

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Э.М. Пинт, К.А. Еличев, И.И. Романенко

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация
транспортно-технологических машин и комплексов»
и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»

Пенза 2016

УДК 621.537

ББК 312

ПЗ2

Рецензенты: кафедра «Автономные информационные и управляющие системы» Пензенского государственного университета (зав. кафедрой, доктор технических наук, профессор А.И. Сидоров); кандидат технических наук, доцент С.В. Чекайкин (ПГТУ)

Пинт Э.М.

ПЗ2 **Общая электротехника и электроника: лабораторный практикум по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»/ Э.М. Пинт, К.А. Еличев, И.И. Романенко. – Пенза: ПГУАС, 2016 – 84 с.**

Для каждой лабораторной работы приводится теоретическая часть, даются порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Лабораторный практикум подготовлен на кафедре «Механизация и автоматизация производства» и предназначен для использования студентами, обучающимися по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов», при изучении курса «Общая электротехника и электроника».

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2016

© Пинт Э.М., Еличев К.А.,
Романенко И.И., 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие по курсу «Общая электротехника и электроника» позволяет студентам подготовиться и качественно выполнить лабораторные работы, способствующие закреплению теоретической части курса и формированию у студентов практических навыков, необходимых при эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой курса «Общая электротехника и электроника» и предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов».

При изучении дисциплины «Общая электроника и электротехника», относящейся к базовой части профессионального цикла, должны быть сформированы следующие общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции, предусмотренные Федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;

- владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией;

- владение знаниями технических условий и правил рациональной эксплуатации транспортной техники, причин и последствий прекращения ее работоспособности;

- способность в составе коллектива исполнителей к анализу передового научно-технического опыта и тенденций развития технологий эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов;

- готовность к участию в составе коллектива исполнителей к деятельности по организации управления качеством эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов.

В результате освоения курса обучающийся должен:

з н а т ь :

- основные физические явления, фундаментальные понятия и законы электротехники и электроники;

- построение, принцип действия, характеристики и параметры основных электротехнических и электронных устройств;

у м е т ь :

- применять современные математические методы в прикладных задачах профессиональной деятельности;

- диагностировать состояние электротехнической и электронной аппаратуры;

в л а д е т ь :

- методологией проведения исследований электротехнических и электронных устройств;

- методикой расчета схем электротехнических и электронных устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение студентом лабораторных работ включает следующие этапы:

1. Самостоятельная подготовка. Предусматривает повторение теоретического материала, изложенного в лекции (учебнике); ознакомление с рекомендованной к данной лабораторной работе литературой; в индивидуальной тетради должен быть заготовлен следующий материал:

- наименование лабораторной работы и учебная цель;
- электрическая схема сборки и проведения экспериментов;
- порядок выполнения работы;
- таблицы заданных, измеряемых и расчетных параметров;
- расчетные формулы.

2. Выполнение лабораторной работы. Осуществляется индивидуально или в составе группы студентов в лаборатории кафедры под руководством преподавателя и лаборанта. Следует иметь в виду, что **включение питания при проведении экспериментов производится только с разрешения преподавателя (лаборанта) после проверки схемы сборки.** По окончании работы выключается питание установки. Результаты измерений в виде таблиц представляются преподавателю для подтверждения правильности выполнения лабораторной работы. После утверждения результатов схема разбирается и рабочее место приводится в порядок.

3. Обработка результатов исследований и составление отчета.

По итогам работы этот этап выполняется во внеурочное время.

Отчет должен быть написан чернилами, четко и аккуратно, иметь титульный лист установленного образца. Содержание отчета:

- наименование и дата выполнения работы;
- цель работы;
- электрическая схема (схемы), вычерченная с соблюдением размеров электрических элементов в соответствии с требованиями ГОСТ и ЕСКД. Подрисовочный текст обязателен;

- перечень используемых источников питания, электрических элементов с указанием их параметров, измерительных приборов. Для электро-механических измерительных приборов указываются наименование прибора, его заводской номер и год выпуска, класс точности, предел измерения и цена деления шкалы. Для цифровых электроизмерительных приборов указывается абсолютная погрешность, которая берется из паспортных данных. Для электрических машин и трансформаторов приводятся данные паспортного щитка, установленного на машине (трансформаторе);

- таблицы с результатами измерений и вычислений. Единицы измерений должны соответствовать Международной системе единиц (СИ). Каж-

дая таблица должна иметь наименование и содержать результаты измерений и вычислений, приведённые к единому порядку точности по исследуемому параметру;

- расчетные формулы, используемые при обработке результатов экспериментов;

- графики и векторные диаграммы, которые должны быть построены на миллиметровой или клетчатой бумаге. Следует обратить внимание на правильный выбор масштаба, чтобы не исказить физическую сущность процесса в исследуемой схеме и обеспечить необходимую точность и наглядность его представления;

- выводы по работе. В выводах, написанных в третьем лице множественного числа, должны быть отражены достижение цели работы, согласование результатов экспериментов с теоретическими положениями, оценка погрешностей результатов измерений.

4. Защита отчета. Осуществляется лично студентом при представлении преподавателю полностью оформленного отчета. При этом необходимо знать наименование лабораторной работы, физическую сущность исследуемых процессов, согласование полученных в работе результатов с основными теоретическими положениями, ответы на все контрольные вопросы по данной лабораторной работе. Необходимо также самостоятельно собирать электрическую схему по данной работе и при необходимости повторить тот или иной эксперимент с получением определенных результатов измерения параметров электрической цепи или характеристик исследуемой электрической установки.

1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Краткие сведения о лабораторном стенде «Уралочка»

Стенд «Уралочка» с набором комплектующих блоков и соединительных проводов предназначен для исследования процессов в цепях постоянного и переменного тока. На лицевой панели стенда размещены:

1. Три мультиметра ВР-11А – цифровые комбинированные электроизмерительные приборы с гнездами «+» и «-» для включения их в измерительные цепи.

2. Автоматический выключатель QF2 с контрольным светодиодом УД4"30У" (рис. 1) для включения и отключения постоянного тока напряжением 30 В к выходным гнездам «+» и «-».

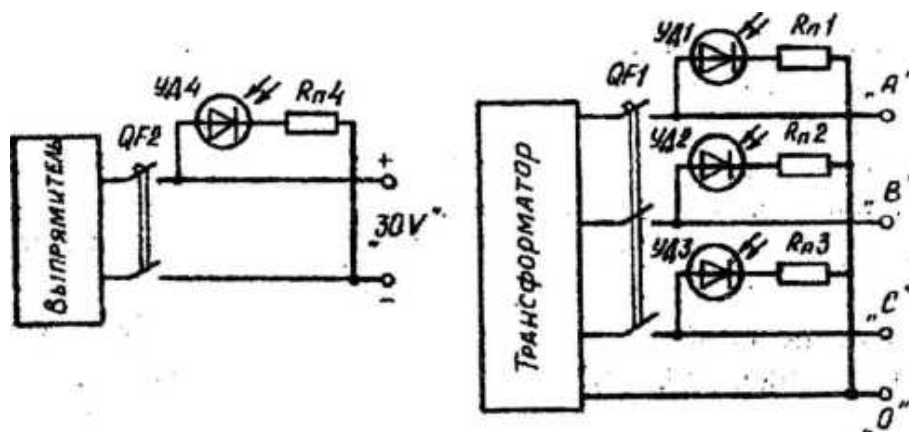


Рис. 1. Автоматические выключатели стенда «Уралочка»

3. Автоматический выключатель QF1 с тремя светодиодами УД1...УД3 в фазах «А», «В» и «С» для включения и отключения трехфазного напряжения к гнездам «А», «В», «С» и «О».

4. Потенциометр R_n - 0-200 Ом – переменное сопротивление для плавного изменения нагрузки потребителя.

5. Тумблер «ВКЛ» для включения и отключения мультиметров в ходе измерения электрических параметров.

6. Предохранитель «Пр1А» на один ампер для защиты мультиметров от перегрузки по току.

7. Лампа осветительная с гнездами подключения – служит в качестве индикатора при поиске неисправностей, возникших в ходе сборки схемы или в процессе работы, а также может быть потребителем электрической энергии.

Комплектующие блоки представляют собой набор резистивных, емкостных и индуктивных элементов, а также коммутационных аппаратов (переключателей). Они совместно с соединительными проводами служат для сборки и исследования простых и разветвленных электрических цепей.

1.2. Общие сведения о мультиметре ВР-11А

Мультиметр ВР-11А представляет собой комбинированный цифровой измерительный прибор и предназначен для измерения напряжения и силы постоянного и переменного тока, сопротивления нагрузки постоянному току, а также частоты переменного тока.

На панели прибора ВР-11А (рис. 2) размещены:

- индикационное табло (1) для высвечивания результата измерения;
- переключатель режимов работы прибора (2) с кнопками:
 - «-V» – для включения прибора в цепи постоянного тока;
 - «~V» – для включения прибора в цепи переменного тока;
 - «kΩ» – для включения прибора в качестве омметра;
 - «kHz*10» – для включения прибора в качестве частотомера;
- переключатель пределов измерения «2мΩ» (3) с кнопками «2», «20», «200» и «2000».

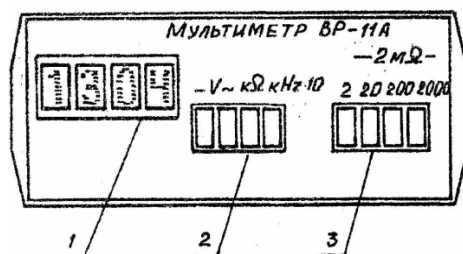


Рис. 2. Передняя панель прибора ВР-11А:
1 – табло; 2 – переключатель режимов; 3 – переключатель пределов

Мультиметр ВР-11А комплектуется двумя токовыми шунтами (рис. 3) для использования его в качестве амперметра: один из них постоянный на 10 А, другой – переменный на 2, 20, 200 и 1000 мА.

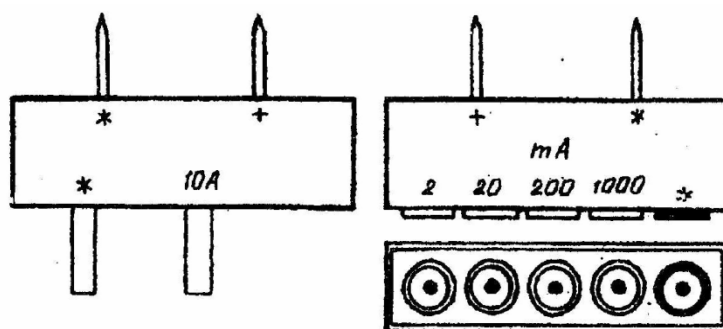


Рис. 3. Шунты ВР-11А для измерения силы тока. Гнезда «*» являются входом, а гнезда «10А», «2, 20, 200, 2000» мА – выходом

Основные технические характеристики мультиметра ВР-11А приведены в таблице.

Основные технические характеристики прибора ВР-11А

Измеряемая величина и размерность	Диапазон измеряемой величины	Пределы измерения на приборе	Относительная погрешность измерения, %
Напряжение постоянного тока, В	$10^{-3} \dots 10^3$	2,20,200,1000*	$\pm 0,5$
Напряжение переменного тока, В $f = *45 \text{ Гц} \dots 1 \text{ кГц}$	$10^{-3} \dots 500$	2,20,200,500*	± 1
Сопротивление постоянному току, кОм	$10^{-3} \dots 2 \cdot 10^3$	2,20,200,2000*	± 1
Сила постоянного тока, мА	$10^{-3} \dots 1 \cdot 10^3$	2,20,200,1000*	± 1
Сила переменного тока, мА $f = 20 \text{ Гц} \dots 10 \text{ кГц}$	$10^{-3} \dots 10 \cdot 10^3$	1000, 10000	$\pm 2,5, \pm 5$
Частота переменного тока, кГц	$0,01 \dots 10^3$	2,20,200,1000*	± 1

Пр и м е ч а н и е . * – на переключателе пределов «2mΩ» нажата кнопка «2000».

Внимание. Во избежание выхода мультиметра из строя необходимо быть внимательным при манипулировании кнопками переключателя пределов. Следует руководствоваться надписями на лицевой панели прибора; нажимать кнопки переключателя пределов в последовательности «2000», «200», «20», «2» при всех видах измерения; переходить на больший предел, когда прибор индицирует перегрузку (высвечивается буква «п» в старшем разряде), и изменять полярность входного сигнала при мигании знака в старшем разряде. Измерения частоты переменного тока следует производить при напряжении не более 20 В. При измерении напряжения более 500 В недопустима манипуляция кнопками переключателя пределов. Измерение силы тока более 0,5 А должно быть кратковременным (не более 20 с).

1.2.1. Измерение электрических величин мультиметром ВР-11А

Измерение напряжения постоянного и переменного тока:

1. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «-V».
2. Нажать на переключателе пределов «2mΩ» кнопку «200».
3. Подключить мультиметр, соблюдая полярность, к гнездам «+», «-» источника «30V» (рис. 4).

4. Включить автоматический выключатель QF2 «30V» (при этом загорается светодиод УД4 «30V») и снять отсчет на цифровом табло.

5. Выключить автоматический выключатель QF2 «30V», при этом гаснет светодиод «30V».

6. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «~V».

7. Подключить мультиметр к гнездам «А» и «0» трехфазного источника.

8. Включить автоматический выключатель QF1, при этом загораются светодиоды УД1-УД3 фаз «А», «В» и «С». Снять отсчет на цифровом табло величины фазного напряжения U_A .

9. Повторить пункты 7 и 8 при измерении фазных напряжений U_B и U_C (гнезда «В»-«0» и «С»-«0»).

Определить среднее значение фазного напряжения источника:

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

10. Подключая прибор к гнездам «А» – «В»; «В» – «С»; «С» – «А», определяем среднее значение линейного напряжения источника:

$$U_{л} = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}).$$

11. Выключить автоматический выключатель QF1. При этом гаснут светодиоды УД1-УД3.

12. Определить отношение $U_{л}/U_{\phi}$.

Измерение величины сопротивления резисторов:

1. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «kQ», а на переключателе пределов «2мП» – кнопку «2».

2. Подключая прибор параллельно R_1 , R_2 на комплектующем блоке и группам их соединения (см. рис. 4), определяем величину сопротивления по результатам отсчета на цифровом табло.

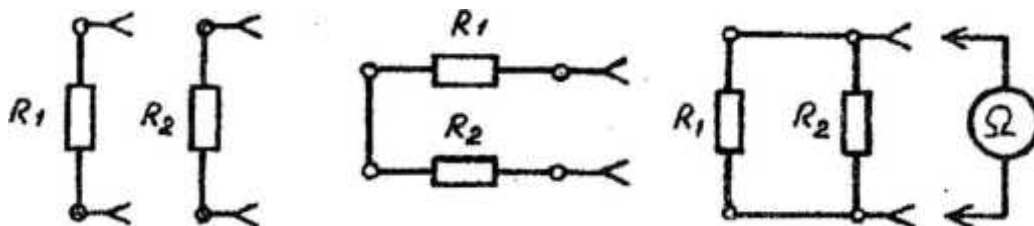


Рис. 4. Измерение сопротивления резистивной нагрузки

3. Проверить соотношения: при последовательном соединении R_1 и R_2 – эквивалентное сопротивление $R_3 = R_1 + R_2$; при параллельном – $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

Измерение силы тока:

1. Подключат» ко входу мультиметра токовый шунт (2...1000) мА.

2. Нажать на переключателе режимов работы кнопку «~V», а на переключателе пределов «2мΩ» – кнопку «2».

3. Собрать схему согласно рис. 5 для измерения силы тока и частоты питающего напряжения.

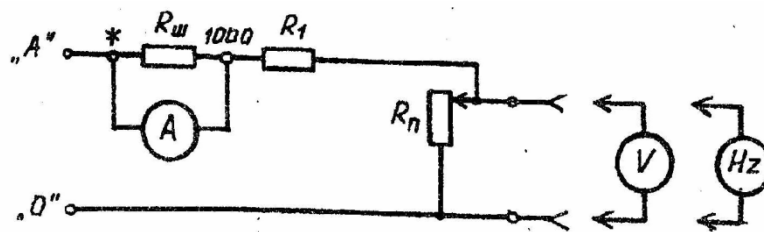


Рис. 5. Схема включения мультиметра ВР-11А

4. Включить автоматический выключатель QF1, при этом загораются светодиоды «А», «В» и «С».

5. Снять отсчет величины тока по цифровому табло при крайних положениях движка потенциометра R_n .

Внимание. При измерении силы тока на запятую, высвечивающуюся в старшем разряде, внимание не обращать. Предел измерения определяется задействованным выходом шунта (гравировка над гнездом).

6. Выключить автоматический выключатель QF1. При этом схему не разбирать.

Измерение частоты переменного тока:

1. Подготовить второй мультиметр ВР-11А для измерения переменного напряжения, подключить его к движку потенциометра $R_n \sim 0-200$ Ом и к гнезду «0» нулевого провода (см. рис. 5).

2. Включить автоматический выключатель QF1 и движком потенциометра R_n установить по вольтметру напряжение менее 20В.

3. Нажать кнопку «kHz-10» переключателя режима работы мультиметра, используемого в качестве вольтметра, а на переключателе пределов «2mΩ» – кнопку «2».

4. Снять по цифровому табло отсчет значения частоты переменного тока. Сравнить его со стандартным значением $f = 50$ Гц.

5. Выключить питание и представить результаты измерений преподавателю.

6. Разобрать схему.

1.3. Краткое описание лабораторного стенда «Электрические машины»

Стенд «Электрические машины» (рис. 6) предназначен для исследования режимов работы электрических машин постоянного и переменного тока, а также однофазного трансформатора и включает в себя:

- электрическую машину постоянного тока (3);
- трехфазный асинхронный двигатель с КЗ-ротором (2);
- лабораторный стол (1).

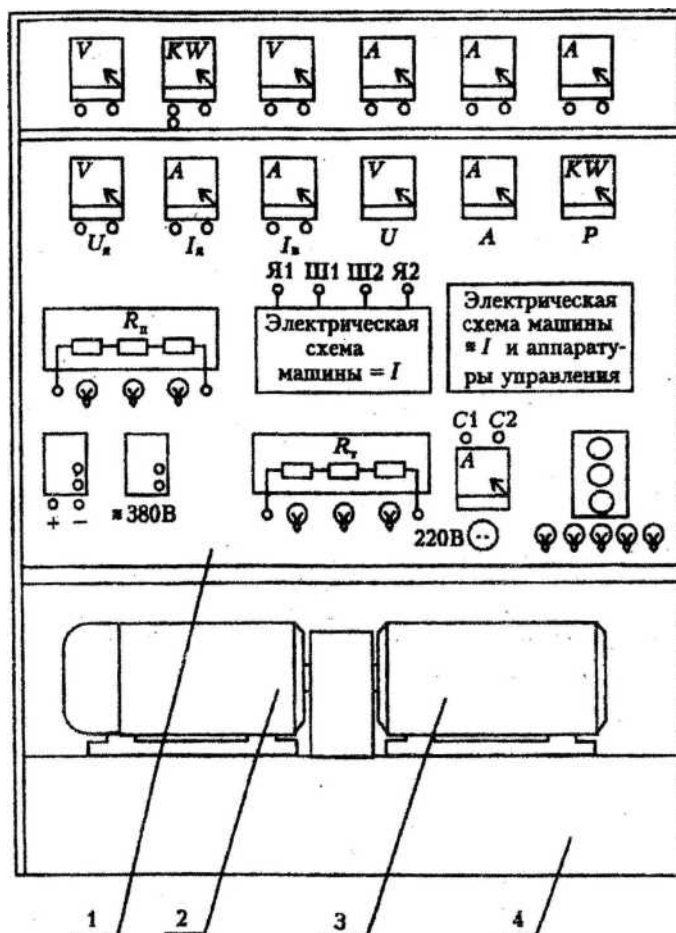


Рис. 6. Лабораторный стенд «электрические машины»

Электрические машины установлены на бетонном фундаменте (4), а их вращающиеся части механически жестко связаны друг с другом. Последнее обеспечивает возможность проводить исследования режимов работы машины постоянного или переменного тока, при этом вторая машина является нагрузкой. Так, в силу обратимости электрических машин при исследовании трехфазного асинхронного двигателя его нагрузкой будет генератор постоянного тока, а при исследовании двигателя постоянного тока – электромашинный тормоз в виде трехфазной асинхронной машины с КЗ-ротором.

На лабораторном столе размещены (сверху вниз и слева направо):

1. Панель электромеханических измерительных приборов для исследования режимов работы однофазного трансформатора.

2. Панель электромеханических измерительных приборов для исследования режимов работы электрических машин постоянного и переменного тока.

3. Трехступенчатый пусковой реостат R_n с тремя однополюсными выключателями для защиты якорной цепи двигателя постоянного тока от перегрузки по пусковому току и плавного вывода его на номинальный режим работы.

4. Электрическая схема машины постоянного тока с выводами якорной цепи (Я1, Я2) и цепи возбуждения (Ш1, Ш2).

5. Электрическая схема трехфазной асинхронной машины и принципиальная электрическая схема системы управления пуском, торможением и реверсом машины.

6. Два автоматических выключателя для включения постоянного (клеммы «+» и «-») и трехфазного (-380 В) напряжения на лабораторном стенде.

7. Трехсекционный тормозной реостат R_T с тремя однополюсными выключателями для регулирования нагрузки асинхронного двигателя, работающего в режиме электромашинного тормоза.

8. Электрическая розетка «220В» для подачи питания на однофазный трансформатор и включения стробоскопического тахометра при измерениях частоты вращения валов электрических машин.

9. Кнопочная станция для управления работой трехфазного асинхронного двигателя.

10. Пять однополюсных выключателей для имитации возможных неисправностей в цепях системы управления трехфазным асинхронным двигателем.

Контрольные вопросы

1. Что включает в себя этап самостоятельной подготовки студента к лабораторным занятиям?

2. Содержание отчета по лабораторной работе.

3. Как изображаются на принципиальной электрической схеме следующие элементы: резистор, выключатель, автоматический трехполюсный выключатель, конденсатор, катушка индуктивности, измерительный прибор, трехфазный асинхронный двигатель с КЗ-ротором? Их размеры.

4. Назначение элементов управления на лицевой панели стенда «Уралочка».

5. Как подготовить мультиметр ВР-11А к измерению силы переменного тока до 1 А?

6. Как измерить мультиметром ВР-11А величину фазного напряжения источника переменного тока?

7. Как измерить мультиметром ВР-11А величину сопротивления делителя напряжений на комплектующем блоке?

8. Назначение приборов контроля и элементов управления на лицевой панели лабораторного стенда «Электрические машины».

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Целью работы является приобретение навыков:

- в сборке электрических схем на лабораторных стендах и пользовании цифровыми и электромеханическими измерительными приборами при измерениях электрических величин;
- в обработке результатов измерений и оценке полученной при этом погрешности.

1. Теоретические сведения

Погрешности измерений

Измерением какой-либо физической величины называется операция, в результате которой становится известно, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за эталон.

На практике используются измерительные приборы, которые тем или иным образом сверены с эталоном.

Различают прямые и косвенные измерения.

Прямым называется измерение, в котором значение интересующей нас величины получается непосредственно из отсчета по измерительному прибору.

При косвенном измерении результат измерения вычисляется как функция одной или нескольких непосредственно измеряемых величин.

Измерения любой физической величины сопровождаются погрешностями измерения – отклонениями результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Численно погрешности измерения выражаются абсолютными и относительными погрешностями. Пусть x – истинное значение измеряемой величины, а x_i – значение, полученное при i -м измерении (наблюдении). Тогда разность $x - x_i = \Delta x_i$ будет называться **абсолютной погрешностью** i -го измерения. В результате имеем $x = x_i \pm \Delta x_i$, т.е. **численное значение полученной из опыта физической величины должно обязательно сопровождаться указанием величины возможной погрешности**. Поэтому в задачу измерений входит не только нахождение значения самой величины, но и оценка допущенной при измерениях погрешности.

Качество результата измерения характеризуется не абсолютной погрешностью Δx_i , а ее отношением к измеряемой величине x или x_i , которое называется относительной погрешностью δ_{xi} .

$$\delta_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x} \cdot 100\% \text{ или } \delta_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x_i} \cdot 100\%.$$

Погрешности измерения возникают вследствие несовершенства метода измерения, ограниченной точности средств измерения, индивидуальных особенностей экспериментатора.

В первом случае они называются **методическими** и возникают вследствие недостаточной разработанности теории явлений, положенных в основу метода измерения, неточности соотношений, используемых для нахождения измеряемой величины, и др.

Погрешности средств измерения называются **приборными** или **инструментальными**. Это погрешности, допущенные при изготовлении прибора и градуировке шкалы, неучете влияния температурных, электрических и магнитных полей и т.п. По способу выражения погрешности средств измерения подразделяются на абсолютные $\Delta x_i = x - x_i$, относительные

$$\delta_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x_i} \cdot 100\%, \text{ и приведенные } \gamma_{xi} = \frac{\Delta x_i}{x_N} \cdot 100\%, \text{ где } x_N - \text{нормирующее}$$

значение, в качестве которого принимают для большей части электроизмерительных приборов верхний предел рабочей части шкалы.

Обобщенной характеристикой средств измерения, отражающей уровень их точности, является **класс точности** – это приведенная погрешность прибора, наносимая на шкале. В этом случае абсолютная погрешность прибора или погрешность градуировки легко определяется как

$$\Delta x = \Delta x_{\text{град}} = \gamma_x \frac{x_N}{100},$$

где γ_x – класс точности прибора.

Для цифровых измерительных приборов, например для мультиметра ВР-11А, значение абсолютной погрешности определяется по паспортным данным на прибор.

Индивидуальные особенности экспериментатора при снятии отсчета по градуировочной шкале прибора приводят к субъективным погрешностям, которые могут быть оценены **погрешностью** снятия отсчета

$$\Delta x_{\text{отсч}} = (0,1 \dots 0,5)d,$$

где d – цена наименьшего деления рабочей части шкалы измерительного прибора.

Все рассмотренные погрешности содержат систематическую и случайную составляющие.

Систематические погрешности – погрешности, которые при повторении измерений тем же методом в неизменных условиях повторяются, не изменяясь ни по величине, ни по знаку, либо изменяются закономерно. Систематические погрешности устраняются изменением методики измерений или введением поправок на результат измерения ($\pm \varepsilon_x$).

Поправка ε_x берется из паспортных данных на измерительный прибор. Она определяется в измерительной лаборатории путем сравнения его показаний с показаниями образцового прибора, т.е. прибора более высокого класса точности. Такая поверка рабочего прибора осуществляется не менее одного раза в два года. Номер измерительной лаборатории, год и квартал поверки наносятся на защитное стекло шкалы прибора мастичным клеймом.

Случайные погрешности – погрешности, которые при многократных повторениях опыта изменяются нерегулярно, что приводит к разбросу измеряемых значений. Случайные погрешности оцениваются ошибками разброса $\Delta x_{\text{разб}}$.

Учитывая это, **единичные измерения следует считать недопустимыми**. Всякое измерение должно проверяться многократным повторением.

Пусть x_1, x_2, \dots, x_n – значения измеряемой величины при n наблюдениях.

Тогда среднее арифметическое результата измерения будет равно:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i .$$

При этом средняя арифметическая погрешность определяется как

$$\Delta x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{\text{ср}} - x_i| .$$

Результат измерения составит: $x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x_{\text{ср}}$. Знак «+» или «-» показывает, что истинное значение измеряемой величины находится в интервале $x_{\text{ср}} - \Delta x_{\text{ср}} \leq x \leq x_{\text{ср}} + \Delta x_{\text{ср}}$, который называется доверительным интервалом или величиной ошибки.

Вероятность P того, что измеряемая величина находится в доверительном интервале, называется **доверительной вероятностью** или **коэффициентом надежности** a_x .

$$P(x_{\text{ср}} - \Delta x_{\text{ср}} \leq x \leq x_{\text{ср}} + \Delta x_{\text{ср}}) = a_x .$$

Точность измерения оценивается средней квадратической погрешностью σ_x :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{\text{ср}} - x_i)^2} .$$

Коэффициент надежности a_x связан со средней квадратической погрешностью σ_x следующими соотношениями: σ_x соответствует

$$a_x = 0,68; 2\sigma_x \rightarrow a_x = 0,95; 3\sigma_x \rightarrow a_x = 0,99.$$

Таким образом, для определения погрешности измерения необходимо определить два числа: величину ошибки (доверительный интервал) и коэффициент надежности a_x .

Методика обработки результатов измерений

Обработка результатов прямых измерений

Полная погрешность прямых измерений оценивается средней абсолютной погрешностью Δx :

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{град}}^2 + \Delta x_{\text{отсч}}^2 + \Delta x_{\text{разб}}^2}.$$

При этом схема обработки результатов прямых измерений сводится к следующей последовательности:

- по классу точности прибора определяется погрешность градуировки

$$\Delta x_{\text{град}} = \gamma_x \frac{x_N}{100};$$

- по цене деления шкалы прибора определяется погрешность снятия отсчета

$$\Delta x_{\text{отсч}} = 0,5d;$$

- из паспортных данных по результатам поверки прибора на основе сравнения его с образцовым прибором берется поправка ϵ_x со своим знаком «+» или «-»;

- проводятся измерения физической величины x_1, x_2, \dots, x_n и вычисляются

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{и} \quad \Delta x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{\text{ср}} - x_i|;$$

- находится погрешность разброса

$$\Delta x_{\text{разб}} = \begin{cases} \Delta x_{\text{ср}} & \text{при } n \geq 4; \\ 1,5\Delta x_{\text{ср}} & \text{при } n = 3; \\ 3,0\Delta x_{\text{ср}} & \text{при } n = 2; \end{cases}$$

- определяется средняя абсолютная погрешность

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{град}}^2 + \Delta x_{\text{отсч}}^2 + \Delta x_{\text{разб}}^2};$$

– находится результат измерения $x=(x_{\text{ср}}\pm\varepsilon_x)\pm\Delta\lambda$.

При проведении единичного измерения $\Delta x_{\text{разб}}=0$ и средняя абсолютная погрешность при прямом измерении $\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{град}}^2 + \Delta x_{\text{отсч}}^2}$.

Пример 1. Амперметром класса точности 1,5 со шкалой (0-2) А и ценой деления 0,1 А проведено двукратное измерение силы тока в электрической цепи. Получены данные измерений 1,2 и 1,3 А. Определить результат измерения и полученную при этом погрешность, если поправка на прибор равна +0,05А.

Решение:

1. $\Delta I_{\text{град}} = 1,5 \frac{2}{100} = 0,03 \text{ А.}$

2. $\Delta I_{\text{отсч}} = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05 \text{ А.}$

3. $\varepsilon_I = +0,05 \text{ А.}$

4. $I_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(1,2 + 1,3) = 1,25 \text{ А.}$

$$\Delta I_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\{|1,25 - 1,2| + |1,25 - 1,3|\} = 0,05 \text{ А.}$$

5. $\Delta I_{\text{разб}} = 3,0 \cdot I_{\text{ср}} = 3 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ А.}$

6. $\Delta I = \sqrt{0,03^2 + 0,05^2 + 0,15^2} = 0,16 \text{ А.}$

7. $I = (1,25 + 0,05) \pm 0,16 = (1,3 \pm 0,16) \text{ А.}$

Пример 2. Вольтметром класса точности 1,0 со шкалой (0-250) В и ценой деления 5 В измерено напряжение в фазе источника. Полученное значение равно 127 В. Определить результат измерения и полученную при этом погрешность.

Решение:

1. $\Delta U_{\text{град}} = 1 \frac{250}{100} = 2,5 \text{ В.}$

2. $\Delta U_{\text{отсч}} = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ В.}$

3. $\Delta U = \sqrt{2,5^2 + 2,5^2} = 3,5 \text{ В.}$

4. $U = (127 \pm 3,5) \text{ В.}$

Обработка результатов косвенных измерений

Пусть $x=f(\alpha,\beta,\gamma)$, где α,β,γ – независимые переменные, которые определены в результате прямых измерений:

$$\alpha = \alpha_{\text{ср}} \pm \Delta\alpha; \quad \beta = \beta_{\text{ср}} \pm \Delta\beta; \quad \gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma.$$

Тогда $x_{\text{ср}}=f(\alpha_{\text{ср}},\beta_{\text{ср}},\gamma_{\text{ср}})$, что справедливо для линейных функций и для общего случая при малых погрешностях $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$.

При этом средняя абсолютная погрешность косвенного измерения величины x определится как

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \gamma} \Delta \gamma\right)^2},$$

где в скобках приведены абсолютные частные ошибки функции x по аргументам α , β и γ . Значения частных производных вычисляются для значений аргументов $\alpha_{\text{ср}}$, $\beta_{\text{ср}}$ и $\gamma_{\text{ср}}$.

Пример 3. Определить активную мощность P методом амперметра и вольтметра (косвенный метод), используя данные примеров 1 и 2.

Решение:

1. $P=UI$;

$$U = U_{\text{ср}} \pm \Delta U = (127 \pm 3,5) \text{ В};$$

$$I = I_{\text{ср}} \pm \Delta I = (1,3 \pm 0,16) \text{ А};$$

$$P_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} = 127 \cdot 1,3 = 165 \text{ Вт.}$$

$$2. P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \Delta I\right)^2} = \sqrt{(I_{\text{ср}} \Delta U)^2 + (U_{\text{ср}} \Delta I)^2} =$$

$$= \sqrt{(1,3 \cdot 3,5)^2 + (127 \cdot 0,16)^2} = 21 \text{ Вт.}$$

3. $P=(165 \pm 21) \text{ Вт.}$

Пример 4. Определить активное сопротивление нагрузки R методом амперметра и вольтметра (косвенный метод), используя данные примеров 1 и 2.

Решение:

1. $R = \frac{U}{I}$;

$$U = U_{\text{ср}} \pm \Delta U = (127 \pm 3,5) \text{ В};$$

$$I = I_{\text{ср}} \pm \Delta I = (1,3 \pm 0,16) \text{ А};$$

$$R_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{I_{\text{ср}}} = 98 \text{ Ом.}$$

$$2. \Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial I} \Delta I\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{\text{ср}}}\right)^2 \Delta U^2 - \left(\frac{U_{\text{ср}}}{I_{\text{ср}}^2}\right)^2 \Delta I^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{1,3} \cdot 3,5\right)^2 + \left(-\frac{127}{1,3^2} \cdot 0,16\right)^2} = 12 \text{ Ом.}$$

$R = (98 \pm 12) \text{ Ом.}$

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему согласно рис. 1.1.

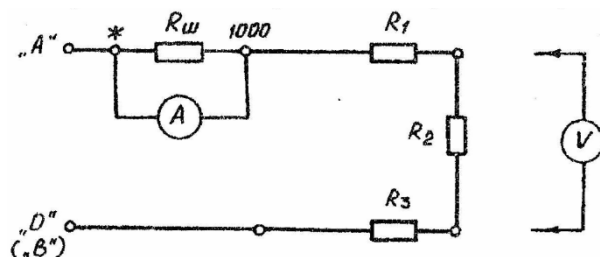


Рис. 1.1. Схема измерения параметров электрической цепи переменного тока

2.2. Измерить фазное и линейное напряжения источника питания, падение напряжений на делителе R_1 , R_2 , R_3 и величину тока. Данные занести в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Результаты измерения параметров электрической цепи
и оценка погрешностей результатов измерений

	Измерено					Вычислено					
	U	U_1	U_2	U_3	I	ΔU	ΔI	R	ΔR	P	ΔP
	В	В	В	В	А	В	А	Ом	Ом	Вт	Вт
$U=U_\phi$											
$U=U_\pi$											

Оценить погрешности прямых и косвенных измерений, пользуясь следующими соотношениями:

$$R = \frac{U}{I}; \Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \Delta U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I^2} \Delta I\right)^2};$$

$$P = UI; \Delta P = \sqrt{(I \Delta U)^2 + (U \Delta I)^2},$$

где абсолютные погрешности приборов ВР-11А ΔU и ΔI взять из паспортных данных (см. таблицу в разд. 1).

2.3. На лабораторном стенде «Электрические машины» (см. рис.6 в подразд. 1.3) включить автоматический выключатель «-380 В». Пользуясь кнопочной станцией магнитного пускателя, запустить асинхронный двигатель сначала «Вперед», а затем «Назад», фиксируя показания амперметра A , вольтметра V и ваттметра KW . Данные занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты измерения электрических параметров в цепи питания
асинхронного двигателя

	Измерено			Вычислено							
	U	I	P	$U_{\text{ср}}$	ΔU	$I_{\text{ср}}$	ΔI	$P_{\text{ср}}^{\text{п}}$	$\Delta P^{\text{п}}$	$P_{\text{ср}}^{\text{к}}$	$\Delta P^{\text{к}}$
	В	А	Вт	В	В	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт
«Вперёд»											
«Назад»											

Внимание. Реверс осуществлять только после полной остановки ротора двигателя.

2.4. Оценить погрешности измерения электрических параметров в цепях питания асинхронного двигателя, пользуясь следующими соотношениями:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(U_{\text{в}} + U_{\text{н}}); \Delta U = \sqrt{\Delta U_{\text{град}}^2 + \Delta U_{\text{отсч}}^2 + \Delta U_{\text{разб}}^2}; \Delta U_{\text{раз}} = 3\Delta U_{\text{ср}};$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(I_{\text{в}} + I_{\text{н}}); \Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{град}}^2 + \Delta I_{\text{отсч}}^2 + \Delta I_{\text{разб}}^2}; \Delta I_{\text{разб}} = 3\Delta I_{\text{ср}};$$

$$P_{\text{ср}}^{\text{п}} = \frac{1}{2}(P_{\text{в}} + P_{\text{н}}); \Delta P^{\text{п}} = \sqrt{\Delta P_{\text{град}}^2 + \Delta P_{\text{отсч}}^2 + \Delta P_{\text{разб}}^2}; \Delta P_{\text{раз}} = 3\Delta P_{\text{ср}};$$

$$P_{\text{ср}}^{\text{к}} = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} \cos \varphi; \cos \varphi = (0,12 \dots 0,16);$$

$$\Delta P^{\text{к}} = \sqrt{(I_{\text{ср}} \Delta U)^2 + (U_{\text{ср}} \Delta I)^2}.$$

Индексы “в” и “н” соответствуют пуску двигателя “Вперед” и «Назад», “п” и “к” – прямым и косвенным измерениям. Значение $\cos \varphi$ задается преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Какие измерения называются прямыми, а какие – косвенными?
2. Какие погрешности сопровождают процесс измерения?
3. Какие погрешности характеризуют средства измерения?
4. Что такое класс точности прибора?
5. Последовательность обработки результатов прямых измерений.
6. Как оценивается погрешность косвенного измерения?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R -, L -, C -ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: научиться исследовать изменение характера электрической цепи при различных соотношениях реактивных элементов, выявлять условия возникновения в цепи резонанса напряжений и получить практические навыки в построении векторных диаграмм по экспериментальным данным.

1. Основные теоретические сведения

В линейной электрической цепи, параметры которой не зависят от величины и направления тока, под действием синусоидального напряжения устанавливается синусоидальный ток той же частоты.

Мгновенные значения синусоидальных напряжений и токов в общем виде могут быть записаны в виде уравнений

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Здесь U_m, I_m – максимальные или амплитудные значения напряжения и тока; $(\omega t + \psi_u), (\omega t + \psi_i)$ – их фазы, где ω – угловая частота, равная $2\pi f$ ($f=50$ Гц – промышленная частота); ψ_u, ψ_i – начальные фазы (фазы при $t = 0$); t – текущее время.

На практике при оценке действия синусоидального тока пользуются действующими значениями напряжения и тока, которые связаны с амплитудными следующими соотношениями:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m ; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m.$$

Электроизмерительные приборы, измеряющие ток и напряжение, показывают всегда действующие значения измеряемой величины.

Разность начальных фаз между напряжением и током $\psi_u - \psi_i = \varphi$ называют углом сдвига фаз. Угол φ определяет характер нагрузки в электрической цепи.

Любая синусоидальная функция времени в декартовой плоскости OXY может быть условно изображена однозначно соответствующим ей вращающимся радиусом-вектором, длина которого равна амплитудному значению синусоиды, а начальное положение относительно оси OX определяется начальной фазой синусоиды (рис.2.1).

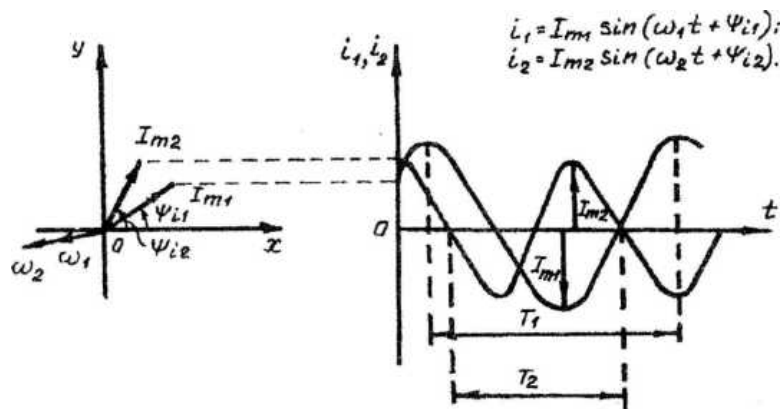


Рис.2.1. Вращающиеся радиусы-векторы и соответствующие им синусоидальные функции времени

Совокупность радиусов-векторов, изображающих синусоидальные функции времени, называется векторной диаграммой.

Изображение векторных диаграмм в декартовой плоскости отличается простотой построения и хорошей наглядностью, но не обеспечивает в ряде случаев требуемой точности расчетов параметров синусоидальных функций. Повысить точность аналитических расчетов позволяет рассмотрение синусоидальных функций на комплексной плоскости (рис.2.2).

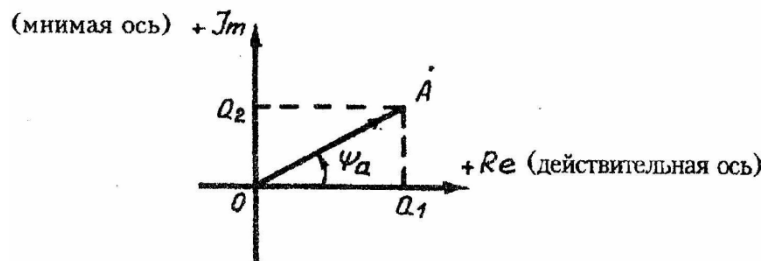


Рис.2.2. Изображающий вектор на комплексной плоскости

Изображающий вектор A на комплексной плоскости расположен относительно оси действительных чисел под углом ψ_a , равным начальной фазе синусоидальной функции. Длина вектора в выбранном масштабе равна ее амплитудному значению.

Любому вектору A , расположенному на комплексной плоскости, соответствует комплексное число, которое может быть записано в трех формах:

алгебраической $A = a_1 + ja_2$;

тригонометрической $A = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a = A (\cos \psi_a + j \sin \psi_a)$;

показательной $A = A e^{j\psi_a}$.

Все три формы записи равнозначны. Выбор той или иной формы в каждом конкретном случае диктуется удобством осуществления нужной математической операции: при суммировании удобна алгебраическая форма, при умножении и делении – показательная.

Переход от одной формы к другой осуществляется с помощью следующих соотношений:

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}; \quad \psi_a = \arctg \frac{a_2}{a_1}; \quad a_1 = A \cos \psi_a; \quad a_2 = A \sin \psi_a;$$

здесь a_1 – действительная часть комплексного числа;

a_2 – мнимая часть комплексного числа;

ψ_a – аргумент комплексного числа.

Следует иметь в виду, что аппарат комплексных изображений применим для анализа электрической цепи, в которой действуют источники одной известной угловой частоты ω . Это, как правило, источники промышленной частоты $\omega = 314$ рад/с ($f = 50$ Гц).

Особый интерес представляет сопоставление по амплитуде и фазе тока и напряжения одного и того же элемента цепи. Это сопоставление проводят также с помощью комплексных чисел.

Отношение комплексной амплитуды напряжения к комплексной амплитуде тока называется комплексным сопротивлением:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

Комплекс Z является комплексным числом, а не изображением синусоидальной функции. Тогда закон Ома в комплексной форме будет иметь вид:

$$\dot{U}_m = \underline{Z} \dot{I}_m \quad \text{или} \quad \dot{U} = \underline{Z} \dot{I}.$$

При анализе электрических цепей синусоидального тока в качестве основных элементов принимают резистивный R , емкостный C и индуктивный L элементы, источники ЭДС e и тока i . Сопротивление резистивного элемента R в цепи переменного тока называется **активным**, элемента C – **емкостным**, элемента L – **индуктивным**. Все эти три элемента являются пассивными, т.к. ток и напряжение на них не равны нулю лишь при подключении к ним источника электрической энергии.

В электрической цепи синусоидального тока с R -элементом:

- вектор напряжения U_R совпадает по фазе с вектором тока I , т.е. угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$;

- комплексное сопротивление резистивного элемента является положительным действительным числом, равным активному сопротивлению $\underline{Z} = R$;

- энергетический процесс в цепи характеризуется активной мощностью P , Вт, которую R -элемент потребляет от источника и необратимо преобразует в тепловую энергию $P = UI$.

В электрической цепи синусоидального тока с L -элементом:

- напряжение на индуктивном элементе синусоидально изменяется с той же частотой; вектор напряжения U_L опережает вектор тока I на четверть периода, т.е. угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$;

- комплексное сопротивление резистивного элемента является положительным мнимым числом $\underline{Z} = jX_L = j\omega L$;

- активная мощность индуктивного элемента равна нулю. В цепи происходит периодический обмен энергией между источником и магнитным полем L -элемента. Амплитудное значение мгновенной мощности называется реактивной мощностью $Q_L = UI = X_L I^2$.

В электрической цепи синусоидального тока с C -элементом:

- ток и напряжение также синусоидальны, одинаковой частоты; при этом вектор тока I опережает вектор напряжения U_C на четверть периода, т.е. $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$;

- комплексное сопротивление C -элемента является отрицательным мнимым числом $\underline{Z} = -jX_C = -j \frac{1}{\omega C}$;

- активная мощность C -элемента равна нулю. В цепи происходит периодический обмен энергией между источником и электрическим полем конденсатора. Интенсивность обмена оценивается амплитудным значением мгновенной мощности, которую называют реактивной: $Q_C = UI = X_C I^2$.

В общем случае, когда в последовательной цепи включены R -, L -, C -элементы (рис.2.3,а), эквивалентное комплексное сопротивление цепи \underline{Z} равно сумме комплексных сопротивлений всех последовательно включенных элементов.

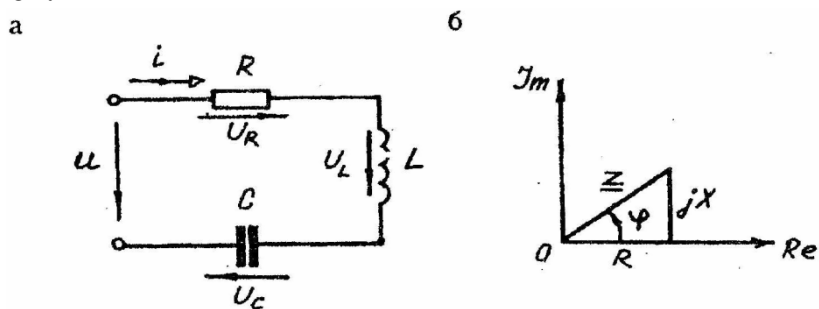


Рис.2.3. Схема цепи с последовательным соединением элементов

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = \dot{I}(R + jX_L - jX_C) = \dot{I}\underline{Z}$$

$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX$; здесь $X = X_L - X_C$ – реактивное сопротивление

Индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления являются арифметическими величинами, зависят только от параметров элементов и угловой частоты: $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Реактивное же сопротивление X – величина алгебраическая, и его знак зависит от соотношения между индуктивным и

емкостным сопротивлениями. Соотношения между Z , R и X можно определить из треугольника сопротивлений, построенного на комплексной плоскости (рис.2.3,6).

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}; \quad R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi.$$

Фазовые соотношения между напряжением и током в цепи определяются углом сдвига $\varphi = \psi_u - \psi_i = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$ (рис.2.4).

В случае $X_L > X_C$, т.е. $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, угол сдвига фаз $\varphi > 0$, вектор напряжения U опережает вектор тока I и цепь носит активно-индуктивный характер (рис.2.4,а).

В случае $X_C \geq X_L$, т.е. $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, угол сдвига фаз $\varphi < 0$, вектор напряжения U отстает от вектора тока I , и цепь носит активно-емкостный характер (рис.2.4,б).

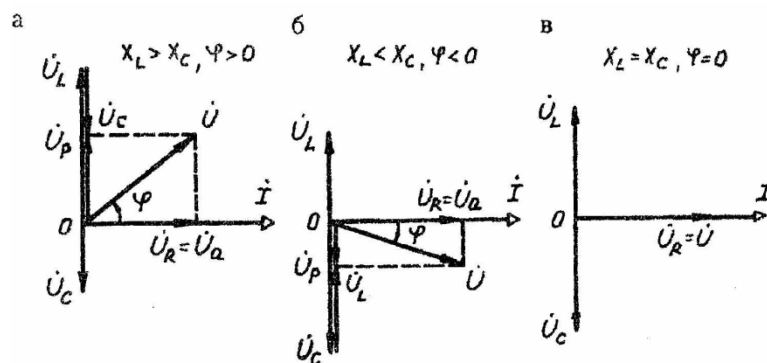


Рис.2.4. Векторные диаграммы цепи с последовательным соединением R -, L -, C -элементов в предположении, что $\psi_i = 0$

И, наконец, возможен третий случай, когда $X_L = X_C$, т.е. $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, угол сдвига фаз $\varphi = 0$, вектор напряжения U совпадает с вектором тока I и цепь носит чисто активный характер. Такой режим в цепи называют **резонансом напряжений**.

При резонансе напряжений $U_L = U_C$, мнимая часть комплексного сопротивления равна нулю, т.е. комплексное сопротивление цепи $\underline{Z} = R$ и ток в цепи достигает своего максимального значения.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему (рис.2.5), используя комплектующие блоки.

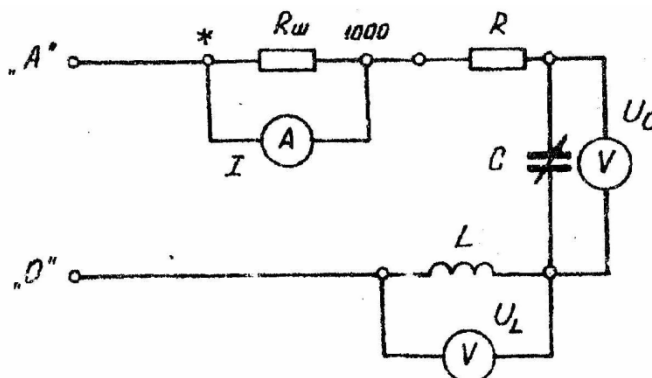


Рис. 2.5. Схема цепи с последовательным соединением R -, C -, L -элементов

Активное сопротивление катушки $R_K < 5$ Ом и ее можно считать чисто индуктивным сопротивлением X_L . В качестве переменной емкости необходимо использовать магазин емкостей, а активное сопротивление выбрать из магазина сопротивлений ($R = 100$ Ом).

2.2. Включить питание и произвести измерения величин тока и падения напряжений на элементах схемы при значениях емкости C 0, 10, 30, 50, 70 и 90 мкФ. Данные занести в табл.2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Результаты измерений и вычислений параметров электрической цепи с последовательным соединением R -, C -, L -элементов при изменении емкости C

Задано		Измерено				Вычислено									
R	C	U	I	U_L	U_C	U_R	L	X_L	X_C	Z	$\cos \varphi$	P	S	S	φ
Ом	мкф	В	А	В	В	В	Гн	Ом	Ом	Ом		Вт	ВА	ВАр	ГРАД

Расчетные формулы для табл. 2.1.

$$UR = IR; L = \frac{UL}{2\pi fI}; X_L = 2\pi fL; X_C = \frac{1}{2\pi fC};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; \cos \varphi = \frac{R}{Z} \text{ или } \cos \varphi = \frac{UR}{U};$$

$$P = I^2 R; S = \frac{P}{\cos \varphi}; Q = S \sin \varphi.$$

2.3. Рассчитать параметры электрической цепи при следующих исходных данных: $R=100$ Ом, $L_{cp}=\frac{1}{5}\sum_{i=1}^5 L_i$ (по данным табл.2.1), $C = 0, 10, 40, 90, \infty$ мкФ, $U=U_{\phi}$. Данные занести в табл.2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Расчетные значения параметров электрической цепи с последовательным соединением R -, C -, L - элементов

C , мкФ	0	10	40	90	∞
$X_C = \frac{1}{314C}$, Ом					
$X_L = 314L_{cp}$, Ом					
$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, Ом					
$I = \frac{U}{Z}$, А					
$U_R = IR$, В					
$U_L = IX_L$, В					
$U_C = IX_C$, В					

2.4. Построить по данным табл.2.1 и 2.2 в общей системе координат графики зависимостей $I=f(C)$, $U_R=f(C)$, $U_L=f(C)$, $U_C=f(C)$, $\phi=f(C)$ и сравнить сходимость экспериментальных (см. табл.2.1) и расчетных (см. табл.2.2) результатов (рис. 2.6). По графикам определить значение резонансной емкости $C = C_p$ и сравнить его с расчетным значением $C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{cp}}$.

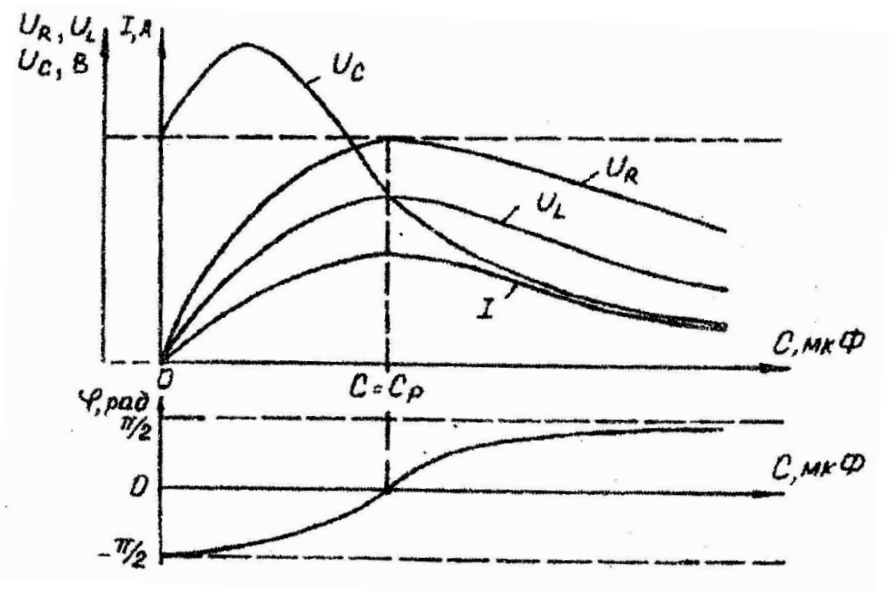


Рис. 2.6. Изменение параметров электрической цепи при изменении емкости C

2.5. Построить в выбранном масштабе векторные диаграммы тока I и напряжений U_R , U_L , U_C и U для трех случаев (см. рис.2.4): до резонанса, при резонансе и после резонанса напряжений, используя экспериментальные данные (см. табл.2.1).

Построение векторной диаграммы удобно начинать с вектора тока I , который является одним и тем же для всех элементов цепи.

Векторы напряжений U_R , U_L и U_C ориентированы по отношению к вектору тока в соответствии с фазовыми соотношениями для R -, L - и C -элементов.

Следует обратить внимание на то, что вектор напряжения $U = U_R + U_L + U_C$ при соблюдении масштаба построения для всех рассматриваемых случаев будет иметь одну и ту же величину, равную фазному напряжению источника. Особенно важно заметить, что вблизи резонанса и при резонансе напряжения на реактивных элементах U_L и U_C , находясь в противофазе, могут значительно превысить напряжение источника. Поэтому резонанс при последовательном соединении элементов называют резонансом напряжения.

2.6. Построить в выбранном масштабе на комплексной плоскости треугольники сопротивлений, напряжений и мощностей для одной строки табл.2.1 до или после резонанса напряжений.

2.7. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Какое значение измеряемой величины показывают электроизмерительные приборы в цепи переменного тока?
2. Что называется углом сдвига фаз и какое влияние он оказывает на характер электрической цепи?
3. Дать характеристику цепи с R - (L - или C)-элементом.
4. Что такое резонанс напряжений и какими параметрами электрической цепи он характеризуется?
5. Начертить в комплексной плоскости треугольник сопротивлений и пояснить его построение.
6. Какой вид имеет векторная диаграмма для активно-индуктивной нагрузки в цепи переменного тока?

Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R-, L-, C-ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: научиться исследовать состояние и определять параметры электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении приемников электрической энергии, а также выявлять условия возникновения резонанса токов в параллельной цепи реальной катушки и конденсатора; приобрести навыки построения векторных диаграмм состояния цепи по экспериментальным и расчетным данным.

1. Основные теоретические сведения

В линейной электрической цепи при параллельном соединении приемников электрической энергии приложенное синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ вызывает в каждой ветви синусоидальные токи одной и той же частоты. Фазовый сдвиг между напряжением и током определяется характером сопротивления ветви.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух параллельных ветвей (рис.3.1). Здесь R_K – активное сопротивление катушки.

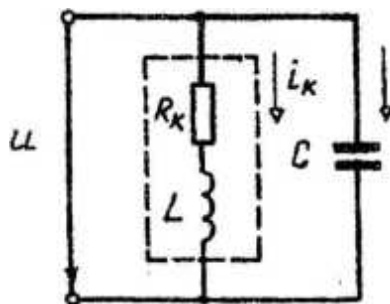


Рис.3.1. Схема цепи с двумя параллельными ветвями

Для узла a согласно первому закону Кирхгофа можно записать $i = i_k + i_c$ или $I = I_k + I_c$. Определим токи в ветвях и общий ток при условии, что начальная фаза напряжения $\psi_u = 0$. Комплексные сопротивления и комплексные проводимости ветвей и всей цепи принимают вид:

$$\underline{Z}_K = R_K + jX_L; \quad \frac{1}{\underline{Z}_K} = \underline{Y}_K = g_K + jb_L;$$

$$\underline{Z}_C = -jX_c; \quad \frac{1}{\underline{Z}_C} = \underline{Y}_C = -jb_C;$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_K \underline{Z}_C}{\underline{Z}_K + \underline{Z}_C}; \quad \frac{1}{\underline{Z}} = \underline{Y} = g + jb = \underline{Y}_K + \underline{Y}_C = g_K + j(b_L - b_C).$$

Здесь \dot{Y}_K , \dot{Y}_C и \dot{Y} – комплексные проводимости ветвей и цепи, у которых действительная часть g называется активной проводимостью, а мнимая b – реактивной проводимостью.

Из приведенных выражений видно, что при параллельном соединении ветвей эквивалентная комплексная проводимость \dot{Y} равна сумме комплексных проводимостей ветвей \dot{Y}_K и \dot{Y}_C .

Определим токи в ветвях и в неразветвленной части цепи:

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_K} = \dot{U}\underline{Y}_K = \dot{U}g_K + \dot{U}jb_L = \dot{I}_{к.а} + \dot{I}_{к.р};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_C} = \dot{U}\underline{Y}_C = -\dot{U}jb_C = -\dot{I}_{ср};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \dot{U}\underline{Y} = \dot{U}g + \dot{U}jb = \dot{I}_a + \dot{I}_p = \dot{I}_{к.а} + (\dot{I}_{к.р} - \dot{I}_{ср});$$

Как видно из полученных выражений, комплексные токи в цепи и в ветвях имеют активные ($\dot{I}_{к.а}$, \dot{I}_a) и реактивные ($\dot{I}_{к.р}$, $\dot{I}_{ср}$, \dot{I}_p) составляющие токов. Такое разделение облегчает анализ фазовых соотношений между током и напряжением при построении векторных диаграмм. При этом возможны следующие случаи:

1) $B_L > b_C$, $\dot{I}_{к.р} > \dot{I}_{ср}$ – цепь носит активно-индуктивный характер, напряжение опережает ток в цепи на угол φ ;

2) $B_L < b_C$, $\dot{I}_{к.р} < \dot{I}_{ср}$ – цепь носит активно-емкостный характер, ток опережает напряжение на угол φ ;

3) $B_L = b_C$, $\dot{I}_{к.р} = \dot{I}_{ср}$ – цепь носит чисто активный характер, ток и напряжение совпадают по фазе ($\varphi = 0$).

Такой режим в параллельной цепи называют **резонансом токов**.

На рис.3.2 приведены векторные диаграммы для рассмотренных случаев при условии, что параметры ветви с катушкой индуктивности и частота источника питания оставались неизменными, а менялась лишь емкость C .

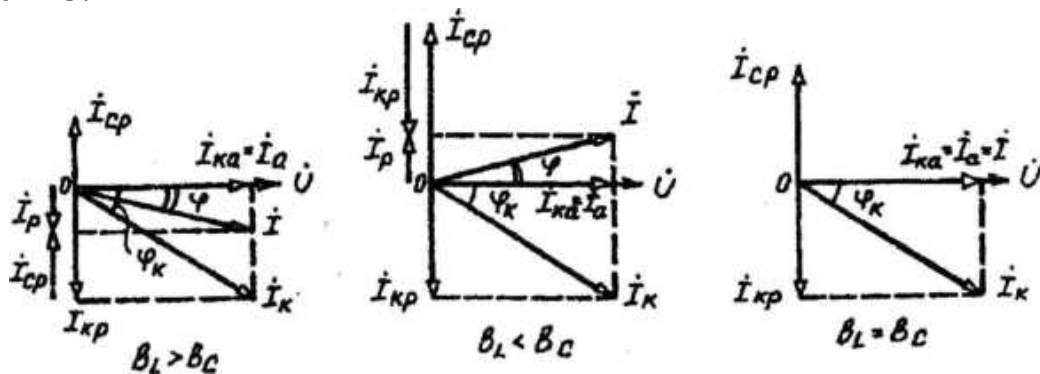


Рис.3.2. Векторные диаграммы синусоидальной цепи с двумя параллельными ветвями

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему согласно рис.3.3, предварительно измерив омметром сопротивление катушки индуктивности R_K .

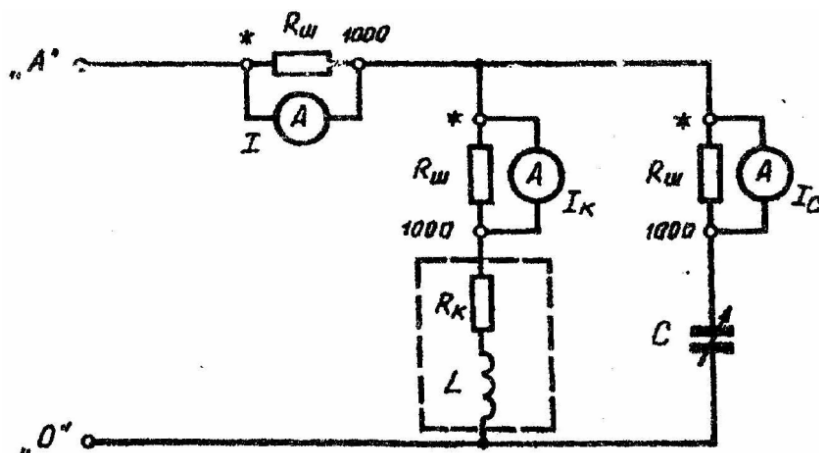


Рис.3.3. Схема сборки цепи параллельного соединения R -, C -, L -элементов

2.2. Включив питание и, изменяя величину емкости C на комплектующем блоке от 0 до 10 мкФ с шагом 1 мкФ, измерить токи в ветвях и в неразветвленном участке цепи. Данные измерений занести в табл.3.1 для дальнейшей обработки.

Таблица 3.1

Изменение параметров цепи с параллельным соединением индуктивного и емкостного элементов при изменении емкости C

Задано		Измерено				Вычислено							
R	C	U	I	I_K	I_C	$I_{к.а}$	$I_{к.р}$	I_p	$\cos\varphi$	φ	S	P	Q
Ом	мкФ	В	А	А	А	А	А	А		рад	ВА	Вт	ВАр

2.3. Произвести расчет параметров ветви с индуктивностью

$$\underline{Z}_K = \frac{U}{I_K}; L = \sqrt{\frac{Z_K^2 - R_K^2}{\omega^2}}; \cos\varphi_K = \frac{R_K}{Z_K}; \sin\varphi_K = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_K},$$

$$I_{к.а} = I_K \cos\varphi_K; I_{к.р} = I_K \sin\varphi_K.$$

2.4. Рассчитать параметры всей цепи.

Так как $I_C = I_{Cp}$, то реактивная составляющая общего тока

$$I_p = I_{к.р} - I_{Cp}, \cos\varphi = \frac{I_{к.а}}{I}; \sin\varphi = \frac{I_p}{I}; S = UI; P = S \cos\varphi;$$

$$Q = S \sin\varphi.$$

2.5. По данным табл.3.1. и результатам расчетов по пунктам 2.3 и 2.4 построить:

– графики зависимостей $I=f(C)$, $I_k=f(C)$, $I_c=f(C)$, $\varphi=f(C)$ определить по экспериментальным данным значение емкости $C=C_p$, при которой наступает резонанс токов (рис.3.4);

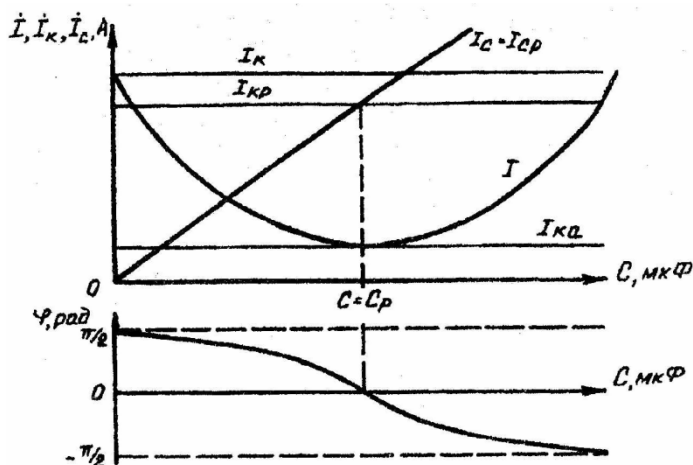


Рис.3.4. Изменение параметров электрической цепи при изменении емкости C

– векторные диаграммы до резонанса, при резонансе и после резонанса токов в цепи (см. рис.3.2). При этом рекомендуется начинать построение с вектора напряжения U , принимая во внимание, что его начальная фаза $\psi=0$;

– треугольник мощностей для случая, когда параллельная цепь носит активно-индуктивный характер.

2.6. Рассчитать значение резонансной емкости $C=C_p$ из условия $\frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2}$ при $R_C=0$. Сравнить полученный результат с экспериментальными данными.

Контрольные вопросы

1. Что такое проводимость ветви электрической цепи?
2. При каком условии параллельная цепь носит активно-емкостный характер?
3. Условия возникновения резонанса токов в параллельной цепи с L - и C -элементами.
4. Каково соотношение токов в ветвях и неразветвленной части цепи при резонансе в параллельной цепи L - и C -элементов?
5. Пояснить технико-экономическое значение повышения коэффициента мощности.

Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: научиться исследовать основные и аварийные режимы работы трехфазной цепи переменного тока при соединении приемников звездой, определять влияние нейтрального провода в четырехпроводной трехфазной цепи, строить по опытным данным векторные диаграммы токов и напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках в фазах приемников электрической энергии.

1. Основные теоретические сведения

Трехфазная цепь состоит из источника электрической энергии, линии передачи и приемников. Источником является трехфазный генератор, у которого статорная обмотка состоит из трех фаз, сдвинутых относительно друг друга на 120° ($2/3 \pi$). При вращении ротора, представляющего собой электромагнит, в обмотках статора возбуждается ЭДС. Если амплитуды этих ЭДС равны, а сдвиг по фазе равен $2/3 \pi$, такую систему называют **симметричной** (рис.4.1).

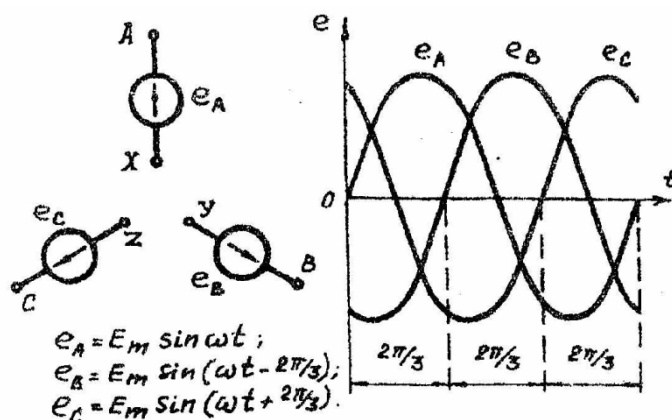


Рис.4.1. Симметричный трехфазный источник
(A, B, C – начала фаз, X, Y, Z – концы фаз)

На практике основными способами соединения фаз трехфазного источника являются связанные системы соединения звездой (рис. 4.2,а), в которой концы фаз X, Y, Z соединяются в один общий узел, называемый нейтралью источника, и треугольником (рис. 4.2,б), где в одну точку соединяются начала и концы соответствующих фаз.

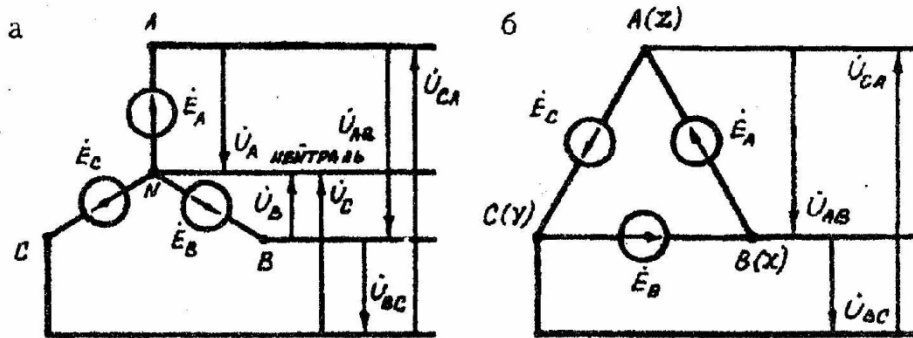


Рис.4.2. Схемы соединения фаз источника звездой и треугольником

Важной особенностью трехфазных цепей является наличие двух напряжений – фазного и линейного. **Фазным** называют напряжение между началом и концом каждой фазы U_A, U_B, U_C , а **линейным** – между началами двух фаз U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . За положительное направление фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз обмоток. Соотношения между линейными и фазными напряжениями трехфазного источника без нарушения симметрии фазных ЭДС определены как $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$. Поэтому предусмотренные ГОСТом линейные и фазные напряжения для цепей низкого напряжения связаны между собой соотношениями:

$$U_{\text{л}} = 660 \text{ В} \rightarrow U_{\text{ф}} = 380 \text{ В}; U_{\text{л}} = 380 \text{ В} \rightarrow U_{\text{ф}} = 220 \text{ В};$$

$$U_{\text{л}} = 220 \text{ В} \rightarrow U_{\text{ф}} = 127 \text{ В}.$$

Схема соединения фаз источника треугольником (чаще всего вторичные обмотки трехфазного трансформатора) позволяет получить только линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть либо однофазными (осветительные и бытовые электроприборы, однофазные двигатели и др.), либо трехфазными. Например, трехфазный асинхронный двигатель. Приемники могут соединяться звездой или треугольником, при этом начала фаз обозначаются прописными буквами a, b, c , а концы – x, y, z (рис.4.3).

Приемник называется **симметричным** (рис.4.3,а), если комплексные сопротивления фаз равны между собой:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}.$$

Если эти условия не выполняются, то приемники называются **несимметричными**. При этом, если модули $Z_a = Z_b = Z_c$, то трехфазный приемник называют **равномерным** (рис. 4.3,г), если равны фазы $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$, то **однородным** (рис. 4.3,б, в).

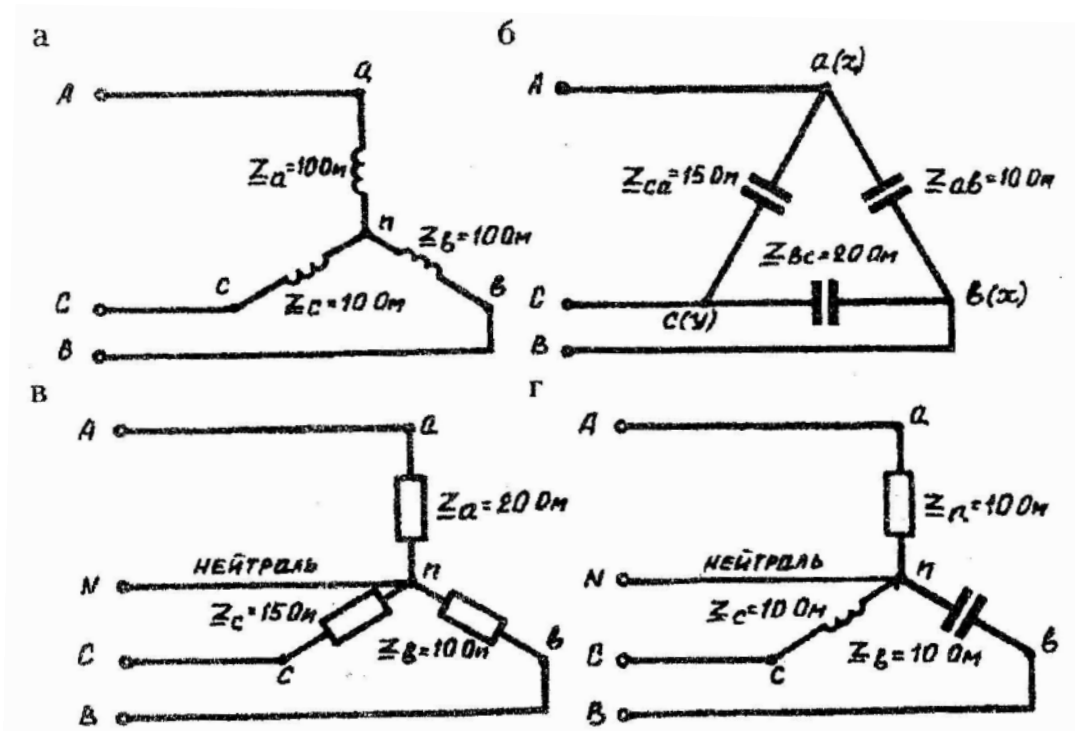


Рис.4.3. Схемы включения однофазных и трехфазных приемников:
 а – трехфазный симметричный приемник (включение фаз звездой по трехпроводной схеме); б – трехфазный несимметричный однородный приемник (включение фаз треугольником); в – однофазный несимметричный однородный приемник (включение звездой по четырехпроводной схеме); г – однофазный несимметричный равномерный приемник (включение звездой по четырехпроводной схеме)

Рассмотрим схему четырехпроводной цепи, в которой фазы генератора и приемника соединены звездой (рис.4.4). Обычно сопротивления линейных проводов и нейтрального провода значительно меньше сопротивлений приемников, поэтому при расчете таких цепей сопротивление проводов можно не учитывать. Тогда фазные напряжения приемника U_A, U_B, U_C будут равны фазным напряжениям источника, т.е. $U_A=U_a, U_B=U_b, U_C=U_c$. Токи в каждой фазе приемника можно определить по формулам:

$$I_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}, \quad I_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}, \quad I_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в нейтральном проводе $I_N=I_a+I_b+I_c=I_A+I_B+I_C$, т.к. в данной схеме соединения линейные токи I_A, I_B, I_C равны фазным I_a, I_b, I_c .

Векторная диаграмма напряжений и токов для несимметричного однородного приемника (см. рис. 4.3,в) представлена на рис. 4.5,а. При построении векторной диаграммы направления векторов U_A, U_B, U_C условно приняты от конца к началу фазы, а комплексная плоскость развернута на $\pi/2$ против часовой стрелки.

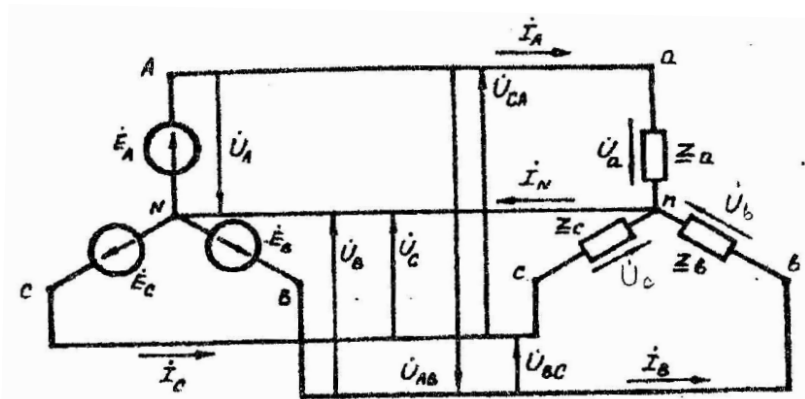


Рис.4.4. Схема четырехпроводной трехфазной цепи

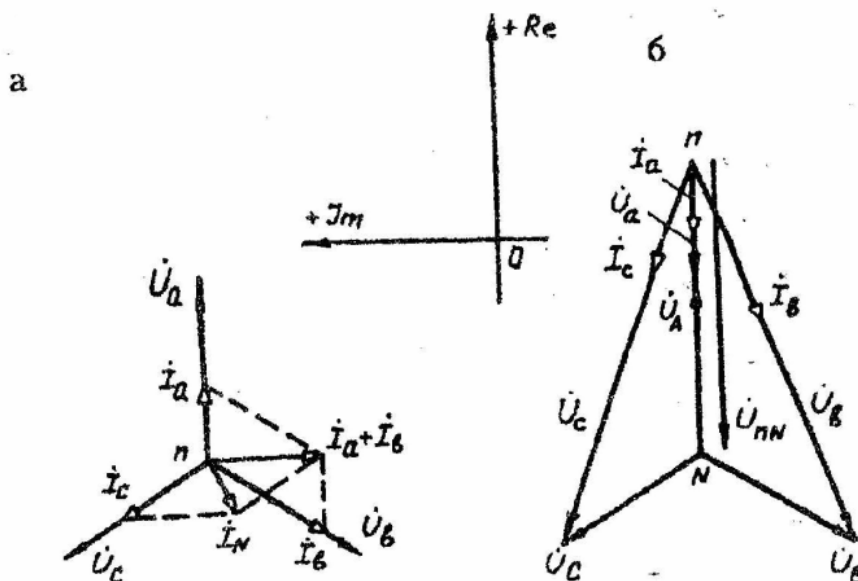


Рис.4.5. Векторные диаграммы напряжений и токов несимметричного однородного приемника, включенного звездой по четырехпроводной (а) и трехпроводной (б) цепи

Из рис. 4.5,а видно, что при равенстве токов в фазах приемника $\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c$, а это возможно лишь при симметричном приемнике $Z_a = Z_b = Z_c$, ток в нейтральном проводе I_N будет равен нулю. В этом случае необходимость в нейтральном проводе отпадает и схему трехфазной цепи можно сделать трехпроводной (рис.4.6).

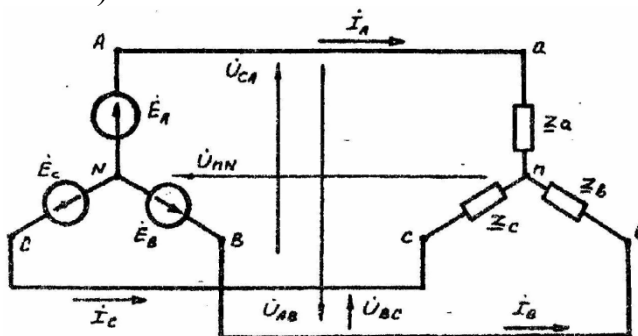


Рис.4.6. Схема трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой

Но для несимметричного приемника векторы токов $\dot{\mathbf{i}}_a = \dot{\mathbf{i}}_b = \dot{\mathbf{i}}_c$ уже не представляют собой симметричную систему (рис.4.5,а), и поэтому ток в нейтральном проводе не будет равен нулю. Значение и фаза тока I_N зависят не только от характера сопротивления фаз приемника, но и от схемы их включения. Например, если в схеме (рис.4.3,г) конденсатор C и катушку индуктивности L поменять местами, то ток в нейтральном проводе изменится в несколько раз.

Если по каким-либо причинам несимметричные приемники, соединенные звездой, окажутся включенными в трехпроводную сеть (рис.4.6), то между нейтральными точками приемника и источника возникнет напряжение U_{nN} , называемое **напряжением между нейтралями**:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

где $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – комплексные проводимости фаз приемника;

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазные напряжения источника.

В этом случае напряжения на фазах приемника будут отличаться друг от друга:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN},$$

а фазные токи будут соответственно равны:

$$\dot{\mathbf{i}}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \dot{U}_a \underline{Y}_a, \quad \dot{\mathbf{i}}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \dot{U}_b \underline{Y}_b, \quad \dot{\mathbf{i}}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \dot{U}_c \underline{Y}_c.$$

В четырехпроводной цепи напряжение между нейтралями может возникнуть в случае обрыва нейтрального провода, и тогда на некоторых фазах приемника напряжения и токи могут значительно превысить номинальные. На рис. 4.5,б представлена векторная диаграмма токов и напряжений для приемника (см. рис. 4.3,в) при обрыве нейтрального провода. Из сравнительного анализа векторных диаграмм (см. рис. 4.5) видно, что напряжения и токи в фазах b и c резко возросли, а в фазе a – уменьшились.

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает сохранение симметрии фазных напряжений несимметричного приемника, что является важнейшим преимуществом четырехпроводной цепи, так как при изменении режима работы одной из фаз режимы других фаз не изменяются.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему четырехпроводной трехфазной цепи (рис. 4.7). Нагрузку в фазах подобрать на комплектующем блоке при условии $R_a=R_b=R_c$, а сопротивление $R_n=100$ Ом – на магазине

сопротивлений. Амперметры включить в фазу а и нейтральный провод. Подготовить один прибор ВР-11А в качестве шльтметра для измерения линейных и фазных напряжений в схеме.

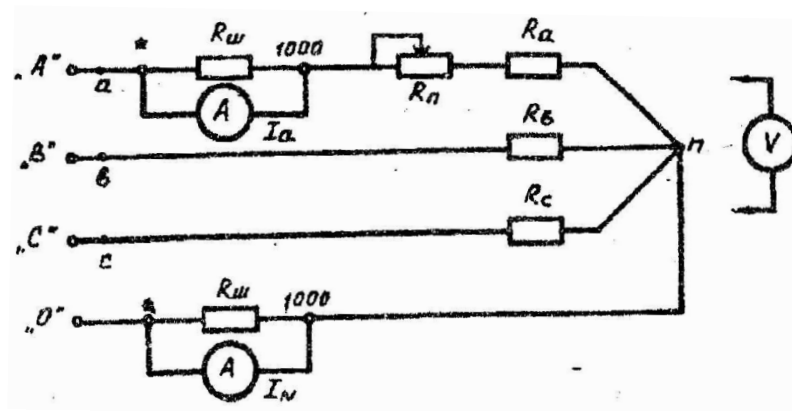


Рис. 4.7. Схема четырехпроводной трехфазной цепи при включении фаз однородного приемника звездой

2.2. Включить трехфазный источник и измерить токи в фазах и нейтральном проводе, фазные и линейные напряжения для следующих случаев:

- а) симметричный приемник ($R_{\pi}=0$);
- б) несимметричный приемник ($R_{\pi}=100$);
- в) обрыв фазы b .

Закончив измерения, выключить питание.

2.3. Собрать на стенде трехпроводную трехфазную цепь для симметричного приемника $R_a=R_b=R_c$ (рис. 4.8,а). Включить питание источника и измерить токи и напряжения при обрыве фазы b . Выключить питание.

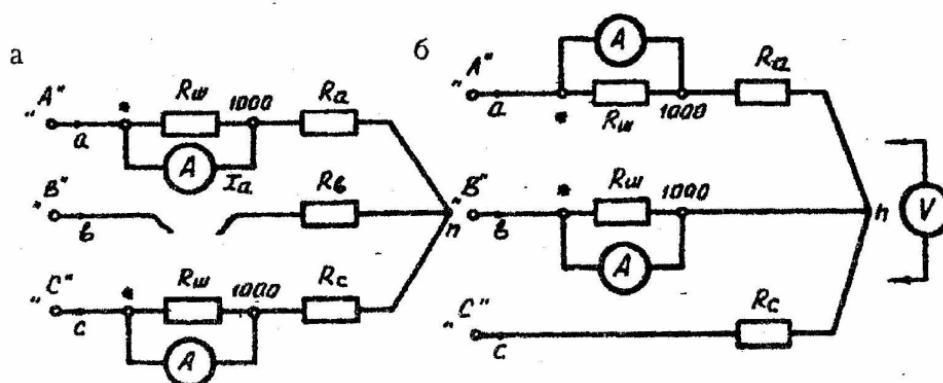


Рис.4.8. Схемы трехпроводной трехфазной цепи для исследования аварийных режимов:
а – обрыв фазы b ; б – короткое замыкание в фазе b

2.4. Собрать на стенде трехпроводную трехфазную цепь для приемника, включенного звездой (рис. 4.8,б), и исследовать режим работы при коротком замыкании в фазе b . Выключить питание.

2.5. Результаты измерений по пунктам 2.2-2.4 занести в табл.4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Результаты измерений параметров трехфазной цепи при включении приемника звездой

Режим	I_a	I_b	I_c	I_N	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
1.Симметричный с нейтралью										
2.Несимметричный с нейтралью										
3.Обрыв фазы b с нейтралью										
4.Обрыв фазы b без нейтрали										
5.КЗ в фазе b без нейтрали										

2.6. По данным табл.4.1 построить в масштабе векторные диаграммы для четырехпроводной (рис.4.9) и трехпроводной (рис.4.10) схем трехфазной цепи для исследуемых режимов работы.

2.7. Для каждого режима рассчитать активную мощность трехфазного приемника, используя следующие формулы:

$$P_a = I_a U_a, P_b = I_b U_b, P_c = I_c U_c, P = P_a + P_b + P_c.$$

2.8. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

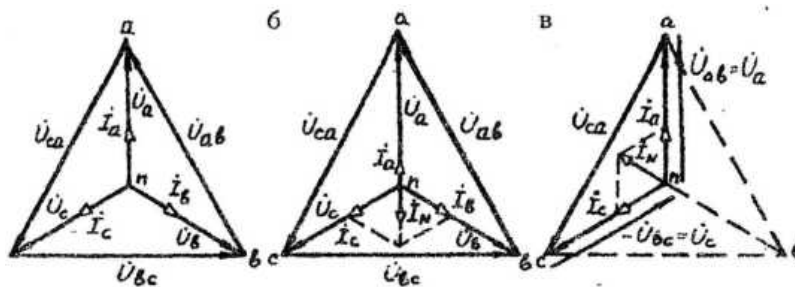


Рис.4.9. Векторные диаграммы токов и напряжений в четырехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой для симметричного (а), несимметричного (б) приемников и при обрыве фазы b (в)

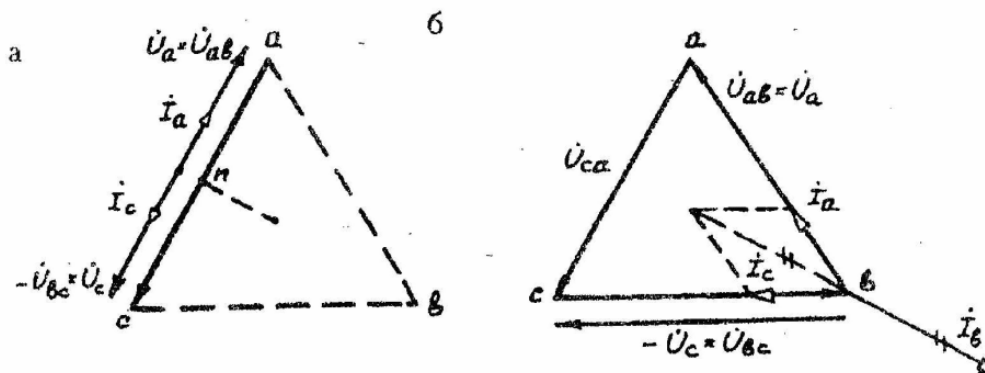


Рис.4.10. Векторные диаграммы токов и напряжений в трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника звездой в аварийных случаях: а – обрыв фазы b ; б – короткое замыкание в фазе b

Контрольные вопросы

1. Характерная особенность четырехпроводной схемы трехфазной цепи переменного тока.
2. Раскрыть понятия «симметричный и несимметричный приемники трехфазной цепи».
3. Каково соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями в схеме соединения приемника звездой?
4. Какова роль нейтрального провода в трехфазной цепи?
5. Можно ли ставить плавкий предохранитель или выключатель на линию нейтрального провода?
6. Аварийные случаи в трехфазной цепи переменного тока и возможные последствия их возникновения.

Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: научиться исследовать основные и аварийные режимы работы трехфазной цепи переменного тока при соединении приемников треугольником; строить по опытным данным векторные диаграммы токов и напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках в фазах приемников.

1. Основные теоретические сведения

Приемники, включаемые в трехфазные цепи, в значительно части бывают несимметричными. Поэтому очень важно на практике обеспечить независимость режима работы отдельных фаз. Кроме четырехпроводной цепи подобными свойствами обладают и трехпроводные цепи при соединении фаз приемника треугольником (рис.5.1).

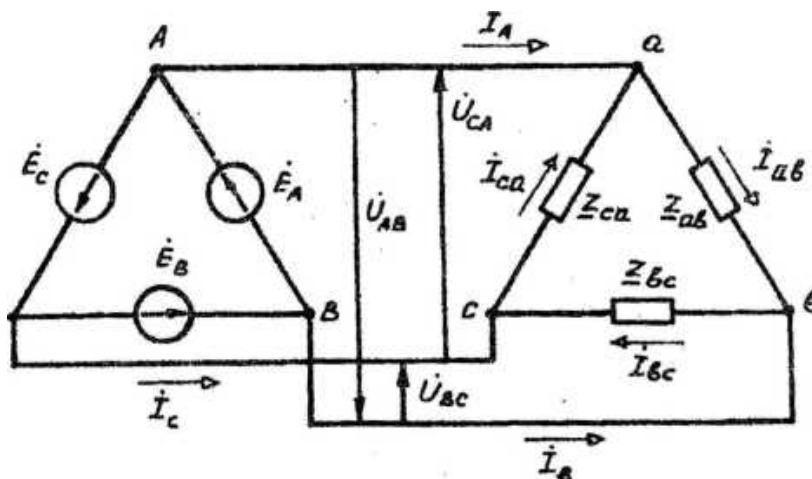


Рис.5.1. Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз приемника треугольником

При этом фазные напряжения приемника равны соответствующим линейным напряжениям источника питания: $U_{ab}=U$, $U_{bc}=U_{BC}$, $U_{ca}=U_{CA}$. Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{i}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}, \quad \dot{i}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}, \quad \dot{i}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}.$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнение по первому закону Кирхгофа для узлов a , b и c (см. рис.5.1):

$$\dot{I}_A = \dot{i}_{ab} - \dot{i}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{i}_{bc} - \dot{i}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{i}_{ca} - \dot{i}_{bc}.$$

С помощью этих уравнений можно определить линейные токи графически, воспользовавшись векторной диаграммой фазных напряжений и токов (рис. 5.2,а или б). В данном случае приемник симметричный ($Z_{ab}=Z_{bc}=Z_{ca}$) и векторы фазных токов образуют симметричную систему. Кроме того, приемник резистивный, так как сдвиги фаз между токами и соответствующими фазными напряжениями равны нулю ($\varphi_{ab}=\varphi_{bc}=\varphi_{ca}=0$).

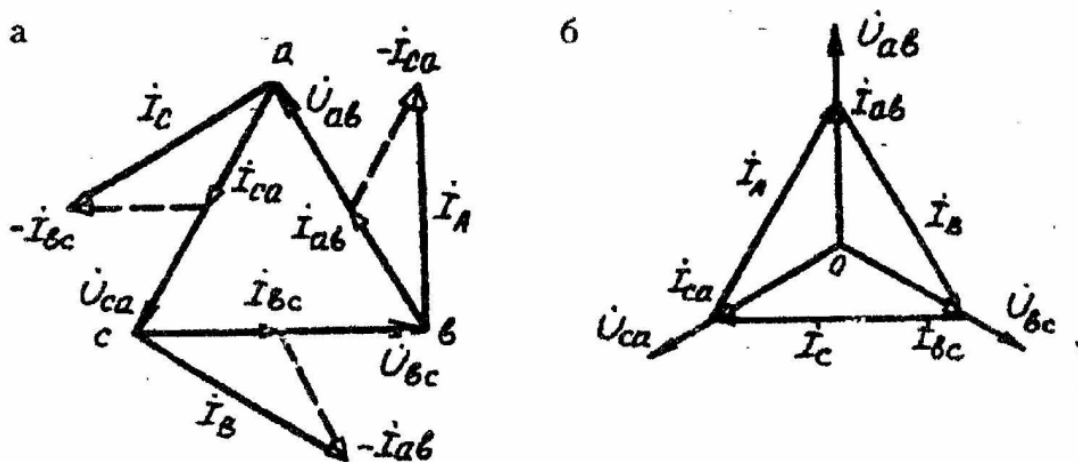


Рис. 5.2. Векторные диаграммы напряжений и токов симметричного приемника, соединенного треугольником

Из векторной диаграммы (см. рис.5.2,б) следует, что в случае симметричных приемников $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$. Сдвиг фаз между токами $I_{л}$ и I_{ϕ} легко определить графически (см., например, рис.5.2,а). Следует обратить внимание на то, что в трехпроводной цепи, независимо от характера приемников, геометрическая сумма линейных токов равна нулю: $I_A+I_B+I_C=0$.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Уралочка» схему трехпроводной цепи согласно рис.5.3 с включением мультиметров ВР-11А в качестве амперметров по 1-й позиции. Их показания определяют фазные токи приемника I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} . Нагрузку в фазах следует брать:

$$R_{ab} = R_1 + R_2, R_{bc} = R_3 + R_4, R_{ca} = R_5 + R_6,$$

где R_1, \dots, R_6 – резисторы на комплектующем блоке.

В качестве потенциометра R_n использовать $R=200$ Ом из магазина сопротивлений.

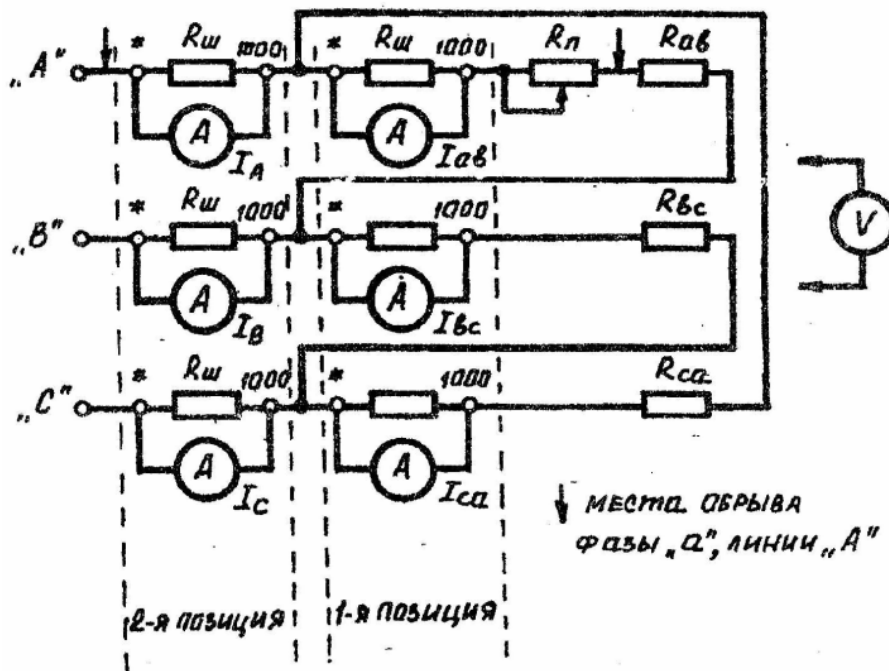


Рис.5.3. Схема сборки трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз резистивного приемника треугольником

2.2. Включить питание стенда и измерить фазные токи приемника для следующих режимов:

- несимметричный приемник ($R_n = 200 \text{ Ом}$);
- симметричный приемник ($R_n = 0$);
- обрыв фазы a ;
- обрыв линейного провода A .

Выключить питание.

2.3. Собрать схему трехпроводной цепи с включением амперметров по 2-й позиции (см. рис.5.3). Их показания определяют линейные токи I_A, I_B, I_C .

Включить питание стенда и измерить линейные токи для тех же режимов (см. пп.2.2). Выключить питание.

2.4. Результаты измерений по пп. 2.2 и 2.3 занести в табл.5.1.

Таблица 5.1

Результаты исследования режимов работы трехпроводной трехфазной цепи при соединении приемников треугольником

Режимы	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
	А	А	А	А	А	А	В	В	В
1.Несимметричный приемник									
2.Симметричный приемник									
3.Обрыв фазы a									
4.Обрыв линии A									

Так как фазные напряжения приемника U_{ϕ} равны линейным напряжениям источника, а они нам известны из результатов выполнения преды-

дущих лабораторных работ, то измерение U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} следует провести только для режима «обрыв линейного провода».

2.5. По данным табл.5.1 в выбранном масштабе построить векторные диаграммы для всех исследуемых режимов (см. рис.5.2 и 5.4).

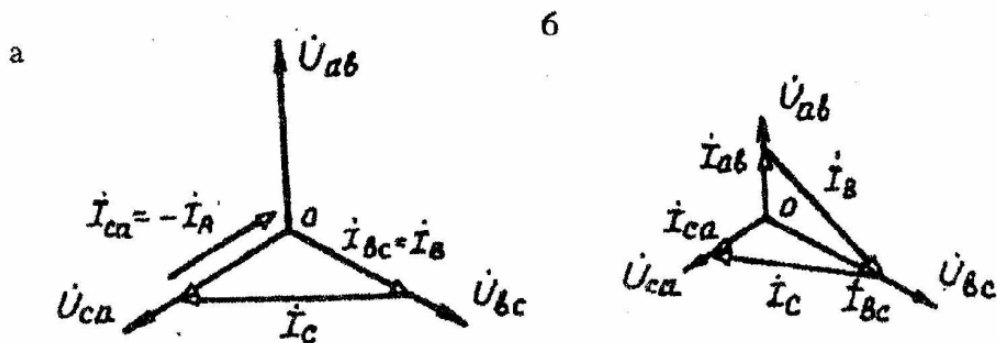


Рис. 5.4. Векторные диаграммы напряжений и токов симметричного приемника при аварийных режимах:
а – обрыв фазы a ; б – обрыв линии A

2.6. Рассчитать активную мощность приемника для каждого режима, используя формулы:

$$P_a = U_{ab} I_{ab}, P_b = U_{bc} I_{bc}, P_c = U_{ca} I_{ca}, P = P_a + P_b + P_c.$$

Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяют трехпроводные трехфазные цепи при соединении фаз приемника треугольником?
2. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями в трехпроводной цепи при соединении приемники треугольником?
3. Построить векторную диаграмму для симметричного активно-индуктивного приемника, соединенного треугольником.
4. Как изменяются фазные напряжения приемника, соединенного треугольником, при обрыве линейного провода?
5. Чему равны активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи симметричного приемника?

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: познакомиться с устройством и принципом действия трансформатора; исследовать основные режимы работы трансформатора, экспериментально определить его основные параметры.

1. Основные теоретические сведения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Конструктивно трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, выполненный из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, на котором расположены в общем случае две обмотки (рис.6.1). К одной обмотке с числом витков w_1 , которая называется первичной, подводится электрическая энергия от источника питания; от другой (вторичной обмотки с числом витков w_2) энергия отводится к приемнику (Z_H). Все электрические параметры, относящиеся к этим обмоткам (I , E , P и др.), называются первичными или вторичными и имеют соответствующие индексы 1 и 2.

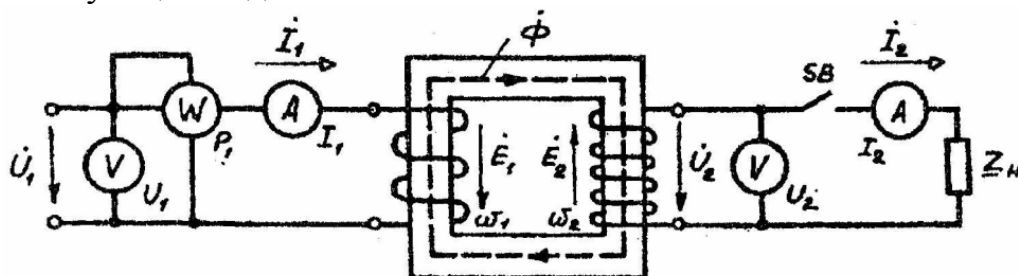


Рис. 6.1. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Под действием подведенного переменного напряжения U_1 в первичной мотке возникает ток I_1 и возбуждается изменяющийся магнитный поток Φ' . Этот поток индуцирует ЭДС E_1 и E_2 в обмотках трансформатора. ЭДС E_1 уравнивает основную часть напряжения источника U_1 ЭДС, E_2 создает напряжение U_2 на выходных зажимах трансформатора.

При замыкании ключа SB во вторичной цепи возникает ток I_2 , который образует в магнитопроводе собственный магнитный поток Φ' , накладывающийся на поток первичной обмотки Φ' . В результате создается общий поток Φ , сцепленный с витками обеих обмоток трансформатора и определяющий в них результирующие ЭДС E_1 и E_2 .

На рис. 6.1 показаны условно-положительные направления всех физических величин, характеризующих электромагнитный процесс в трансформаторе. Так, положительное направление потока Φ связано с током I_1 правилом правоходового винта. То же правило определяет положительное направление потока Φ , ЭДС E_1 и E_2 ; тока и напряжения во вторичной цепи. Это позволяет правильно записать уравнения электрического состояния трансформатора.

Рассматривая принцип действия трансформатора, обычно пренебрегают магнитным полем рассеяния и активным сопротивлением обмоток. Такой трансформатор называют идеализированным.

Уравнения электрического состояния обмоток идеализированного трансформатора для мгновенных значений параметров имеют вид:

$$u_1 = -e_1, u_2 = +e_2,$$

где $e_1 = +w_1 \frac{d\Phi}{dt}, e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$.

Отношения напряжений и ЭДС

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{w_1}{w_2} = K.$$

называют коэффициентом **трансформации**. Из последнего следует, что форма кривых напряжений $u_2(t)$ и $u_1(t)$ одинакова. В трансформаторе происходит «масштабное» преобразование переменного напряжения в K раз. При синусоидальном первичном напряжении вторичное напряжение также синусоидально. Отношение комплексных напряжений:

$$\frac{\dot{U}_{1m}}{\dot{U}_{2m}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = K.$$

Действующие значения напряжений связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = K.$$

Поток в магнитопроводе определяется напряжением u_1 :

$$\Phi(t) = \frac{1}{W_1} \int u_1(t) dt.$$

При $u_1(t) = U_{1m} \sin \omega t$ $\Phi_m = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega}$

В трансформаторе происходит преобразование не только переменных напряжений, но и токов. Уравнение магнитного состояния идеализированного трансформатора имеет вид: $w_1 i_1 + w_2 i_2 \approx 0$.

$$\text{Отсюда } -\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{K}.$$

Следовательно, кривые изменения токов $i_2(t)$ и $i_1(t)$ подобны. Действительное направление тока $i_2(t)$ противоположно направлению тока $i_1(t)$ относительно одноименных выводов обмоток w_1 и w_2 . Поэтому магнитодвижущие силы (МДС) первичной $w_1 i_1$ и вторичной $w_2 i_2$ обмоток действуют встречно и уравнивают друг друга.

При синусоидальных токах:

$$-\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{1}{K}, \quad \frac{I_2}{I_1} = K.$$

Возьмем отношения

$$\frac{u_1 i_1}{u_2 i_2} = \frac{p_1}{p_2} = 1 \text{ или } p_1 = p_2.$$

В идеализированном трансформаторе электрическая энергия передается полностью из первичной обмотки во вторичную и далее в приемник, хотя обмотки имеют только магнитную связь и электрически изолированы друг от друга.

Кроме того, трансформатор обладает свойством саморегулирования тока i_1 .

При изменении нагрузки (тока i_2) выполняется закон сохранения энергии и обеспечивается баланс мгновенных мощностей $p_1 = p_2$ или $u_1 i_1 = u_2 i_2$.

Трансформатор характеризуется следующими основными параметрами:

- номинальной мощностью S_{H} , В·А;
- номинальными значениями напряжения и тока в первичной $U_{1\text{H}}$, $I_{1\text{H}}$ и вторичной $U_{2\text{H}}$, $I_{2\text{H}}$ цепях;
- количеством обмоток и схемой их соединения;
- относительным значением напряжения короткого замыкания (КЗ) $U_{\text{кз}}$ %.

Различают следующие режимы работы трансформатора:

1. Режим холостого хода (XX) – исследовательский режим. При этом $I_2=0$, $Z_{\text{H}}=\infty$ (см. рис.6.1 – переключатель SB разомкнут). В режиме XX можно определить:

- коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{1\text{x}}}{U_{2\text{x}}} = \frac{U_{1\text{H}}}{U_{2\text{H}}}, \quad (U_{1\text{x}} \leq 1,1 U_{1\text{H}});$$

- потери мощности в магнитопроводе на нагрев трансформатора

$$P_{\text{H.наг}} = P_{1\text{x}} - I_{1\text{x}}^2 R_1;$$

– коэффициент мощности XX $\cos \varphi_x = \frac{P_{1x}}{U_{1x} I_{1x}}$;

– активную $I_{ta.x} = I_{tx} \cos \varphi_x$ и реактивную $I_{1p.x} = I_{1x} \sin \varphi_x$ составляющие тока XX.

2. Опыт КЗ – исследовательский режим. При этом $Z_H=0$

$$U_{1к} \approx (5...10)\%U_{1н}, I_{1к} = I_{1н}. \text{ Тогда } E_2 = (2...5)\%E_{2н}.$$

При опыте КЗ можно определить:

– мощность потерь в обмотке трансформатора

$$P_{н.обм} = P_{1к} \text{ или } P_{н.обм} = I_{1н}^2 R_1 + I_{2н}^2 R_2;$$

– коэффициент мощности при КЗ $\cos \varphi_k = \frac{P_{1к}}{U_{1к} I_{1к}}$;

– активное, полное и реактивное сопротивления КЗ:

$$U_{a.к} = \frac{R_k I_{1к}}{U_{1н}} 100\%, U_{p.к} = \frac{X_k I_{1н}}{U_{1н}} 100\%, U_k = \frac{Z_k I_{1н}}{U_{1н}} 100\%;$$

– коэффициент трансформации $K = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} 100\%$.

Следует заметить, что опыты XX и КЗ проводят на заводе-изготовителе при испытаниях трансформатора. Результаты испытаний вносят в паспорт трансформатора.

3. Рабочий режим – основной режим работы трансформатора под нагрузкой. Важнейшим показателем трансформатора в рабочем режиме является его внешняя вольт-амперная характеристика:

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } U_1 = U_{1н} \text{ и } \cos \varphi_2 = \text{const (рис. 6.2)}.$$

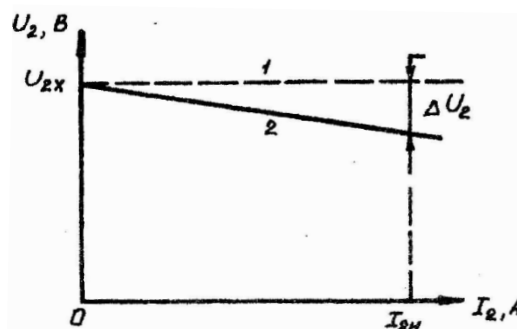


Рис. 6.2. Внешняя характеристика идеального (1) и реального (2) трансформаторов

У идеализированного трансформатора $U_2 = \frac{U_1}{K} = U_{2к} = \text{const}$, т.е. напряжение U_2 не зависит от нагрузки. У реального трансформатора существуют

ЭДС от полей рассеяния и падения напряжений на активных сопротивлениях обмоток. При обычной активно-индуктивной нагрузке напряжение U_2 уменьшается с ростом тока I_2 . Изменение вторичного напряжения $\Delta U_2 = U_{2x} - U_2$ характеризует устойчивость работы трансформатора. У силовых трансформаторов при $I_2 = I_{2н}$ отношение $\Delta U_2 / U_{2x}$ имеет порядок 5-10 %. Трансформаторы проектируются так, чтобы напряжение ХХ U_{2x} было на 5 % больше номинального напряжения приемников электрической энергии.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать на стенде «Электрические машины» схему согласно рис.6.3. Выписать данные трансформатора и электроизмерительных приборов.

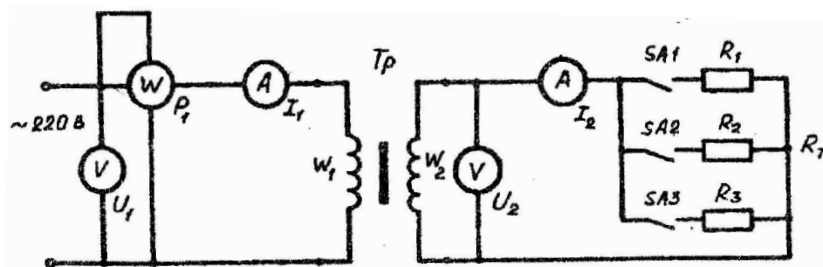


Рис. 6.3. Схема исследования однофазного трансформатора на лабораторном стенде

2.2. Исследовать режимы ХХ и рабочий при изменении нагрузки R_T . Данные занести в табл.6.1.

Т а б л и ц а 6.1

Результаты исследования однофазного трансформатора

Режим работы	R_T	Измерено					Вычислено			
		U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	K	$\cos \varphi$	P_2	η
		В	В	Вт	В	А			Вт	%
ХХ	∞									
Рабочий	$R_T = R_1$ $R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ $R_T = R_T$									

Расчетные формулы для ХХ:

$$K = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}, \quad \cos \varphi_x = \frac{P_{1x}}{U_{1x} I_{1x}}.$$

Для рабочего режима: $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ при $\cos \varphi_2 = 0,85$, $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$.

2.3. Для рабочего режима построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$ и оценить величину ΔU_2 .

2.4. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Что называется трансформатором и каковы основные режимы его работы?
2. В чем заключается принцип трансформации напряжения и тока?
3. Что называется коэффициентом трансформации? Способы его определения.
4. Паспортные данные трансформатора. Что они определяют?
5. Показать графически внешнюю характеристику трансформатора. Что она определяет?
6. Применение трансформаторов на объектах строительства.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучение особенностей конструкции трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, приобретение навыков построения его механической характеристики, исследование режимов работы асинхронного двигателя при изменении нагрузки на валу.

1. Основные теоретические сведения

Электроприводы большинства машин и механизмов, используемых в строительном производстве, в своей структуре в качестве исполнительных устройств содержат трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Они отличаются простотой конструкции и обслуживания, имеют меньшую стоимость по сравнению с другими двигателями постоянного и переменного тока.

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижной части – статора и подвижной вращающейся части – ротора. Статор представляет собой литой корпус, в который запрессован пакет штампованных листов электротехнической стали. В пазах пакета размещена трехфазная обмотка в виде трех отдельных катушек (или групп катушек), сдвинутых по окружности статора относительно друг друга на $2/3\tau$, где $\tau = \pi D_{ст}/2$ – ширина полюса, а $D_{ст}$ – диаметр статора.

Ротор представляет собой цилиндр, также набранный из штампованных листов электротехнической стали, насаженных в виде пакета на вал ротора. На наружной части пакета ротора имеются пазы, в которых укладывается обмотка ротора. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется из медных или алюминиевых стержней способом заливки пазов пакета расплавленным металлом, при этом на торцевых частях ротора одновременно отливаются замыкающие кольца и лопасти вентилятора. Такая обмотка получила название «беличье колесо», т.к. проводники образуют фигуру, похожую на колесо для белки.

Вал ротора установлен на подшипниках в подшипниковых щитах, укрепляемых по торцам статора. На корпусе имеется коробка выводов, в которой размещены начала (C_1, C_2, C_3) и концы (C_4, C_5, C_6) катушек каждой фазы обмотки статора (рис.7.1). Фазы обмотки статора могут быть соединены звездой или треугольником.

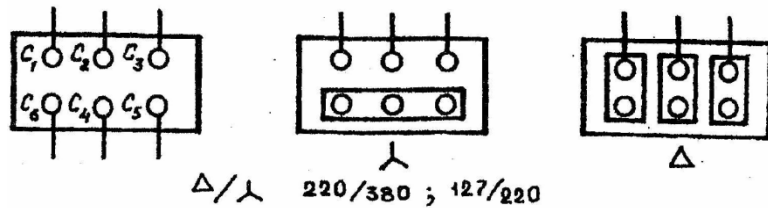


Рис. 7.1. Щиток с выводами фаз обмотки статора и способы их включения

Принцип действия асинхронного двигателя основан на двух явлениях: образовании рабочего вращающегося магнитного поля тока в обмотке статора и воздействии этого поля на токи, индуцированные в короткозамкнутых витках ротора.

Условия образования вращающегося магнитного поля трехфазной обмотки статора:

- смещение катушек разных фаз на $2/3\tau$;
- сдвиг токов в катушках по фазе на $2/3\pi$;
- равенство действующих фазных МДС ($W_A I_A = W_B I_B = W_C I_C$).

За один период T магнитное поле делает полный оборот. Угловая скорость этого поля зависит от частоты токов статорной обмотки ω и числа пар полюсов p : $\Omega = \omega/p$.

Обычно скорость вращения характеризуется частотой вращения:

$$\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30}; \quad \omega = 2\pi f; \quad \frac{\pi n_1}{30} = \frac{2\pi f}{p}.$$

Откуда $n_1 = \frac{60f}{p}$ об/мин.

При промышленной частоте $f=50$ Гц частота вращения магнитного поля статора n_1 получает фиксированные значения в зависимости от числа пар полюсов $p=1,2,3,\dots$, т.е. от конструкции машины:

$$n_1=3000; 1500; 1000,\dots \text{ об/мин.}$$

В проводниках обмотки ротора вращающееся магнитное поле индуцирует ЭДС E_2 , которая создает в короткозамкнутой обмотке ротора ток I_2 . На проводники ротора с током I_2 во вращающемся магнитном поле статора действует электромагнитная сила F , возникает электромагнитный момент $M = FD/2$, где D – диаметр ротора. Этот момент M заставляет ротор вращаться вслед за полем статора. Однако ротор никогда не сможет вращаться с той же скоростью, что и поле статора, так как при равенстве их скоростей будет индуцироваться ЭДС E_2 в обмотке ротора и, следовательно, не будет создаваться ток ротора I_2 . Обозначив частоту вращения ротора n_2 , условие образования вращающегося электромагнитного момента можно выразить следующим образом:

$$M > 0, \text{ если } n_2 < n_1.$$

Таким образом, ротор асинхронного двигателя вращается несинхронно-асинхронно по отношению к полю статора. Относительную частоту $n_s = n_1 - n_2$ называют **частотой скольжения**, а отношение $\frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ — **скольжением**. Скольжение играет фундаментальную роль в теории асинхронных машин и определяет режимы работы асинхронной машины (рис.7.2).

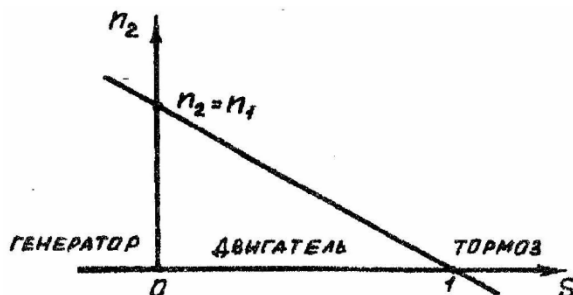


Рис.7.2. Режимы работы асинхронной машины

Асинхронные двигатели проектируют так, что при работе на холостом ходу $n_{2x} \approx n_1$ и $S_x = 0,001 - 0,05$, при номинальной нагрузке $n_{2н} \approx 0,95n_1$ и $S_н = 0,05$.

Зависимость электромагнитного момента M от величины скольжения S определяется выражением

$$M = \frac{2M_{кр}}{S / S_{кр} + S_{кр} / S},$$

где $M_{кр}$ — критический (максимальный) момент, величина которого пропорциональна квадрату напряжения питания статора U_1^2 и может быть определена через перегрузочную способность двигателя $\lambda = 1,7 \dots 2,5$,

$$M_{кр} = \lambda M_н;$$

здесь $M_н$ — номинальный момент двигателя, определяемый по паспортным данным;

$S_{кр}$ — критическое скольжение, которому соответствует $M = M_{кр}$,

$$S_{кр} = S_н \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right).$$

От зависимости $M=f(S)$ можно перейти к механической характеристике двигателя $n_2=f(M)$, учитывая, что $n_2=n_1(1-S)$ (рис.7.3).

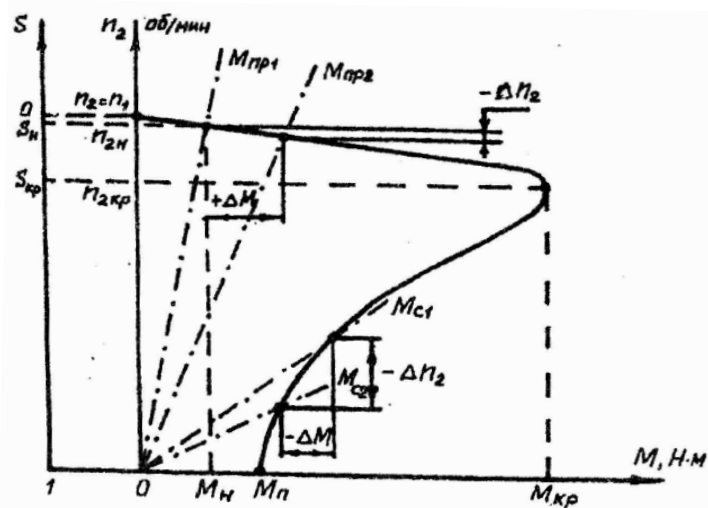


Рис.7.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

На механической характеристике можно выделить следующие режимы работы двигателя:

- холостой ход (точка с координатами $n_2=n_1, 0$);
- номинальный режим ($n_{2н}, M_n$);
- критический режим ($n_{2кр}, M_{кр}$);
- пусковой режим ($0, M_п$).

Критическая точка ($n_{2кр}, M_{кр}$) делит механическую характеристику на два участка: участок устойчивой работы двигателя от точки холостого хода до критической и участок неустойчивой работы ($n_{2кр}, M_{кр} - M_n$). На участке устойчивой работы (на основном участке) проявляется свойство саморегулирования двигателя – при изменении противодействующего момента, создаваемого рабочим механизмом (нагрузкой), автоматически изменяется вращающийся момент двигателя и восстанавливается равенство моментов на валу.

Уравнение движения электродвигателя в общем случае можно представить в следующем виде:

$$J \frac{dn_2}{dt} = M - M_{пр},$$

где J – момент инерции вращающихся частей, приведенный к валу электродвигателя

$\frac{dn_2}{dt}$ – скорость изменения частоты вращения вала двигателя

M – электромагнитный момент двигателя

$M_{пр} (M_c)$ – противодействующий момент (момент сопротивления) рабочего механизма. На рис. 7.3 характер изменения $M_{пр} (M_c)$ соответствует нагрузке в виде генератора постоянного тока.

В установившемся режиме при номинальной нагрузке $M = M_n - M_{пр1}$. При этом $dn_2/dt=0$ и частота вращения двигателя $n_2=n_{2н}=\text{const}$. С увеличением противодействующего момента $M_{пр2}>M_{пр1}$ равновесие моментов в правой части уравнения нарушается. Это приводит к тому, что $dn_2/dt<0$ и двигатель уменьшает обороты на величину Δn_2 . В связи с этим частота скольжения n_s увеличивается, повышается скорость вращения магнитного поля статора машины, а значит, увеличивается индуцированная в проводниках ротора ЭДС E_2 . Следовательно, возрастают токи ротора I_2 , электромагнитная сила F и электромагнитный момент $M=M_n+\Delta M$. Таким образом, автоматически восстанавливается равновесие моментов на валу. При этом вал двигателя вращается с меньшей частотой $n_2 = n_{2н} - \Delta n_2$. И наоборот, при уменьшении $M_{пр}$ уменьшается момент двигателя M , но возрастает частота вращения вала двигателя n_2 .

Из рис.7.3 видно, что свойство саморегулирования на участке неустойчивой работы не выполняется. При любом изменении момента сопротивления M_c падает частота вращения n_2 и уменьшается момент двигателя M , а это приводит к его остановке.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя показывают зависимость эксплуатационных параметров машины от мощности на валу двигателя P_2 . К этим параметрам относятся: ток в обмотке статора I_2 , частота вращения вала двигателя n_2 , электромагнитный момент M , коэффициент мощности $\cos\varphi$ и КПД η . Выражая параметры в относительных единицах по отношению к номинальным значениям, можно получить типовые рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис.7.4).

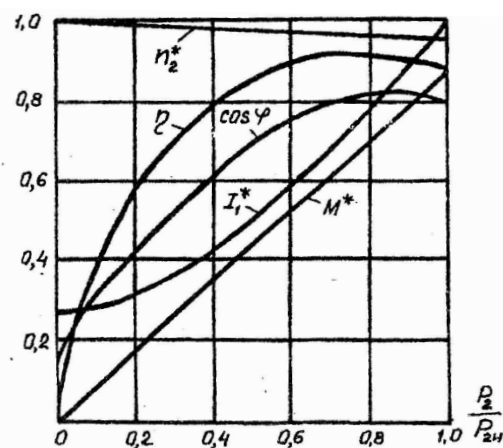


Рис.7.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Анализ рабочих характеристик позволяет сделать следующие обобщенные выводы:

1) частота вращения вала двигателя n_2 мало зависит от изменения мощности: $n_2 - (0,995...0,998)n_1$, $n_{2к} = 0,95n_1$;

2) КПД при отсутствии нагрузки равен нулю; по мере увеличения мощности P_2 КПД (η) повышается; максимум η находится в пределах $(0,7...0,8)P_{2н}$, затем уменьшается из-за увеличения потерь в обмотках двигателя;

3) коэффициент мощности $\cos\varphi$ при холостом ходе $P_2=0$ имеет значение примерно 0,2, что указывает на недопустимость длительной работы двигателя без нагрузки. При номинальной нагрузке $\cos\varphi = 0,7...0,8$;

4) момент на валу M пропорционален мощности P_2 во всем диапазоне изменения нагрузки;

5) ток статора I_1 в режиме холостого хода существенно зависит от величины воздушного зазора δ и в зависимости от мощности двигателя P_2 находится в пределах $(0,2...0,5)i_{1н}$, но по мере увеличения нагрузки ток статора возрастает.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Для асинхронного двигателя на лабораторном стенде типа А02 32-6У-3 выписать паспортные данные $P_{2н}$, U_1 , $I_{1п} / I_{1н}$, $\cos\varphi_{н}$, $\eta_{н}$.

2.2. По паспортным данным двигателя построить его механическую характеристику $n_2=f(M)$.

Пример. Для асинхронного двигателя с КЗ ротором типа ЧА906У3 требуется построить механическую характеристику по следующим паспортным данным: $P_{2н}=2,2$ кВт, $n_{2н}=950$ об/мин, $\lambda=2,1$.

Для этого:

1) определяем номинальный момент

$$M_{н} = 9,55 \frac{P_{2н}}{n_{2н}} = 9,55 \frac{2200}{950} \approx 22 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

2) находим критическое (максимальное) значение моменты

$$M_{кр} = \lambda M_{н} = 2,1 \cdot 22 \approx 46 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

3) определяем частоту вращения магнитного поля статора n_1 , исходя из следующих соображений: n_1 чуть больше $n_{2н}$ (см. рис. 7.3), имеет фиксированные значения в зависимости от числа пар полюсов $p=1, 2, 3...$

Так как $n_{2н}=950$ об/мин, то $n_1 = \frac{n_{2н}}{0,95} = 1000$ об/мин;

4) находим номинальное $S_{н}$ и критическое $S_{кр}$ скольжение:

$$S_{н} = \frac{n_1 - n_{2н}}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05;$$

$$S_{кр} = S_{н} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,05 \left(2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1} \right) = 0,2;$$

5) определяем координаты основных режимов работы двигателя на механической характеристике, используя следующие уравнения:

$$M = \frac{2M_{кр}}{S/S_{кр} + S_{кр}/S}, \quad n_2 = n_1(1 - S).$$

Результаты вычислений удобно свести в таблицу.

Режимы работы	Скольжение	$M = \frac{2 \cdot 46}{0,2/S + S/0,2}$, Н·м	$n_2 = 1000(1 - S)$. об/мин
Холостой ход	0	0	1000
Номинальный	0,05	22	950
Критический	0,2	46	800
Пусковой	1	18	0

Полученные результаты позволяют построить механическую характеристику двигателя $n_2=f(M)$. Для повышения точности построения участка устойчивой работы можно получить дополнительные данные для M и n_2 , задаваясь значениями скольжения S в интервале 0-0,2.

2.3. Собрать на стенде схему, представленную на рис.7.5.

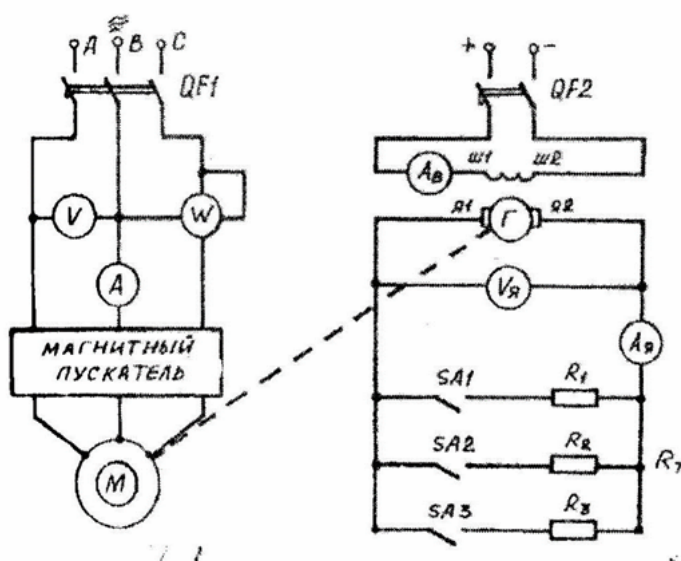


Рис.7.5. Схема испытаний асинхронного двигателя

2.4. Подготовить стробоскопический тахометр для измерения частоты вращения вала двигателя. Тахометр состоит из измерительного блока и импульсной газоразрядной лампы B измерительном блоке находится генератор импульсов регулируемой частоты, выполняющей роль регулятора вспышек лампы. На лицевой панели блока размещены:

- тумблеры включения сети, синхронизации и лампы;
- ручка переключателя диапазонов частоты;

– ручки для грубого и точного регулирования частоты вспышек газоразрядной лампы, связанные со стрелкой отчета.

Включить тахометр в сеть 220 В. После прогрева блока (5...10 мин) включить тумблер лампы. Выбор диапазона частот должен соответствовать паспортным данным исследуемого двигателя.

Работа с тахометром заключается в том, чтобы для вращающегося с неизвестной частотой вала, на котором закреплен диск с покрашенным сектором, подобрать такую частоту вспышек лампы, при которой интервал между вспышками будет равен времени одного оборота вала двигателя. Тогда для наблюдателя вращающийся вал с сектором будет казаться неподвижным. Показания на шкале блока в этот момент будут соответствовать частоте вращения вала n_2 .

2.5. После проверки правильности сборки схемы и подготовки стробоскопического тахометра запустить асинхронный двигатель, записать в табл.7.1 показания электроизмерительных приборов в цепях питания двигателя, генератора постоянного тока и тахометра, а также следующих значениях сопротивления R_T :

$$R_T = 0 \text{ (SA1, SA2, SA3 разомкнуты);}$$

$$R_T = R_1 \text{ (замкнут SA1);}$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \text{ (замкнуты SA1 и SA2);}$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \text{ (замкнуты все выключатели SA1, SA2, SA3).}$$

Т а б л и ц а 7.1

Режимы работы	Измерено						Вычислено						
	U	I	P	n_2	$U_{и}$	$I_{и}$	S	$\cos \varphi$	M	P_2	P_{2*}	η	η^*
	В	А	Вт	об/мин	В	А	ВА		Н·м	Вт	Вт		
$R_T = 0$													
$R_T = R_1$													
$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$													
$R_T = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$													

Расчетные формулы:

– полной мощности, потребляемой двигателем, $S = \sqrt{3}UI$;

– коэффициента мощности $\cos \varphi = \frac{P}{S}$;

– момента двигателя $M = \frac{2M_{кр}}{S / S_{кр} + S_{кр} / S}$, где $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ – скольжение;

– механической мощности на валу двигателя $P_2 = M \frac{n_2}{9,55}$;

– мощности, преобразуемой генератором постоянного тока в электрическую $P_2 = \frac{U_a I_a}{\eta_r}$, где η_r – КПД генератора (0,85);

– КПД двигателя $\eta = \frac{P_2}{3P}$;

– КПД системы «двигатель – генератор» $\eta^* = \frac{P_{2*}}{3P}$;

2.6. Результаты измерений и вычислений точек с координатами n_2 , M нанести на механическую характеристику двигателя, построенную по паспортным данным. Сделать выводы по режиму работы двигателя при изменении нагрузки.

2.7. Определить значения $n_{2*} = \frac{n_2}{n_{2н}}$, η , $\cos\varphi$, $I^* = \frac{I_1}{I_{1н}}$, $M^* = \frac{M_1}{M_{н}}$ как

функции аргумента $\frac{P_2}{P_{2н}}$ для всех режимов работы двигателя.

Результаты нанести на типовые рабочие характеристики (см. рис. 7.4) и сделать выводы о соответствии экспериментальных данных теоретическим положением.

Контрольные вопросы

1. Общее устройство и принцип работы асинхронного двигателя.
2. Почему двигатель называется асинхронным?
3. Какова роль скольжения в определении режима работы асинхронной машины?
4. Как определить частоту вращения магнитного поля статора по паспортным данным асинхронной машины?
5. Вычертить механическую характеристику асинхронного двигателя и указать на ней характерные точки, определяющие режимы работы двигателя.
6. В чем состоит свойство саморегулирования асинхронного двигателя?
7. Определить число пар полюсов магнитного поля статора, если известно, что номинальная частота вращения двигателя по паспортным данным равна 540 об/мин, 970 об/мин.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: изучение особенностей конструкции электрической машины постоянного тока, исследование режимов работы двигателя постоянного тока при изменении нагрузки, построение механической и рабочих характеристик двигателя по опытным данным.

1. Основные теоретические сведения

Электрические машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей и несколько меньше – в качестве генераторов электрической энергии. Это объясняется важными преимуществами двигателей постоянного тока перед другими двигателями: они допускают плавное регулирование частоты вращения простыми способами и обладают лучшими пусковыми качествами – развивают большой пусковой момент при относительно небольшом токе. Поэтому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте.

Электрическая машина постоянного тока состоит из двух частей: неподвижной части – статора и подвижной (вращающейся) части – якоря.

Статор включает в себя станину, основные и дополнительные полюсы, обмотку возбуждения, щеткодержатели с электрографитовыми щетками, подшипниковые щиты с подшипниками, коробку с выводными зажимами. При подаче питания на обмотку возбуждения в статоре образуется магнитное поле машины Φ .

Якорь состоит из барабана, набранного из листов электротехнической стали и закрепленного на валу. В пазах барабана уложена якорная обмотка, выводы отдельных секций которой припаиваются к изолированным друг от друга пластинам коллектора. Пластины коллектора при вращении якоря контактируют со щетками статора.

Электрические машины обладают свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому, если якорную обмотку машины постоянного тока подключить к источнику постоянного тока, это вызовет ток в цепи якоря $I_{\text{я}}$. Взаимодействие тока якоря $I_{\text{я}}$ с магнитным полем обмоток возбуждения создает на валу якоря электромагнитный момент

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}},$$

где C_M – конструктивная постоянная машины.

Этот момент M является вращающим моментом, под действием которого якорь машины начнет вращаться, т.е. машина будет работать в режи-

ме электродвигателя, потребляя из сети электрическую энергию и преобразуя ее в механическую.

При вращении якоря в магнитном поле в его обмотке индуцируется ЭДС $E=C_e n \Phi$, направление которой противоположно направлению тока $I_{\text{я}}$. Ток направлен против ЭДС. Поэтому ЭДС якоря двигателя называют противоЭДС E .

Уравнение электрического состояния машины имеет вид

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Отсюда ток якоря двигателя определится как

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}.$$

Умножив в выражении (8.1) левую и правую части на $I_{\text{я}}$, получим уравнение баланса мощностей:

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}.$$

где $UI_{\text{я}}$ – электрическая мощность, подводимая к двигателю,

$$UI_{\text{я}} = P_{\text{э}} = P_1;$$

$EI_{\text{я}}$ – электромагнитная мощность двигателя,

$$EI_{\text{я}} = P_{\text{эм}} = P_{\text{мех}} = \Omega M = \frac{\pi n}{30} M,$$

т.е. равна механической мощности, развиваемой двигателем;

$I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ – мощность потерь в цепи якоря.

Электромагнитный момент M приводит якорь двигателя во вращение, которое через вал передается исполнительному механизму. При этом на вал двигателя действуют следующие моменты:

1) вращающий (электромагнитный) момент $M = 9,55 \frac{P_{\text{эм}}}{n}$;

2) момент холостого хода M_0 , обусловленный механическими и магнитными потерями в двигателе. Величина момента M_0 не зависит от нагрузки и составляет 2-6 % от номинального значения вращающего момента $M_{\text{н}}$;

3) полезный момент M_2 , т.е. противодействующий момент механизма ($M_{\text{пр}}$), приводимого в действие данным двигателем;

4) динамический момент $M_{\text{д}}$, возникающий при всяком изменении угловой скорости Ω (частоты вращения n) двигателя в связи с инерцией вращающихся частей двигателя и механизма при изменении нагрузки:

$$M_{\text{д}} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{или} \quad M_{\text{д}} = kJ \frac{dn}{dt}, \quad k = \frac{\pi}{30}.$$

Уравнение движения двигателя имеет вид

$$kJ \frac{dn}{dt} = M - (M_2 + M_0) = M - M_{ст},$$

где $M_{ст}$ – статический момент сопротивления на валу двигателя.

В установившемся режиме работы $\frac{dn}{dt} = 0$ и $M = M_2 + M_0 = M_{ст}$.

Частота вращения двигателя определяется из формулы противоЭДС $E = C_E n \Phi$:

$$n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U - I_{я} R_{я}}{C_E \Phi}.$$

Электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую энергию вращения. Механическая мощность $P_{мех} = \frac{\pi n}{30} M$, Вт, определяется развиваемым двигателем моментом M и частотой вращения n , об/мин. Поэтому основной характеристикой двигателя является его механическая характеристика $n=f(M)$.

Вращающий момент $M=C_M \Phi I_{я}$ определяется током якоря $I_{я}$ и магнитным потоком полюсов возбуждения и, следовательно, зависит от способа возбуждения. Различают (рис.8.1) двигатели независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения.

Независимо от способа возбуждения всем электродвигателям постоянного тока присущи общие свойства и процессы: свойство саморегулирования, процессы пуска и реверса, регулирование частоты вращения.

Пуском называют процесс разгона якоря от неподвижного состояния до установившегося значения скорости. Пусковые качества двигателя характеризуются кратностью (к номинальному) пускового тока и момента. Если не принять специальных мер, то пуск двигателя постоянного тока может сопровождаться недопустимо большим броском тока якоря и резким толчком момента на валу (рис.8.2).

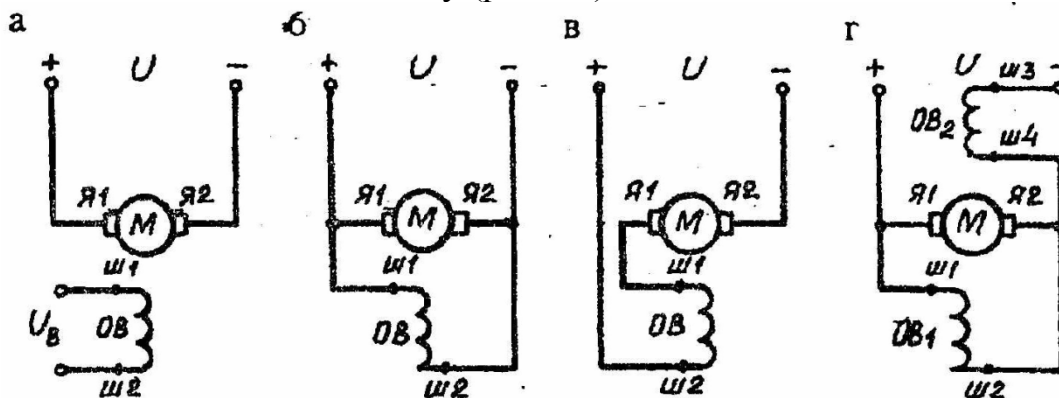


Рис.8.1. Способы возбуждения двигателей постоянного тока

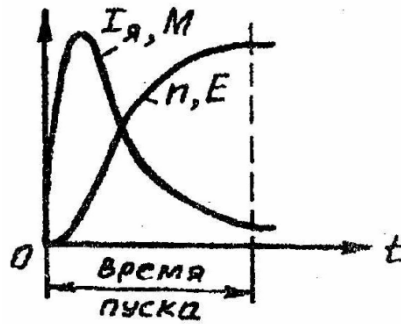


Рис.8.2. Изменение параметров двигателя при пуске

Это объясняется тем, что если во вращающемся якоре ток $I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}$, то в момент включения номинального напряжения сети на обмотку неподвижного якоря в нем не наводится противоЭДС ($E=0$ при $n=0$). Ток включения (пусковой ток) ограничивается только малым сопротивлением $R_{я}$:

$$I_{п} = \frac{U_{н}}{R_{я}} \approx (10 - 30) I_{я}.$$

Такой большой ток вызывает опасное искрение на коллекторе и чрезмерно большой пусковой момент $M_{п} = C_{М} \Phi I_{я}$, создающий рывок и удар на валу. Для предотвращения этого пуск электродвигателей производят пусковым реостатом с сопротивлением $R_{п}$, ограничивающим бросок тока до кратковременного допустимого значения:

$$I_{п.доп} = \frac{U_{н}}{R_{я} + R_{п}} \leq (2 - 2,5) I_{я}.$$

С разгоном якоря возникает противоЭДС E , уменьшающая ток. При этом пусковой реостат полностью выводят из цепи якоря, иначе он будет нагреваться от потерь энергии.

Все электродвигатели обладают свойством саморегулирования – автоматически создавать вращающий момент M , равный моменту статического сопротивления на валу $M_{ст}$, когда частота вращения устанавливается неизменной ($n = \text{const}$). Из уравнения (8.2) следует, что если $M_{ст} > M$, то появляется отрицательное ускорение $dn/dt < 0$ и частота вращения якоря начинает падать. Но вместе с тем уменьшается противоЭДС $E = C_{Е} n \Phi$, а ток якоря $I_{я} = (U - E) / R_{я}$ и вращающий момент $M = C_{М} \Phi I_{я}$ возрастают. Когда M станет равным возросшему моменту сопротивления $M_{ст}$, dn/dt станет равным нулю и установится новое, меньшее значение частоты вращения якоря. Следовательно, при работающем двигателе ток якоря ($I_{я} = M / C_{М} \Phi$) определяется моментом на валу и магнитным потоком возбуждения.

Реверс двигателя постоянного тока, как правило, осуществляется изменением полярности питания цепи якоря или цепи возбуждения.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Для двигателя постоянного тока типа П-32М, установленного на лабораторном стенде, выписать паспортные данные P_n , U_n , I_n , n_n .

2.2. Собрать на стенде схему испытаний двигателя с параллельным возбуждением, представленную на рис 8.3.

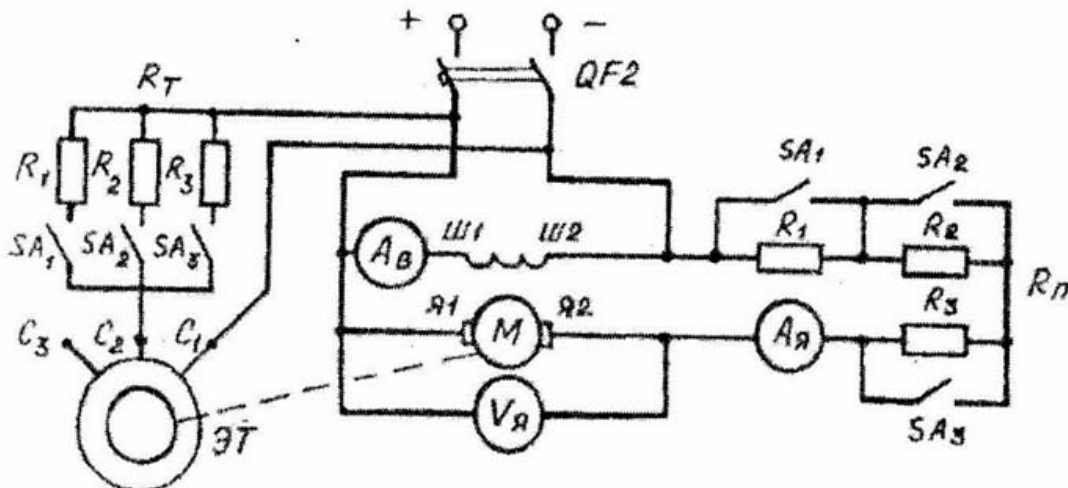


Рис. 8.3. Схема испытаний двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

2.3. Подготовить стробоскопический тахометр для измерения частоты вращения вала двигателя.

2.4. После проверки правильности сборки схемы и готовности к работе стробоскопического тахометра запустить двигатель, включив автоматический выключатель $QF2$.

2.5. Включая поочередно переключатели $SA1$, $SA2$ и $SA3$ пускового реостата R_n , вывести его из якорной цепи двигателя.

2.6. Снять показания электроизмерительных приборов и частоты вращения якоря при следующих значениях тормозного сопротивления:

1) $R_T = \infty$ (разомкнуты $SA1$, $SA2$, $SA3$ R_T);

2) $R_T = R_1$ (замкнут $SA1$ R_T);

3) $R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (замкнуты $SA1$ и $SA2$ R_T);

4) $R_T = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_1 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$ (замкнуты все переключатели R_T).

Полученные данные занести в табл.8.1.

Таблица 8.1

Результаты испытаний двигателя постоянного тока
с параллельным возбуждением

№ п/п	Измерено				Вычислено					
	U	$I_{я}$	$I_{н}$	n	$P_{эм}$	M	M_2	P_2	P_1	η
	В	А	А	об/мин	Вт	Н·м	Н·м	Вт	Вт	%

Примечание. В табл. 8.1 значения напряжения питания U соответствуют показаниям вольтметра $V_{я}$.

Расчетные формулы:

– электромагнитной мощности двигателя $P_{эм} = UI_{я} - I_{я}^2 R_{я}$. Здесь $R_{я} = \frac{U}{I_{н}} 0,5(1 - \eta_{н})$, а номинальный КПД $\eta_{н} = 0,73$;

– электромагнитного момента $M = 9,55 \frac{R_{эм}}{n}$;

– полезного момента $M_2 = M - M_0 = M - 0,04M_{н}$;

– полезной мощности на валу двигателя: $P_2 = 0,1047M_2n$;

– электрической мощности, подводимой к двигателю: $P_1 = U(I_{я} + I_{н})$;

– коэффициента полезного действия $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$.

2.7. По данным табл.8.1 построить механическую характеристику двигателя $n=f(M)$ и рабочие характеристики (рис.8.4 и 8.5). При построении механической характеристики частоту вращения холостого хода следует рассчитывать по формуле

$$n_0 = n_{н} \frac{U_{н}}{U_{н} - I_{н} R_{я}}$$

Естественная характеристика двигателя представляет собой прямую, проходящую через точки $(n_0, 0)$ и $(n_{н}, M_{н})$.



Рис.8.4. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

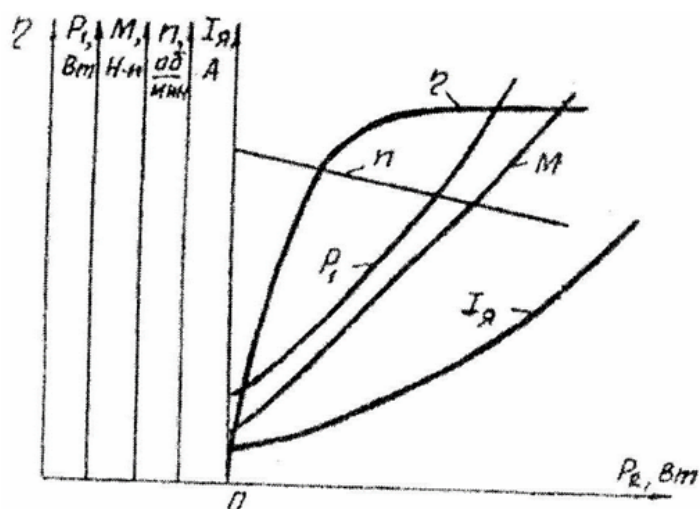


Рис.8.5. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

2.8. Сделать выводы о соответствии полученных экспериментальных данных теоретическим положением.

Контрольные вопросы

1. Особенности конструкции электрических машин постоянного тока. Их достоинства и недостатки.
2. Принцип работы двигателя постоянного тока.
3. Способы возбуждения двигателя постоянного тока.
4. Написать уравнение баланса мощностей и пояснить его физический смысл.
5. Почему при запуске двигателя постоянного тока используется пусковой реостат?
6. Начертить механическую характеристику двигателя и пояснить процесс выхода двигателя на естественную характеристику.

Лабораторная работа № 9

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА МЕТОДОМ ДВУХ ВАТТМЕТРОВ

Цель работы:

1. Изучить различные методы измерения активной мощности в цепях трехфазного тока.
2. Измерить активную мощность методом двух ваттметров.
3. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для схемы из двух ваттметров.

1. Основные теоретические сведения

Измерить активную мощность в цепях трехфазного тока можно следующими методами:

1. Методом одного ваттметра.
2. Методом двух ваттметров.
3. Методом трех ваттметров.

Метод одного ваттметра применяют для измерения мощности трехфазной системы при симметричной нагрузке. В этом случае мощность всей системы

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos\varphi.$$

Метод трех ваттметров может быть применен для измерения мощности в четырехпроводной несимметричной системе. В этом случае каждый из ваттметров учтет мощность P_{ϕ} одной фазы. Полная мощность P системы определится как сумма показаний трех ваттметров, т. е.

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

В данной работе рассматривается метод двух ваттметров как получивший наибольшее распространение при измерении мощности в трехпроводных цепях трехфазного тока независимо от характера нагрузки (индуктивного или емкостного) и от степени симметрии системы. Мощность P трехфазной системы будет определяться алгебраической суммой показаний двух ваттметров, т.е.

$$P = P_I + P_{II}.$$

Согласно теории этого метода, независимо от схемы соединения нагрузки звездой или треугольником при различных схемах включения двух ваттметров в цепь полная активная мощность определяется по одному из следующих уравнений:

$$P = U_{AC} I_A \cos\beta_1 + U_{BC} I_B \cos\beta_2; \quad (9.1)$$

$$P = U_{AB} I_A \cos\beta_3 + U_{CB} I_C \cos\beta_4; \quad (9.2)$$

$$P = U_{BA} I_B \cos\beta_5 + U_{CA} I_C \cos\beta_6, \quad (9.3)$$

где U_{AC} , U_{BC} и т. д. – линейные напряжения;

I_A , I_B , I_C – линейные токи;

β_1, \dots, β_6 – углы сдвига между этими токами и напряжениями.

При этом токовые обмотки обоих ваттметров включаются в две фазы из трех. Обмотки напряжения включаются на линейные напряжения соответственно между фазами, в которых имеются токовые обмотки, и фазой, которая осталась свободной от включения в нее токовых обмоток ваттметров. Важно обратить внимание на правильность подключения генераторных зажимов.

При включении ваттметров по схеме (рис. 9.1,а) согласно уравнению (9.2) векторная диаграмма (рис. 9.1,б) соответствует симметричной системе с индуктивным характером нагрузки ($\varphi > 0$), что в основном действительно имеет место для промышленной нагрузки.

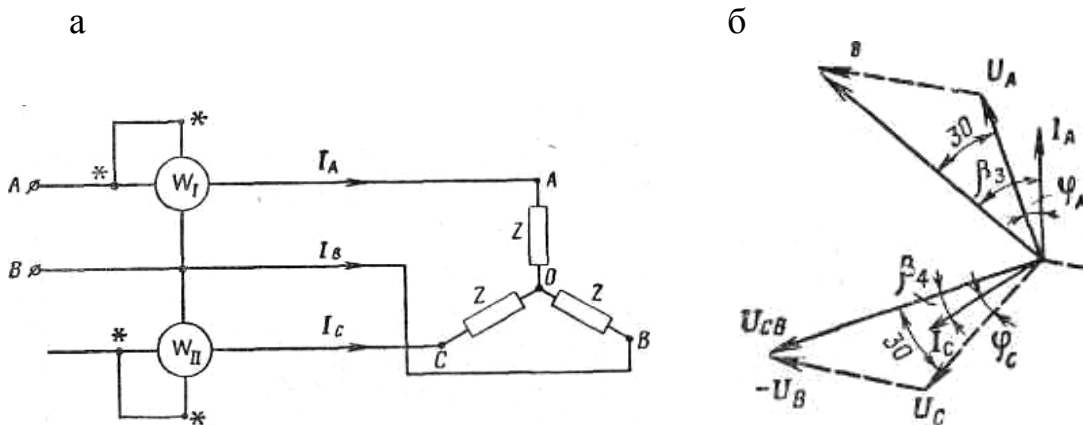


Рис. 9.1. Схема соединения для измерения активной мощности способом двух ваттметров и векторная диаграмма

Из диаграммы следует, что $\beta_3 = 30 + \varphi$ и $\beta_4 = 30 - \varphi$.

После подстановки значений β_3 и β_4 в уравнение (9.2)

$$P = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30 + \varphi) + U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30 - \varphi). \quad (9.4)$$

Преобразуя уравнение (9.4)

$$P = U_{\text{л}} I_{\text{л}} [\cos(30 + \varphi) + \cos(30 - \varphi)] = U_{\text{л}} I_{\text{л}} 2 \cos 30 \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi,$$

убеждаемся, что два ваттметра, включенные по схеме рис. 9.1,а, действительно измеряют мощность трехфазной цепи.

Из уравнения (9.4) следует, что показания каждого ваттметра могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от величины и знака угла φ (при индуктивном характере нагрузки $\varphi > 0$, при

емкости $\varphi < 0$). Следовательно, мощность P трехфазной системы будет определяться алгебраической суммой показаний двух ваттметров.

Определяя из уравнения (48) зависимость показаний двух ваттметров, можно, например, для индуктивного характера нагрузки установить следующее:

а) при $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$) показания обоих ваттметров одинаковы:

$$P_I = P_{II} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} I_{л};$$

б) при $\varphi < 60^\circ$ ($\cos \varphi > 0,5$) оба ваттметра показывают положительные значения мощности. Это наблюдается, например, при работе асинхронных двигателей или трансформаторов в режиме номинальной нагрузки, когда $\cos \varphi = 0,6 - 0,8$;

в) при $\varphi = 60^\circ$ ($\cos \varphi = 0,5$) показание одного ваттметра (в нашем случае W_I) будет равно нулю, а показание другого ваттметра W_{II} – некоторой положительной величине;

г) при $\varphi > 60^\circ$ ($\cos \varphi < 0,5$) один из ваттметров (W_{II}) показывает положительное значение по шкале, а другой – отрицательное (стрелка ваттметра W_I отклоняется влево). Это соответствует режиму холостого хода асинхронного двигателя или трансформатора, когда $\cos \varphi = 0,2 - 0,3$. В данном случае для отсчета надо изменить направление тока в одной из обмоток этого ваттметра и его показание считать отрицательным.

При изменении продуктивного характера нагрузки ($\varphi > 0$) на емкостный ($\varphi < 0$) направления отклонения подвижных систем ваттметров, а следовательно, и их показания изменятся на обратные (см. уравнение (9.4)). Мощность трехфазного тока методом двух ваттметров в производственных условиях измеряют специальным трехфазным (двухэлементным) ваттмером.

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой (рис. 9.2) и подобрать соответствующее оборудование и электроизмерительные приборы.

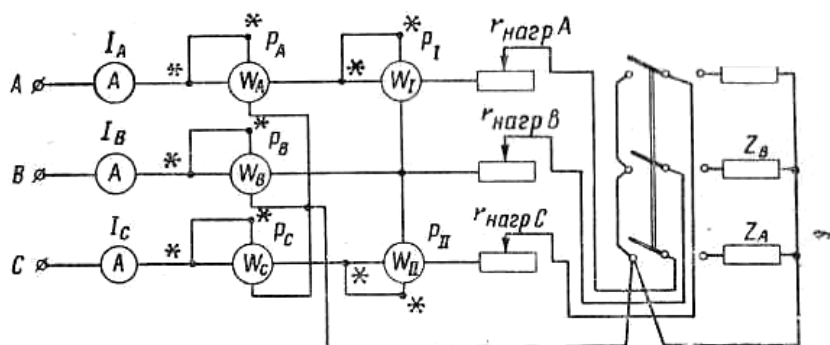


Рис.9.2. Схема включения приборов при исследовании схемы двух ваттметров

Для контроля измерения активной мощности методом двух ваттметров следует в схеме включить три однофазных ваттметра. По показаниям этих ваттметров, а также амперметров и вольтметра со свободными проводниками можно определить угол сдвига по фазе между фазными токами и напряжениями.

2. Собрать схему, приведенную на рис. 9.2. После проверки ее руководителем включить в сеть и опробовать в работе. При сборке схемы особое внимание обратить на правильность включения генераторных зажимов токовых обмоток и обмоток напряжения ваттметров.

3. Измерить активную мощность в цепи при различных значениях коэффициента мощности трехфазной системы:

$$\cos \varphi = 1; \cos \varphi > 0,5; \cos \varphi = 0,5 \text{ и } \cos \varphi < 0,5.$$

Для случая $\cos \varphi = 1$ измерить активную мощность при различных значениях нагрузки фаз в допустимых пределах (переключатель П поставить в соответствующее положение).

Для случая $\cos \varphi \neq 1$ измерения произвести при симметричной нагрузке в фазах:

при $\varphi > 0$ для $\cos \varphi > 0,5; \cos \varphi = 0,5; \cos \varphi < 0,5;$

при $\varphi < 0$ для $\cos \varphi < 0,5.$

Характер нагрузки соответственно значениям $\cos \varphi > 0,5; \cos \varphi = 0,5$ и $\cos \varphi < 0,5$ установить путем изменения сопротивлений нагрузочных реостатов $r_{\text{нагр}}$, включенных последовательно (с помощью переключателя П) с катушками индуктивности в каждой фазе. Указанные значения контролировать по показаниям двух однофазных ваттметров W_I и W_{II} . Одновременно следить за симметричностью нагрузки по показаниям амперметров и однофазных ваттметров, включенных в фазы. Для получения угла сдвига $\varphi < 0$ катушки индуктивности заменить конденсаторами в каждой фазе.

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 9.1. В табл. 9.1 обозначены:

$U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ – напряжения фазные и линейные (измерить вольтметром со свободными проводниками);

$P = P_A + P_B + P_C$ – активная мощность, потребляемая приемником;

P_A, P_B, P_C – показания ваттметров, включенных в отдельные фазы;

P_I и P_{II} – показания двух ваттметров, включенных по схеме измерения активной мощности двумя ваттметрами;

$$\cos \varphi_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{I_{\phi} U_{\phi}} \text{ – косинус угла сдвига фаз (A, B, C);}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_I - P_{II}}{P_I + P_{II}} \text{ – тангенс угла сдвига фаз трехфазной системы}$$

(формула справедлива только для симметричной нагрузки);

$\cos \varphi$ – косинус угла сдвига фаз трехфазной системы (определить по найденному значению $\operatorname{tg} \varphi$ и сравнить со значениями косинусов угла сдвига фаз в отдельных фазах).

Т а б л и ц а 9.1

Характер нагрузки	Измерено										
	I_A	I_B	I_C	U_A	U_B	U_C	P_A	P_B	P_C	P_I	P_{II}
$\cos \varphi = 1$											
$\cos \varphi > 0,5$	При $\varphi > 0$										
$\cos \varphi = 0,5$											
$\cos \varphi < 0,5$											
$\cos \varphi < 0,5$ при $\varphi < 0$											

Характер нагрузки	Вычислено								Примечание
	P	$P_I + P_{II}$	$\cos \varphi_A$	$\cos \varphi_B$	$\cos \varphi_C$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos \varphi$	φ	
$\cos \varphi = 1$									
$\cos \varphi > 0,5$	При $\varphi > 0$								
$\cos \varphi = 0,5$									
$\cos \varphi < 0,5$									
$\cos \varphi < 0,5$ при $\varphi < 0$									

4. По данным опыта для схемы двух ваттметров (см. рис. 9.2) построить векторные диаграммы напряжений и токов:

при $\varphi > 0$ для $\cos \varphi > 0,5$; $\cos \varphi = 0,5$; $\cos \varphi < 0,5$;

при $\varphi < 0$ для $\cos \varphi < 0,5$.

5. Сделать вывод о возможности применения метода двух ваттметров, отметить, что изменение характера нагрузки (с индуктивного на емкостный) влияет на отклонение подвижных систем ваттметров.

6. Сделать отчет по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие еще методы измерения активной и реактивной мощностей существуют?
2. Как определить цену деления ваттметра, включенного через трансформатор тока?
3. Как измерить активную мощность симметричной трехфазной цепи при отсутствии нулевого провода одним ваттметром?
4. Как включается в цепь трехфазный ваттметр?
5. Как включаются ваттметры в трехфазную цепь при изменении мощности методом двух приборов?
6. Как рассчитать мощность трехфазной цепи по показаниям ваттметров?
7. В каких схемах соединения и при каком характере нагрузки метод двух ваттметров дает правильные результаты?

Лабораторная работа № 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель работы: ознакомиться с электрическими методами измерения неэлектрических величин: температуры, скорости вращения и деформации от механических напряжений.

1. Основные теоретические сведения

Для управления любым производственным технологическим процессом необходимо периодически измерять физические параметры, характеризующие этот процесс, например: температуру, скорость, время, частоту, напряжение, мощность и т.д. Наиболее удобным методом измерения физических величин, в основном являющихся неэлектрическими, может быть метод преобразования неэлектрической величины в электрическую с последующим ее замером.

В электрических методах измерения неэлектрических величин используется зависимость какого-либо электрического параметра (сопротивления, емкости, э.д.с. и т.д.) от измеряемой величины (температуры, скорости, механических деформаций). Измерительное устройство, применяемое для измерения неэлектрических величин электрическими методами, состоит из трех основных звеньев: преобразователя, канала связи и электроизмерительного прибора-измерителя. Преобразователь (датчик) преобразует физическую величину в электрическую. Преобразователи могут быть параметрическими, например термосопротивления, и генераторными, например термопара, тахогенератор.

Источником питания измерительного устройства может быть сам преобразователь (генераторного типа) или посторонний источник электроэнергии.

В этой работе рассматриваются измерения температуры, скорости вращения и деформации электрическими методами.

А. Измерение температуры

При измерении температуры от 0 до 500°C в качестве преобразователей используются термометры сопротивления, представляющие собой тонкую проволоку диаметром 0,02–0,06 мм и длиной от 5 до 50 мм, укрепленную концами в держателях. Материалом для термометров сопротивлений могут служить медь, никель, платина.

Сопротивление термометра сопротивления зависит от температуры. Эта зависимость для медного термометра сопротивления, например, определяется известной формулой

$$r_t = r_0[1 + \alpha(t^\circ - t^\circ_0)], \quad (10.1)$$

где α для меди 0,00428.

Градуировочная характеристика $r_t = f(t^\circ)$ может быть задана для данного термометра сопротивления в виде таблицы (табл. 10.1).

Т а б л и ц а 10.1

Градуировочная характеристика медного термометра сопротивления

Градуировка: 2α ; $r_0 = 53,00$ Ом.

$t^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70
r_t Ом	53,00	55,25	57,50	59,76	62,01	64,26	66,52	68,77

$t^\circ\text{C}$	80	90	100	ПО	120	130	140	150
r_t Ом	71,02	73,27	75,52	77,78	80,03	82,28	84,54	86,79

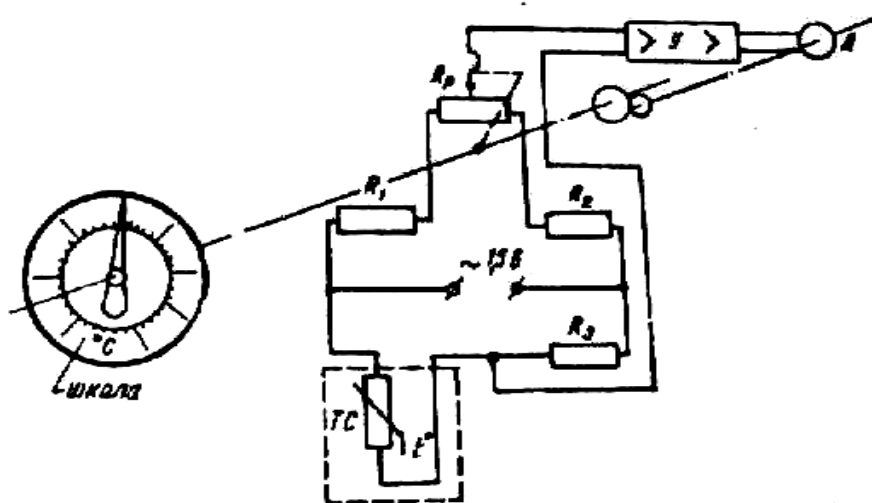


Рис.10.1. Принципиальная схема моста переменного тока:

R_1, R_2, R_3 – неизменяемые сопротивления плеч моста; R_p – переменное сопротивление моста; ТС – термометр сопротивления; У – усилитель; Д – двигатель, передающий импульс на измерительный орган моста

Для измерения температуры термометр сопротивления помещают в зону измерения температуры, включив его в одно из плеч неуравновешенного моста, измерительный орган которого регистрирует температуру объекта.

Принципиальная схема моста приведена на рис. 10.1.

Шкала измерительного органа моста градуируется в градусах Цельсия. При эксплуатации прибора ежемесячно проверяется соответствие делений шкалы моста сопротивлению термометра сопротивления (см. табл. 10.1).

Для проверки градуировки к мосту вместо термометра сопротивления подсоединяют магазин сопротивлений. Относительная номинальная погрешность градуировки определяется по формуле

$$g = \frac{\alpha_x - \alpha}{\alpha_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (10.2)$$

где α_x – найденное значение температуры (показание прибора);
 α – действительное значение измеряемой температуры (по табл. 10.1);
 $\alpha_{\text{ном}}$ – верхний предел измерения температуры по шкале прибора.

Измерительные схемы с термометрами сопротивления требуют постороннего источника тока, который может быть переменным или постоянным, в зависимости от типа моста.

Для измерения температуры от 500 до 1 850°C в качестве преобразователей используют термопары, представляющие собой два проводника из различных металлов, различающихся между собой работой выхода электронов. Одни концы проводников спаиваются или свариваются между собой, а другие – подсоединяются к измерителю. В табл. 10.2 указаны сочетания металлов, применяемых в термопарах при измерении различных температур.

Т а б л и ц а 10.2

Материал термопары	Предел измеряемой температуры, °C
Платинородий – платина	1300
Хромель – алюминь	1000
Железо – копель	600
Медь – копель	350

Кроме указанных в табл. 10.2, на практике встречаются нестандартные термопары: медь – константан, нихром – константан, железо – константан (константан берется взамен копеля).

Для измерения температуры термопара градуируется, т.е. определяется зависимость $E = f(t^\circ)$ (рис. 10.2).

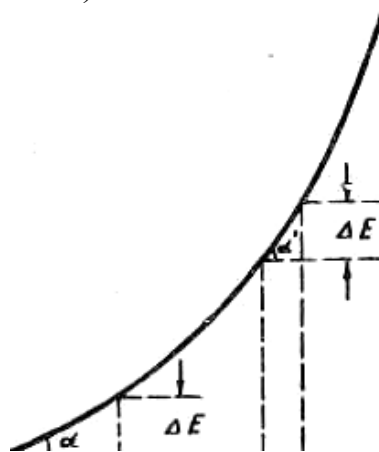


Рис.10.2. Градуировочная кривая $E = f(t^\circ)$ термопары

В условиях лабораторий градуировку можно произвести сравнением показаний измерителя и ртутного термометра при нагревании их (или при охлаждении) в одинаковых условиях (в одном нагревателе). При градуировке температура свободных концов термопары должна быть равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если температура свободных концов термопары отлична от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то вводится поправка, и действительная температура объекта f будет равна:

$$t^{\circ} = t' + \Delta t = t' + t'_0 \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha'} = t' + kt'_0, \quad (10.3)$$

где t° – истинная температура объекта;

t'_0 и t' – температуры окружающей среды и объекта, измеренные измерителем;

α и α' – углы наклона касательной к кривой $E = f(t^{\circ})$ в точках t'_0 и t' (рис. 10.2);

k – переменный коэффициент, зависящий от t_0 и t' .

В качестве измерителя с термопарой применяется милливольтметр или гальванометр. Термопара является генераторным преобразователем, поэтому источником питания измерительной схемы с термопарой является сама термопара.

Б. Измерение скорости вращения

Для преобразования скорости вращения в пропорциональное ей напряжение используется тахогенератор. Тахогенератор – это генератор постоянного тока, электродвижущая сила E на зажимах которого при постоянном магнитном потоке машины Φ пропорциональна скорости вращения n :

$$n = \frac{E}{c\Phi}. \quad (10.4)$$

Постоянство потока в тахогенераторе может быть обеспечено питанием обмоток электромагнитов от независимого источника постоянного тока или применением постоянных магнитов. Тахогенератор – генераторный преобразователь, поэтому питание измерительной схемы осуществляется от него. Измерителем является магнитоэлектрический вольтметр, подключенный к щеткам тахогенератора и отградуированный в единицах оборотов в минуту. Градуируется тахогенератор стробоскопическим методом. Для этого на доступный конец вала тахогенератора наносится резко выделяющаяся белая черта. Вал в этом месте освещается газосветной лампой, частоту вспышек которой можно регулировать. При соответствии частоты вспышек и скорости вращения вала черта и сам вал кажутся неподвижными.

Устанавливая частоту и регулируя скорость вращения, добиваются получения неподвижного изображения метки и сравнивают полученное

число оборотов с показаниями строботахометра, включенного в цепь тахогенератора.

В. Измерение деформаций

Деформации конструкции или машины, вызванные механическими напряжениями, измеряются с помощью тензодатчиков сопротивления.

Тензодатчик представляет собой проволоку из материала с высоким удельным сопротивлением (константан, нихром, манганин) диаметром 0,02–0,05 мм. Эта проволока укладывается зигзагообразно и наклеивается на бумажную основу, а концы ее подсоединяются к измерительной схеме. Тензодатчик характеризуется длиной петли (базой) и сопротивлением. Размеры тензометров колеблются от 2,5 до 150 мм по длине и от 3 мм до 60 мм по ширине. Сопротивление тензометра обычно 100–200 Ом. Для измерения датчик приклеивают специальным клеем (часто БФ-2) к испытываемой детали так, чтобы проволока датчика деформировалась так же, как и испытываемая деталь. При этом меняется сопротивление датчика:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta p}{p} - \frac{\Delta s}{s} = K \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (10.5)$$

где r , l и s – сопротивление, длина и сечение проволоки датчика;

p – удельное сопротивление датчика;

K – чувствительность датчика.

Относительное изменение сопротивления датчика в пределах допустимых для детали нагрузок очень мало и редко бывает больше 1%. Поэтому датчик подключается к чувствительной измерительной схеме (обычно это четырехплечный мост). До начала измерения мост уравновешивается. При возникновении деформации равновесие моста нарушается и измеритель (обычно гальванометр) отметит величину деформации или величину, пропорциональную ей (ток, напряжение). Для компенсации погрешности, возникающей вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения материала испытываемой детали и проволоки датчика, в соседнее с рабочим преобразователем плечо моста включается нерабочий преобразователь, наклеенный на такой же материал, из которого выполнена испытываемая деталь и помещенный в одинаковые температурные условия с рабочим преобразователем.

Измеритель может быть отградуирован в единицах механического напряжения или в единицах деформации.

Для питания измерительной схемы применяют посторонний источник питания постоянного или переменного тока, в зависимости от типа моста.

2. Порядок выполнения работы

А. Измерить температуру нагревания индуктивной катушки с помощью медного термометра сопротивления:

1. Проверить шкалу моста, используя для этого схему, приведенную на рис. 10.1, и включив вместо термометра сопротивления ТС магазина сопротивлений. Данные проверки занести в табл. 10.3.

Т а б л и ц а 10.3

Сопротивление магазина r , Ом	Температура по прибору t , $^{\circ}\text{C}$ (a_x)	Температура по табл. 10.1 $t^{\circ}\text{C}$ (a)	Относительная номинальная погрешность $g = \frac{\alpha_x - \alpha}{\alpha_{\text{ном}}} \cdot 100\%$	Примечание

Построить градуировочную кривую и определить относительную номинальную погрешность для шкалы моста.

2. Снять кривую нагревания индуктивной катушки при протекании по ней тока. Для этого в схему (см. рис. 10.1) включить термометр сопротивления, помещенный между витками катушки. Каждые 2–3 мин записывать показания измерителя в табл. 10.4.

Т а б л и ц а 10.4

T , с	
t , $^{\circ}\text{C}$	

По данным опыта построить кривую нагревания катушки $t^{\circ} = f(T)$.

Б. Измерить температуру нагрева индуктивной катушки с помощью термопары:

1. Проградуировать термопару методом сравнения с эталонными термометрами. Данные наблюдения записать в табл. 10.5.

Т а б л и ц а 10.5

t , $^{\circ}\text{C}$	E , деления	Примечание

По полученным данным построить градуировочную кривую $E = f(t^{\circ})$.

2. Снять кривую нагревания индуктивной катушки при протекании по ней тока. Работу провести по схеме, изображенной на рис. 10.3.

Термопару на время опыта поместить между витками катушки. При заданной преподавателем и поддерживаемой постоянной величине тока в

цепи катушки через каждые 5 мин записывать показания измерителя в табл.10.4. По данным опыта начертить кривую $t_{изм}^{\circ} = f(T)$.

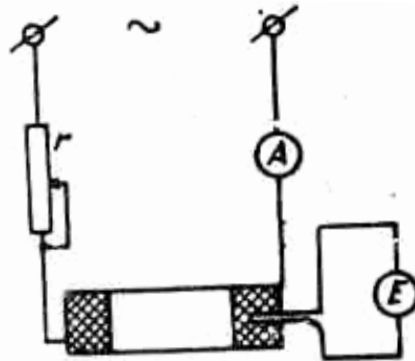


Рис. 10.3. Схема для снятия термопарой кривой нагревания катушки

В. Измерить скорость вращения двигателя с помощью тахогенератора:

1. Проградуировать измеритель тахогенератора с помощью стробоскопа, используя для этого схему рис. 10.4.

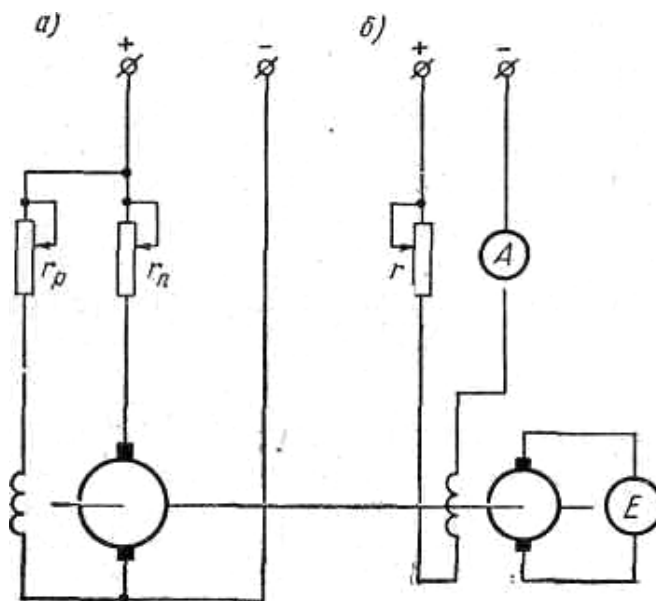


Рис. 10.4. Схема для градуировки тахогенератора:
а – схема включения двигателя; б – схема включения тахогенератора

Данные градуировки записать в табл. 10.6.

По данным опыта начертить кривую $E = f(n)$.

Таблица 10.6

n , об /мин	
E , В	

Г. Измерить механическое напряжение с помощью тензодатчика:

1. Собрать мостовую схему из двух сопротивлений и двух датчиков, включить измеритель и источник питания.
2. Уравновесить мост и подсчитать сопротивление датчика.
3. Проградуировать измеритель в единицах механического напряжения. Для этого датчик нужно наклеить на узкую стальную ленту, подвешенную одним концом к балке. На другой конец ленты нужно подвесить груз, т.е. прикладывать растягивающее усилие. Механическое напряжение подсчитать по формуле

$$\sigma = \frac{Q}{S_{\text{л}}}, \text{ кГ/см}^2, \quad (10.6)$$

где $S_{\text{л}}$ – поперечное сечение ленты, см^2 ;

Q – вес груза, кг.

Данные результатов опыта записать в табл. 10.7.

Т а б л и ц а 10.7

Q	a	σ	Примечание

По данным опыта построить градуировочную кривую $a = f(\sigma)$.

Контрольные вопросы

1. Из каких самостоятельных узлов состоят приборы измерения электрических величин?
2. Какие основные характеристики имеет преобразователь неэлектрических величин?
3. Охарактеризуйте методы измерения неэлектрических величин.
4. Как классифицируются преобразователи неэлектрических величин?
5. Объясните устройство, принцип действия и область применения преобразователей неэлектрических величин: реостатных, тензосопротивлений, индукционных, емкостных, пьезоэлектрических, фотоэлектрических, термосопротивлений, термоэлектрических.
6. Поясните конструктивное устройство: виброметра ЭДИВ-72, пирометра ФЭП-4, электрического бензинометра, манометра с тензометрическим преобразователем, индукционного тахометра, электронного сигнализатора МЭСУ, датчика сигнализатора СВК-3.
7. Какие погрешности вносятся в измерения преобразователями неэлектрических величин?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Общая электротехника и электроника. Ч.1. Электроника [Текст]: учебник / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2015.
2. Электротехника и электроника [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2014.
3. Основы теории расчета линейных электрических цепей и электро-снабжения объектов [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2012.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	7
Лабораторная работа № 1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	14
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ <i>R</i> -, <i>L</i> -, <i>C</i> -ЭЛЕМЕНТОВ	22
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ <i>R</i> -, <i>L</i> -, <i>C</i> -ЭЛЕМЕНТОВ	30
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ	34
Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ	42
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	46
Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ	52
Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ...	61
Лабораторная работа № 9. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА МЕТОДОМ ДВУХ ВАТТМЕТРОВ	68
Лабораторная работа № 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	74
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	82

Учебное издание

Пинт Эдуард Михайлович
Еличев Константин Александрович
Романенко Игорь Иванович

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА**

Лабораторный практикум по направлениям подготовки 23.03.03
«Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»
и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 1.03.16. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 5,25. Тираж 80 экз.
Заказ №181.



Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.