

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена»



**Кононов А.А., Попова И.О., Смирнов А.П., Маслов В.В.,
Колобов А.В.**

ЭЛЕКТРОРАДИОТЕХНОЛОГИИ
(Лабораторный практикум)
Часть 1

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург
2020

ББК

Э45??

*Печатается по решению совета факультета
физики ФГБОУ ВО «Российский государственный
педагогический университет им. А. И. Герцена»*

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор Аванесян В. Т.
доктор педагогических наук, профессор Хинич И. И.

Э45 Кононов А.А., Попова И.О., Смирнов А.П., Маслов В.В.,
Колобов А.В.
Электрорадиотехнологии (лабораторный практикум). Часть 1:
Учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Гер-
цена, 2020. – 73 с.

ISBN

Учебно-методическое пособие «Электрорадиотехнологии (лабора-
торный практикум), часть 1» содержит описания пяти лабораторных ра-
бот, которые включают в себя как теоретические сведения, так и экспери-
ментальные задания по изучаемым темам.

Пособие подготовлено на основе курса «Электрорадиотехнологии»,
преподаваемого в РГПУ им. А. И. Герцена для студентов Института ин-
формационных технологий и технологического образования в соответ-
ствии с ФГОС. Оно также может быть полезно преподавателям и студен-
там смежных направлений и других вузов.

ББК *(по названию)*

ISBN

© Коллектив авторов, 2020

© Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2020

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа №1. Электрические измерения. Вольт-амперная характеристика элемента цепи (лампы накаливания)	6
Лабораторная работа №2. Исследование источника тока	17
Лабораторная работа №3. Исследование цепей трехфазного тока	26
Лабораторная работа №4. Изучение однофазного трансформатора	42
Лабораторная работа №5. Испытание трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	59
Ответы к упражнениям для самостоятельной работы	71
Рекомендованная литература	73

Введение

Процесс подготовки конкурентоспособного специалиста, готового к реализации инновационной доктрины России, предполагает формирование у него профессиональных и общекультурных компетенций, а именно, способность применять знания, умения и навыки для создания новых объектов и технологий в области науки и техники, готовность к непрерывному повышению своей квалификации, самоопределению, к восприятию и реализации инновационных идей и проектов, новой информации. Такой специалист обязан оперативно и эффективно овладевать различными новейшими технологиями. В связи с этим, важна организация учебного процесса с использованием интерактивных форм проведения занятий.

Эффективная деятельность и высокое качество жизни современного человечества немислимы без активного использования электроэнергии. Ввиду этого является чрезвычайно актуальным освоение студентами такой дисциплины как «Электрорadiотехнологии». Настоящее учебное пособие предназначено для студентов Института информационных технологий и технологического образования, но может быть полезным и студентам других естественнонаучных и технических факультетов. Электротехника, как прикладная наука, позволяет углубить понимание многих явлений и процессов, происходящих, в том числе, в компьютерной и электронной технике. Чрезвычайно полезным является глубокое понимание студентами технических факультетов физических принципов работы компонентов современной компьютерной и прочей электронной аппаратуры.

Данное учебное пособие включает в себя 5 лабораторных работ. Лабораторная работа № 1 посвящена исследованию вольт-амперной характеристики ламп накаливания. Кроме того, в процессе данной работы студенты получают навыки работы с различными электрическими измерительными приборами, а также оценки и расчета погрешностей электрических измерений. Лабораторная работа №2 позволяет продемонстрировать работу источника тока, овладеть навыками определения основных его параметров. Более того, данная работа хорошо иллюстрирует работу основных законов физики на практике. Лабораторная работа № 3 посвящена трехфазным сетям. Выполнив данную работу, студенты получают представление о принципах электроснабжения потребителей электрической энергии. Лабораторная работа № 4 позволяет студентам освоить принципы работы трансформатора, электротехнического устройства, играющего чрезвычайно важную роль в большинстве источников питания

различных устройств. В процессе выполнения лабораторной работы № 5 студенты приобретают навыки испытаний электрических машин на примере трехфазных асинхронных двигателей.

Монтаж (сборку) электроизмерительной установки студенты производят самостоятельно, руководствуясь принципиальной схемой, приведенной в описании к лабораторной работе. Прежде чем начать соединение элементов схемы между собой, следует расположить их таким образом, чтобы было удобно и безопасно производить необходимые регулировки и переключения и, в случае необходимости, иметь возможность оперативного отключения рабочей схемы. Сборка электрической схемы осуществляется с помощью соединительных проводов. Не допускается переплетение проводов. Контакты должны быть надежными, люфты в клеммах приборов и элементов цепи недопустимы. К каждой клемме измерительного прибора или элемента цепи нежелательно подводить более двух проводов. Сборку схемы рекомендуется начинать от одного из полюсов источника тока. Сначала следует собирать главную последовательную часть цепи, а затем к ней подключать разветвления и параллельные участки. Если в схеме применяются вольтметры, то их включают в цепь в последнюю очередь. Все ключи и коммутаторы в цепи должны быть разомкнуты при первом запуске цепи. Электроизмерительные приборы необходимо переключить на самые большие пределы измерений. Также необходимо перед проведением измерений проверять нулевое положение стрелок приборов. При необходимости следует откорректировать ноль приборов путем вращения корректирующего винта, находящегося рядом со шкалой. Реостаты, включенные в цепь, должны быть полностью введены (выставлено их максимальное сопротивление), потенциометры установлены таким образом, чтобы напряжение на потребителях было минимальным. Нельзя производить переключения элементов в цепи, находящихся под напряжением. ***При разборке схемы, прежде всего, необходимо обесточить источник тока!***

Подавать напряжение на цепь без проверки ее правильности монтажа преподавателем или лаборантом запрещается!

Учебное пособие составлено с учетом многолетнего опыта проведения лабораторных работ по электротехнике на естественнонаучных факультетах РГПУ им. А. И. Герцена.

Лабораторная работа №1

Электрические измерения. Вольт-амперная характеристика элемента цепи (лампы накаливания)

Цель работы: ознакомиться с устройством, конструктивными особенностями и принципом действия электроизмерительных приборов: электромагнитной, магнитоэлектрической, электродинамической, электростатической и выпрямительной систем; научиться расшифровывать технические данные, указанные на шкалах и панелях приборов, определять внутреннее сопротивление приборов, абсолютную и относительную погрешность электроизмерительных приборов и результатов измерений; приобрести практические навыки в составлении и сборке принципиальных электрических схем.

Сведения из теории

Для измерения электрических величин (тока, напряжения, мощности и др.) используют электроизмерительные приборы, которые могут быть классифицированы по нескольким признакам:











- 1) по назначению (роду измеряемой величины): вольтметры, амперметры, ваттметры и т.д.;
- 2) по принципу действия: магнитоэлектрические, электродинамические, электромагнитные, индукционные, электростатические и др.;
- 3) по виду тока: приборы, рассчитанные на работу в цепи постоянного или переменного тока;
- 4) по методам измерения: метод непосредственной оценки (оценивается непосредственно измеряемая величина) и метод сравнения (используется в измерительных мостах, компенсаторах);
- 5) по степени точности.

В таблице 1.1 приведены условные обозначения, которые указываются на шкалах и корпусах наиболее широко применяемых электроизмерительных приборов.

По принципу действия электроизмерительных приборов выделяют следующие основные системы измерения: магнитоэлектрическая, электродинамическая, электромагнитная, индукционная, ферродинамическая, электронная, термоэлектрическая. Чаще всего в лабораторном практикуме и на производстве используются приборы магнитоэлектрической, электродинамической, электромагнитной и электронной (цифровой) измерительных систем, поэтому остановимся более подробно на их устройстве.

Электроизмерительные приборы *магнитоэлектрической* системы используются для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. Принцип действия таких приборов основан на взаимодействии внешнего магнитного поля, создаваемого сильным постоянным магнитом, и рамки, по которой идет измеряемый ток. Зависимость между углом поворота стрелки и током получается линейной, что обеспечивает равномерность шкалы измерительного прибора. Кроме этого, приборы данной системы отличаются высокой чувствительностью и точностью, малое потребление энергии, слабая чувствительность к внешним магнитным полям.

Таблица 1.1. Распространенные символы, используемые для обозначения типов электроизмерительных приборов

Характеристика	Обозначение
Постоянный ток	
Переменный ток	
Трехфазный ток	
Прибор электромагнитной системы	
Прибор электродинамической системы	
Прибор магнитоэлектрической системы с подвижной рамкой	
Прибор магнитоэлектрической системы с подвижным магнитом	
Изоляция прибора испытана при напряжении 2 кВ	
Установка прибора горизонтальная	
Установка прибора вертикальная	

Принцип действия приборов *электромагнитной* системы основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки, по которой идет измеряемый ток, и подвижного железного сердечника, помещенного в это магнитное поле. Шкала таких приборов является неравномерной, изменяя форму сердечника, добиваются равномерности шкалы в последних трех

четвертях, начальную часть такой шкалы не используют. На измерительной шкале прибора начало рабочей части обозначают точкой (рис.1.1).

Измерительные приборы данной системы используют для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного и переменного токов. К их достоинствам относят: возможность использования в сетях постоянного и переменного токов, простоту конструкции, устойчивость к перегрузкам.



Рис. 1.1. Пример измерительной шкалы прибора

Измерительные приборы *электродинамической* системы предназначены для измерения силы тока, напряжения и мощности в цепях переменного и постоянного токов. Принцип действия основан на взаимодействии неподвижной и подвижной катушек, по которым протекают измеряемые токи. В зависимости от назначения прибора катушки соединяют последовательно или параллельно. В случае измерения тока, катушки соединяют параллельно между собой и, для увеличения диапазона измерения, параллельно им подключают еще и шунты. Для измерения напряжения катушки лучше соединить последовательно, для расширения пределов измерения в данном случае последовательно с катушками подключают добавочное сопротивление.

Величина шунта для увеличения пределов измерения амперметра может быть определена по формуле: $R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}$, где R_A – сопротивление амперметра, n – коэффициент расширения пределов измерения тока амперметром. Величина добавочного сопротивления для вольтметра может быть рассчитана по формуле: $R_d = \frac{R_V}{m-1}$, где R_V – сопротивление

амперметра, m – коэффициент расширения пределов измерения напряжения вольтметром.

К достоинствам приборов электродинамической системы относят возможность их использования в цепях переменного и постоянного тока и их высокую точность. К недостаткам – неравномерность шкалы и чувствительность к перегрузкам. Часто приборы электродинамической системы используются как ваттметры. В этом случае одна катушка подключается последовательно с потребителем, а вторая – параллельно ему (рис. 1.2).

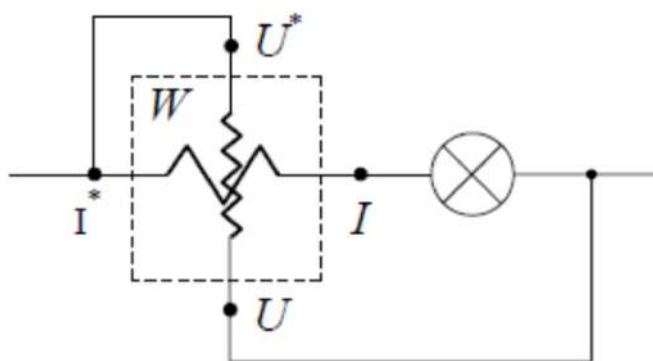


Рис. 1.2. Схема подсоединения ваттметра

Рассмотрим кратко измерительные приборы других систем.

В основе функционирования приборов тепловой системы лежит изменение длины проводника при его нагревании, они используются в цепях постоянного и переменного тока.

Индукционная система – принцип действия основан на взаимодействии токов, индуцируемых в подвижной части прибора с магнитным потоком неподвижных электромагнитов.

Вибрационная система основана на резонансе при совпадении частот собственных колебаний подвижной части прибора с частотой переменного тока. Используют для измерения частоты тока.

Заслуживают отдельного внимания цифровые измерительные приборы. Благодаря высокой точности и чувствительности измерений, компактности и надежности, возможности фиксировать полученные результаты на ЭВМ, они чрезвычайно широко используются как в быту, так и в научных исследованиях, на различных производствах. Рассмотрим устройство и принцип действия цифрового вольтметра. На генераторе линейно измеряющего напряжения (ГЛИН) формируется напряжение, нарастающее по линейному закону $U_{\text{глин}} = S \cdot t$, которое подается на компаратор, где S – крутизна преобразования. Селектор связывает выход

высокочастотного импульсного тактового генератора со входом счетчика. В компараторе линейно нарастающее напряжение ГЛИН сравнивается с измеряемым постоянным напряжением $U_{вх}$ (рис. 1.3).

Через определенный интервал времени Δt от начала запуска ГЛИНа напряжение на его выходе становится равным измеряемому, т.е. $U_{вх} = S \cdot \Delta t$. В данный момент времени на выходе блока сравнения формируется положительный импульс напряжения, который поступает на вход селектора и прерывает связь между выходом высокочастотного генератора и входом счетчика. Таким образом, в цифровом вольтметре измеряемое напряжение сначала преобразуется в пропорциональный интервал $\Delta t = \frac{U_{вх}}{S}$, а затем этот интервал времени преобразуется в пропорциональное интервалу число импульсов, т.е. $n = \Delta t f = \frac{f U_{вх}}{S}$, которое фиксируется цифровым дисплеем или индикатором (рис.1.4).

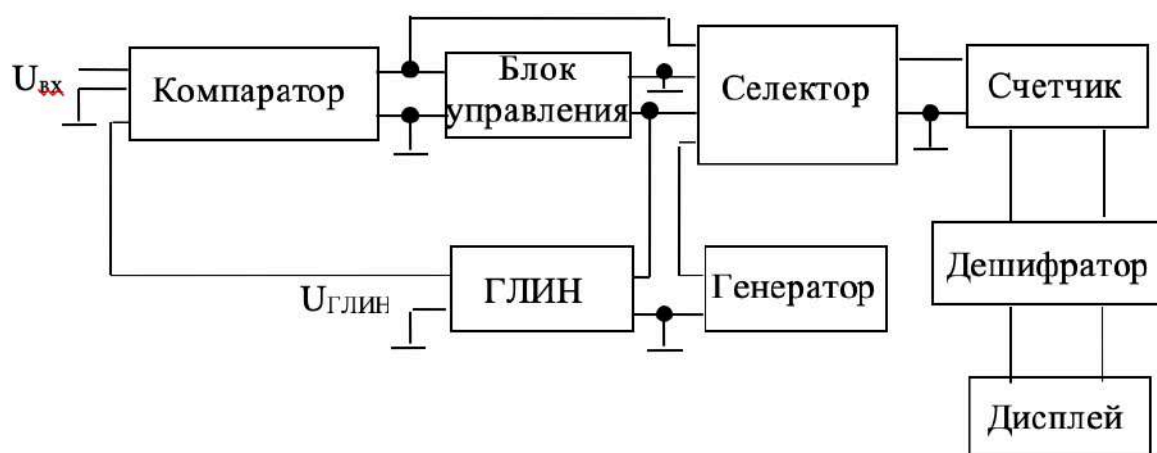


Рис. 1.3. Блок-схема цифрового вольтметра

В виду того, что f (частота) велика, а S (крутизна) мала, то даже малым значениям $U_{вх}$ соответствует большое число импульсов n , что обеспечивает высокую чувствительность и точность цифрового вольтметра. Цифровая индикация обеспечивает объективность считывания показаний.

По точности измерения все приборы делятся на классы. Класс прибора указывается на его шкале цифрой (0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.4, 0.5, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 4.0), и соответствует величине возможной относительной погрешности при нормальных условиях работы. Например, если прибор имеет класс точности 1.5 и шкалу 0 – 150 В, то инструментальная погрешность будет равна:

$$\frac{\text{класс точности} \cdot \text{предел шкалы}}{100\%} = \frac{1.0 \cdot 150}{100\%} = 1.5B.$$

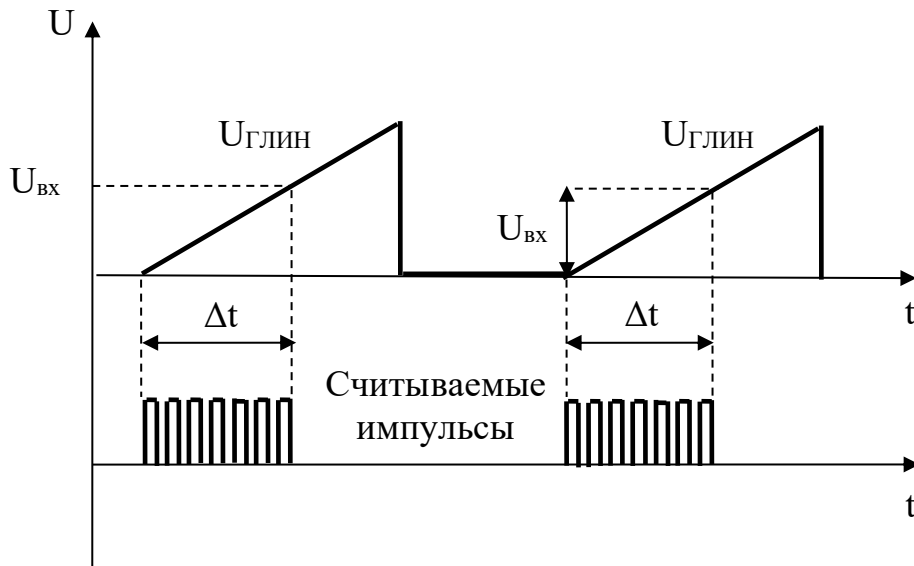


Рис. 1.4. Графическое представление принципа измерения напряжения

Если класс точности не указан, то инструментальная погрешность принимается равной половине цены деления измерительного прибора.

Включение прибора в измерительную цепь не должно вносить существенных изменений в режим работы цепи, для этого входное сопротивление вольтметра должно быть достаточно большим, а амперметра — малым.

Также на шкале прибора указывается испытательное напряжение изоляции, то есть напряжение, которое может быть приложено между токоведущими частями и любой металлической деталью, касающейся корпуса прибора.

В данной лабораторной работе измеряются ток, напряжение и мощность на элементе цепи синусоидального переменного тока и анализируется вольт-амперная характеристика (ВАХ) элемента — зависимость тока через элемент от величины приложенного к концам элемента напряжения, т.е. $I = f(U)$. В зависимости от вида ВАХ различают линейные и нелинейные элементы цепи.

Для линейных элементов вольт-амперная характеристика является прямой линией, проходящей через начало координат, и описывается законом Ома. Угол наклона ВАХ обусловлен электрическим сопротивлением R (электропроводимостью G) элемента: $\operatorname{tg} \varphi = G$.

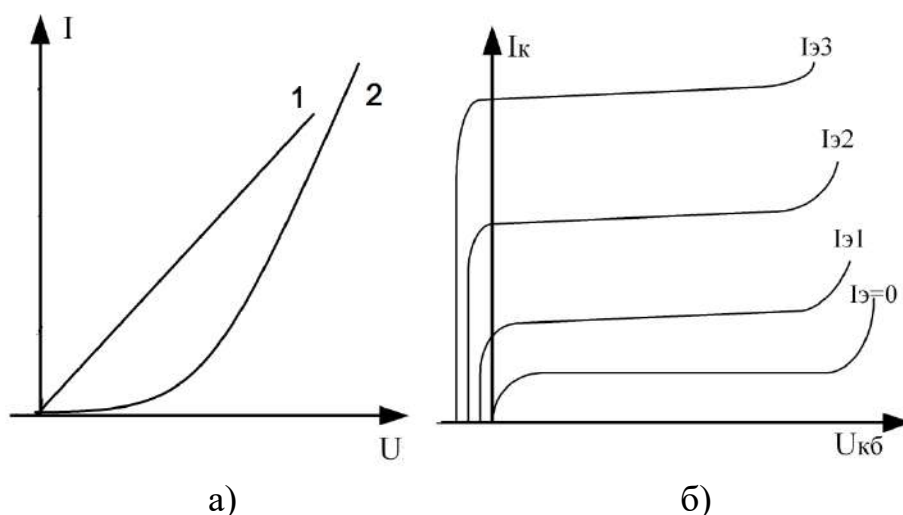


Рис. 1.5. Вольт-амперные характеристики: а – линейного резистора и диода (соответственно кривые 1 и 2), б – семейство выходных ВАХ транзистора, включенного в схему с общей базой

Практический интерес представляют элементы с нелинейной ВАХ, такие как, диоды, стабилитроны и др., которые могут быть использованы в электронных схемах выпрямления, стабилизации, преобразователях частоты, логических элементах и т.п.

Для элементов с управляющим электродом (например, транзистор или электровакуумный триод) строят семейства кривых ВАХ при заданном токе или напряжении на управляющем электроде элемента. На рисунке 1.5 схематично представлены ВАХ для различных элементов цепи.

Изучаемая вольт-амперная характеристика лампы накаливания также является нелинейной, так как при протекании электрического тока происходит нагрев нити накала лампы, что приводит к увеличению ее сопротивления, и, соответственно, изменению ВАХ.

Практическая часть

*Монтаж электроизмерительной установки студенты производят самостоятельно, руководствуясь принципиальной схемой, приведенной в описании к лабораторной работе. Рекомендуется начинать сборку схемы от одного из полюсов источника тока, последовательно подключая все необходимые элементы, чтобы получилась главная последовательная цепь. Затем подключают параллельные участки цепи (вольтметры подключают в последнюю очередь). **Подавать напряжение на цепь без ее проверки преподавателем или лаборантом запрещается!***

Стоит отметить, что в начале проведения измерений необходимо определить цену деления приборов. Показания приборов в единицах СИ определяются следующим образом:

$$X = \frac{Y}{N} \cdot N_X - \text{для амперметра и вольтметра,}$$

$$X = \frac{Y'Z'}{N} \cdot N_X - \text{для ваттметра,}$$

где X – «истинные» показания приборов в СИ, Y – предел измерения вольтметра или амперметра, N – число делений шкалы приборов, N_X – показания прибора по шкале, Y' – предел измерения ваттметра по току, Z' – предел измерения ваттметра по напряжению.

Внимание!!! Перед сборкой схем необходимо убедиться, что пакетный выключатель стенда находится в положении "отключено", а неоновые индикаторы напряжения стенда не горят!

Задание I. Исследование ВАХ ламп накаливания (количество ламп задается преподавателем).

1) Собрать схему, изображенную на рис. 1.6, где ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; ламповый реостат "АХ", "ВУ", "СЗ". V – вольтметр с пределами измерения 75 – 600 В, А – амперметр с пределом измерения 0.25 – 1 А, W – ваттметр с пределами измерения по току 1 А.

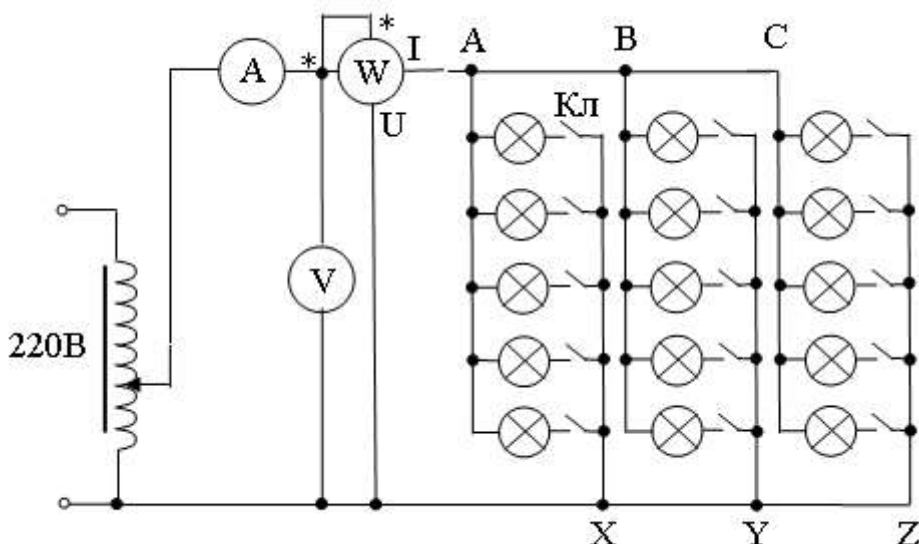


Рис. 1.6. Рабочая схема для выполнения задания I

2) Привести схему в начальное состояние: пакетный выключатель должен находиться в положении «выключен». Ручку ЛАТРа поверните против часовой стрелки до упора (выходное напряжение ЛАТРа должно

быть близким к нулю). После получения разрешения преподавателя или лаборанта на проведение работы, вставьте вилку ЛАТРа в гнезда 127 В или 220 В на стенде. Включить стенд.

3) Исследовать ВАХ, меняя постепенно напряжение на нагрузке с помощью ЛАТРа от 30 В до 220 В с шагом 10 В. В таблицу 1.2 занести результаты измерений и вычислений.

Таблица 1.2.

№	Измерить			Вычислить		
	I, А	U, В	P, Вт	ΔI , А	P, Вт	R, Ом
1		30				
2		40				
3		50				
...		...				
20		220				

4) Построить ВАХ для заданной группы ламп, изобразив на графике погрешности измерений.

5) На том же листе построить ВАХ для одной лампы в предположении, что все они одинаковы. Номинальные параметры лампы: $P = 25$ Вт, $U = 220$ В.

Задание II. Описать все электроизмерительные приборы, использованные при выполнении задания I, согласно классификации электроизмерительных приборов, представленных в разделе «Сведения из теории».

Контрольные вопросы

1. Какие цепи можно считать линейными? Нарисуйте график ВАХ линейной цепи.
2. Сформулируйте основные физические законы, применяемые в электротехнике.
3. Как выбираются, подключаются и работают электроизмерительные приборы?
4. Какая мощность измеряется ваттметром?
5. Какой прибор необходимо подключить в цепи совместно с

ваттметром, чтобы определить сопротивление участка цепи?

6. Номинальное значение амперметра $I_{\text{ном}}=5\text{A}$. Класс точности его 2,5. Определить абсолютную и относительную погрешности при показаниях прибора: а) 0,5А; б) 4,9А.

Упражнения для самостоятельной работы

1. В таблице 1.3 приведены ВАХ двух лам накаливания. Определить ток и напряжение на каждой лампе при их последовательном соединении и подключении к общему напряжению 150 В.

Таблица 1.3

U, В	0	5	15	25	35	45	60	80	100	120
I_1 , А	0	0,12	0,23	0,31	0,38	0,44	0,52	0,61	0,7	0,8
I_2 , А	0	0,02	0,06	0,11	0,16	0,21	0,31	0,45	0,63	0,8

2. При каком напряжении общий ток при параллельном соединении ламп ВАХ, которых приведены в таблице 1.3, будет равен 1 А? Каким будет ток каждой лампы?
3. ВАХ лампы накаливания изображена на рисунке 1.7. При напряжении источника 12 В температура нити лампы равна 3100 К. Сопротивление нити прямо пропорционально её температуре. Какова температура нити накала при напряжении источника 6 В?
4. Вольт-амперная характеристика лампы накаливания изображена на рисунке 1.7. Если на лампу подать напряжение 12 В, то температура нити лампы равна 3100 К. Сопротивление нити прямо пропорционально её температуре. При какой температуре накала нити потребляемая лампой мощность составит 8,4 Вт?

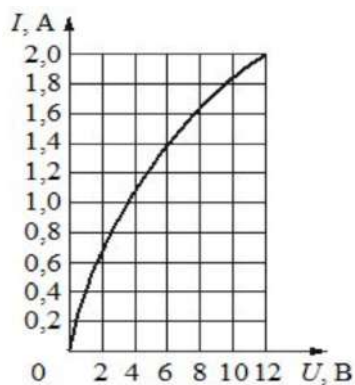


Рис. 1.7. ВАХ лампы накаливания

5. Через проводник постоянного сечения идет постоянный ток силой 1 нА. Определите сколько электронов в среднем проходит через поперечное сечение этого проводника за 0.24 мкс.
6. На рисунке 1.8 представлена зависимость силы тока, протекающего через участок электрической цепи, от приложенного к нему напряжению. Определите работу тока на участке за 15 минут при напряжении 30 В.

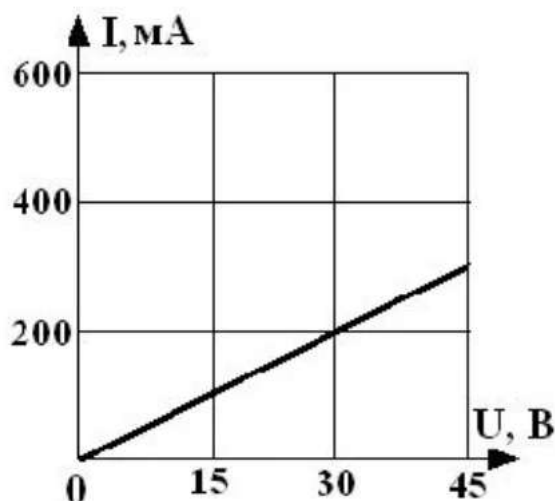


Рис. 1.8. ВАХ участка электрической цепи

7. Реостат изготовлен из никелиновой проволоки длиной 15 м и площадью поперечного сечения $1,0 \text{ мм}^2$. Какой силы ток будет идти через полностью включенный реостат, если напряжение на его зажимах поддерживать равным 12 В? Каково сопротивление реостата? Удельное сопротивление никелина $0,40 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.
8. Определить величину сопротивления шунта амперметра для расширения пределов измерения тока с 10 миллиампер до 10 Ампер. Внутреннее сопротивление амперметра равно 100 Ом.
9. Определить величину добавочного сопротивления вольтметра для расширения пределов измерения напряжения с 5 до 500 Вольт. Внутреннее сопротивление вольтметра равно 200 Ом.
10. Рассчитать шунт для увеличения предела измерения амперметра, если прибор может измерять максимально ток в 50 мА, а его сопротивление равно 5 Ом и его требуется подключить к реостату, рассчитанному в задаче №7.

Лабораторная работа №2

Исследование источника тока

Цель работы: исследовать работу источника тока в режиме генератора.

Сведения из теории

Прежде чем приступить к рассмотрению работы источника тока, уточним некоторые понятия, которые будут использоваться в дальнейшем. Следует различать такие понятия как напряжение, падение напряжения, разность потенциалов и ЭДС, а также реже используемые, падение потенциала и потеря напряжения. Несмотря на то, что все они измеряются в вольтах, энергетически они описывают различные процессы, происходящие при переносе единичного положительного заряда.

Разность потенциалов ($\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi$) равна работе электростатических сил, либо работе против электростатических сил, в зависимости от направления движения зарядов.

Падение напряжения ($U=I \cdot R$) описывает превращение энергии зарядов во внутреннюю энергию проводника или какого-либо иного элемента цепи (в тепло). Это следует из закона Джоуля – Ленца $Q = I^2 R t = IR \cdot It = IRq$, откуда $IR = Q/q$.

Электродвижущая сила (ЭДС) (E) определяет работу сторонних (не электростатических) сил при переносе единичного заряда. Знак этой работы различен в зависимости от режима работы источника ЭДС. В режиме генератора работу совершают сторонние силы, в режиме потребителя работа совершается против сторонних сил. В первом случае энергия зарядов увеличивается за счет других видов энергии (химической, механической), во втором – энергия зарядов превращается в химическую, механическую, но не в тепловую.

Примечания: 1. Термин "напряжение" чаще всего заменяет "разность потенциалов". 2. В цепях переменного тока при рассмотрении вопросов передачи энергии по длинным проводам, а также при работе трансформатора под нагрузкой, необходимо отличать "падение напряжения" от "потери напряжения" (падение напряжения на проводах).

Для участка цепи сопротивлением R , но не содержащего источник тока с ЭДС, разность потенциалов на концах этого участка $\Delta\varphi$ равна падению напряжения на этом участке, т.е. $\Delta\varphi = IR$. Отсюда $I = \frac{\Delta\varphi}{R}$. Это выражение является законом Ома для участка цепи, не содержащего

источник тока. Разность потенциалов на концах разомкнутого источника равна его ЭДС, так как ток I в данном случае равен 0. Это означает, что сторонние силы не могут преодолеть электростатическое поле, возникшее в результате предшествовавшего разделения (перемещения) зарядов сторонними силами.

Если участок цепи сопротивлением R содержит ЭДС E , то величина и направление тока на этом участке зависит от величины и взаимного направления действия на заряды электростатического поля и сторонних сил $I = \frac{(\pm \Delta \varphi \pm E)}{R}$. Отсюда $\Delta \varphi = \pm E \pm IR$, т.е. разность потенциалов на концах участка складывается алгебраически из ЭДС и падения напряжения.

Потенциальная диаграмма

Потенциальная диаграмма представляет собой графическое изображение изменения потенциала при перемещении вдоль цепи. На рис. 2.1 изображена цепь, на рисунке 2.2 – ее потенциальная диаграмма. Потенциал точки 1 φ_1 принят равным нулю. При перемещении вдоль соединительных проводов потенциал практически не изменяется. При переходе от отрицательного "–" полюса (зажима) источника ЭДС к положительному "+" потенциал изменяется скачком на величину E ($E_1 = \varphi_1 - \varphi_2$). При переходе от одного конца резистора к другому по направлению тока потенциал постепенно (линейно) уменьшается на величину падения напряжения ($I_1 R_1 = \varphi_2 - \varphi_3$). Скачки потенциала на источнике ЭДС не зависят от направления тока, а изменения потенциала на резисторе зависят. Например, при переходе от точки 4 к точке 5 навстречу току I_2 потенциал увеличивается на величину падения напряжения $I_2 R_2$. При полном обходе замкнутого контура (точки 1-7) потенциал последней точки должен равняться потенциалу начальной.

Изменение потенциалов на схеме, изображенной на рис.2.1, можно записать аналитически. Для определения, например, $\varphi_5 - \varphi_2$ можно записать:

$$\varphi_2 - I_1 R_1 - E_2 + I_2 R_2 = \varphi_5.$$

Отсюда $\varphi_5 - \varphi_2 = -I_1 R_1 - E_2 + I_2 R_2 = 1 \cdot 6 - 2 + 2 \cdot 2 = -4\text{В}$, что совпадает по величине и знаку с $\varphi_5 - \varphi_2 = 1 - 5 = -4\text{В}$, полученной из диаграммы.

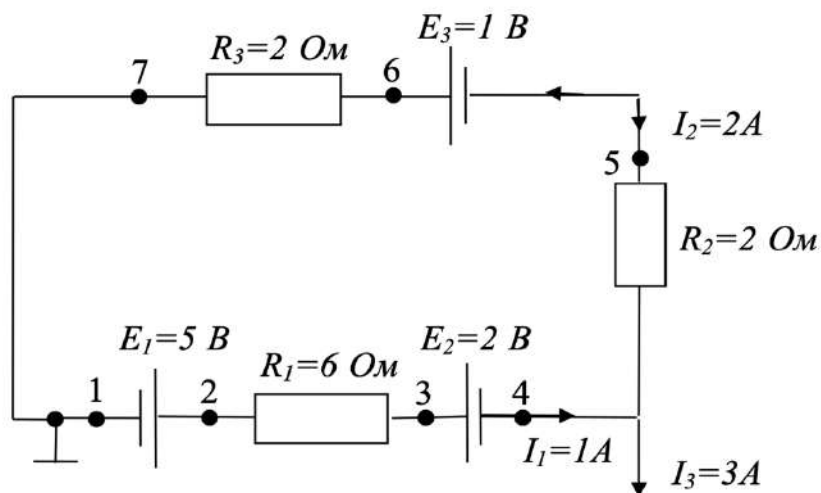


Рис. 2.1. Исследуемая цепь постоянного тока

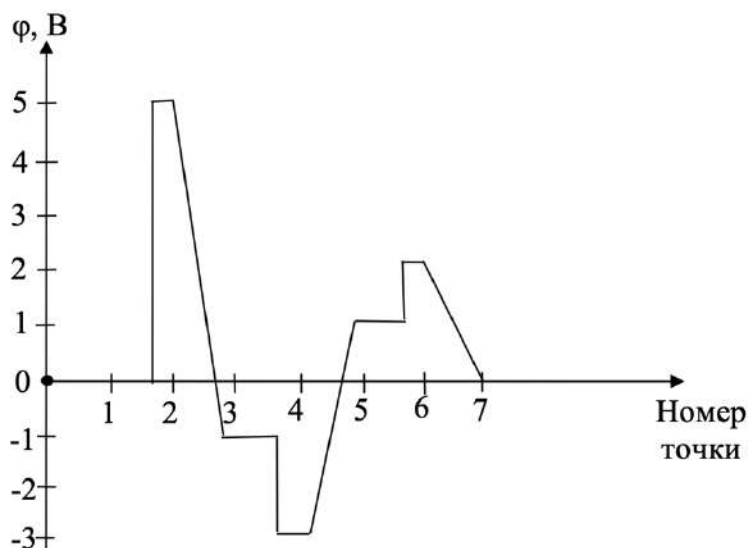


Рис. 2.2. Потенциальная диаграмма для схемы на рис. 2.1

Работа источника тока в режиме генератора

а) Внешняя характеристика.

Основными характеристиками источника тока являются электродвижущая сила (ЭДС) E и внутреннее сопротивление r . При разомкнутой цепи разность потенциалов $\varphi_a - \varphi_b$ (в дальнейшем напряжение U_{ab}) на его концах (точки "а" и "b" рис.2.3 (а)) равна ЭДС E . Если к источнику тока подключить внешнее сопротивление R , называемое сопротивлением нагрузки, то по цепи пойдет ток, равный:

$$I = \frac{E}{(R + r)} \quad (2.1)$$

При этом напряжение U_{ab} на зажимах источника станет меньше ЭДС на величину падения напряжения внутри источника (на внутреннем сопротивлении):

$$U = E - Ir \quad (2.2)$$

Зависимость $U = f(I)$ называется внешней или рабочей характеристикой источника. У многих источников E и r не зависят от тока I , поэтому для них график $U(I)$ представляет прямую линию (рис. 2.3б), наклон которой определяется внутренним сопротивлением.

Отсюда следует способ определения r :

$$r = \frac{(U_1 - U_2)}{(I_2 - I_1)}. \quad (2.3)$$

При $R = 0$, из формулы (2.1) получаем $I_{кз} = E/r$. Эта величина называется током короткого замыкания. В этом режиме из формулы (2.2) следует, что напряжение на зажимах источника $U = 0$. Если внутреннее сопротивление порядка 0.001 Ом, то ток короткого замыкания достигает тысяч ампер. При таких токах источник питания быстро выходит из строя. Обычно для каждого источника известен наибольший допустимый ток при длительной работе (номинальный ток), который не следует превышать в процессе эксплуатации.

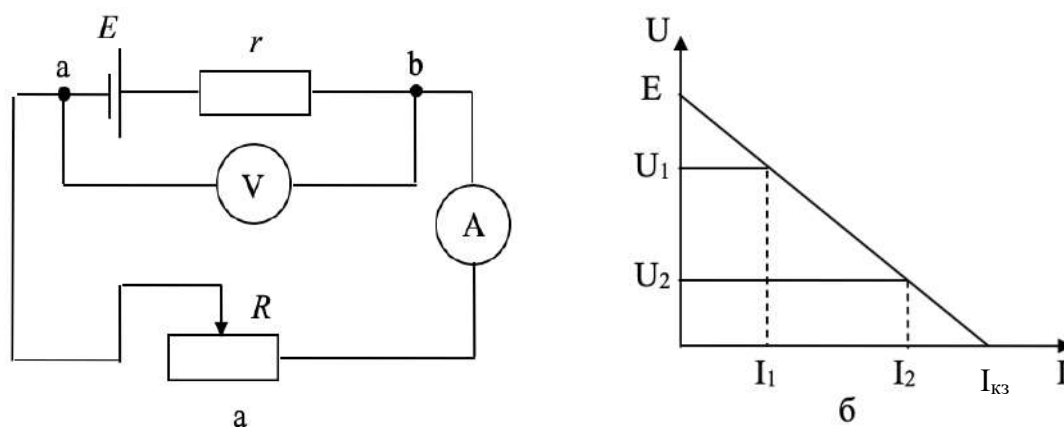


Рис. 2.3. Схема для снятия внешней характеристики источника тока (а) и нагрузочная характеристика данного источника (б)

б) Мощность.

Полная мощность, развиваемая источником, равна $P_{\Pi} = IE$. Часть этой мощности выделяется внутри источника на его внутреннем сопротивлении в виде Джоулева тепла $P_r = I^2 r$. Другая часть полной мощности, выделяемая во внешней цепи P_H (на сопротивлении нагрузки), может

быть использована и называется полезной. Величина полезной мощности может быть выражена следующим образом:

$$P_H = I^2 R = IU = IE - I^2 r \quad (2.4)$$

Первые два выражения не дают возможности определить вид зависимости P_H от I , так как сопротивление R и напряжение U не остаются постоянными при изменении I . Последнее выражение дает зависимость P_H от I в явном виде. Ясно, что график зависимости $P_H(I)$ представляет собой параболу с ветвями, направленными вниз.

в) *Коэффициент полезного действия.*

Коэффициент полезного действия источника равен отношению полезной мощности, выделяемой во внешней цепи, к полной мощности, развиваемой источником:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} \quad (2.5)$$

Подставляя в (2.5) вместо значения мощностей их выражения через токи, напряжения, ЭДС и сопротивления, можно получить зависимости $\eta(I)$, $\eta(U)$, $\eta(R)$ в явном виде.

Практическая часть

Внимание!!! Перед сборкой схем необходимо убедиться, что пакетный выключатель стенда находится в положении "отключено", а неоновые индикаторы напряжения стенда не горят!

1) Собрать схему, изображенную на рис. 2.4, где ЛАТР – лабораторный автотрансформатор типа РНШ (регулятор напряжения школьный); D_1 – диод на панели блока диодов и постоянных источников напряжения; R_1 , R_3 – резисторы и B_2 и B_3 – тумблеры (ключи), находящиеся на панели блока резисторов; ламповый реостат "АХ", "ВУ", "СЗ". V – вольтметр с пределами измерения 75 – 600 В (использовать предел измерения на 150 В), A – амперметр с пределом измерения 0.25 – 1 А, W – ваттметр с пределами измерения по току 1 А. Контакты, к которым присоединен вольтметр, можно считать клеммами источника ЭДС E_1 . Сопротивления R_1 , R_3 являются основной частью внутреннего сопротивления источника E_1 .

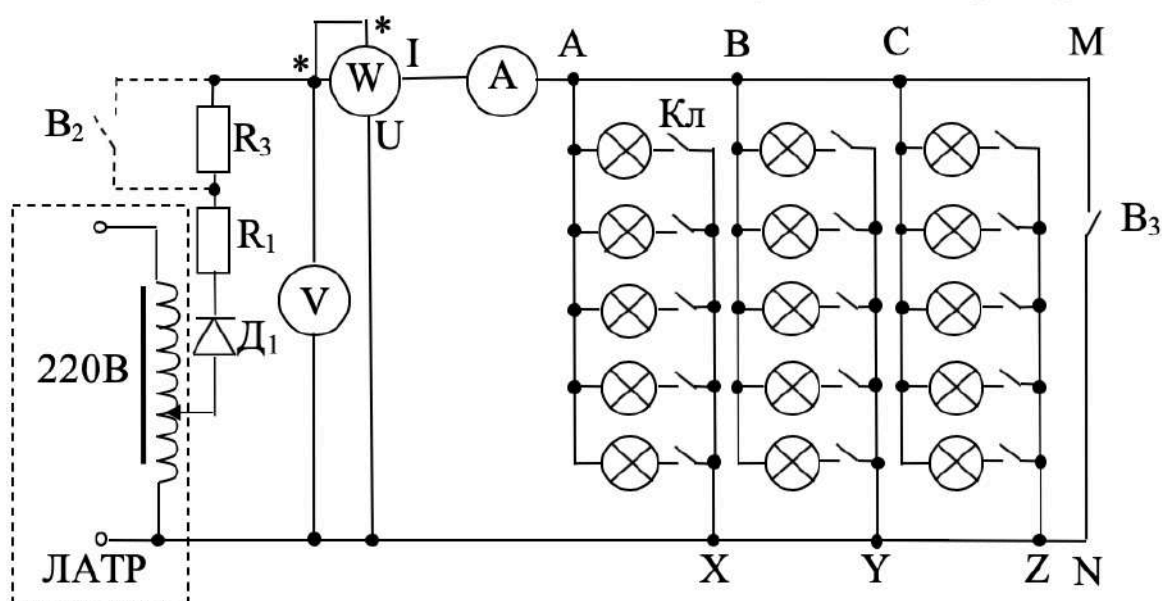


Рис. 2.4. Рабочая схема для выполнения задания

2) Привести схему в начальное состояние: пакетный выключатель должен находиться в положении «выключен», тумблеры B_2 , B_3 должны быть установлены в положение "отключено". Ручку ЛАТРа поверните против часовой стрелки до упора. После получения разрешения преподавателя или лаборанта на проведение работы, вставьте вилку ЛАТРа в гнезда 127 В или 220 В на стенде. Включить стенд.

3) Провести опыт холостого хода (определение ЭДС E). Для этого переключением пакетного выключателя в положение «включено» подайте напряжение на стенд. Ручкой ЛАТРа установите напряжение 100 В. Если сопротивление вольтметра много больше внутреннего сопротивления источника, то можно считать, что $E = U$.

4) Работа источника под нагрузкой. Меняя постепенно сопротивление нагрузки с помощью лампового реостата от бесконечности (все лампы отключены, $I = 0$) до минимального значения (все лампы включены) с помощью тумблеров K_1 , снять внешнюю характеристику генератора $U(I)$ для 12-15 точек. Из 3-5 точек определите среднее внутреннее сопротивление источника. В таблицу 2.1 необходимо занести результаты опытов, выполненных в пунктах 3, 4, 5.

5) Провести опыт короткого замыкания (определение $I_{кз}$). Для этого тумблером B_3 замкнуть накоротко сопротивление нагрузки и снять показания амперметра. Определите внутреннее сопротивление источника, используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания. Сравните это значение с полученным в пункте 4.

Таблица 2.1.

Число ламп	Измерить			Вычислить				
	I, А	U, В	P _н , Вт	P _п , Вт	P _г , Вт	R, Ом	r, Ом	η
0								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
К.З.								

6) Провести вышеуказанные измерения для включенного ключа В₂, при этом внутреннее сопротивление источника будет соответствовать R₁. Заполнить таблицу 2.1 для этого случая.

7) Построить на одном графике зависимости $U(I)$, $P_n(I)$ (полезной мощности), $P_{п}(I)$ (полной мощности), $P_r(I)$ (потерянной мощности), $\eta(I)$.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные параметры источника тока.
2. Что называется номинальным током источника?
3. Как определить ЭДС источника E ?
4. Как определить внутреннее сопротивление r источника?
5. Как напряжение на зажимах источника U зависит от тока I ?
6. Какие условия должны выполняться, чтобы при измерении вольтметром получить $U = E$?
7. Чему равно U источника при токе короткого замыкания?

8. Каково соотношение между U и E источника при работе его в режиме генератора?
9. Укажите зажимы исследуемого источника в схеме на рис.2.4.
10. Объясните назначение ключа B_2 в схеме на рис.2.4.

Упражнения для самостоятельной работы

1. Аккумулятор с ЭДС $E = 6,0$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,1$ Ом питает внешнюю цепь с сопротивлением $R = 11,9$ Ом. Какое количество теплоты Q выделится во всей цепи за время $t = 10$ мин?
2. Разность потенциалов в сети зарядной станции равна 20 В. Внутреннее сопротивление аккумулятора, поставленного на зарядку, равно 0,8 Ом; в начальный момент времени его остаточная ЭДС равна 12 В. Какая мощность будет расходоваться станцией на зарядку аккумулятора при этих условиях? Какая часть этой мощности будет расходоваться на нагревание аккумулятора?
3. При подключении вольтметра сопротивлением $R_V = 200$ Ом непосредственно к зажимам источника он показывает $U = 20$ В. Если же этот источник замкнуть на резистор сопротивлением $R = 8$ Ом, то сила тока в цепи $I = 0,5$ А. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление источника.
4. Имеется три источника с равными ЭДС $E_1 = E_2 = E_3$, но разными внутренними сопротивлениями $r_1 = 10$ Ом, $r_2 = 20$ Ом, $r_3 = 40$ Ом. Какой источник следует выбрать, чтобы на плитке $R = 20$ Ом выделялась наибольшая мощность?
5. Найти внутреннее сопротивление и ЭДС источника тока, если при силе тока 30 А мощность во внешней цепи равна 180 Вт, а при силе тока 10 А эта мощность равна 100 Вт.
6. Два элемента с внутренним сопротивлением 0,2 Ом и 0,4 Ом соединены одинаковыми полюсами. Напряжение на зажимах элементов равно 1,5 В. ЭДС первого элемента 1,2 В. Найти ЭДС второго элемента.
7. К источнику тока с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 2 Ом подсоединили параллельно два проводника сопротивлением 10 Ом и 50 Ом. Найти напряжение на зажимах источника.

8. Источник тока с внутренним сопротивлением $1,5\ \Omega$ замкнут на резистор $1,5\ \Omega$. Когда в цепь последовательно включили второй источник с ЭДС, равной ЭДС первого, то сила тока в цепи не изменилась. Каково внутреннее сопротивление второго источника?
9. Источник тока с ЭДС $5\ \text{В}$ замыкается один раз на сопротивление $4\ \Omega$, а другой раз – на $9\ \Omega$. В обоих случаях на внешнем сопротивлении выделяется одинаковая мощность. Найти эту мощность.
10. Девять нагревательных элементов с сопротивлением $1\ \Omega$ каждый соединены по три последовательно в три параллельные ветви. ЭДС источника $10\ \text{В}$, внутреннее сопротивление $1\ \Omega$. Какая мощность выделяется во внешней цепи?

Лабораторная работа №3

Исследование цепей трехфазного тока

Цель работы: изучить особенности работы трехфазных сетей для случая подключения потребителей звездой, приобрести навыки измерения токов, напряжений, мощностей в трехфазной системе.

Сведения из теории

Занимаясь усовершенствованием методов передачи и применения переменного тока, Н. Тесла предложил двухфазную систему, в которой одновременно действовали два тока одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутые по фазе на 90° друг относительно друга. Такая система имела ряд преимуществ по сравнению с однофазной. Им же была разработана шестифазная система, однако более совершенной оказалась трёхфазная система, теоретически обоснованная и реализованная на практике русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским. В такой системе одновременно действуют три напряжения равной частоты и амплитуды, но сдвинутые по фазе на 120 градусов друг относительно друга. Трёхфазные системы имеют ряд достоинств по сравнению с однофазными и двухфазными:

- 1) простота конструкции генераторов и двигателей;
- 2) большая экономия при транспортировке энергии на большие расстояния (масса проводов снижается на $20 - 30 \%$);
- 3) возможность получения двух напряжений – линейных и фазных в одной и той же трехфазной системе.

На рис. 3.1 показаны схематическое устройство трехфазного генератора и графики зависимостей от времени напряжений в каждой из обмоток. Начала обмоток обозначены буквами А, В и С, концы обмоток буквами Х, Y и Z. Каждая из действующих ЭДС E_i находится в своей фазе периодического процесса, поэтому их часто называют просто «фазой». Также «фазами» называют проводники – носители этих ЭДС.

Если фазы обмотки генератора электрически не соединены между собой, то они образуют несвязанную трехфазную систему. При этом каждая из фаз генератора соединена со своим приемником двумя проводами. Такая система практически не применяется ввиду ее неэкономичности – требуется шесть проводов. Более экономичные – связанные системы, в которых фазы обмотки генератора соединены между собой.

При таком соединении концы обмоток генератора, Х, Y, Z соединяют в общую точку О, называемую нейтральной точкой (или просто –

нейтралью). Начала фаз подведены к зажимам А, В, С, затем к ним подключают провода, которые соединяют генератор с приемником энергии. Эти провода называются «линейными», а трехфазная цепь – «трехпроводной». Если нейтральная точка О генератора соединена с нейтральной точкой О' приемника отдельным проводом, то трехфазная система будет называться «четырёхпроводной».

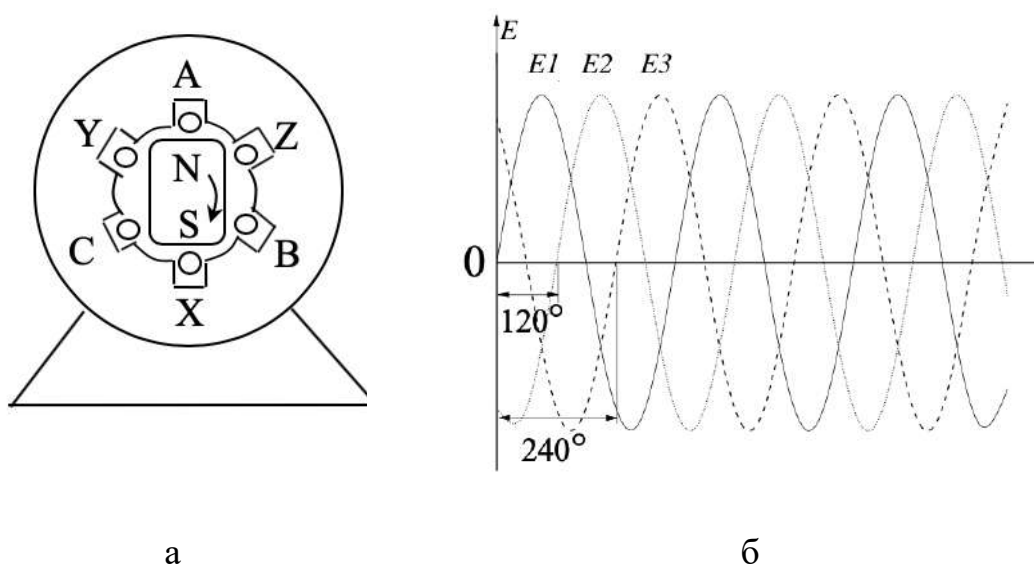


Рис 3.1. Схематическое устройство трехфазного генератора (а) и форма напряжений в каждой фазе (б)

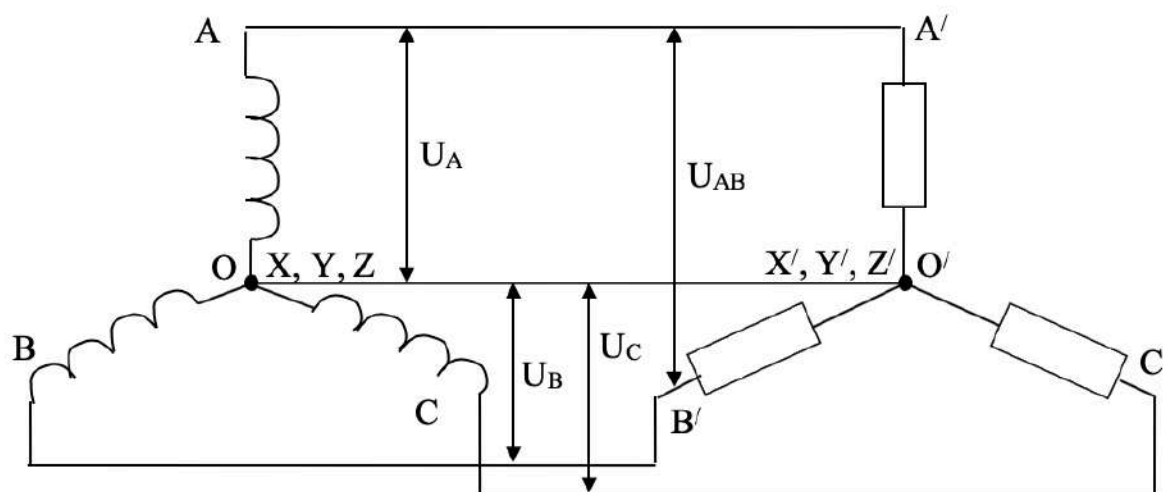


Рис. 3.2. Четырёхпроводная трехфазная система (соединение звездой)

При соединении фаз генератора треугольником (рис. 3.3) фазы источника соединяются последовательно: X-B, Y-C, Z-A. Такое соединение не равносильно короткому замыканию, так как при симметричной

системе напряжений сумма их мгновенных значений равна нулю. Поэтому в режиме холостого хода (потребитель отсутствует) ток в фазах генератора равен нулю.

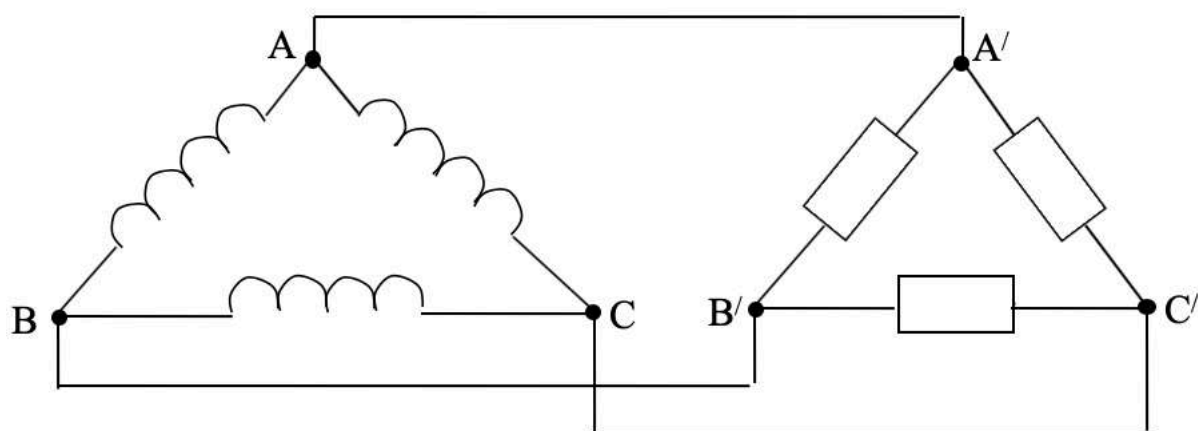


Рис. 3.3. Трехфазная цепь. Соединение треугольником

Рассмотрим более подробно соединение звездой в трехфазных цепях.

Напряжение на отдельных фазах, т.е. между нулевым проводом (проводом, который соединяет концы обмоток генератора и нагрузок) и линейным, называется фазным и обозначается соответственно U_A , U_B , U_C . Напряжение между линейными проводами называется линейным и обозначается U_{AB} , U_{BC} , U_{AC} . Ток, текущий по отдельной фазе, называется фазным, ток, текущий по линейному проводу, называется линейным. В случае соединения звездой (рис. 3.2) фазный ток равен линейному:

$$I_{\phi} = I_{\text{л}}. \quad (3.1)$$

Мгновенное значение тока, протекающего по нулевому проводу, равно алгебраической сумме мгновенных значений токов в отдельных фазах:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (3.2)$$

Если нагрузка симметричная, т.е. сопротивления в фазах равны ($Z_A = Z_B = Z_C$) и сдвиги фаз между фазными напряжениями и фазными токами одинаковы ($\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$), то ток в нулевом проводе отсутствует. Данный факт хорошо иллюстрирует векторная диаграмма, изображенная на рис. 3.4.

Если сложить вектора токов, то видно, что их сумма равна нулю. При неоднородной или несимметричной нагрузке (различны и/или токи в

фазах или сдвиги фаз токов) сумма векторов фазных токов не равна нулю. В этом случае по нулевому проводу будет протекать ток. Величина данного тока определяется векторной суммой фазных токов. Ток в нулевом проводе зависит от неравномерности нагрузки фаз. Как правило, этот ток меньше фазных токов и поэтому нулевой провод изготавливают с меньшим сечением по сравнению с линейными проводами.

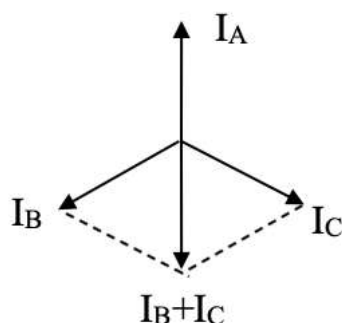


Рис. 3.4. Векторная диаграмма токов в четырехпроводной системе в случае симметричной нагрузки

Одним из предельных случаев неравномерности нагрузки фаз в четырехпроводной системе можно считать обрыв линейного провода или отключение нагрузки на одной из фаз. При этом ток в нулевом проводе I_0 определяется как векторная сумма токов двух других. Другим предельным случаем неравномерной нагрузки является короткое замыкание в одной из фаз. Этот режим считается аварийным и на практике не допускается (срабатывает защитный автомат).

В рассмотренной четырехпроводной системе при различных изменениях нагрузки на отдельных фазах действующие значения напряжений на фазах нагрузки благодаря нулевому проводу остаются неизменными и равны фазным напряжениям на генераторе (падением напряжения на линейном проводе можно пренебречь). Из векторной диаграммы напряжений (рис. 3.4) можно вывести соотношений между фазными и линейными напряжениями. Из рис. 3.5 видно, что соотношение между линейными и фазными напряжениями имеет вид:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \cdot \sqrt{3}. \quad (3.3)$$

ГОСТом предусмотрено номинальные напряжения 380/220 В или 220/127 В, где числитель – линейное напряжение, а знаменатель – фазное.

Четырехпроводное соединение звездой обладает следующими двумя преимуществами:

1) данный вид соединения позволяет использовать два напряжения генератора – фазное и линейное;

2) нулевой провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при любом изменении фазных нагрузок.

Если в четырехпроводной цепи отключить (или оборвать) нулевой провод, то цепь становится трехпроводной. В этом случае значения фазных напряжений сильно зависят от соотношений проводимостей каждой из фаз. Например, в случае короткого замыкания в фазе А фазы В и С оказываются под линейными напряжениями U_{AB} и U_{AC} соответственно (рис. 3.6).

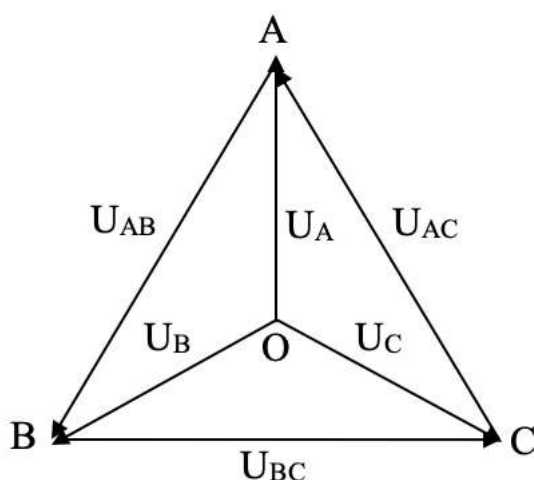


Рис. 3.5. Векторная диаграмма напряжений трехфазной сети при соединении звездой

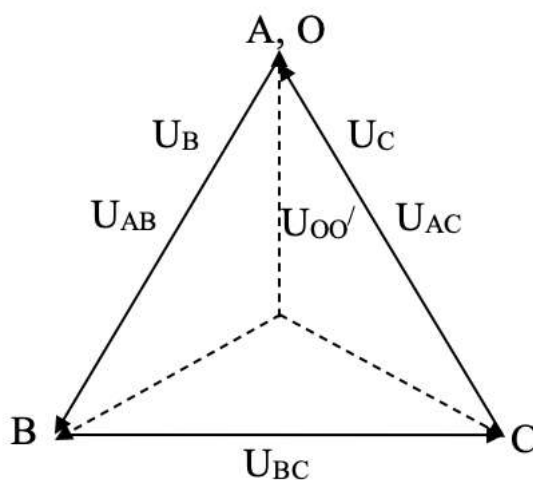


Рис. 3.6. Векторная диаграмма для трехпроводной цепи в случае короткого замыкания в фазе А

Из данного рисунка видно, что в случае короткого замыкания фазы А точка О сместится в точку А ($U_a = 0$), а вектора ОВ (U_B) и ОС (U_C) совпадут соответственно с векторами АВ (U_{AB}) и АС (U_{AC}). Напряжение смещения $U_{OO'}$, которое является разностью потенциалов между общей точкой фаз нагрузок и потенциалом общей точки генератора, в данной ситуации будет равно фазным напряжениям, которые имели бы место быть, если бы нагрузка в данной трехпроводной цепи была бы симметричной.

Нарисуем векторную диаграмму для случая неравномерной нагрузки, т.е. $Y_A \neq Y_B \neq Y_C$ для трехпроводной цепи (рис.3.7):

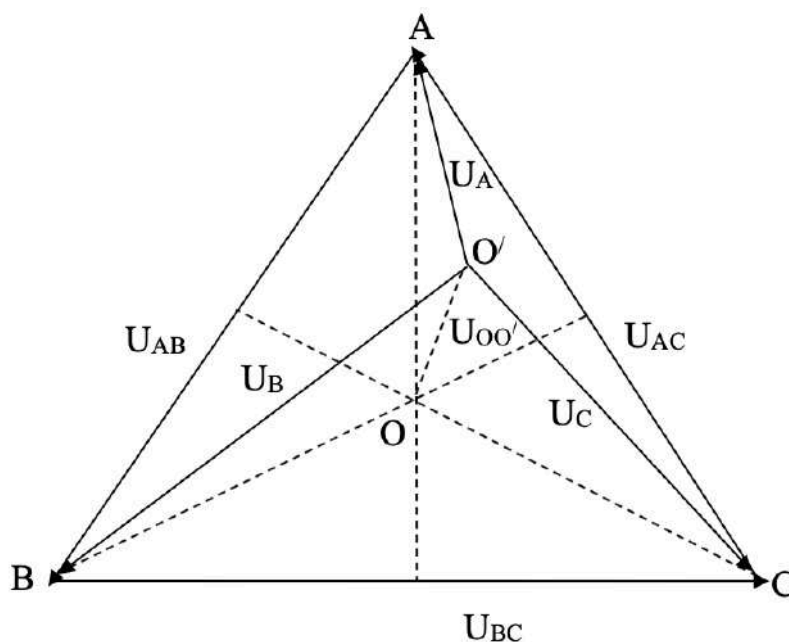


Рис. 3.7. Векторная диаграмма напряжений для трехпроводной цепи для случая неравномерной нагрузки

В случае наличия реактивной нагрузки в данном типе цепи точка O' может оказаться и за пределами треугольника, что может привести к возникновению фазных напряжений больших, чем линейные. При любой неравномерности активных нагрузок точка O' будет находиться внутри треугольника ABC. Расчет напряжения смещения $U_{OO'}$ в общем случае производится по формуле:

$$U_{OO'} = \frac{U_A \cdot Y_A + U_B \cdot Y_B + U_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (3.4)$$

где U_A, U_B, U_C — комплексные фазные напряжения, Y_A, Y_B, Y_C — комплексные проводимости фаз.

Рассмотрим далее методы измерения мощности в трехфазных системах. Активная мощность в трехфазных сетях равна сумме активных

мощностей в отдельных фазах (для обозначения фаз кроме букв А, В, С могут применяться цифры 1, 2, 3 соответственно). Таким образом, можно записать:

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3. \quad (3.5)$$

Аналогичные соотношения справедливы для реактивной (Q) и полной мощностей (S):

$$Q_{3\phi} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad S_{3\phi} = S_1 + S_2 + S_3. \quad (3.6)$$

Активная мощность в каждой фазе зависит от величины тока I_ϕ , напряжения U_ϕ , сдвига фаз между ними и определяется также, как и для однофазной нагрузки:

$$P_{\phi n} = I_{\phi n} U_{\phi n} \cos \varphi_{\phi n} \quad (3.7)$$

Таким образом, в общем случае, активная мощность трехфазной нагрузки может быть выражена через действующие значения фазных токов и фазных напряжений в следующем виде:

$$P_{3\phi} = I_1 U_1 \cos \varphi_1 + I_2 U_2 \cos \varphi_2 + I_3 U_3 \cos \varphi_3 \quad (3.8)$$

В случае симметричной нагрузки, независимо от способа соединения (звездой или треугольником) активная мощность во всей трехфазной сети в 3 раза больше, чем активная мощность одной фазы:

$$P_{3\phi} = 3 \cdot P_\phi. \quad (3.9)$$

В этом случае $P_{3\phi}$ можно определить с помощью одного ваттметра, измеряющего мощность в любой из трех фаз. При соединении потребителя звездой ваттметр включается по схеме, изображенной на рис. 3.8.

В случае несимметричной нагрузки в четырехпроводной системе (соединение звездой) мощность трехфазного тока может быть измерена с помощью трех ваттметров, измеряющих мощность в каждой фазе (рис. 3.9):

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (3.10)$$

В трехпроводной системе (соединение звездой) мощность $P_{3\phi}$ может быть измерена с помощью двух ваттметров (метод Арена), при этом сумма показаний данных двух ваттметров равна общей активной мощности $P_{3\phi}$ системы. Для этого токовые обмотки ваттметров подключаются в разрывы линейных проводов, а их «вольтовые» обмотки подключаются между «своей» линией и оставшейся третьей (рис. 3.10).

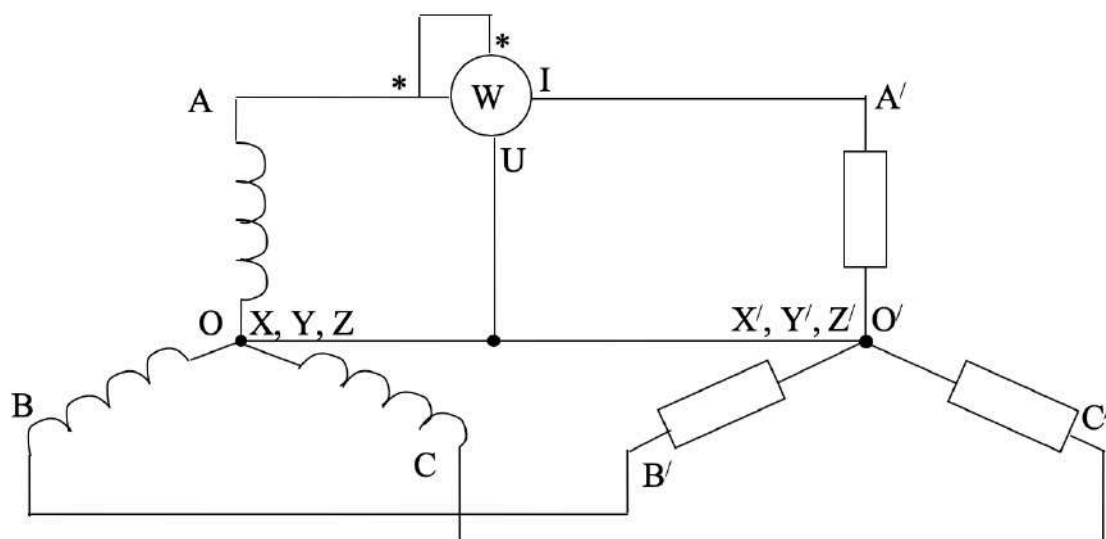


Рис. 3.8. Включение ваттметра в трехфазную цепь при соединении звездой

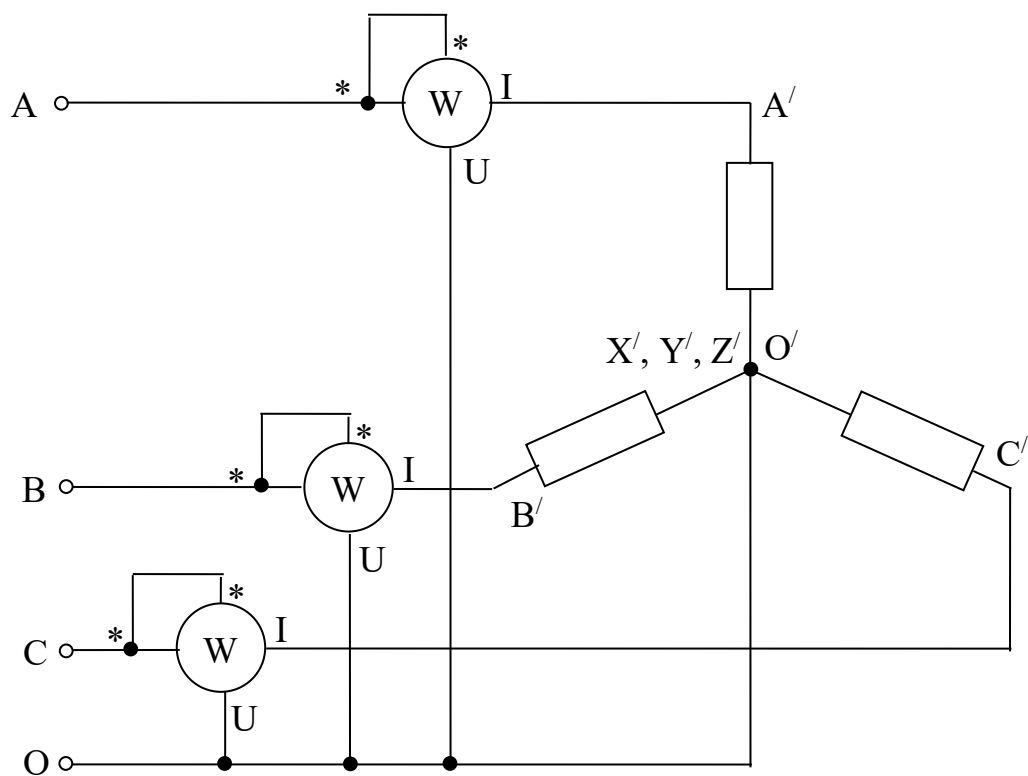


Рис. 3.9. Измерение мощности в трехфазной сети методом трех ваттметров

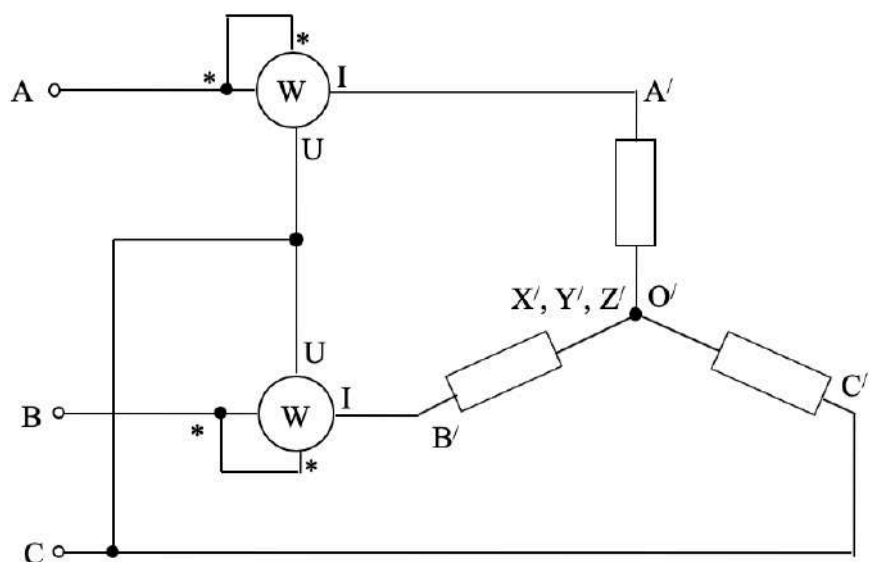


Рис. 3.10. Измерение мощности трехфазной сети методом двух ваттметров

Практическая часть

Задание I. Исследование работы трехфазных цепей – соединение звездой.

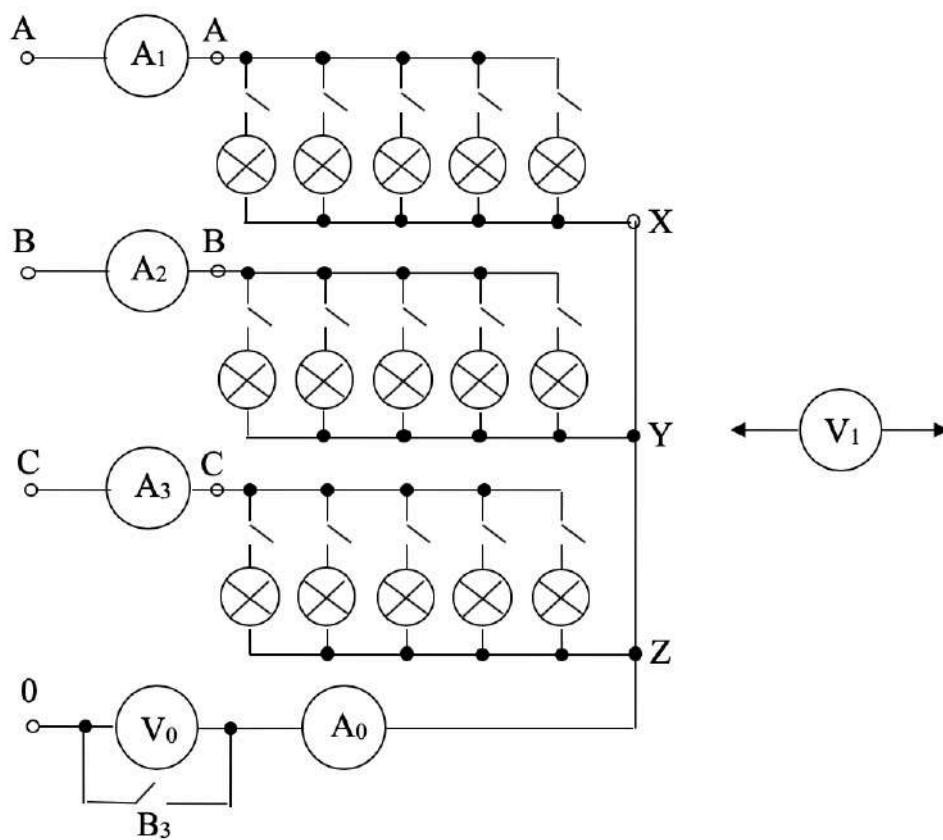


Рис. 3.11. Рабочая схема для исследования соединения звездой

Приборы и оборудование: A_1, A_2, A_3, A_0 – амперметры с пределами измерений 0.25 – 1 А, V_1, V_0 – вольтметры с пределами измерений 75 – 600 В, ламповый реостат, конденсатор переменной емкости на блоке конденсаторов.

В качестве нагрузки, берутся элементы с активным (лампы накаливания блока ламповых реостатов с клеммами соответственно фазам А-Х, В-У, С-З) или реактивным (катушка индуктивности, конденсатор) сопротивлением. Потребители, соединенные звездой, подключаются к клеммам А, В, С, 0 электрогенератора трехфазного тока. Измеряются U_ϕ и U_λ , I_ϕ и I_λ в режимах симметричной и несимметричной нагрузки, по данным опытов строятся топографические диаграммы.

1) Подобрать электроизмерительные приборы. Собрать электрическую цепь (рис. 3.11), представить ее для проверки.

2) В четырехпроводной системе создать симметричную активную нагрузку. Произвести первое измерение, результаты занести в таблицу 3.2. Таблицы 3.1 и 3.2 стоит заполнять одновременно: когда ключ ВЗ замкнут – четырехпроводная система, разомкнут – трехпроводная система.

Таблица 3.1.

Параметры	Режим нагрузки 1			Режим нагрузки 2			Режим нагрузки 3			Режим нагрузки 4			Режим нагрузки 5		
	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c
Фазы															
Число ламп	3	3	3	1	3	5	3	3	0	3	3	к.з	3	3	С
I_ϕ , А															
I_λ , А															
U_ϕ , В															
U_λ , В															
U_{00} , В															
I_{00} , А															

3) В четырехпроводной цепи создать несимметричную (активную) нагрузку и провести намерения.

4) При тех же условиях и характере нагрузок произвести измерения в трехпроводной системе.

Таблица 3.2.

Параметры	Режим нагрузки 1			Режим нагрузки 2			Режим нагрузки 3			Режим нагрузки 4		
	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c	Z_a	Z_b	Z_c
Фазы												
Число ламп	3	3	3	1	3	5	3	3	0	3	3	С
I_{ϕ} , А												
I_L , А												
U_{ϕ} , В												
U_L , В												
U_{00} , В												
I_{00} , А												

5) В двух фазах создать равномерные активные нагрузки, а в третью фазу подключить L или C (по указанию преподавателя). Провести измерения в трехпроводной и четырехпроводной системах.

6) В отчете к данному заданию лабораторной работы необходимо построить векторные диаграммы в выбранном масштабе (длину стороны треугольника брать не менее 5 см) для всех режимов работы: 4 диаграммы для четырехпроводной системы и 4 – для трехпроводной системы.

Примечание: Векторные диаграммы следует строить следующим образом. Сначала строится в масштабе треугольник линейных напряжений. Линейные напряжения задаются источником, поэтому они во всех случаях неизменны. Вершины треугольника обозначаются соответственно А, В, С. Далее на соответствующую вершину треугольника ставится игла циркуля, при этом расстояние от иглы циркуля до его карандаша соответствует фазному напряжению. Затем проводится дуга. Другие две дуги чертятся аналогично. Точка пересечения трех дуг и будет точкой O' . От точки O' к вершинам треугольника проводятся вектора, они и будут векторами соответствующих фазных напряжений. Расстояние от точки O (центра треугольника) до точки O' будет соответствовать напряжению смещения $U_{00'}$ (см. рис. 3.7). Далее, если нагрузка активная, то от точки O' вдоль векторов фазных напряжений откладываются вектора фазных токов. Если нагрузка в фазе реактивная или смешанная, то, соответственно вектора фазных токов откладываются относительно векторов фазных напряжений на угол сдвига фаз. В случае четырехпроводной системы следует произвести сложения трех векторов фазных токов. Результат сложения этих векторов будет соответствовать току в нулевом проводе.

Задание II. Измерение мощности трехфазных цепей. Соединение звездой.

Приборы и оборудование: W_1 , W_2 , W_3 – ваттметры с пределами измерений по току 1 – 2 А, ламповый реостат.

Для симметричной нагрузки, соединенной звездой, для определения полной мощности достаточно включить в цепь один (одноэлементный) ваттметр, например, W_1 : токовая обмотка ваттметра включается в разрыв цепи, последовательно с фазовой нагрузкой, а обмотка по напряжению – параллельно фазовой нагрузке. При этом клеммы * подключаются со стороны генератора. Тогда полная активная мощность равна $3W_1$. При несимметричной нагрузке полную мощность можно определять по схеме 3-х ваттметров (рис. 3.12) $W=W_1+W_2+W_3$.

Если при измерении стрелка одного из ваттметров отклоняется влево от нуля, то необходимо с помощью переключателя, расположенного на панели прибора, изменить направление отклонения стрелки.

1) Собрать цепь (рис. 3.12), выставить во всех фазах равномерную активную нагрузку. Представить цепь для проверки.

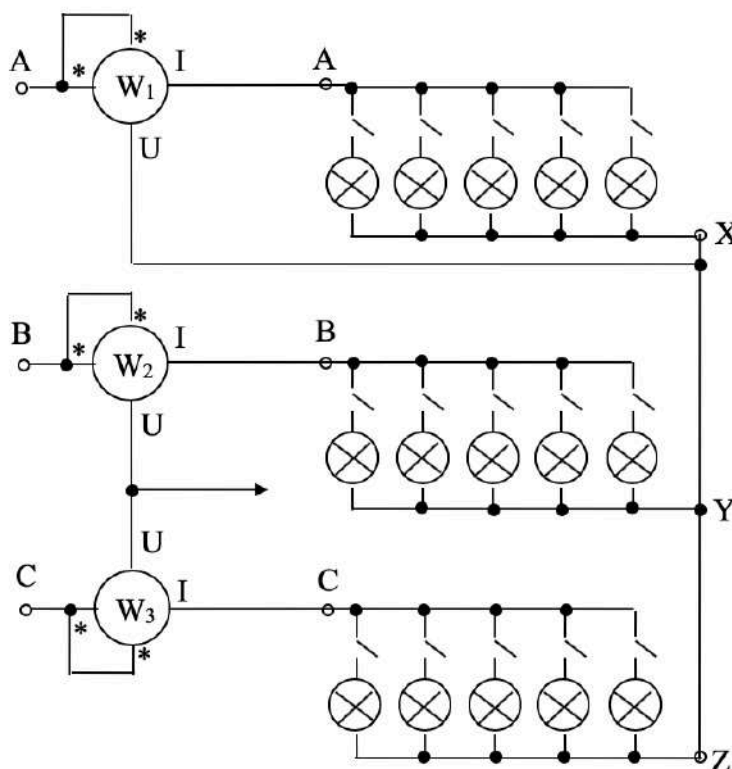


Рис. 3.12. Измерение мощности в трехфазной сети методами двух и трех ваттметров

2) Произвести измерения параметров цепи в различных режимах, согласно таблице 3.3. В качестве отчета к заданию предоставить заполненную таблицу 3.3.

Таблица 3.3.

Методы измерений	Метод трех ваттметров			Метод трех ваттметров			Метод двух ваттметров			Метод двух ваттметров		
Число ламп	3	3	3	1	3	5	3	3	3	1	3	5
Параметры	W_1	W_2	W_3	W_1	W_2	W_3	W_2	W_3		W_2	W_3	

Контрольные вопросы

1. Какое соединение потребителей называется звездой и каковы при этом соотношения между токами и между напряжениями при равномерной нагрузке?
2. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при равномерной и неравномерной нагрузках с нулевым проводом и без него?
3. Какова роль нулевого провода при четырехпроводной системе?
4. В каком случае и почему отсутствует ток в нулевом проводе?
5. Почему на нулевой провод не ставят предохранитель?
6. Какие особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при неравномерной нагрузке фаз с нулевым проводом и без него?
7. Какие особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при обрыве линейного провода в трехпроводной и четырехпроводной системе?
8. Когда возникает короткое замыкание одной из фаз и каковы особенности этого режима с нулевым проводом и без него?
9. Какие достоинства имеет соединения потребителя звездой?
10. Может ли напряжение на фазе превышать линейное?

11. Может ли отсутствовать ток в нулевом проводе при несимметричной нагрузке?
12. К каким последствиям приводит появление U_{00} ?
13. Отличается ли измеренная прибором величина U_{00} от той же величины, найденной из соответствующей топографической диаграммы?
14. Какие соотношения существует между I_L и I_Φ при $U_{00}=0$ и $U_{00}>0$?
15. Какие соотношения существуют между U_L и U_Φ , (при $U_{00}>0$)?
16. В каких проводах трехфазной системы включаются предохранительные устройства и почему?
17. В каких случаях можно работать без нулевого провода?
18. При соединении звездой (четырёхпроводная система) амперметры в отдельных фазах показывают по 5 А. Может ли при этом идти ток в нулевом проводе? Каково может быть его наибольшее значение?
19. Может ли в нулевом проводе протекать ток больший самого большого из фазных?
20. Как вычисляется активная, реактивная и полная мощность трехфазного тока при соединении потребителей звездой при равномерной нагрузке?
21. Как измеряется мощность в цепи трехфазного тока при четырёхпроводной системе?

Упражнения для самостоятельной работы

1. Мгновенное значение напряжения в фазе А равно $u_A = 311 \sin(\omega t - 60^\circ)$. Запишите выражения для мгновенных значений напряжения в фазах В и С. Определите действующие значения напряжений на каждой из фаз.
2. В четырёхпроводной трехфазной цепи линейное напряжение равно 380 В. Сопротивления фаз равны соответственно 10 Ом, 10 Ом и 20 Ом. Определите значение тока, протекающего по нулевому проводу.
3. Три одинаковые лампы мощностью 60 Вт включены в каждую фазу четырёхпроводной сети с линейным напряжением 380 В. Чему будет равна сила тока в нулевом проводе, если перегорит одна из ламп?
4. В трехпроводной трехфазной цепи с симметричной нагрузкой, соединенной звездой, и линейным напряжением 380 В перегорел предохранитель в фазе С. Чему будут равны напряжения на фазах А и В?

5. В трехпроводной трехфазной цепи с симметричной нагрузкой по 100 Ом в каждой фазе, соединенной звездой, и фазным напряжением 220 В закоротилась нагрузка на фазе С. Чему будут равны напряжения на оставшихся фазах?
6. Три лампы мощностью по 100 Вт включены в трехфазную сеть с напряжением 220 В по схеме звездой. Определите величину линейных токов.
7. К трехфазному генератору, обмотки которого соединены по схеме звезда, подключена равномерная нагрузка, соединенная по той же схеме, через линию, обладающую активным сопротивлением $R = 2$ Ом и индуктивностью $L = 16$ мГн. Полное сопротивление нагрузки в каждой фазе $Z = 80$ Ом (конденсатор емкостью $C = 53$ мкФ с последовательно включенным резистором). Определить действующее значение напряжения в нагрузке, если линейное напряжение генератора $U = 380$ В при частоте $f = 50$ Гц. Построить векторную диаграмму токов и напряжений. Освещение здания питается от четырехпроводной трехфазной сети с линейным напряжением $U_L = 380$ В. Первый этаж питается от фазы "А" и потребляет мощность 1760 Вт, второй – от фазы "В" и потребляет мощность 2200 Вт, третий – от фазы "С", его мощность 2640 Вт. Составить электрическую схему цепи, рассчитать токи, потребляемые каждой фазой, и ток в нейтральном проводе, вычислить активную мощность всей нагрузки. Построить векторную диаграмму.
8. К источнику трехфазной сети с линейным напряжением 380 В и частотой 50 Гц подключена равномерная нагрузка, соединенная по схеме звезда, с полным сопротивлением в фазе 90 Ом и индуктивностью 180 мГн. Определить активную, реактивную и полную мощности, действующие значения линейного тока и напряжения. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.
9. Несимметричный потребитель, соединенный звездой, подключен к трехфазному источнику с линейным напряжением 380 В. Исходные данные приведены в таблице 3.4, где положительные реактивные сопротивления имеют индуктивный характер, отрицательные – емкостной.
Начертить электрическую схему к задаче, в которой предусмотреть три (для четырехпроводной сети) или два (для трехпроводной сети) ваттметра для измерения активной мощности, отдаваемой

источником в нагрузку. Рассчитать фазные токи потребителей, сдвиги их по фазе по отношению к своим напряжениям и активные мощности. Построить в масштабе для каждого потребителя векторную диаграмму и определить расчетом или графически линейные токи и ток в нейтрали (если она есть). Построить в масштабе векторную диаграмму для схемы в целом, на которой показать все линейные токи. Определить графически линейные токи источника и сдвиги их по фазе по отношению к соответствующим фазным напряжениям; для схемы с двумя ваттметрами определить сдвиги по фазе их токов по отношению к их напряжениям. Используя результаты этих расчетов, найти показания ваттметров и сравнить их сумму с суммой активных мощностей потребителей.

Таблица 3.4.

Вариант	Симметр. потр. (звезда)	
	$Z_A = Z_B = Z_C$	
	R, Ом	X, Ом
1	-	-40
2	30	-
3	-	22
4	17	17
5	16	-11

Лабораторная работа №4

Изучение однофазного трансформатора

Цель работы: изучить устройство и принцип работы однофазного трансформатора, а также методы его испытания.

Сведения из теории

Трансформатором называется устройство, в котором переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения. Трансформатор является устройством обратимым и может служить как для увеличения (повышающий трансформатор) так для уменьшения (понижающий трансформатор) напряжения.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Обычно трансформатор состоит из двух изолированных друг от друга обмоток, размещённых на стальном замкнутом сердечнике (рис. 4.1).

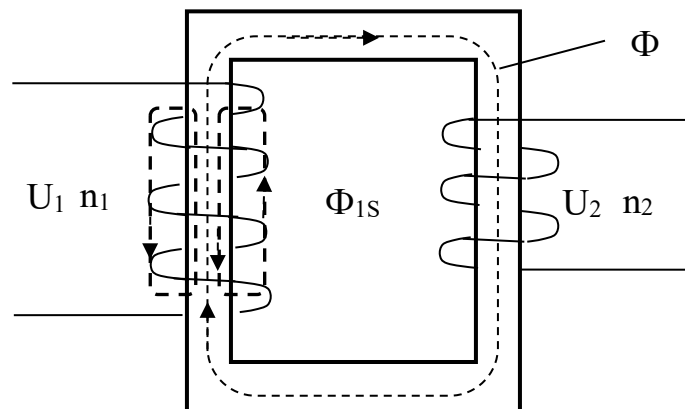


Рис. 4.1. Принципиальная схема однофазного трансформатора

Если одну обмотку (первичную) подключить к сети переменного синусоидального напряжения $U = U_0 \sin(\omega t)$, то по обмотке будет протекать переменный ток i_1 . Этот ток создает в стальном сердечнике переменный поток Φ , который, пронизывая первичную и вторичную обмотки, создает в каждой из них переменные электродвижущие силы (ЭДС). Как правило, поток Φ меняется по синусоидальному закону:

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t). \quad (4.1)$$

Величина ЭДС, индуцируемой этим потоком в одном витке первичной обмотки, определяется на основании закона электромагнитной индукции:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi_m \omega \cos(\omega t) = \omega \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4.2)$$

Приняв произведение $\omega \Phi_m$ за амплитудное значение ЭДС в одном витке E_m , имеем:

$$E = E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (4.3)$$

ЭДС E отстаёт по фазе от потока Φ на угол $\frac{\pi}{2}$.

Определим действующее значение ЭДС E_1 в первой обмотке, учитывая, что она имеет n_1 витков:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{E_m n_1}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \Phi_m n_1}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m n_1}{\sqrt{2}} = 4,44 f \Phi_m n_1. \quad (4.4)$$

Таким образом, действующее значение ЭДС E_1 пропорционально частоте f , амплитуде магнитного потока Φ_m и числу витков n_1 .

Аналогично, действующее значение ЭДС во вторичной обмотке E_2 , имеющей число витков n_2 , равно:

$$E_2 = 4,44 f \Phi_m n_2. \quad (4.5)$$

Разделив уравнение 4.4 на уравнение 4.5, имеем:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \quad (4.6)$$

Коэффициент K называется коэффициентом трансформации.

Физический смысл и роль электродвижущих сил E_1 и E_2 в трансформаторе различны. ЭДС E_1 появляется как реакция обмотки на изменение тока в ней, и, являясь ЭДС самоиндукции, противодействует приложенному к обмотке напряжению U_1 . ЭДС E_2 рассматривается как ЭДС источника тока для цепи, присоединяемой к вторичной обмотке.

Обычно для исследования трансформатора и для более глубокого понимания явлений, происходящих в нем, работу трансформатора рассматривают в различных режимах: холостой ход, работа под нагрузкой и опыт короткого замыкания.

Режим холостого хода

При режиме холостого хода вторичная обмотка остаётся разомкнутой, а в первичной обмотке при этом идёт ток холостого хода I_0 . Данный ток создаёт магнитный поток. Указанный магнитный поток целесообразно рассматривать состоящим из двух частей: главного магнитного потока Φ , замыкающегося по стальному магнитопроводу и пронизывающего первичную и вторичную обмотки, а также создающего в них ЭДС индукции, и

потока рассеяния Φ_{IS} , частично или полностью проходящего по воздуху, не пронизывающего витки вторичной обмотки и создающего дополнительную ЭДС E_{2S} только в первичной обмотке.

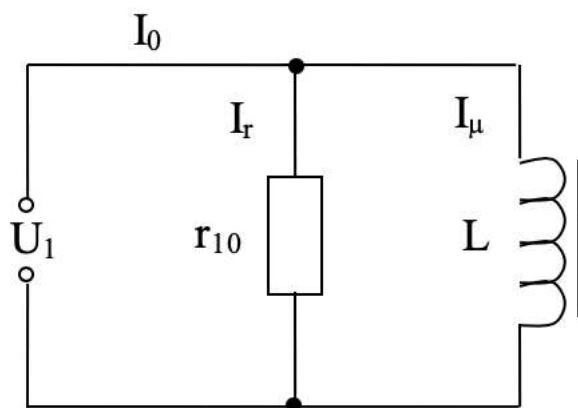


Рис. 4.2. Упрощенная эквивалентная схема трансформатора, работающего в режиме холостого хода

Магнитный поток Φ , проходя по сердечнику, наводит в нём вихревые токи и вызывает перемагничивание железа. При этом происходят активные потери энергии. Можно представить, что эти потери происходят в некотором активном сопротивлении r_{10} (рис. 4.2), присоединённом параллельно некоторой катушке индуктивности L , с которой связан основной поток Φ . Тогда ток I_0 , проходящий по первичной обмотке, можно рассматривать в виде двух составляющих: намагничивающего тока I_μ , проходящего через катушку индуктивности L , и тока I_r , проходящего через сопротивление r_{10} и создающего активные потери, равные потерям в сердечнике. Величина тока I_0 определяется по формуле $I_0 = \sqrt{I_r^2 + I_\mu^2}$, так

как токи I_μ и I_r сдвинуты по фазе на $\frac{\pi}{2}$, поток Φ совпадает по фазе с током I_μ и, следовательно, отстаёт от тока I_0 на некоторый угол α (угол потерь), зависящий от соотношения токов I_μ и I_r . Обычно угол α составляет несколько градусов.

Векторная диаграмма для токов I_μ , I_r , I_0 , магнитного потока Φ и ЭДС E_1 , наведённой потоком Φ , изображена на рис. 4.3. Поток Φ_{IS} мал по сравнению с потоком Φ и практически не создаёт активных потерь энергии, так как проходит в основном по воздуху. Можно считать, что он совпадает по фазе с током I_0 .

Электродвижущая сила самоиндукции, которая создаётся этим потоком в первичной обмотке, отстаёт от потока на $\frac{\pi}{2}$ и пропорциональна ему по величине. Следовательно, можно представить, что трансформатор состоит как бы ещё из одной катушки индуктивности L_{1S} , по которой проходит ток, и создаёт поток Φ_{1S} . Эту индуктивность на эквивалентной схеме следует включить последовательно с разветвлением на L и r . Если к тому же учесть активное сопротивление первичной обмотки r_1 , то получим полную эквивалентную схему первичной обмотки трансформатора (рис. 4.4).

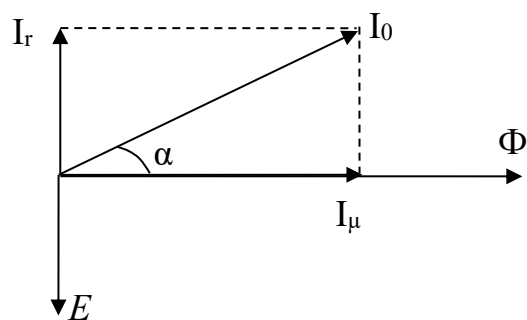


Рис. 4.3. Векторная диаграмма для токов I_μ , I_r , I_0 , магнитного потока Φ и ЭДС E , наведённой потоком

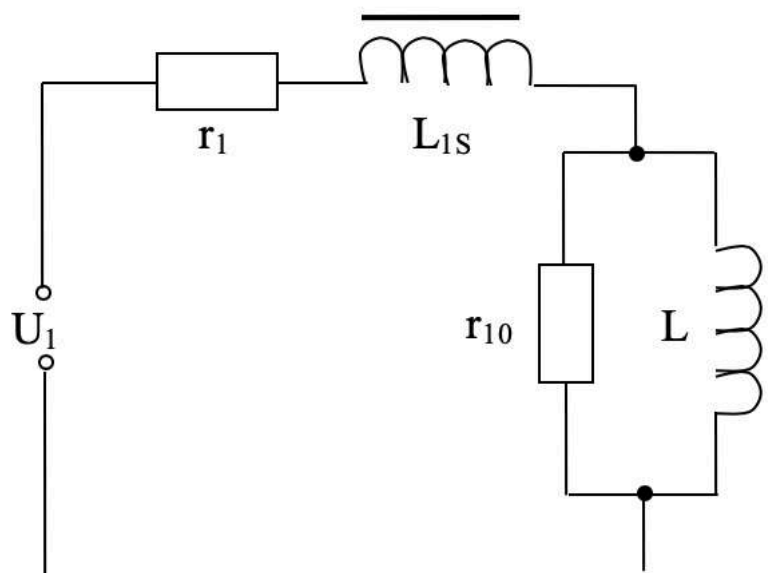


Рис. 4.4. Эквивалентная схема первичной обмотки трансформатора
Напряжение U_1 , приложенное к первичной обмотке, равно векторной сумме:

$$\vec{U}_1 = \vec{I}_0 Z' + \vec{I}_0 r_1 + \vec{I}_0 \omega L_{1S}, \quad (4.7)$$

где $\vec{I}_0 Z'$ – падение напряжения на участке цепи $r_{10}L$, $\vec{I}_0 r_1$ – падение напряжения на активном сопротивлении, $\vec{I}_0 \omega L_{1s}$ – падение напряжения на индуктивном сопротивлении эквивалентной катушки L_{1s} .

Работа трансформатора под нагрузкой

Если вторичную обмотку замкнуть на нагрузочное сопротивление Z_H , то по данной обмотке пойдет ток I_2 . В этом случае для описания работы трансформатора рассматривают три магнитных потока: основной поток Φ , сцепленный с первичной и с вторичной обмотками, поток рассеяния первичной обмотки Φ_{1s} , и поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{2s} . Электродвижущие силы, наводимые потоками рассеяния, учитывают обычно при помощи индуктивных сопротивлений рассеяния первичной L_{1s} и вторичной L_{2s} обмоток. В таком случае трансформатор можно представить в виде эквивалентных схем первичной и вторичной цепей, связанных потоком Φ (рис.4.5).

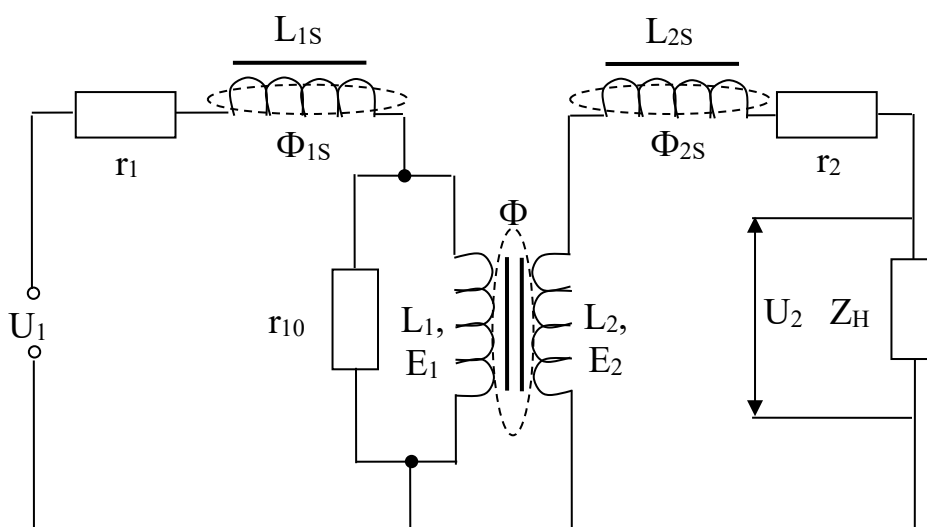


Рис. 4.5. Эквивалентная схема первичной и вторичной цепей трансформатора

Уравнение, выражающее энергетический баланс вторичной цепи, имеет следующий вид:

$$\vec{E}_2 = \vec{U}_2 + \vec{I}_2 r_2 + \vec{I}_2 \omega L_{2s}, \quad (4.8)$$

где r_2 – активное сопротивление вторичной обмотки; ωL_{2s} – реактивное сопротивление (рассеяния) вторичной обмотки, $U_2 = I_2 Z_H$ – напряжение на внешней части вторичной цепи.

В свою очередь, для первичной цепи энергетический баланс выражается уравнением:

$$\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_1 r_1 + \vec{I}_1 \omega L_{1s}, \quad (4.9)$$

которое аналогично уравнению (4.7), только вместо тока холостого хода I_0 в уравнении (4.9) подставлены значения тока I_1 , протекающего в этом случае по первичной обмотке. При изменении величины и характеристики сопротивления нагрузки Z_H изменяется величина тока I_2 и соответствующий ему поток Φ_2 .

Рассмотрим, как значение и фаза тока I_1 зависит от величины тока I_2 . Так как значения r_1 , и x_{1s} малы по сравнению с x_{L1} , то разность $\vec{I}_1 r_1 - \vec{I}_1 x_{1s}$ обычно составляет несколько процентов от U_1 . Вследствие этого можно считать, что отношение $U_1 \approx E_1$, справедливое при холостом ходе, остаётся справедливым (хотя и менее точно) для нагруженного трансформатора. Это в свою очередь означает, что при изменении нагрузки амплитуда основного магнитного потока Φ_m приблизительно постоянна и равна амплитуде магнитного потока в режиме холостого хода. При холостом ходе поток создаётся намагничивающей силой только холостого тока $I_0 n_1$, а так как при нагрузке тот же поток создаётся намагничивающими силами первичного тока $I_1 n_1$ и вторичного тока $I_2 n_2$, то справедливо соотношение:

$$\vec{I}_0 n_1 = \vec{I}_1 n_1 + \vec{I}_2 n_2. \quad (4.10)$$

Разделив все члены последнего равенства на n_1 , получим: $\vec{I}_0 = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \frac{n_2}{n_1}$.

Если ввести понятие приведённого вторичного тока, $I'_2 = I_2 \frac{n_2}{n_1}$ то окончательно получим:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}'_2 = \vec{I}_0, \quad (4.11)$$

то есть векторная сумма первичного тока \vec{I}_1 и приведённого второго \vec{I}'_2 равна току холостого хода \vec{I}_0 . Из равенства (4.9) следует:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 - \vec{I}'_2 = \vec{I}_0 - \vec{I}_2 \frac{n_2}{n_1}. \quad (4.12)$$

Таким образом, изменение величины и фазы тока I_2 , приведёт к изменению величины и фазы тока I_1 .

Так как работа трансформатора принципиально не изменится, если число витков во вторичной обмотке будет равно числу витков в

первичной обмотке ($K = 1$), то обычно для более глубокого понимания явлений, возникающих при работе трансформатора под нагрузкой, рассматривают именно такой трансформатор. Кстати, такие трансформаторы ($K = 1$) применяются на практике для развязки электрических цепей без изменения величины напряжения. Кроме того, для такого трансформатора значительно проще рассчитать его работу при различных нагрузках. Этими преимуществами будет обладать трансформатор с любым коэффициентом трансформации, если его вторичную обмотку «привести» к первичной. С этой целью вместо реального трансформатора с $K \neq 1$, рассматривают «приведённый» трансформатор, то есть трансформатор, у которого число витков во вторичной обмотке стало равно числу витков в первичной обмотке. Так как $E'_2 = E_1$, то для приведённого трансформатора магнитную связь между обмотками можно заметить электрической и вместо схемы, изображенной на (рис. 4.5), можно построить эквивалентную схему приведённого трансформатора (рис. 4.6).

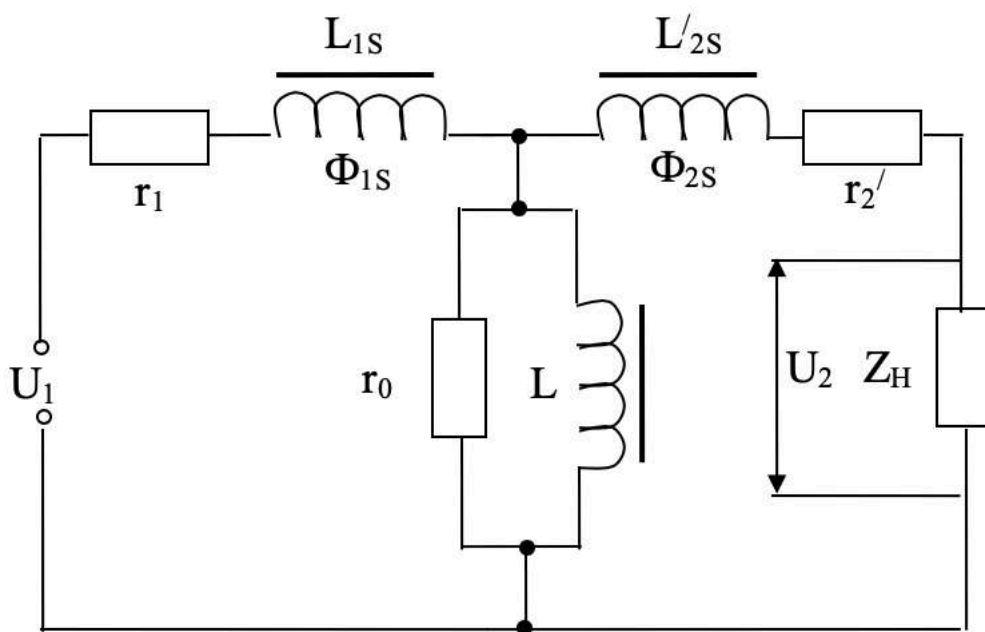


Рис. 4.6. Приведенная схема эквивалентного трансформатора

Отметим, что трансформатор преобразует не только токи и напряжения, но и сопротивления, причем последние в K раз. Поскольку в K раз преобразуются все сопротивления вторичной обмотки, то сдвиг фаз между токами и напряжениями в приведенном трансформаторе не изменяется по сравнению со сдвигами фаз в реальном трансформаторе. При больших нагрузках токи I'_1 и I'_2 будут много больше тока I_0 , и тогда вместо равенства (4.12) будет справедливо приближённое равенство:

$$\vec{I}_1 \approx -\vec{I}'_2. \quad (4.13)$$

Это означает, что при больших нагрузках токи I_1 и I'_2 равны по величине и противоположны по фазе. Поскольку мы пренебрегали током I_0 , то схему (рис. 4.6) можно упростить, исключив из нее сопротивления r_1 и r'_2 . Если к тому же сопротивления r_1 и r'_2 , а также x_{1S} и x'_{2S} заменить на суммарные $r_k = r_1 + r'_2$ и $x_k = x_1 + x'_2$, то можно построить упрощённую схему приведённого трансформатора (рис. 4.7).

На основании этой схемы можно вывести приближённую формулу для определения напряжения U_2 в зависимости от тока нагрузки I_2 . Для этого введём понятие арифметической разности между напряжением при холостом ходе U_{20} и напряжением при нагрузке U_2 , т.е.: $\Delta U_2 = U_{20} - U_2$. Приведенное значение данной разности можно записать в виде: $\Delta U'_2 = \Delta U_2 K$.

В свою очередь, для упрощённого трансформатора можно записать:

$$U_2 = U_{20} - I_2 \frac{1}{K^2} (r_k \cos(\varphi) + x_k \sin(\varphi)). \quad (4.14)$$

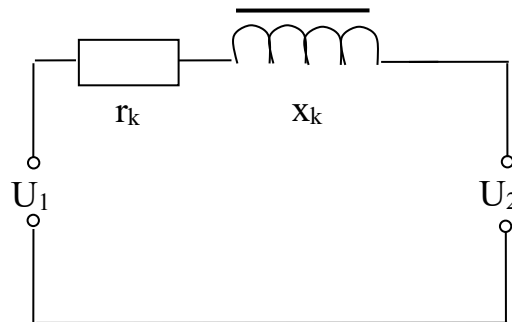


Рис. 4.7. Упрощенная схема приведенного трансформатора

Из формулы (4.14) видно, что если r_k , x_k и $\cos(\varphi)$ постоянны, то напряжение U_2 линейно уменьшается с ростом тока I'_2 . Зависимость $U_2 = f(I_2)$ называется внешней характеристикой трансформатора.

На рис. 4.8 изображены характеристики, соответствующие различным значениям $\cos(\varphi_2)$. Из формулы 4.14 видно, что для расчета U_2 необходимо знать значения K , r_k и x_k . Значение K определяют в опыте холостого хода, а значения r_k и x_k можно получить из опыта короткого замыкания, описанного ниже.

Упрощённую схему можно использовать при расчёте работы трансформатора в таком режиме, при котором действительно ток I_0 мал по сравнению с токами I_1 и I'_2 . Если же необходимо рассчитать работу

трансформатора при малых нагрузках, обычно пользуются эквивалентной схемой, изображенной на рис. 4.9.

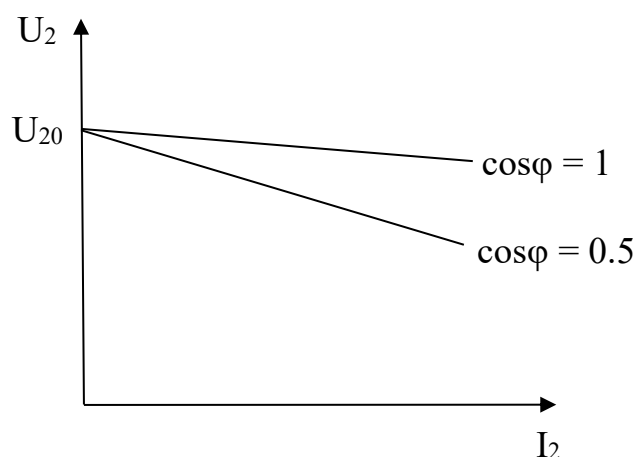


Рис. 4.8. Общий вид нагрузочной характеристики трансформатора
Опыт холостого хода и короткого замыкания

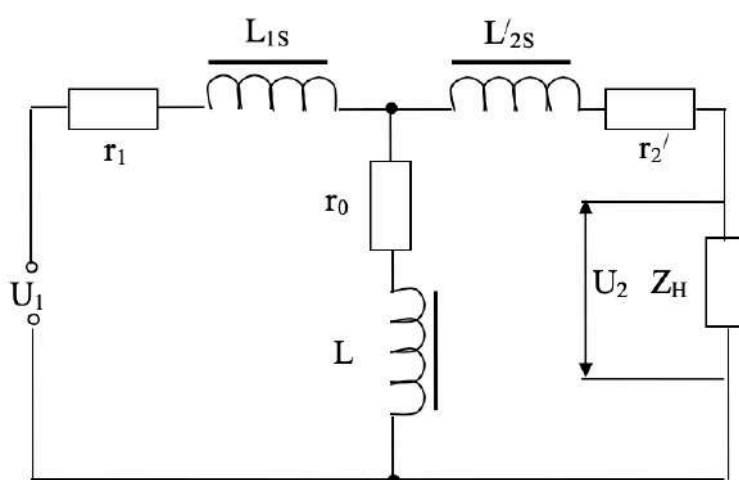


Рис. 4.9. Вариант эквивалентной схемы трансформатора, используемый для анализа работы трансформатора при малых нагрузках

Параметры этой схемы можно определить из опытов холостого хода и короткого замыкания. Для этого собирают схему, соответствующую рис. 4.10.

При работе трансформатора в режиме холостого хода потери в медных проводах $I_0^2 r_1$ малы по сравнению с потерями в стальном сердечнике $I_0^2 r_0$ и, следовательно, можно считать, что ваттметр в этом случае показывает потери в стали P . Отсюда, зная I_0 , можно определить $r_0 = \frac{P_{cm}}{I_0^2}$.

Если сопротивлениями r_1 и x_{1S} пренебречь по сравнению с r_0 и x_L , то полное сопротивление цепочки r_0 и x_L равно $Z = \frac{U}{I_0}$. Тогда $x_L = \sqrt{Z^2 - (r_0)^2}$.

Сопротивления $r_k = r_1 + r_2'$ и $x_k = x_1 + x_2'$ можно определить из измерений в опыте короткого замыкания.

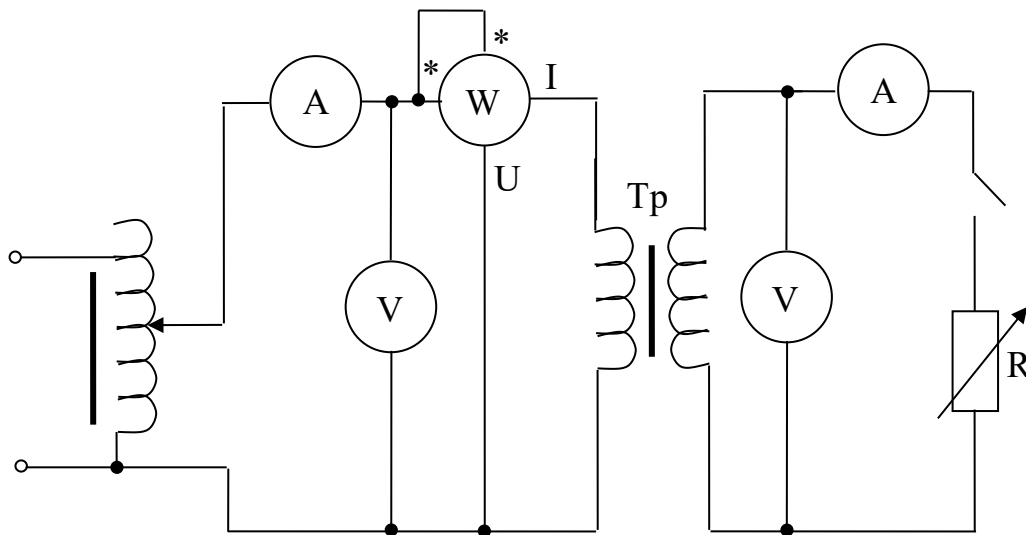


Рис. 4.10. Схема, применяемая для испытания трансформатора

Прежде всего, отметим, что опыт короткого замыкания, проведённый правильно, не опасен для трансформатора, в отличие от режима аварийного короткого замыкания. Опыт короткого замыкания обычно проводят при токах в первичной и вторичной обмотках равных номинальным. Для этого вторичную обмотку замыкают накоротко, а на первичную подают пониженное напряжение U_{1K} от какого-либо регулируемого источника напряжения. Напряжение U_{1K} , при котором в обмотках будут протекать номинальные токи, составляет $10 - 20\%$ от номинального напряжения первичной обмотки U_{1H} . При этом можно считать потери в стали незначительными, так как они пропорциональны квадрату магнитной индукции B^2 (или Φ^2), а магнитный поток Φ мал, поскольку мало подводимое напряжение. Потери же в меди P_M в этом опыте равны потерям в меди при полной нагрузке. На этом основании можно считать, что ваттметр, подключённый к первичной обмотке, показывает мощность потерь в меди первичной и вторичной обмоток, т. е.:

$$P_k = I_{1K}^2 r_1 + I_{2K}^2 r_2. \quad (4.15)$$

В опыте короткого замыкания можно воспользоваться упрощённой схемой, так как вследствие малости потока Φ намагничивающий ток мал по сравнению с токами I_{1K} и I_{2K} . Тогда, используя равенства (4.11) и (4.12), вместо равенства (4.15), получим: $P_K = I_{1K}^2 r_1 + I_{2K}^2 r_2' = I_{1K}^2 (r_1 + r_2') = I_{1K}^2 r_k$.

Откуда $r_k = \frac{P_K}{I_{1K}^2} = \frac{P_k}{(I'_{2K})^2}$.

Кроме того, из показаний вольтметра и амперметра можно определить полное сопротивление обмоток трансформатора Z_K , а затем и реак-

тивное сопротивление x_K , т. е.: $Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}$; $x_k = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}$.

Таким образом, из опыта короткого замыкания можно определить все сопротивления упрощенной схемы замещения трансформатора и, соответственно, определить потери в меди.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора η равен отношению мощности, отдаваемой вторичной обмоткой во внешнюю цепь P_2 , к мощности, потребляемой первичной обмоткой P_1 , т.е.:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% . \quad (4.16)$$

При увеличении нагрузки трансформатора, а именно тока I_2 , увеличивается полезная мощность P_2 , расходуемая во внешней цепи вторичной обмотки. При этом увеличиваются и потери в меди P_M первичной и вторичной обмоток. Потери в стали $P_{СТ}$, зависящие от магнитного потока Φ_M , остаются практически постоянными. Все эти явления определяют довольно сложную зависимость КПД η от тока I_2 (рис. 4.11). Эту зависимость можно получить экспериментально, измеряя мощности в первичной и во вторичной цепях трансформатора при различных значениях тока I_2 .

Зная механизмы потерь в трансформаторе, можно записать: $P_1 = P_2 + P_{СТ} + P_{МЕДИ}$, $P_2 = I_2 U_2$.

Однако для очень мощных трансформаторов целесообразно оценить КПД расчетным путём. Кроме того, идеи, заложенные в расчёт, помогают объяснить ход зависимости η (I_2), изображённой на рис.4.11.

Потери в стали считаем постоянными, а потери в меди P меди можно рассчитать для любого тока нагрузки I_2 . Для этого вместо эквивалентного

сопротивления r_k введем величину эквивалентного активного сопротивления трансформатора, приведенного к вторичной обмотке $R_k = K^2 r_k$.

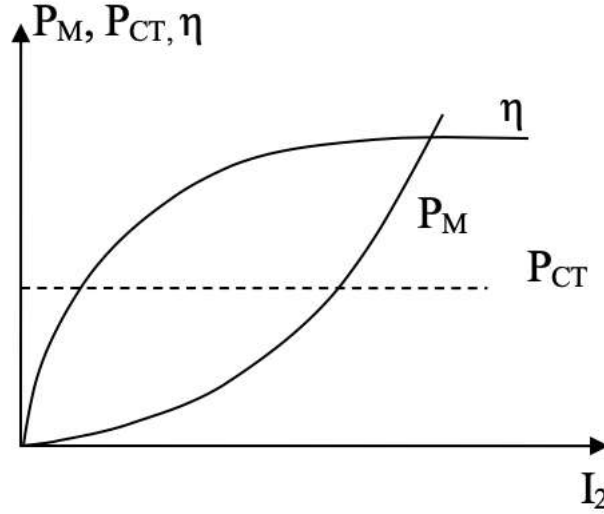


Рис. 4.11. Общий вид зависимостей потерь в трансформаторе

Считая, что $I_1 = I'_2 = I_2 K$, получим следующие выражения для потерь в меди: $P_M = I^2 r_k = (I'_2)^2 r_k = I_2^2 K^2 r_k = I_2^2 R_k$.

Введем еще одно понятие – коэффициент загрузки β , равный отношению вторичного тока I_2 к номинальному току во вторичной обмотке I_{2H} , т.е. $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$. Следовательно, $I_2 = \beta \cdot I_{2H}$

Подставляя полученные выше выражения в формулу (4.16) для КПД получим:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{CT} + P_M} = \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + P_{CT} + I_2^2 R_k} = \frac{U_2 \beta \cdot I_{2H}}{U_2 \beta \cdot I_{2H} + P_{CT} + I_{2H}^2 \beta^2 R_k} \quad (4.17)$$

Если пренебречь изменением напряжения U_2 , то в последнем выражении переменной величиной является только коэффициент нагрузки β . При $\beta = 0$ $\eta = 0$ так как знаменатель не равен 0 из-за P_{CT} . При $\beta \rightarrow \infty$, $\eta \rightarrow 0$. Следовательно, зависимость $\eta(\beta)$ имеет максимум. Определим те условия, при которых КПД η максимален. Для этого приравняем нулю производную от η по β :

$$\eta' = \left(\frac{U_2 I_{2H}}{U_2 I_{2H} + \frac{P_{CT}}{\beta} + I_{2H}^2 \beta R_k} \right)' = \frac{U_2 I_{2H} (-\beta^2 P_{CT} + I_{2H}^2 R_k)}{(U_2 I_{2H} + \frac{P_{CT}}{\beta} + I_{2H}^2 \beta R_k)^2} = 0.$$

Это выражение равно нулю при выполнении следующего равенства

$$\beta^2 P_{CT} = I_{2H}^2 R_K. \text{Отсюда } P_{CT} = \frac{I_{2H}^2}{\beta^2} R_K = I_2^2 R_K = P_M.$$

Таким образом видно, что КПД трансформатора достигнет максимума при таком токе нагрузки I_2 , при котором потери в меди становятся равными потерям в стали P_{CT} . Учитывая то обстоятельство, что силовые трансформаторы часть суток работают при нагрузках, меньших номинальной, то расчет трансформатора производят так, чтобы максимум КПД приходился не на номинальную нагрузку, а среднюю в течение суток. Для мощных силовых трансформаторов КПД достигает 98 – 99 %. Для трансформаторов же с номинальной мощностью порядка 100 Вт и меньше, применяемых в радиоэлектронных приборах (радиоприёмниках, осциллографах и др.), КПД снижается до 50 %.

Практическая часть

Задание I. *Исследование работы трансформатора в режиме холостого хода.*

Приборы и компоненты: вольтметр V_1 с пределами измерения 75 – 600 В; вольтметр V_2 с пределами измерения 7.5 – 60 В; ваттметр с пределами измерений по току 1 – 2 А; амперметр A_1 с пределами измерений 0.25 – 1 А; амперметр A_2 с пределами измерений 2.5 – 5 А; реостат с номинальными значениями 30 Ом, 5 А.

1) Собрать электрическую схему, изображенную на рис. 4.12.

2) При разомкнутой вторичной обмотке (ключ B_2 разомкнут) изменяя напряжение U_1 от 80 В до номинального, или несколько выше (до 240 В), с шагом 20 В, записать показания приборов. Данные занести в таблицу 4.1. Стоит отметить, что $\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$, а $K = \frac{U_1}{U_2}$.

3) По данным измерений и расчетов построить графики зависимостей: $I_1 = f(U_1)$, $K = f(U_1)$, $P_1 = f(U_1)$.

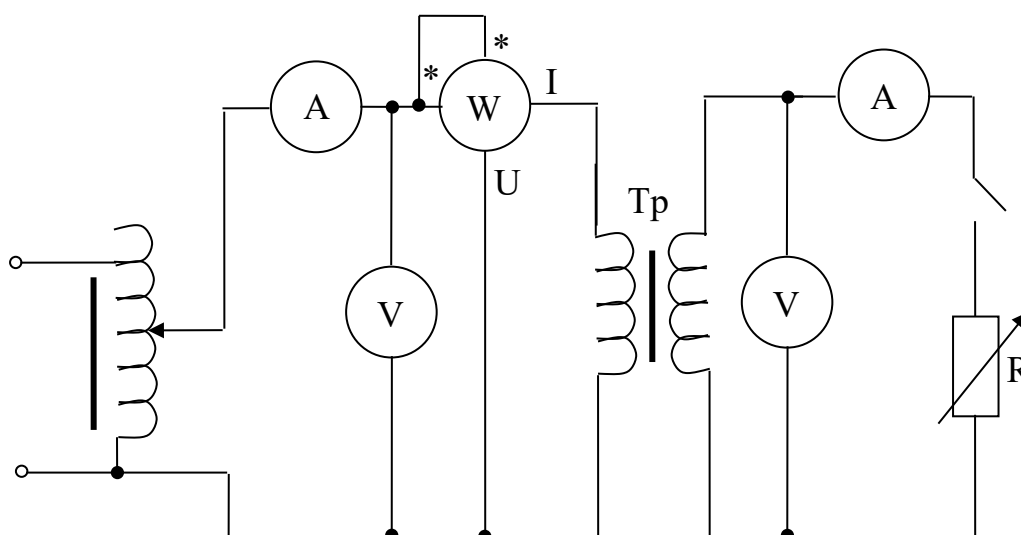


Рис. 4.12. Рабочая схема для исследования работы трансформатора

Таблица 4.1.

	Измерено				Вычислено	
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	$\cos\varphi$	K
1	80					
2	100					
3	120					
4	140					
5	160					
6	180					
7	200					
8	220					
9	240					

Задание II. Снять нагрузочную характеристику.

1) Установить напряжение, равное номинальному (220 В), и поддерживать его неизменным в ходе выполнения задания. Замкнуть ключ В₂. Изменяя I_2 от 0,5 А до 5 А, с шагом 0,5 А, записать показания приборов. Данные занести в таблицу 4.2.

2) По данным измерений и расчетов построить графики зависимостей: $U_2 = f(I_2)$, $I_1 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$, $\cos(\varphi_1) = f(I_2)$.

Таблица 4.2.

№	Измерено					Вычислено		
	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$\cos \varphi$	$P_2, Вт$	η
1	220				0			
2	220				0.5			
3	220				1.0			
4	220				1.5			
5	220				2.0			
6	220				2.5			
7	220				3.0			
8	220				3.5			
9	220				4.0			
10	220				4.5			
11	220				5.0			

Задание III. Исследование работы трансформатора в режиме короткого замыкания.

1) Отключить схему после предыдущих измерений от сети, затем необходимо разобрать схему вторичной обмотки исследуемого трансформатора (схему первичной обмотки трансформатора оставить без изменений!!!). После этого нужно закоротить вторичную обмотку через амперметр A_2 . **Включать схему можно только после ее проверки преподавателем или лаборантом!!!**

2) Выставив напряжение на ЛАТРе на минимуме, включить схему. Плавное увеличение напряжения на ЛАТРе от минимума до такого значения, при котором ток во вторичной обмотке равен 5 А. Шаг измерений равен 1.0 А. Заполнить таблицу 4.3.

Таблица 4.3.

№	Измерить					Вычислить	
	$I_2, А$	$U_2, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_1, В$	η	R_K
1	0	0					
2	1.0	0					
3	2.0	0					
4	3.0	0					
5	4.0	0					
6	5.0	0					

3) Определите R_k по формуле $R_k = \frac{P_1}{I_2^2}$. Рассчитайте η по формулам

для каждого значения тока I_2 . Постройте график $\eta = f(I_2)$.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных частей состоит трансформатор?
2. В чем заключается опыт холостого хода, и какие параметры трансформатора определяются по данным этого опыта?
3. В чем заключается опыт короткого замыкания, и какие параметры определяются при этом опыте.
4. Что называется внешней характеристикой трансформатора и как она может быть получена практически?
5. От каких факторов зависит потеря напряжения в трансформаторе?
6. От каких величин зависит КПД трансформатора и как эти величины определяются?
7. При каком условии КПД трансформатора имеет максимальное значение?
8. Какие изменения произойдут в режиме работы трансформатора, если в его сердечнике создать воздушный зазор?
9. Почему в опыте холостого хода мощность P_0 , потребляемая в первичной цепи, практически определяется потерями в железе?
10. Почему мощность трансформаторов измеряется в вольт-амперах (ВА), а не в ваттах (Вт)?
11. Как по внешним признакам можно отличить обмотку высшего и низшего напряжения?
12. Почему на обмотку трансформатора с номинальным напряжением 220 В нельзя подавать постоянное напряжение такой же величины? Какое наибольшее напряжение постоянного тока можно подавать на такую обмотку?

Упражнения для самостоятельной работы

1. Понижающий трансформатор со 110 витками во вторичной обмотке понижает напряжение от 2200 В до 110 В. Сколько витков в его первичной обмотке?
2. Первичная обмотка повышающего трансформатора содержит 100 витков, а вторичная — 1000. Напряжение в первичной цепи 120 В. Каково напряжение во вторичной цепи, если потерь энергии нет?

3. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 300 витков, включен в сеть напряжением 220 В. Во вторичную цепь трансформатора, имеющую 165 витков, включен резистор сопротивлением 50 Ом. Найдите силу тока во вторичной цепи, если падение напряжения на ней равно 50 В.
4. Понижающий трансформатор дает ток 20 А при напряжении 120 В. Первичное напряжение равно 22000 В. Чему равны ток в первичной обмотке, а также входная и выходная мощности трансформатора, если его КПД равен 90%?
5. Повышающий трансформатор создает во вторичной цепи ток 2 А при напряжении 2200 В. Напряжение в первичной обмотке равно 110 В. Чему равен ток в первичной обмотке, а также входная и выходная мощности трансформатора, если потерь энергии в нем нет?
6. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 8 включена в сеть напряжением 200 В. Сопротивление вторичной обмотки 2 Ом, ток во вторичной обмотке трансформатора 3 А. Определите падение напряжения на зажимах вторичной обмотки. Потерями в первичной обмотке пренебречь.
7. Напряжение на зажимах вторичной обмотки понижающего трансформатора 60 В, сила тока во вторичной цепи 40 А. Первичная обмотка включена в цепь с напряжением 240 В. Найдите силу тока в первичной обмотке трансформатора.
8. Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Напряжение на зажимах вторичной обмотки 20 В, ее сопротивление 1 Ом, ток в ней 2 А. Найдите коэффициент трансформации и КПД трансформатора.
9. Трансформатор повышает напряжение с 220 В до 1,1 кВ и содержит 700 витков в первичной обмотке. Каков коэффициент трансформации? Сколько витков во вторичной обмотке? В какой обмотке провод большего сечения?
10. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 840 витков, повышает напряжение с 220 В до 660 В. Каков коэффициент трансформации и сколько витков содержится во вторичной обмотке трансформатора? В какой обмотке провод будет иметь большую площадь сечения?

Лабораторная работа № 5

Испытание трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы: изучить принцип действия, устройство и рабочие характеристики асинхронного двигателя, а также схемы подключения данного типа двигателя.

Сведения из теории

Асинхронная машина является машиной переменного тока. На рис.5.1 изображен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде: 1 – остов, 2 – статор, 3 – ротор, 4 – стержни обмотки ротора, 5 – подшипниковый щит, 6 – вентиляционные лопасти ротора, 7 – вентилятор, 8 – коробка выводов.

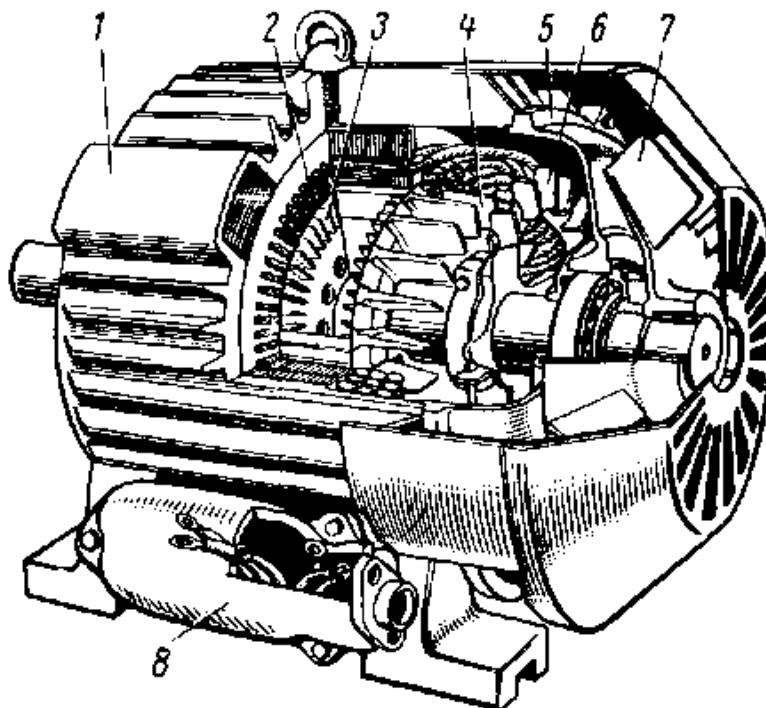


Рис. 5.1. Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Как правило, асинхронные машины применяются в качестве двигателя в частотном диапазоне питающего напряжения до 2 кГц. При мощности асинхронных машин свыше 0.5 кВт применяются трехфазные машины, при мощности менее 0.5 кВт – однофазные. Электромагнитная система асинхронной машины состоит из двух частей: неподвижной – статора, в пазах которого находятся фазные обмотки, и вращающейся –

ротора с обмоткой в виде стержней, замкнутых с торцов кольцами. Для уменьшения потерь мощности на вихревые токи сердечники статора и ротора набираются из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. Обмотки статора и ротора сделаны из меди или алюминия. Обмотки фаз статора соединяются между собой в звезду или треугольник. При питании обмотки статора трехфазным напряжением в зазоре между сердечниками статора и ротора создается вращающееся магнитное поле, скорость вращения n которого пропорциональна частоте питающего напряжения f :

$$n = \frac{60 \cdot f}{P}, \quad (5.1)$$

где P – число пар полюсов магнитного поля. Вращающееся магнитное поле наводит в замкнутой обмотке ротора токи, которые, взаимодействуя с полем, создают электромагнитный момент вращения. Скорость вращения ротора n_1 будет меньше скорости вращения магнитного поля n . Характеристика двигателя вида $s = \frac{n - n_1}{n}$ называется скольжением.

В момент пуска двигателя, когда скорость вращения ротора n_1 равна 0, скольжение равно 1. При холостом ходе двигателя скорость вращения ротора очень близка к скорости поля, а $s \approx 0$. Номинальное скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, составляет 0.02 – 0.05.

Вращающееся магнитное поле пересекает витки обмотки статора и ротора, наводя в них соответственно ЭДС самоиндукции E_1 :

$$E_1 = 4.44 K_{o61} \omega_1 f_1 \Phi \quad (5.2)$$

и взаимоиндукции E_2 :

$$E_2 = 4.44 K_{o62} \omega_2 f_2 \Phi, \quad (5.3)$$

где K_{o61} и K_{o62} – обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора, учитывающие уменьшение ЭДС вследствие пространственного распределения обмотки; ω_1 и ω_2 – числа витков статора и ротора; f_1 и f_2 – частоты ЭДС в статоре и роторе; Φ – магнитный поток.

Частота ЭДС и тока в роторе равна:

$$f_2 = \frac{P}{60} (n - n_1) = \frac{n - n_1}{n} \frac{Pn}{60} = sf. \quad (5.4)$$

Если в формулу (5.3) подставить выражение вида $f_2 = f \cdot s$, то получим:

$$E_2 = 4.44K_{062}\omega_2sf\Phi = E_{2H}s. \quad (5.5)$$

Величина E_{2H} называется ЭДС фазы ротора, приведенной к частоте ЭДС статора или ЭДС эквивалентного неподвижного ротора. Из формулы (5.5) видно, что ЭДС ротора при вращении последнего пропорциональна скольжению и имеет наибольшую величину E_{2H} при неподвижном роторе, когда $s = 1$. В этом случае аналогия асинхронной машины с трансформатором очевидна, т.к. частоты ЭДС статора и ротора равна частоте питающей сети, в которую включен двигатель. Ток I_2 в роторе создается электродвижущей силой, индуцируемой в обмотке ротора, которая представляет собой замкнутую цепь, и поэтому I_2 равен ЭДС, деленной на сопротивление цепи роторной обмотки:

$$I_2 = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_{XL}^2}}, \quad (5.6)$$

где r_2 – активное сопротивление ротора, x_{XL} – индуктивное сопротивление неподвижного ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый ротором, определяется магнитным потоком и током ротора:

$$M = c\Phi \cdot I_2 \cdot \cos \Psi_2, \quad (5.7)$$

где c – коэффициент пропорциональности, учитывающий конструктивные особенности машины, Ψ_2 – угол сдвига фаз между ЭДС и током ротора.

Вращающийся момент машины зависит от изменяющихся при нагрузке Φ , I_2 , $\cos \Psi_2$, но его можно представить в виде функции одной переменной, а именно скольжение s :

$$M = c' \frac{E_1^2 s r_2}{r_2^2 + (s r_2)^2}. \quad (5.8)$$

При работе машины в обычных условиях ЭДС E_1 статора приблизительно равна напряжению U_1 сети и поэтому:

$$M = c' \frac{U_1^2 s r_2}{r_2^2 + (s r_2)^2} \quad (5.9)$$

и, следовательно, асинхронный двигатель очень чувствителен к понижению напряжения сети.

Из (5.9) следует, что при малых скольжениях вращающий момент двигателя растет примерно пропорционально скольжению. При значительном увеличении скольжения момент начинает убывать, т.к. знаменатель растет быстрее, чем числитель, и поэтому зависимость $M(s)$ имеет максимум. Вид данного графика изображен на рис.5.2.

Первая часть изображенного графика соответствует устойчивой работе двигателя, вторая часть графика – неустойчивой работе. В первом случае у работающего двигателя вращающий момент двигателя M уравновешивается тормозным моментом нагрузки M_t до тех пор, пока $M_t < M_{\max}$ (максимального момента двигателя).

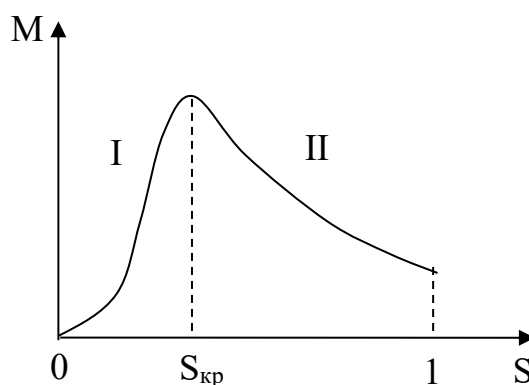


Рис. 5.2. Вид зависимости вращающего момента двигателя от скольжения

Если скорость двигателя уменьшается, скольжение возрастает, при этом вращающий момент двигателя также уменьшается, вследствие чего новое равновесие моментов наступить не может и двигатель останавливается. При нормальной работе двигатель должен иметь запас устойчивости, для чего максимальный момент двигателя должен быть больше номинального момента M_H , соответствующего номинальной мощности двигателя.

Отношение $\frac{M_{\max}}{M}$ называется перегрузочной способностью двигателя и для асинхронных двигателей обычно равно 1.8 – 2.5.

Определим теперь критическое скольжение $s_{кр}$, при котором вращающий момент $M = M_{\max}$. Для этого нужно приравнять нулю первую производную по s от выражения (5.9). Получается:

$$s_k = \pm \frac{r_2}{x_{L2}}. \quad (5.10)$$

При работе машины в режиме двигателя $s > 0$ подставляя положительное значение критического скольжения в (5.9), получим:

$$M_{\max} = c' U_1^2 \frac{1}{2x_{L2}} \quad (5.11)$$

Из последнего выражения следует, что M_{\max} не изменяется при изменении активного сопротивления ротора, однако при этом изменяется критическое скольжение. Возможность увеличения критического скольжения за счет увеличения активного сопротивления ротора при одновременном сохранении неизменного M_{\max} привела к созданию и использованию асинхронного двигателя с фазным ротором. У данного двигателя обмотка фазного ротора выполнена по типу обмотки статора и соединяется, как правило, в звезду. Концы обмоток подключают к трем контактными кольцам, изолированных друг от друга и насаженных на вал через диэлектрические прокладки. При помощи неподвижных щеток, наложенных на контактные кольца, в цепь ротора можно включить трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Асинхронные двигатели с фазным ротором применяются там, где требуется плавное регулирование скорости приводимого в движение механизма, а также частых пусков двигателя под нагрузкой. О свойствах любого двигателя обычно судят по его рабочим характеристикам. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя представляют собой зависимости тока статора I_1 , коэффициента $\cos\varphi_1$, скорости вращения n_1 , скольжения s , вращающего момента M , и КПД η от полезной мощности P_2 на валу двигателя при неизменных значениях питающего напряжения U_1 и частоты f_1 . Данные характеристики изображены на рис.5.3.

Характеристика тока статора $I_1 = f(P_2)$. Ток холостого хода двигателя составляет 0.25 – 0.5 номинального тока двигателя. С увеличением нагрузки (с возрастанием скольжения) растет ток ротора I_2 вследствие роста ЭДС E_2 , пропорциональной скольжению, что вызывает увеличение тока статора, а, следовательно, кривая $I_2 = f(P_2)$ носит восходящий характер.

Характеристика коэффициента мощности $\cos\varphi_1 = f(P_2)$. В режиме холостого хода угол φ_1 велик, т.к. двигатель потребляет почти чисто реактивный ток, идущий на создание основного магнитного потока машины. При увеличении нагрузки и приближении ее к номинальной возрастает активная составляющая тока вследствие увеличения механической мощности на валу двигателя. Реактивная составляющая тока мало изменяется, т.к. основной поток примерно постоянен. Поэтому с ростом нагрузки $\cos\varphi_1$ резко увеличивается. При нагрузках выше номинальной

возрастают магнитные потоки рассеяния, реактивная составляющая тока увеличивается, а $\cos\varphi_1$ уменьшается.

Характеристики $n_1 = f(P_2)$ и $s = f(P_2)$. На холостом ходу ротор вращается со скоростью $n_1 \approx n$, следовательно, $s=0$. По мере увеличения нагрузки скорость вращения n_1 уменьшается, а скольжение растет. При возрастании нагрузки от 0 до номинальной изменение скорости или скольжения составляет (2 – 5) % и поэтому говорят, что асинхронный двигатель обладает жесткой скоростной характеристикой.

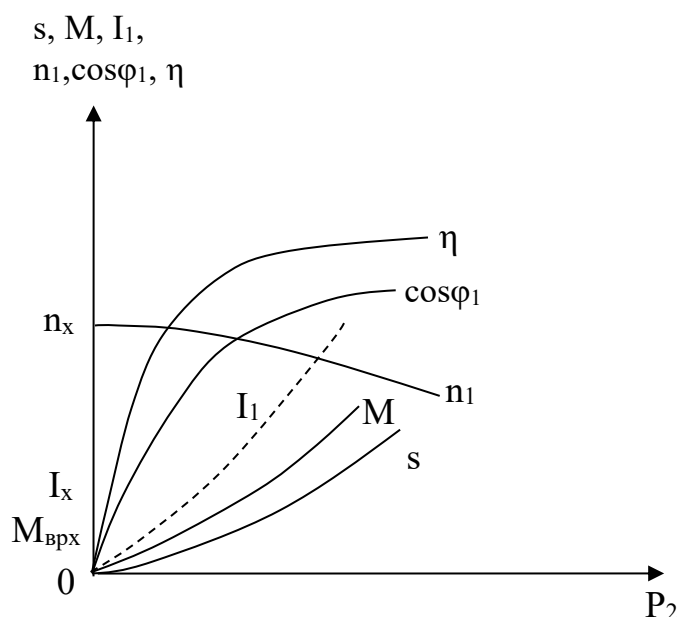


Рис. 5.3. Вид рабочих характеристик асинхронного двигателя

Характеристика вращающего момента $M = f(P_2)$. В установившемся режиме работы двигателя вращающий момент складывается из полезного момента M_2 на валу двигателя и момента холостого хода M_0 . Момент холостого хода затрачивается на покрытие механических потерь. Этот момент можно приблизительно считать независимым от нагрузки двигателя. Полезный момент пропорционален скорости вращения:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n / 60} = \frac{60P_2}{2\pi n}. \quad (5.11)$$

Скорость вращения с ростом P_2 немного уменьшается и поэтому зависимость $M_2(P_2)$ не является линейной.

Коэффициент полезного действия (КПД) определяется отношением полезной мощности P_2 к подводимой мощности P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{ном}}}, \quad (5.12)$$

где подводимая мощность равна сумме полезной мощности и мощностей всех потерь в двигателе. В асинхронных двигателях существуют те же самые виды потерь, которые существуют в других электрических машинах.

Потери в двигателе делятся на постоянные (или мало зависящие от нагрузки) и переменные, изменяющиеся с нагрузкой. К первой группе относятся механические потери, потери в стали на гистерезис и вихревые потоки, добавочные потери в обмотках и стали. К переменным потерям относятся потери в обмотках, зависящие от величины токов, т.е. потери на нагревание статора и ротора. Поскольку общие потери зависят от нагрузки, то и КПД двигателя является функцией нагрузки. При увеличении полезной нагрузки суммарные потери растут медленнее, чем полезная мощность, поэтому КПД резко возрастает, достигая своего максимального значения (65 – 95) % при нагрузке 0.7 – 0.8 от номинальной. В этом случае переменные потери равны постоянным. При дальнейшем росте нагрузки быстрое возрастание переменных потерь приводит к уменьшению КПД.

Электромагнитный тормоз (ЭМТ) представляет собой устройство, в котором тормозящий момент создается взаимодействием вихревых токов, наводимых во вращающемся диске, и магнитного поля электромагнитов. Основными элементами ЭМТ являются алюминиевый диск, соединяемый с валом испытуемого двигателя, и системы электромагнитов, которые формируют тормозящее магнитное поле. К системе электромагнитов, которая может поворачиваться в направлении вращения диска, прикреплен стрелка и маятник с грузами. Тормозящий момент, создаваемый вихревыми токами, передается системе электромагнитов и поворачивает ее до тех пор, пока отклонившийся маятник не уравновесит момент двигателя. Величина тормозящего момента зависит от величины магнитного потока, а, следовательно, и от тока электромагнитов, поэтому, изменяя ток электромагнитов, можно менять величину тормозящего момента, т.е. нагрузку двигателя. По углу отклонения стрелки на шкале определяется величина момента. Для измерения скорости вращения испытуемого двигателя применяется электронный фототахометр.

Практическая часть

Описание установки

Испытание асинхронного двигателя проводится на лабораторной установке, состоящей из соединенных на одном валу электромагнитного тормоза и асинхронной машины. Электрическая схема рабочей установки представлена на рис.5.4. Вольтметр V с пределами измерений 75 – 600 В показывает напряжение на зажимах фазной обмотки статора, ваттметр W с пределами измерений по току 1 А – фазную мощность, амперметр A_1 на 1 А – ток в цепи одной статорной обмотки.

Задания.

1) Ознакомиться с устройством асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, устройством электромагнитного тормоза, записать данные, записанные на корпусе прибора.

2) Определить начала и концы фаз (обмоток) статора. Для этого необходимо сначала при помощи омметра определить зажимы каждой из фаз (обмоток). Затем соединить последовательно две обмотки и подать на данное соединение напряжение сети, а к зажимам третьей обмотки подключить вольтметр. Если вольтметр покажет напряжение, то конец первой обмотки соединен с началом второй обмотки. Если же показание вольтметра приблизительно равно нулю, конец первой обмотки соединен с концом второй. Аналогичным образом находят начало и конец третьей обмотки.

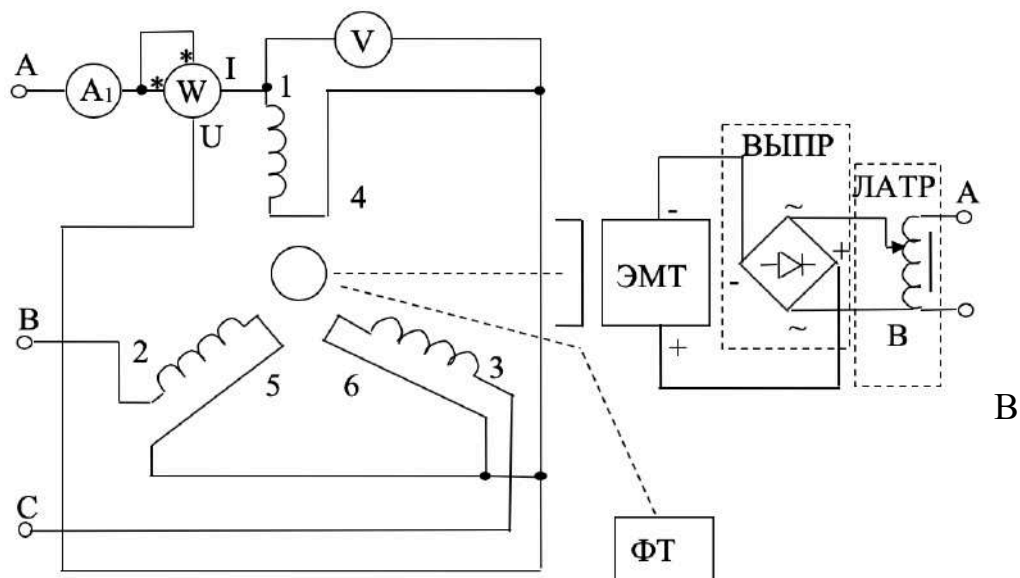


Рис.5.4. Рабочая схема испытания асинхронного двигателя

3) Согласно рабочей схеме (рис.5.4) найти подходящие приборы для работы с исследуемой системой.

4) Собрать схему, изображенную на рис.5.4. и дать проверить ее преподавателю или лаборанту.

5) Снять рабочие характеристики асинхронного двигателя. Для этого запустить двигатель в режиме холостого хода. Меняя момент нагрузки через 200 г·см от 0 до 2000 г·см (путем изменения тока возбуждения электромагнитного тормоза), результаты измерения и расчетов занести в таблицу 5.1. Полезная мощность $P_2 = 9.81 \frac{2\pi n_1}{60} M$, где M измеряется в кг·м, n_1 – число оборотов ротора в минуту.

6) Выключить двигатель и переключить две любые фазы статора. Включить двигатель и убедиться, что направление вращения изменится.

7) Выполнить необходимые вычисления для заполнения таблицы 5.1. Отметим, что для расчета коэффициента мощности двигателя можно воспользоваться формулой, представленной в работе 4 «Изучение однофазного трансформатора».

8) В отчете должна быть представлена рабочая схема с перечнем приборов, машин и их номинальных параметров.

9) Результаты испытаний должны быть представлены в виде графиков (аналогично графикам, представленных на рис. 5.3), построенным по данным наблюдений и вычислений.

10) Проанализировать полученные характеристики и дать оценку полученным результатам.

Таблица 5.1.

Измерить						Вычислить				
№	M, г·см	U _ф , В	I _ф , А	P _{1ф} , Вт	n ₁ , об/мин	P ₂ , Вт	η	cosφ ₁	s	P ₁ = 3P _{1ф} (Вт)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

8										
9										
10										
11										
12										
13										

Контрольные вопросы

1. Почему двигатель называется асинхронным?
2. Чем (конструктивно) отличается короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя от фазного ротора?
3. По каким признакам можно определить двигатель с короткозамкнутым ротором и асинхронный двигатель с фазным ротором?
4. Что обозначает величина напряжения и тока, приведенного в паспорте двигателя?
5. Как и паспортных данных двигателя определить число пар полюсов вращающегося поля, число катушек в фазе статора?
6. Зависит ли количество клемм (выводов обмоток) на корпусе двигателя от числа катушек в фазе статора?
7. Можно ли включить двигатель в сеть, если нет обозначений выводов обмоток статора?
8. Чем отличается пуск двигателя с короткозамкнутым ротором от пуска двигателя с фазным ротором?
9. Почему пусковой ток двигателя больше номинального тока?
10. Какие способы применяются для уменьшения величины пускового тока?
11. Что такое режим холостого хода асинхронного двигателя?
12. Чем характеризуется режим короткозамкнутого двигателя?
13. Куда затрачивается мощность, получаемая из сети при режиме короткого замыкания?
14. Какую аналогию можно провести между работой асинхронного двигателя и трансформатора?
15. Какие составляющие входят в уравнение энергетического баланса асинхронного двигателя?
16. Какую информацию содержат рабочие характеристики?

Упражнения для самостоятельной работы

1. Определить скольжение в асинхронном двигателе, если частота питающей сети равна 50 Гц, частота вращения ротора равна 1450 оборотов в минуту, число пар полюсов равно 2.
2. Определить частоту вращения ротора трехфазного шестиполюсного асинхронного двигателя при частоте питающей сети 50 Гц и скольжении, равном 4 %.
3. Частота вращения ротора четырехполюсного асинхронного двигателя $n_2 = 1425 \text{ мин}^{-1}$. Определить его скольжение, если частота тока $f = 50 \text{ Гц}$.
4. Найти ЭДС, индуцируемую в фазе обмоток статора и ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя при неподвижном и вращающемся роторе, если известно, что скольжение двигателя равно 4 %, обмотка статора соединена в звезду и подключена к сети переменного тока с линейным напряжением 380 В, число витков в каждой фазе статора 88, ротора 12, магнитный поток $1.21 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, обмоточный коэффициент статора 0,92, ротора 0,95, частота тока 50 Гц.
5. Асинхронный двигатель с номинальной мощностью 45 кВт имеет электрические потери, равные 900 Вт, потери в стали, равные 1.2 кВт, а также механические потери, равные 1.5 кВт. Дополнительные потери в данном двигателе составляют 2 %. Вычислить КПД указанного двигателя.
6. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальную мощность 17 кВт, скорость вращения ротора 2900 об/мин, КПД = 88 %, число пар полюсов 1. Определить номинальную мощность, потребляемую двигателем, и номинальное скольжение.
7. Асинхронный двигатель имеет номинальную мощность 400 Вт. КПД двигателя равно 80 %, коэффициент мощности равен 0.5. Вычислить мощность, потребляемую данным двигателем из сети.
8. Определить номинальный вращающий момент асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность 380 Вт, и номинальная частота вращения ротора равна 2800 об/мин.

9. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором вращается с частотой 1440 об/мин. Определить число пар полюсов и скольжение, если синхронная частота вращения магнитного поля 1500 об/мин.
10. Трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие номинальные характеристики: номинальная мощность равна 1500 Вт, напряжения питания 380/220 В, частота вращения ротора равна 935 об/мин, КПД равен 75 %, коэффициент мощности соответственно равен 0.74. Определить мощность, потребляемую двигателем из сети, вращающий момент, скольжение и токи в обмотках статора при соединении треугольником и звездой.

Ответы к упражнениям для самостоятельной работы

Лабораторная работа №1

1. $I_0 = 0,54 \text{ A}$, $U_1 = 60 \text{ В}$, $U_2 = 90 \text{ В}$
2. $U_0 = 75 \text{ В}$, $I_1 = 0,43 \text{ A}$, $I_2 = 0,57 \text{ A}$
3. 2220 К
4. 2214 К
5. 1500
6. 5400 Дж
7. 2 A , 6 Ом
8. $0,1 \text{ Ом}$
9. 20 Ком
10. $0,13 \text{ Ом}$

Лабораторная работа №2

1. $1,8 \text{ кДж}$
2. 120 Вт ; 80 Вт
3. 24 В ; 40 Ом
4. 1
5. $0,2 \text{ Ом}$; 12 В
6. $2,1 \text{ В}$
7. $9,7 \text{ В}$
8. 3 Ом
9. 1 Вт
10. 25 Вт

Лабораторная работа №3

1. $u_B = 311 \sin(\omega t - 180^\circ)$, $u_C = 311 \sin(\omega t - 300^\circ)$,
 $U_A = U_B = U_C = 220 \text{ В}$
2. 11 A
3. $0,27 \text{ A}$
4. $U_A = U_B = 190 \text{ В}$

5. $U_A = U_B = 380\text{ В}$

6. 0.77 А

7. $U_{RH} = 63,6\text{ В}$, $U_{XH} = 228\text{ В}$, $U_H = 236\text{ В}$

8. $I_A=8\text{ А}$; $I_B=10\text{ А}$; $I_C=12\text{ А}$; $I_H=2.5\text{ А}$; $P=6600\text{ Вт}$

9. $U_\phi=220\text{ В}$; $I_\phi=2,45\text{ А}$; $\cos\varphi=0,778$; $P=1,26\text{ кВт}$; $Q=1\text{ кВт}$; $S=1,62\text{ кВт}$

Лабораторная работа №4

1. 22000

2. $1,2\text{ кВ}$

3. $1,42\text{ А}$

4. $0,12\text{ А}$; $2,67\text{ кВт}$; $2,4\text{ кВт}$

5. 40 А ; 4400 Вт ; 4400 Вт

6. 19 В

7. 10 А

8. 10 ; 91%

9. $0,2$; 3500 ; в первичной обмотке

10. $1/3$; 2520 ; $S_1>S_2$

Лабораторная работа №5

1. 0.033

2. $n = 960\text{ об/мин}$

3. 0.05

4. $E_1=217,5\text{ В}$; $E_2=30,6\text{ В}$; $E_{2s}=1,22\text{ В}$

5. 90%

6. $19,3\text{ кВт}$; 0.033

7. 1000 ВА

8. $1,297\text{ Нм}$

9. 2 ; 0.04

10. $P_{\text{затр}} = 2000\text{ Вт}$; $M = 15.33\text{ Н·м}$; $I_\Delta = 7.1\text{ А}$; $I_* = 4.1\text{ А}$; $s = 0.065$

Рекомендованная литература

1. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника – Академия. – 2008.
2. Блажкина А. Т. Общая электротехника –Энергоатомиздат. – 1986.
3. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электротехники– М.: Высшая школа. – 1981.
4. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. Электротехника – М.: Энергоатомиздат. – 1985.
5. Горяев М. А., Маслов В. В., Попова И. О., Рычгорский В. В., Смирнов А.П. Электротехнический практикум. Часть 1: Учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2018.
6. Горяев М. А., Маслов В. В., Попова И. О., Смирнов А. П. Электротехнический практикум. Часть 2: Учебно-методическое пособие / под общ. ред. М.А. Горяева. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2019.