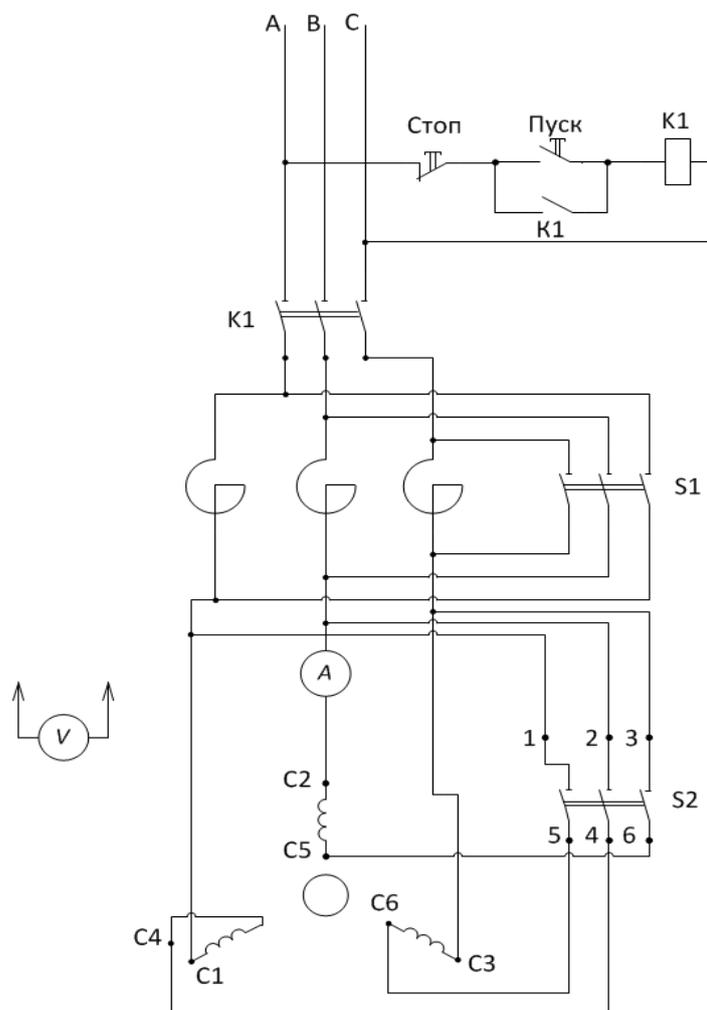
Обработка экспериментального материала и оформления отчета производится после выполнения всего объема лабораторной работы.

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.

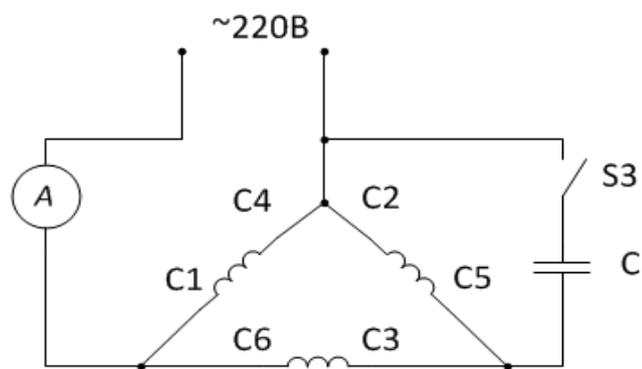
4. Алгоритмы и порядок выполнения лабораторной работы

1. На основе технических данных двигателя подобрать необходимые измерительные приборы.

2. Собрать схему согласно рисунку 9.4а. Посредством переключателя S1 зашунтировать реакторы.



а)



б)

Рисунок 9.4 - Схема пуска АД: а) в трехфазном режиме, б) в однофазном режиме

3. Осуществить прямые пуски АД при соединении обмоток статора «звездой», потом «треугольником». Измерить ток в момент пуска $I_{\text{пуск}}$ и установившееся значение тока $I_{\text{уст}}$ АД. Результаты измерений занести в табл. 9.3.

Таблица 9.3 – Результаты измерений

Схема подключения обмоток статора	Прямой пуск		Пуск через реактор		
	$I_{\text{п}}$	$I_{\text{у}}$	$I_{\text{п}}$	$I_{\text{у}}$	ΔU_L
Δ					
Y					

4. Посредством переключателя S1 включить реакторы в цепь каждой фазы обмотки статора. Осуществить пуск двигателя с реактором при соединении обмоток статора в «звезду», а затем в «треугольник» Измерить $I_{\text{пуск}}$ и $I_{\text{уст}}$, падение напряжения на реактор ΔU_L . Результаты занести в таблицу 9.3.

5. Собрать схему (рисунок 9.4б). Переключатель S3 перевести в замкнутое положение. Осуществить пуск двигателя в однофазном режиме. Измерить фазные напряжения $U_{\text{ав}}$, $U_{\text{вс}}$, $U_{\text{са}}$, напряжение на конденсаторе U_c , а также фазные токи. Результаты измерений занести в таблицы 9.4, 9.5.

Таблица 9.4 – Результаты измерений напряжений

$U_{\text{вх.}}$	$U_{\text{ав}}, \text{В}$	$U_{\text{вс}}, \text{В}$	$U_{\text{са}}, \text{В}$	$U_c, \text{В}$

Таблица 9.5 – Результаты измерений токов

$I, \text{А}$	$I_{\text{ав}}, \text{А}$	$I_{\text{вс}}, \text{А}$	$I_{\text{са}}, \text{А}$	$I_c, \text{А}$

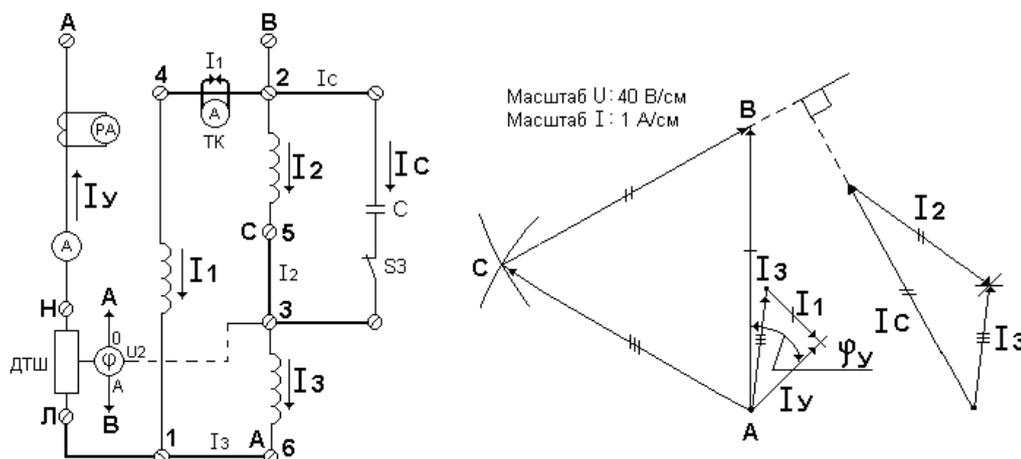


Рисунок 9.5 – Схема и векторная диаграмма к лабораторной работе № 9

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Рассчитать по формуле (3) электромеханическую $I_1 = f(S)$, а по формуле (6) - механическую характеристику АД $M = f(S)$ при соединении обмоток статора «звездой» и «треугольником» и построить эти зависимости.

2. Рассчитать зависимости $I_1 = f(S)$, $M = f(S)$ при соединении обмоток «звездой» и «треугольником» и включенном реакторе. При расчетах реактор считать идеальной индуктивностью. Далее, задаваясь скольжением от $S=1$ до $S=0$, рассчитать I_1 . Для каждого значения тока определить напряжение, которое подводится в данный момент к обмотке статора. Рассчитать величину M . Построить зависимости $I_1 = f(S)$ и $M = f(S)$ в той же системе координат, что и аналитические электромеханические и механические характеристики для данного АД.

3. При оформлении отчета рассчитать $C_{p,ном}$. Построить векторную диаграмму напряжений и токов конденсаторного АД.

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 способы пуска трехфазных АД вам известны, их достоинства и недостатки.
2. Как зависит вращающий момента АД от напряжения, подводимого к двигателю?
3. Назовите основные моменты механической характеристики АД.

4. Какие параметры схемы замещения АД влияют на пусковой и максимальный момент?
5. Почему при относительно большом токе статора при пуске $I_1 = (4 - 7)I_{1н}$ пусковой момент имеет относительно малое значение?
6. Почему при расчетах зависимости $I_1 = f(S)$ величиной r_1 в цепи контура намагничивания можно пренебречь?
7. Что такое критическое скольжение, от каких параметров оно зависит, и каким образом определить выражения S_k .
8. Почему при уменьшении скольжения от $S=1$ до $S \approx S_k$ ток статора меняется незначительно, а при $S > S_k$ незначительное уменьшение скольжения вызывает большое изменение тока?
9. Объяснить механическую характеристику однофазного АД?
10. Чему равен пусковой момент у трехфазного АД, у которого одна фаза имеет обрыв?
11. К каким последствиям приводит обрыв одной фазы находящегося в работе трехфазного АД?
12. Какие способы используются для пуска трехфазных АД от однофазной сети

Лабораторная работа № 10 «Характеристики синхронного генератора»

Цель работы: Освоить методы испытаний СГ. Снять его характеристики и получить наглядное представление о ряде основных свойств СГ.

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. 10.1).

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_0 мала, вследствие чего и поток Φ_0 мал. Поэтому при коротком замыкании магнитная цепь не насыщена и х.к.з. $I = f(I_f)$ прямолинейна (рисунок 10.1). Опытные х.х.х. и х.к.з. позволяют определить опытное значение продольного индуктивного сопротивления X_d .

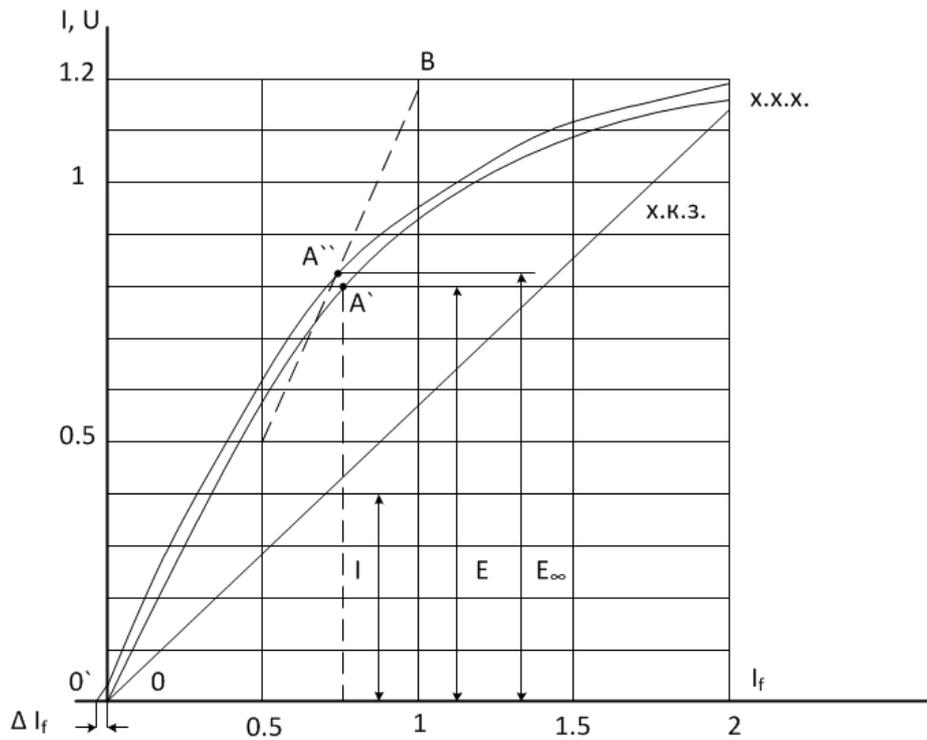


Рисунок 10.1 - Х.х.х. и х.к.з. синхронного генератора

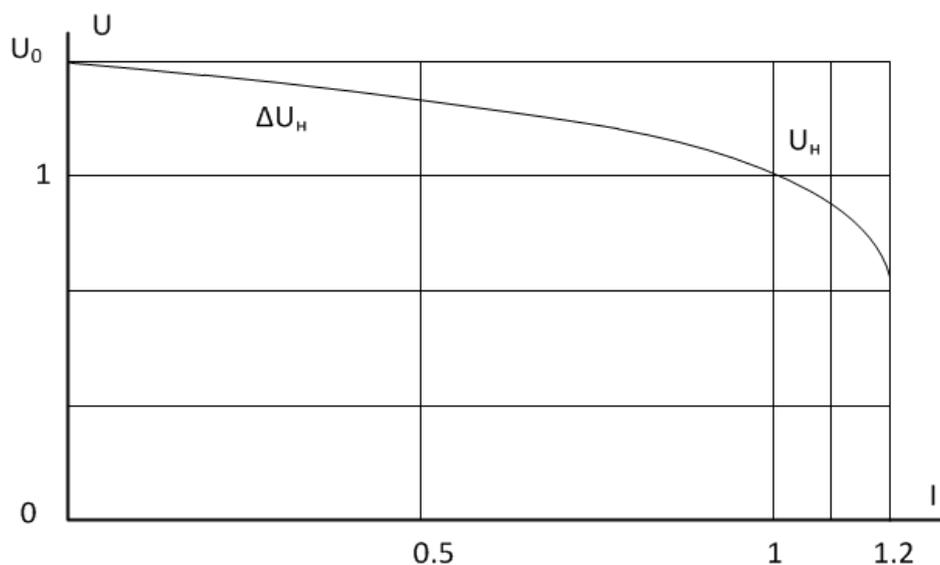


Рисунок 10.2 - Внешняя характеристика синхронного генератора

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 10.1), 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 10.2) 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 10.3. Установка содержит исследуемый синхронный генератор, который приводится в действие асинхронным двигателем (АД). Технические параметры СГ приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1 - 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 10.3. 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 10.2.

Таблица 10.2 - 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							

Таблица 10.4 - 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 10.5.

Таблица 10.5 - 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 10.6.

Таблица 10.6 - 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 10.1.). 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 № 11

«Параллельная работа синхронного генератора с электрической сетью»

Цель работы: Ознакомиться с условиями синхронизации синхронных генераторов и освоить метод точной синхронизации синхронного генератора с электрической сетью. Изучить способы 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

$$\begin{aligned}U_{Гa} - U_{Ca} &= 0 \\U_{Гb} - U_{Cb} &= 0 \\U_{Гc} - U_{Cc} &= 0,\end{aligned}\tag{2}$$

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. 11.3.

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 уравнительных 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 $E_G > U_C$ синхронная машина называется перевозбужденной, а при $E_G < U_C$ невозбужденной (рисунок 11.1).

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 11.1).

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

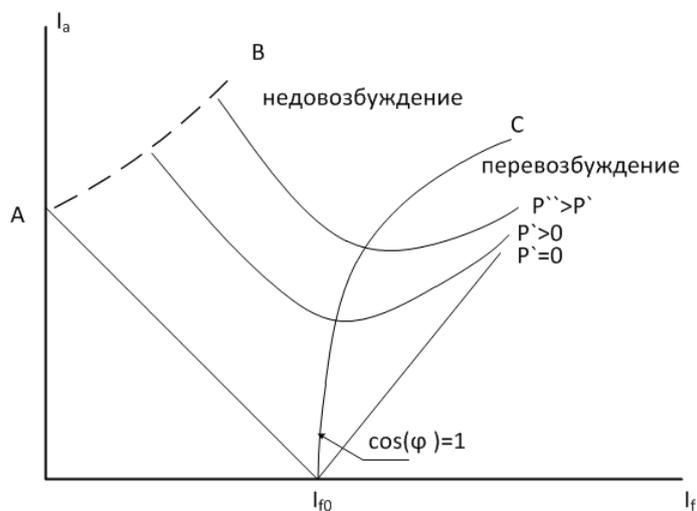


Рисунок 11.1 – V-образные характеристики синхронного генератора

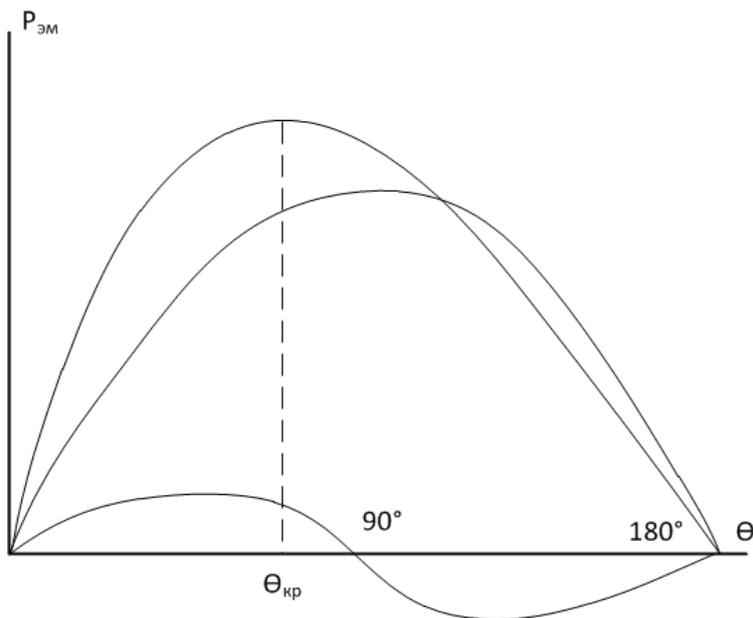


Рисунок 11.2 - Угловые характеристики синхронного генератора

Минимальное значение тока для каждой кривой определяет активную составляющую тока якоря и величину активной мощности. Нижняя кривая (рисунок 11.1) 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 $X_{\sigma a} \cdot I_a$ 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 11.2) возрастает при движении вдоль кривых (рисунок 11.1) 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 11.1.

Таблица 11.1 - 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 11.3.

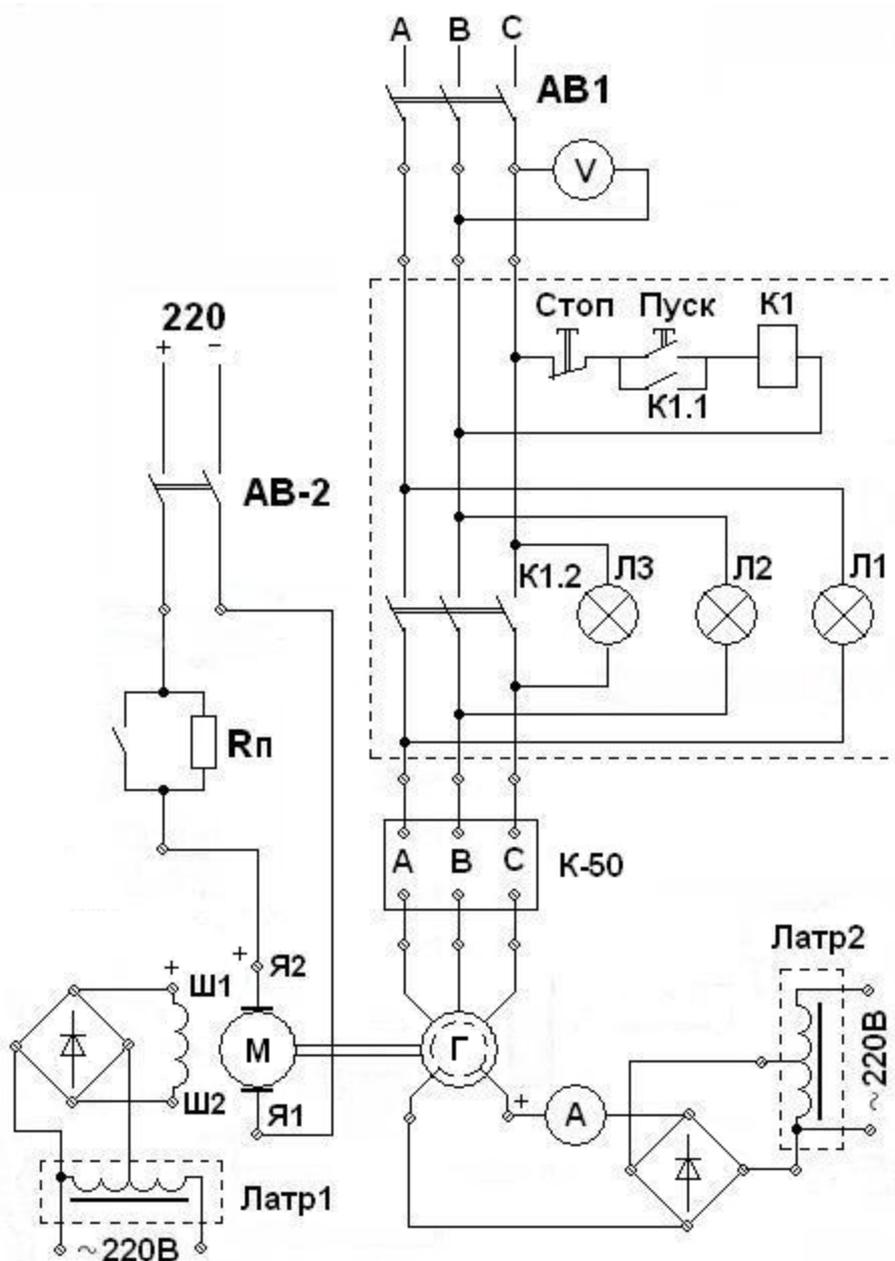


Рисунок 11.3 - Принципиальная схема лабораторной установки

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 11.3.

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 11.2.

Таблица 11.2 - 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 $0,3 P_n$ и поддерживать ее в течение опыта неизменной. Изменяя ток возбуждения от нуля до $2I_{f0}$, снять зависимость $I_a = f(I_f)$ при $P = 0,3P_n$. Результаты занести в таблицу 11.3

Таблица 11.3 - Зависимость $I_a = f(I_f)$ при $P = 0,3P_n$

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 $P = 0,3P_n$. 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 синхроноскопов, 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?

Лабораторная работа № 12

«Испытание синхронного двигателя»

Цель работы: Ознакомиться с устройством, принципом действия и особенностями работы синхронного двигателя. Изучить способы пуска синхронного двигателя. На основе испытаний построить и проанализировать рабочие и V – кривые синхронного двигателя.

1. Краткие теоретические сведения

Преимущества синхронных двигателей (СД) перед асинхронными - это способность генерировать реактивную мощность, меньшая чувствительность к колебаниям напряжения сети и более высокий КПД. Несмотря на более сложное обслуживание и большую стоимость, целесообразно применять СД при мощностях электроприводов более 200–300 кВт, где не требуется частых пусков, остановок и регулирования частоты вращения электропривода.

Ценным свойством СД является то, что при снижении напряжения сети во время аварийных ситуаций их реактивный ток возрастает и они отдают в сеть дополнительную реактивную мощность, что способствует устойчивости системы и быстрому восстановлению напряжения. У современных СД предусматривается увеличение тока возбуждения в 1.5 – 2 раза в течение нескольких десятков секунд.

Существует несколько способов пуска СД: с помощью разгонного двигателя; частотный пуск; асинхронный пуск. Пуск СД часто производят путем прямого включения в сеть. Двигатели снабжают пусковой обмоткой, имеющей в пределах полюсного наконечника конструкцию, сходную с конструкцией обмотки короткозамкнутого ротора (беличьей клетки) асинхронного двигателя и аналогичную демпферной обмотки явнополюсных генераторов. В пазах полюсных наконечников ротора размещают в осевом направлении неизолированные стержни, коротко замыкающиеся на торцах полюсов соединительными сегментами. Сегменты частей обмотки, расположенные под каждым полюсом, имеют межполюсные соединения и образуют общее кольцо по всей окружности ротора. Для создания большего пускового момента стержни пусковой обмотки выполняют из материала, имеющего повышенное активное сопротивление, например из латуни или фосфористой бронзы (в отличие от демпферной обмотки, стержни которой выполняются из меди). В некоторых случаях вместо пусковой обмотки делают массивные полюса или массивные полюсные наконечники, соединенные по торцам короткозамыкающими сегментами, имеющими межполюсные переемычки. В результате взаимодействия токов стержней пусковой обмотки с магнитным полем машины возникает асинхронный момент, который доводит

ротор до околосинхронной скорости. При скольжении порядка 3-5% включают возбуждение, и двигатель вследствие взаимодействия поля полюсов ротора и вращающегося магнитного поля статора, скачком втягивается в синхронизм. Моменты СД, начальный пусковой (при $s=1$), входа в синхронизм (при $s=0.05$) и номинальный (при $s=0$) являются достаточно высокими (рисунки 12.1, 12.2)

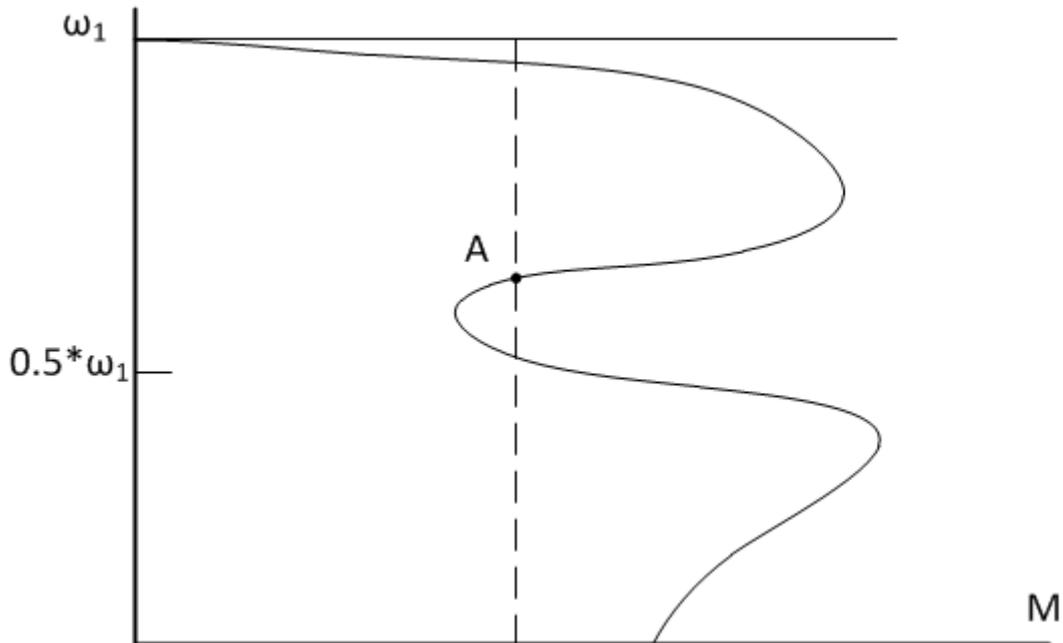


Рисунок 12.1 - Механическая характеристика СД при асинхронном пуске с провалом вблизи полусинхронной скорости

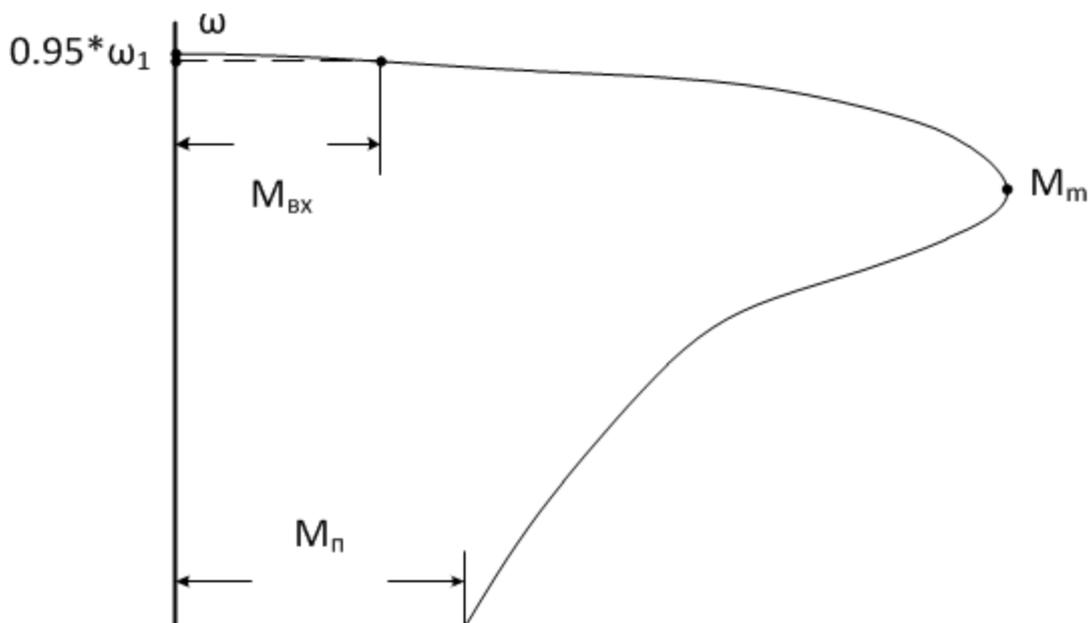


Рисунок 12.2 - Механическая характеристика СД при асинхронном пуске

Во избежание эффекта одноосного включения ротора обмотку возбуждения обычно замыкают на гасительное сопротивление, превышающее

собственное в 10-12 раз. Оставляя разомкнутой обмотку возбуждения нельзя из-за того, что в начале пуска обмотки якорная и возбуждения представляют собой как бы повышающий трансформатор, вследствие чего на обмотке возбуждения может возникнуть недопустимо высокое напряжение, опасное для изоляции и обслуживающего персонала. В замкнутой обмотке возбуждения индуктируется пульсирующая ЭДС, вызывающая одноосный пульсирующий поток ротора. В результате возникает обратная волна намагничивающей силы ротора и одноосный момент. Поэтому момент при пуске двигателя с короткозамкнутой обмоткой возбуждения может иметь глубокий провал при скорости вращения, близкой к полусинхронной.

Пуск с помощью разгонного двигателя состоит в том, что посторонним двигателем ротор СД разворачивается до номинальной скорости. Обмотка возбуждения включена в сеть постоянного тока, а обмотка статора разомкнута. Затем производят включение СД на параллельную работу с сетью способами, какими синхронизируют с сетью синхронный генератор. После подключения СД к сети разгонный двигатель механически соединяют от вала СД, и последний переходит в двигательный режим.

Частотный пуск применяется в том случае, если СД подключен к автономному источнику, частоту напряжения которого можно изменять от нуля до номинальной. Если плавно повышать частоту питающего напряжения, что соответственно будет увеличиваться скорость магнитного поля. Ротор, следуя за полем, постепенно будет повышать свою скорость от нуля до номинальной. В процессе пуска машина все время работает в синхронном режиме.

Работа СД характеризуется рабочими характеристиками, которые обычно изображаются в относительных единицах

$$P_1/P_n, I_1/I_n, \eta, \cos(\phi) = f\left(\frac{P_2}{P_n}\right) \text{ при } U = U_n, f = f_n, \text{ и } I_f = I_{fn} = const,$$

где P_1 – потребляемая из сети мощность; $P = P_{2н}$ – номинальная мощность на валу СД; I_{fn} – номинальный ток возбуждения СД.

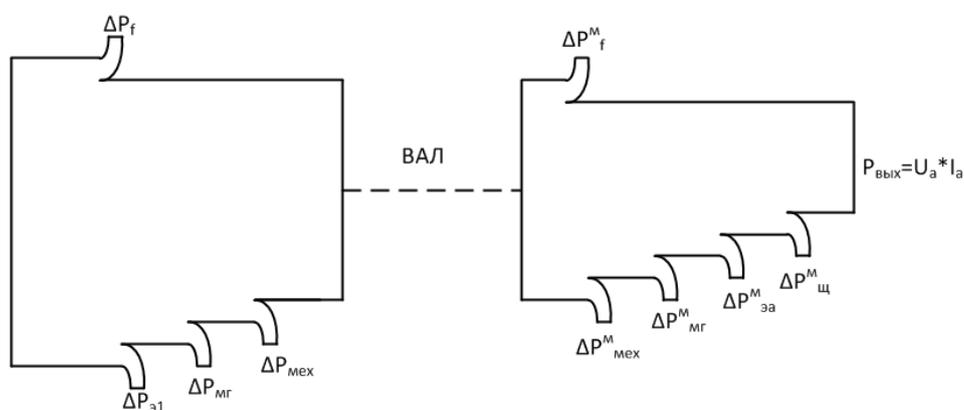


Рисунок 12.3 - Энергетическая диаграмма машинного агрегата СД–МПТ

Энергетическая диаграмма машинного агрегата, используемого в лабораторной работе, приведена на рисунке 12.3. Для расчета этих характеристик нужна мощность на валу СД - P_2 . При этом величину P_2 можно определить дважды: со стороны переменного тока

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\text{э1}} - \Delta P_f - \Delta P_{\text{мг}} - \Delta P_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{э1}}$ – потери в обмотках статора; $\Delta P_{\text{мг}}$ – магнитные потери в стали статора; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери СД.

$$\Delta P_{\text{э1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \quad (2)$$

$$\Delta P_f = I_f \cdot U_f + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_f = I_f^2 \cdot R_{\text{в}} + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_f, \quad (3)$$

где $\Delta U_{\text{щ}} \approx 2\text{В}$ – падение напряжения на щетках и со стороны цепи постоянного тока:

$$P_2 = \Delta P_{\text{мех}}^{\text{м}} + \Delta P_{\text{мг}}^{\text{м}} + \Delta P_{\text{эа}}^{\text{м}} + \Delta P_f^{\text{м}} + \Delta P_{\text{щ}}^{\text{м}}, \quad (4)$$

где U_a, I_a – соответственно напряжение и ток якоря МПТ; $\Delta P_{\text{эа}}^{\text{м}}$ – электрические потери в обмотке якоря; $\Delta P_{\text{щ}}^{\text{м}}$ – потери в щетках; $\Delta P_f^{\text{м}}$ – потери в обмотках возбуждения.

$$\Delta P_{\text{эа}}^{\text{м}} = I_a^2 \cdot R_a \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{щ}}^{\text{м}} = 2 \cdot I_a \quad (6)$$

$$\Delta P_f^{\text{м}} = U_a \cdot I_f = \frac{U_a^2}{R_f} \quad (7)$$

Добавочными потерями в обеих машинах пренебрегаем. Отсюда коэффициент мощности и КПД СД определяется по формулам

$$\cos(\phi) = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

V-образные кривые СД аналогичны V-образным кривым, снимаемым для синхронного генератора (лабораторная работа «Параллельная работа синхронного генератора с электрической сетью»). Под ними понимают зависимости $I_1 = f(I_f)$ при $U_{\text{сети}} = \text{const}$, $f = \text{const}$, и $P_2 = \text{const}$.

2. Описание лабораторного стенда

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 12.4. Она содержит исследуемую синхронную машину, которая используется в качестве синхронного двигателя (СД). В качестве нагрузочного устройства используется машина постоянного тока (ГПТ) с нагрузочными сопротивлениями, которые включены в цепь якоря. Технические данные синхронной машины и машины постоянного тока даны в таблице 12.1

Таблица 12.1 - Технические данные синхронной машины и машины постоянного тока

Наименование машины	Тип машины	P_n кВт	U_n В	n_n об./мин	Обмотка возбуждения		Цепь якоря		ΔP Вт	ΔP Вт
					I_{fn} А	R_f Ом	I_n А	R_a Ом		
Синхронный двигатель	ГАБ-4-Т/320М2	4	230	3000	5,9	1,06	10	0,47	86	80
Машина постоянного тока	П22М	2,1	220		0,47	426	11,6	0,96	83	83

В состав лабораторной установки входят также: автотрансформатор (ЛАТР) и выпрямитель для питания постоянным током обмотки возбуждения СД; переключатели S4 и S5 для коммутации цепи возбуждения; измерительные приборы.

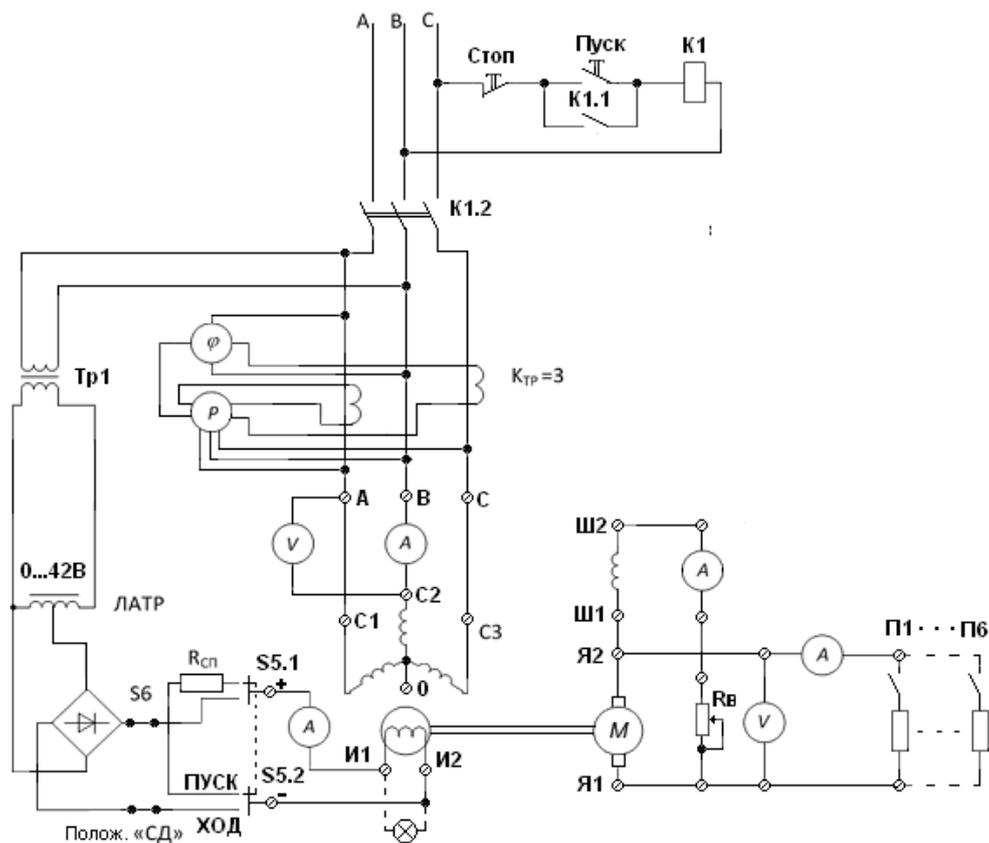


Рисунок 12.3 - Схема лабораторной установки

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 основе технических данных СД и ГПТ подобрать необходимые измерительные приборы.

2. Согласно рисунку 12.3 собрать электрическую схему установки. Переключатель S4 установить в положение "СД", переключатель S5 в положение «Пуск». Ручку ЛАТРа установить в положение, соответствующее номинальному току возбуждения СД (см. по риске).

3. Осуществить асинхронный пуск двигателя. Для этого подключить СДк сети переменного тока посредством включения контактора К1. При достижении скорости ротора СД, близкой к синхронной (примерно через 5–6 сек.), переключатель S5 перевести в положение «Ход». Если синхронизация СД с сетью не произошла, то следует отключить СД от сети, вернуть переключатель S5 в исходное положение. После этого повторить процедуру пуска СД.

4. Снять рабочие характеристики СД. Для этого установить номинальное напряжение СД. Далее посредством переключателей П1–П6 установить максимальную нагрузку в цепи якоря ГПТ, но не более номинального тока якоря ГПТ, что соответствует максимальному значению момента на валу СД $M_2 = M_{\max}$.

5. Установить в цепи обмотки возбуждения СД ток возбуждения, при котором коэффициент мощности СД $\cos(\phi) = 1$, и в течение опыта поддерживать I_f постоянным.

6. Изменяя момент на валу СД от максимального значения до минимального, измерить $U_{\text{сети}}$, частоту тока сети, ток статора I_1 , мощность P_1 , $\cos(\phi)$, ток возбуждения, а также ток и напряжение якоря, ток возбуждения ГПТ. Результаты занести в таблицу 12.2.

7. Снять рабочие характеристики СД при $\cos(\phi) = 0,9$. Результаты занести в таблицу 12.2.

Таблица 12.2 – Результаты измерений рабочих характеристик СД

№	Опытные данные						Расчётные данные					
	Синхронный двигатель					Нагруз. устр. (Машина ПТ)			Со стороны перем. тока		Со стороны постоянн. тока	
	U В	I ₁ А	P ₁ кВт	I _f А	cos(φ)	I _a А	U _a В	I _f А	P ₂ Вт	η	P ₂ Вт	η
1												
2					1							
3					1							
4					1							
5					1							
1					0,9							
2					0,9							
3					0,9							
4					0,9							
5					0,9							

8. Снять V –образные характеристики СД: $I_1 = f(I_f)$ при $U_{\text{сети}} = \text{const}$, $f = \text{const}$, и $P_2 = \text{const}$. Для этого установить мощность на выходе ГПТ $P_{\text{вых}} \approx 0,3P_n$ (700 Вт) и поддерживать ее во всех опытах постоянной. Далее изменять ток возбуждения СД от минимального возможного до значения, при котором ток статора не превышал бы своего номинального значения.

9. Снять V-образные характеристики СД при $P_{\text{вых}} \approx 0,6P_n$ (1200Вт) Измерьте напряжение сети U, ток статора I₁, мощность P₁, cos(φ) и ток возбуждения СД, а также ток U_a и I_a, I_f, машины постоянного тока. Опытные данные занесите в таблицу 12.4.

Таблица 12.3 – Результаты измерений V-образных характеристик СД

№ п/п	Опытные данные							Машина ПТ		
	Опытные данные					Расчётн. данн.		Опытные данные		
	U В	I ₁ А	P ₁ Вт	I _f (А)	cos(φ)	U _в В	P ₂ Вт	U _а В	I _а А	I _f А
1					0.7					
2					0.8					
3					0.9					
4					1.0					
5					-0.9					
6					-0.8					
7					-0.7					

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. По данным таблицы 12.2 вычислить полезную мощность на валу СД как со стороны переменного тока, так и со стороны постоянного.

2. Рассчитать скорость вращения СД для двух токов возбуждения СД и построить зависимости n_2/n_1 , P_1/P_H , I_1/I_H , η , $\cos(\phi) = f\left(\frac{P_2}{P_H}\right)$ при $U = U_H$, $f = f_H$, и $I_f = I_{fH} = const$

3. По данным таблицы 12.3 построить V-образные характеристики СД.

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. Каковы преимущества и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?
2. Как перевести синхронную машину, работающую с генератором параллельно с сетью, в двигательный режим?
3. Назовите способы пуска синхронных двигателей.
4. Как происходит асинхронный пуск синхронного двигателя?
5. Какой реактивный ток (индуктивный или емкостный) будет отдавать в сеть синхронный двигатель при перевозбуждении?
6. Почему при скольжении, близком к 0,5, в кривой момента при пуске синхронного двигателя возникает провал?

Лабораторная работа № 13

«Испытание синхронного компенсатора»

Цель работы: Ознакомиться с особенностями конструкции синхронных компенсаторов, методами их пуска в работу. Исследовать режимы работы СК.

1. Краткие теоретические сведения

Синхронные компенсаторы (СК), являющиеся генераторами реактивной мощности, позволяют разгружать линии передачи от реактивных токов, дают возможность поддерживать постоянными заданные уровни напряжения в системе. Регулирование напряжения в системе важно не только в отношении качества электрической энергии, но и с точки зрения устойчивости системы и уменьшения потерь в сетях.

СК представляет собой синхронную машину, работающую в режиме двигателя без активной нагрузки и генерирующую в сеть реактивный (опережающий или отстающий) ток. Таким образом, машина ведет себя по отношению к сети как емкость или индуктивность и является генератором или потребителем реактивной мощности. Регулирование реактивной мощности, вырабатываемой СК или потребляемой из сети, осуществляется изменением тока возбуждения машины.

В таблице 13.1 приведены данные отечественных ОК серии КС и КВС с водородным охлаждением.

Таблица 13.1 - Технические данные СК

Тип СК	Мощность МВт	U_n кВ	n_n об./мин	Потери кВт	Масса т	Охлаждение
КС-10-16	+10	6,6	1000	288	38,5	воздушное
КС-36-11	+30	10,5	750	540	100	воздушное

Обмотка статора двухслойная, стержневая петлевого типа с термореактивной изоляцией. Ротор СК выполнен с массивными коваными полюсами. Торцы полюсных башмаков соединены между собой массивными медными демпферными сегментами.

В СК мощностью 50-160 МВт возбуждение бесщеточное с применением реверсивной системы с двумя обмотками на роторе. Основная обмотка служит для положительного возбуждения, а дополнительная – создает встречный поток. М.д.с. дополнительной обмотки составляет 15 % м.д.с. основной. К основной обмотке подключен диодный бесщеточный возбудитель положительного возбуждения, к дополнительной обмотке – возбудитель отрицательного возбуждения. Возбудители выполнены с обеих сторон СК.

Якоря обращенных генераторов и блоки выпрямителей расположены на валу СК.

Автоматический регулятор возбуждения обеспечивает следующие режимы работы СК: рабочий с положительным, нулевым и отрицательным возбуждением, форсировки возбуждения с ограничением тока ротора до двухкратного и снижением его до номинального, быстрого возбуждения путем перевода тиристорного преобразователя в инверторный режим.

Пуск СК асинхронный при напряжении на обмотке статора $0,4 U_{\text{ном}}$. СК можно пускать как синхронный генератор методом точной, грубой синхронизации, а также с помощью разгонного двигателя.

Так как СК не развивает активной мощности, то вопрос статической устойчивости теряет остроту. Поэтому СК изготавливаются с меньшим воздушным зазором, чем генераторы и двигатели. Уменьшение зазора позволяет облегчить обмотку возбуждения и удешевить машину.

Характеристикой СК является V-образная характеристика. На рисунке 13.1 приведена V-образная характеристика СК мощностью 50 МВт.

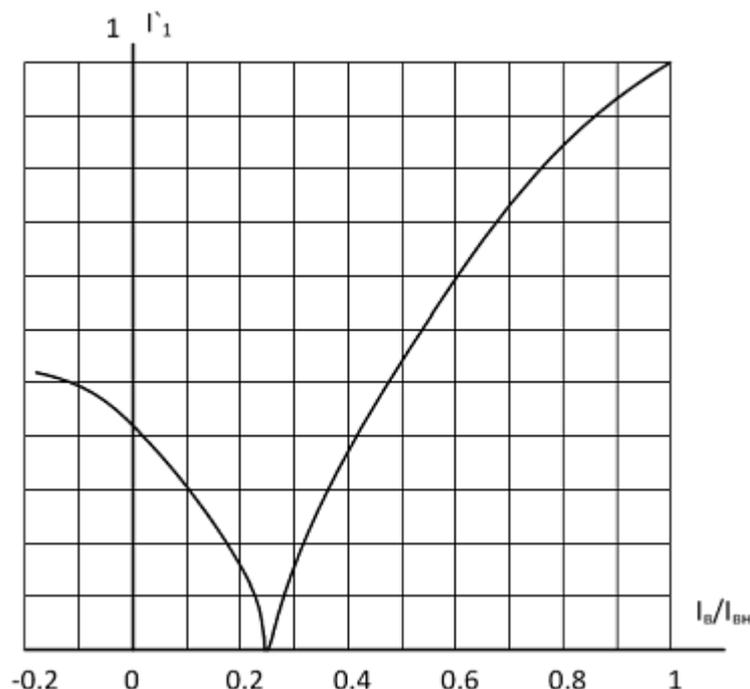


Рисунок 13.1 - V-образная характеристика СК 50 МВА

2. Описание лабораторного стенда

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рисунке 13.2. Она содержит синхронный генератор (СГ), пуск которого осуществляется с помощью двигателя постоянного тока (ДПТ). В состав установки входят также комплект К51, амперметры, ламповый синхроскоп, реостаты. Технические данные СГ приведены в таблице 13.2

Таблица 13.2 - 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

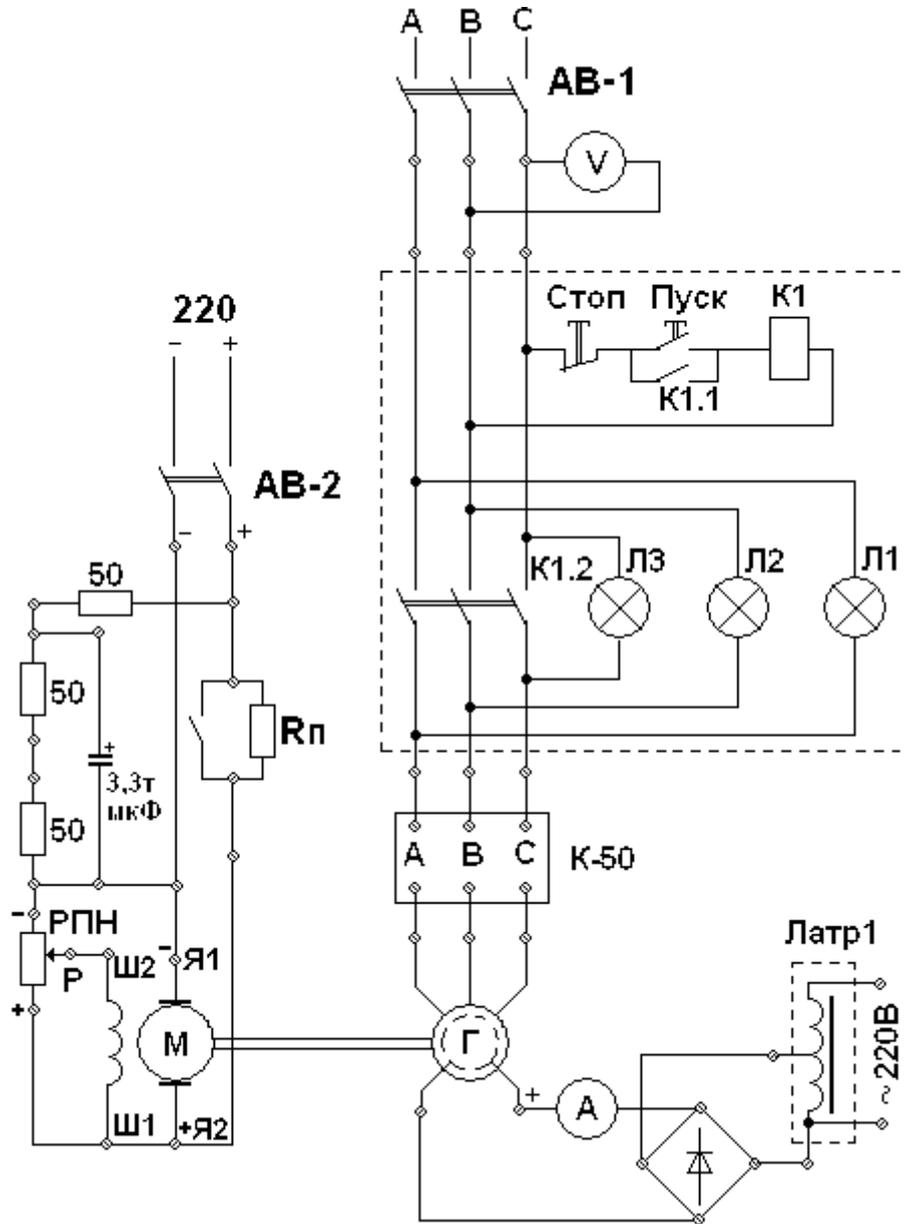


Рисунок 13.2 - Принципиальная схема лабораторной установки

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. По техническим данным СГ подобрать необходимые приборы.

2. Согласно рисунку 13.2 собрать схему установки.

3. Осуществить точную синхронизации СГ с сетью (см. лаб. работу «Исследование параллельной работы СГ с сетью»).

4. Отключить ДПТ от сети постоянного тока. При этом синхронная машина переходит в режим СК. Снять V-кривую $I_1 = f(I_f)$ и другие данные, приведенные в таблице 13.3.

5. Дополнительно снять показания фазометра, включенного в измеряемую линию. Результаты измерения отобразить на V-образных характеристиках.

Таблица 13.3 – Результаты экспериментальных исследований (синхронного компенсатора)

Опытные данные									
$U_f, В$									
$I_f, А$	0	0,2	0,5	0,8			2	2,5	
$P_B, Вт$									
$I_a, А$									
$\varphi, ГР$					0				
Расчетные данные									
$\Delta P_f = I_f * U_f, Вт$									
$3 I_1^2 r_1$									
$\Delta P_{МЕХ} + \Delta P_{СТ}$									
Суммар. потери: $\Sigma \Delta P, Вт$									

Таблица 13.4 – Результаты экспериментальных исследований (синхронного генератора)

$U_f, В$									
$I_f, А$	0	0,2	0,5	0,8			2	2,5	
$I_B, А$					0				
$\varphi, гр$					0				

5. Алгоритм обработки результатов измерений

1. Построить V- образную характеристику СК.
2. Построить график зависимости суммарных и долеых потерь от тока возбуждения СК.

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. Объяснить назначение и область использования СК.
2. Назовите способы пуска СК.
3. Почему вопрос статической устойчивости для СК теряет свою остроту?
4. Объясните принцип работы СК и его регулируемую способность
5. Что такое реверсивная система возбуждения СК?
6. Почему у СК X_d выше, чем у аналогичных по мощности синхронных генераторов?

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»
направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

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

Калининград
20XX

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
Максим Сергеевич Харитонов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Редактор Э. С. Круглова

Уч.-изд. л. 9,0. Печ. л. 8,0

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