

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

М. П. Тиличенко

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу для студентов
специальностей 1-36 01 01 «Технология
машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое
оборудование машиностроительного производства»,
1-36 01 05 «Машины и технология обработки
материалов давлением» и 1-36 02 01 «Машины
и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2012

УДК 621.3+621.313(075.8)
ББК 31.2+31.261я73
Т40

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 27.12.2011 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Н. И. Вяхирев*

Тиличенко, М. П.

Т40

Электротехника, электрические машины и аппараты : лаборатор. практикум по одноим. курсу для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением» и 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» днев. и заоч. форм обучения / М. П. Тиличенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 76 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-059-1.

Содержит восемь лабораторных работ, каждая из которых включает тему, цель работы, краткие теоретические сведения, задание, выполняемое при самостоятельной подготовке, лабораторное задание, контрольные вопросы и требования к содержанию отчета. Тематика работ соответствует программе курса «Электротехника, электрические машины и аппарат».

Для студентов неэлектротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3+621.313(075.8)

ББК 31.2+31.261я73

ISBN 978-985-535-059-1

© Тиличенко М. П., 2012

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2012

Введение

В учебные планы подготовки инженеров неэлектротехнических специальностей входит целый ряд общеобразовательных дисциплин, к которым относится и электротехника – наука о техническом применении электрических и магнитных явлений.

Необходимость в усвоении базовой системы знаний, умений и навыков в области электротехники будущими инженерами неэлектротехнических специальностей обусловлена широким использованием электромагнитных явлений, электрических аппаратов и электрических методов измерений.

В формировании этой системы знаний, умений и навыков большое значение имеют лабораторные занятия.

Лабораторные занятия по электротехнике имеют целью:

- дать возможность изучить устройство и характеристики наиболее часто применяемых на практике электроизмерительных приборов, машин и аппаратов;

- помочь овладеть практическими способами настройки и управления электротехнических устройств на требуемый режим;

- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических устройств;

- выработать умение выносить суждение о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных устройств для решения тех или иных практических задач.

Организация работы в лабораториях кафедры ТОЭ

В лабораториях электротехники студенты изучают явления, происходящие в электрических цепях, приобретают навыки в постановке эксперимента, наблюдения и регистрации различных процессов, знакомятся с конструкциями и методами испытаний трансформаторов, электрических машин, электронных устройств, электрических аппаратов и с типовыми схемами управления электроприводом.

Оптимальный результат в обучении достигается при выполнении лабораторных работ бригадами не более 2–3 человек.

В лабораториях, оборудованных универсальными стендами, применяется фронтальный метод проведения занятий, т. е. все студенты одной учебной группы (подгруппы) выполняют бригадами работу на одну тему. Преимуществом такой организации лабораторных

работ является возможность выполнения работ непосредственно после изложения соответствующей темы на лекциях, что способствует немедленному закреплению и расширению знаний студентов.

Фронтальная постановка лабораторных работ позволяет преподавателю руководить и контролировать действия студентов, давать для всей группы (подгруппы) указания по ходу выполнения лабораторной работы и раскрывать общие характерные ошибки студентов, выявленные во время проведения занятий.

На первом занятии преподаватель проводит вступительную беседу, делит подгруппу на бригады, проводит инструкцию по технике безопасности, знакомит студентов с тематикой работ, с применяемыми в лаборатории техническими средствами обучения.

Правила техники безопасности во время лабораторных занятий

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками и при определенных условиях могут стать источником опасности поражения электрическим током. Тело человека обладает свойством электропроводности, и при соприкосновении с токоведущими частями установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникающий в теле человека электрический ток может вызвать ожог кожи (электрическую травму) или нанести тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной системам организма (электрический удар).

Установлено, что как постоянный, так и переменный электрические токи при определенных условиях и величине 0,05А являются опасными, а при величине 0,1А – смертельными. Поэтому следует всегда помнить о возможности поражения электрическим током и выполнять следующие правила:

1. Сборку электрической цепи следует производить только при отключенных источниках питания стенда.

2. Перед включением электрической цепи под напряжение переключатели пределов измерительных приборов необходимо установить в положения, превышающие ожидаемые значения измеряемых величин.

3. Включение источников электропитания разрешается только после проверки преподавателем правильности собранной электрической цепи.

4. При сборке электрической цепи необходимо обеспечить высокую плотность контактов всех разъемных соединений. Неиспользуемые провода следует убрать со стола в отведенное для них место.

5. Не следует пользоваться соединительными проводами без штырей и с неисправной изоляцией.

6. Все переключения, выполняемые по ходу работы, устранение замеченных нарушений в монтаже или разборка цепи под напряжением категорически запрещаются.

7. Помните, что отключенный конденсатор может сохранять опасный электрический заряд, и не забывайте разрядить его до включения в цепь.

8. Не прикасайтесь к незащищенным элементам соединительных и коммутационных устройств, находящихся под напряжением.

9. Особую осторожность соблюдайте при исследовании участков цепей с последовательным соединением катушек индуктивности и конденсаторов.

10. Обнаружив любую неисправность в стенде (нагрев резисторов, катушки индуктивности, зашкаливание стрелок измерительных приборов) при выполнении лабораторного задания, немедленно отключайте сеть и сообщите об этом преподавателю.

В случае поражения электрическим током следует немедленно отключить установку от сети, освободив тем самым пострадавшего от действия электрического тока, и поставить в известность о случившемся преподавателя.

К проведению лабораторных работ допускаются студенты, знающие правила техники безопасности и расписавшиеся в специальном журнале. Инструктаж по технике безопасности проводит преподаватель.

Ответственность за соблюдение правил техники безопасности возлагается на студентов, работающих в лаборатории, а контроль за их выполнением ведется преподавателями и сотрудниками кафедры, участвующими в проведении лабораторных занятий.

Требования к подготовке, выполнению, оформлению и защите лабораторных работ

Для того чтобы студент мог проводить лабораторную работу сознательно, критически оценивая получаемые результаты, он обязан хорошо знать теоретические вопросы по теме лабораторной работы, программу и методику проведения эксперимента.

Степень подготовки студента к выполнению лабораторной работы устанавливается преподавателем по наличию в заготовленном отчете письменных ответов на контрольные вопросы и их правильности, а также по правильности ответов на вопросы преподавателя, задаваемые в устной форме в начале занятия.

Основные этапы работы студента следующие:

- подготовка к выполнению лабораторной работы;
- собеседование-допуск;
- выполнение лабораторного задания;
- обработка экспериментальных данных;
- анализ полученных результатов;
- оформление отчета и защита лабораторной работы.

1. Подготовка к выполнению лабораторной работы.

Выполнению работы должно предшествовать:

- изучение теоретических вопросов (по литературе, по лекциям, по теоретическим сведениям, приведенным в описании);
- изучение описания лабораторной работы;
- составление письменных ответов на контрольные вопросы;
- составление протокола выполнения лабораторного задания, содержащего электрические схемы и таблицы для записи показаний приборов для каждого пункта задания;
- оформление результатов выполнения задания по разделу «Задание для самостоятельной подготовки».

Подготовленные материалы представляются каждым студентом отдельно в начале занятия преподавателю для собеседования по допуску к выполнению лабораторной работы.

2. Собеседование-допуск.

Собеседование-допуск проводится в начале каждого лабораторного занятия перед выполнением лабораторных экспериментов. Во время собеседования студент должен ответить на вопросы преподавателя по существу предстоящей работы, технике эксперимента.

3. Выполнение лабораторного задания.

3.1. Сборку электрической цепи следует начинать с ее токовой части, включая в каждую ветвь перемычку для замены ее при измерении тока амперметром. Провода от вольтметров и обмоток напряжения ваттметров и фазометров присоединяются к соответствующим точкам цепи в последнюю очередь.

3.2. Перед включением источника питания следует убедиться в правильности собранной схемы, показав ее преподавателю.

3.3. Не производя запись показаний приборов, следует убедиться экспериментально в возможности получить заданные пределы изменения режима работы цепи, определить качественно характер исследуемой зависимости и установить диапазоны изменения измеряемых величин.

3.4. Выполнить экспериментальное задание с записью показаний приборов в соответствующую таблицу протокола выполнения лабораторного задания.

3.5. По окончании каждой части эксперимента, не разбирая схему цепи, следует выключить питание, оценить правильность полученных результатов, обработать данные эксперимента и представить этот материал преподавателю для проверки. В случае необходимости повторить эксперимент, а в случае правильности – разобрать схему и приступить к выполнению следующего пункта лабораторного задания.

3.6. После получения правильных результатов по всем пунктам лабораторного задания следует представить протокол преподавателю для визирования.

4. Обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведения работы не требовалось никаких устных пояснений.

Рекомендации по обработке результатов эксперимента

4.1. Снятые экспериментально зависимости величин следует обязательно отображать в виде графиков на клетчатой бумаге. По осям следует указывать стандартные условные обозначения величин и единиц их измерения. На осях откладываются деления с одинаковыми интервалами (равномерный масштаб) в указанных единицах измерения. Величина, являющаяся аргументом, откладывается по оси абсцисс, а функция откладывается по оси ординат.

4.2. Векторные диаграммы, строящиеся по опытным данным, выполняются карандашом в масштабе, который указывается рядом с диаграммой, например, $m_U = 10$ В/мм; $m_I = 0,1$ А/мм. Кроме того, для каждой диаграммы указывается, для какой схемы она построена или какому режиму работы электрической цепи она соответствует.

4.3. Анализ полученных в работе результатов заключается в сопоставлении теоретических сведений с результатами эксперимента, в объяснении имеющих место расхождений теории и практики.

5. Оформление отчета и защита лабораторной работы.

Отчет оформляется на листах из школьной тетради в клетку каждым студентом. Требования к содержанию отчета приводятся в описании каждой лабораторной работы. Отчет по каждой работе начинается с титульного листа (рис. 1). Страницы отчета нумеруются (рис. 2), титульный лист не нумеруется.

The diagram shows a rectangular frame representing a page layout. The text is centered within the frame. Dimensions are indicated by arrows: a vertical double-headed arrow at the top and bottom is labeled '5', a horizontal double-headed arrow on the left is labeled '20', and a horizontal double-headed arrow on the right is labeled '5'. The text is as follows:

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет им. П.О. Сухого»

Кафедра ТОЭ

ОТЧЕТ
по лабораторной работе № 1.01
«Изучение лабораторного стенда»

Стенд №

Выполнил студент гр. ТМ-31
Иванов И.И. (дата)

Принял преподаватель
Петров П.Н. (дата)

Гомель 2012

Рис. 1. Образец оформления титульного листа

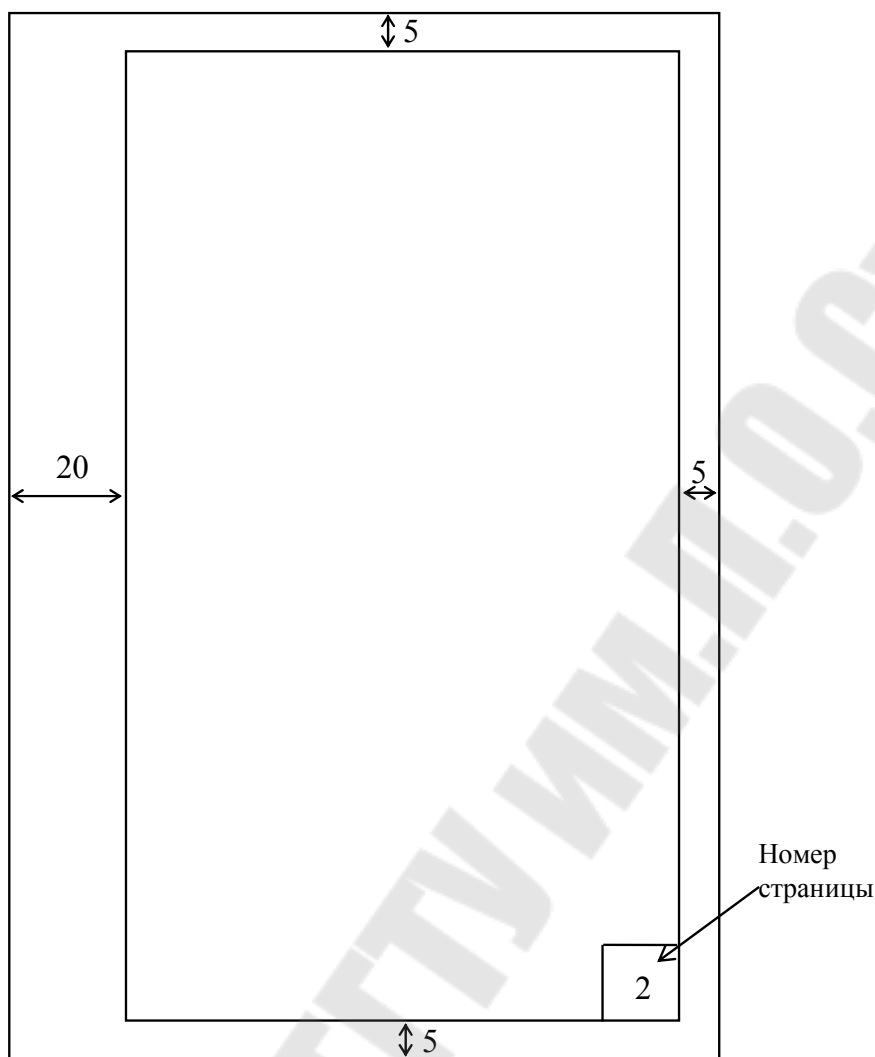


Рис. 2. Образец оформления страницы отчета

Весь отчет в целом должен быть оформлен аккуратно с применением чертежных инструментов и условных графических обозначений элементов цепи [1, с. 292–294].

В процессе защиты проверяется знание студентом техники проведения эксперимента, понимание результатов эксперимента и его анализа, а также знание основных вопросов теории, связанных с темой лабораторной работы.

К следующей лабораторной работе каждый студент представляет оформленный отчет по предыдущей работе и материал подготовки по следующей работе.

Описание стенда

Первый цикл лабораторных работ по курсу «Электротехника, электрические машины и аппараты» выполняется во фронтальном

режиме на однотипных стендах, состоящих из источника питания, пассивных элементов, вольтметра и амперметра.

Источник БП-1 содержит понижающий трансформатор, имеющий первичную обмотку номинального напряжения сети $U_{1н} = 220$ В переменного синусоидального тока промышленной частоты $f = 50$ Гц и две вторичные обмотки номинального напряжения $U'_{2н} = U''_{2н} = 15$ В. Номинальный ток каждой из вторичных обмоток $I'_{2н} = I''_{2н} = 2$ А.

На выходе одной из вторичных обмоток установлен лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), позволяющий плавно изменять величину выходного напряжения от нуля до $U_{2н} = 15$ В. Выходное напряжение второй вторичной обмотки трансформатора используется для питания источника постоянного тока БП-3 с фиксированным (нерегулируемым) напряжением $U_{\text{вых}} = 13$ В.

Блок питания БП-2 обеспечивает на выходных клеммах регулируемое напряжение постоянного тока $U_{\text{вых}} = 0 \div 15$ В, $I_{н} = 2$ А. Регулировка $U_{\text{вых}}$ источников БП-1 и БП-2 осуществляется одним и тем же лабораторным автотрансформатором, рукоятка которого выведена на правую боковую стенку корпуса стенда, либо на лицевую панель справа.

Блок питания БП-4 обеспечивает на выходных клеммах трехфазное напряжение 20/12 В, частоты $f = 50$ Гц. Это напряжение создается понижающим трехфазным трансформатором, вторичные обмотки которого соединены по схеме «звезда». Клеммы трехфазной вторичной обмотки выведены на лицевую панель стенда (блока БП-4) с разметкой: А, В, С, N или 1,2,3,0. Блок питания БП-5 обеспечивает на выходных гнездах напряжение $U_{н} = 220$ В для питания измерительных приборов и калькуляторов, имеющих сетевые блоки питания.

Все блоки питания имеют выключатели, индикаторные лампочки включения и предохранители. Питание всего стенда включается через трехфазный автоматический выключатель, установленный на правой боковой стенке корпуса стенда, либо на верхней крышке корпуса.

Панель пассивных элементов содержит три резистора R_1 , R_3 , R_4 с нерегулируемым электрическим сопротивлением, резистор R_2 с регулируемым электрическим сопротивлением, катушку индуктивности L , лампу накаливания EL как нелинейный элемент и батарею конденсаторов, емкость которой на выходных клеммах регулируется ступенчато тумблерами. Батарея снабжена кнопкой «Разряд», с помощью которой производится разряд конденсатора после отключения батареи от электрической цепи.

Лабораторная работа № 1

Изучение лабораторного стенда

Цели работы:

- изучить устройство стенда, назначение, принцип работы и параметры источников питания;
- изучить назначение и правила эксплуатации измерительных приборов, входящих в лабораторный стенд;
- приобрести навыки сборки простейших электрических цепей и измерения токов и напряжений в цепях постоянного и синусоидального токов;
- приобрести навыки измерения параметров пассивных элементов стенда (резисторов, катушки индуктивности, батареи конденсаторов).

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Электроизмерительные приборы, используемые в лабораторном практикуме

Выполнение лабораторных работ по электротехнике сопровождается измерениями тока, напряжения, мощности и других величин, что позволяет понять сущность исследуемых физических процессов и выявить характеристики того или иного электротехнического устройства. Для обеспечения правильности измерений необходимо грамотно использовать средства электрических измерений, уметь определять цену деления шкалы и снимать отсчеты измеряемых величин.

В состав стенда входят следующие измерительные приборы:

- вольтметр постоянного и переменного (синусоидального) токов с автоматическим выбором пределов измерения;
- амперметр постоянного и переменного (синусоидального) токов.

Эти приборы позволяют измерять ток и напряжение методом непосредственной оценки, а также сопротивления R резисторов, индуктивность и активное сопротивление R_k катушки индуктивности и емкость C конденсаторов.

1.2. Измерение токов

Измерение токов выполняется с помощью амперметра. При этом амперметр включается в цепь последовательно с тем элементом, ток в котором требуется измерить. При измерении тока в цепях постоянного тока переключатель «Режим» устанавливается в положение «←→»,

а при измерении в цепях синусоидального тока – в положение «~». Предел измерения амперметра выбирается автоматически $I_{\max} = 300$ мА.

Внимание! При $I > 300$ мА перегорает предохранитель в амперметре.

1.3. Измерение напряжений

Измерение напряжений в цепях постоянного и переменного (синусоидального) токов осуществляется с помощью вольтметра.

Вольтметр включается в электрическую цепь параллельно тем точкам, разность потенциалов между которыми (электрическое напряжение) требуется измерить. При измерении напряжений в цепях постоянного тока переключатель «Режим» устанавливается в положение «—», а в цепях синусоидального тока – в положение «~».

1.4. Измерение электрических сопротивлений

Измерение электрических сопротивлений постоянному току с помощью приборов, входящих в лабораторную установку, можно осуществить с помощью амперметра и вольтметра.

Определение величин электрического сопротивления с помощью амперметра и вольтметра. Этот метод позволяет измерять малые и средние значения электрических сопротивлений по схемам, представленным на рис. 1.1, а и 1.1, б.

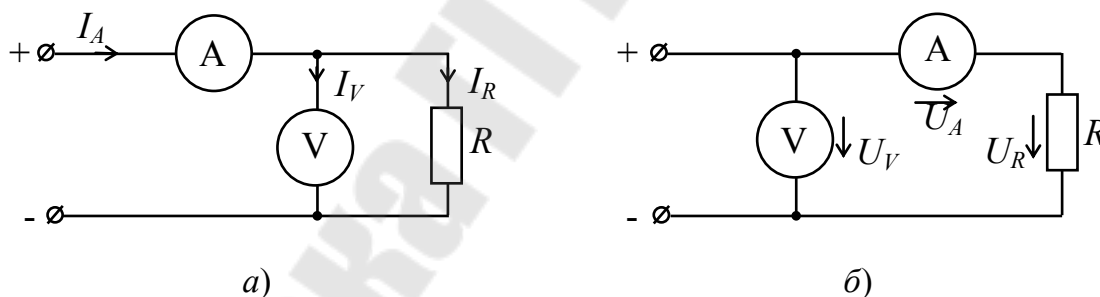


Рис. 1.1. Схемы измерения малых (а) и средних (б) значений электрических сопротивлений по методу амперметра-вольтметра

Для схемы на рис. 1.1, а $I_A \approx I_R$ (т. к. $I_V \ll I_R$), а для схемы на рис. 1.1, б $U_V \approx U_R$ (т. к. $U_A \ll U_R$).

Величина измеряемого сопротивления R_X определяется по закону Ома, по показаниям вольтметра и амперметра

$$R_X = \frac{U_V}{I_A}. \quad (1.1)$$

1.5. Измерение индуктивности

Величину индуктивности катушек или обмоток реле, двигателей с помощью приборов, входящих в лабораторную установку, можно определить косвенным методом по следующей методике:

– методом вольтметра-амперметра измеряется активное сопротивление $R_k = \frac{U}{I}$ на постоянном токе по схеме (рис. 1.1, а), где вместо R_X подключается катушка;

– подав на вход схемы (рис. 1.1, а) переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц, определяется полное сопротивление катушки

$$Z_k = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}; \quad (1.2)$$

– определяется индуктивное сопротивление катушки

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad (1.3)$$

– определяется индуктивность катушки

$$L = \frac{X_k}{2\pi f}. \quad (1.4)$$

1.6. Измерение емкости

Величину емкости батареи конденсаторов можно определить по схеме (рис. 1.1, б), запитав ее переменным (синусоидальным) напряжением U_{\sim} частотой $f = 50$ Гц и подключив вместо R_X батарею конденсаторов. При этом реактивное сопротивление батареи конденсаторов:

$$X_C = \frac{U_{\sim}}{I_{\sim}}; \quad (1.5)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}. \quad (1.6)$$

2. Лабораторное задание

2.1. Изучите устройство стенда, назначение, принцип работы и основные параметры источников питания, назначение, метрологические характеристики и правила эксплуатации измерительных приборов, методы измерения параметров R -, L -, C -элементов по разделу 1 данной лабораторной работы.

2.2. По методике параграфа 1.4 измерьте и запишите значения электрических сопротивлений резисторов R_1 , R_3 , R_4 . Для резистора R_2 измерьте и запишите максимальное и минимальное значения сопротивления, изменяя его величину ключами SA4, SA5, SA6.

2.3. По методике параграфа 1.5 определите величину индуктивности L катушки.

2.4. По методике параграфа 1.6 определите величины емкостей батареи конденсаторов. Результаты измерений занесите в табл. 1.1.

Таблица 1.1

$C_{уст}, \text{мкФ}$	20	40	60
$U_{\sim}, \text{В}$			
$I_{\sim}, \text{А}$	0,05	0,05	0,05
$X_C, \text{Ом}$			
$C_{изм}, \text{мкФ}$			

3. Контрольные вопросы

1. Приведите основные технические характеристики блоков питания стенда.

2. Как осуществляется сборка исследуемых цепей на стенде? Какую последовательность сборки, разборки схем необходимо соблюдать?

3. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при работе на стенде?

4. Укажите перечень измерительных приборов, входящих в лабораторную установку.

5. Как включаются амперметры в исследуемую электрическую цепь и как определяется величина тока по показаниям амперметра?

6. Как измеряются напряжения в цепях постоянного и переменного синусоидального тока с помощью вольтметра?

7. Как определяется величина электрического сопротивления в лабораторной установке?

8. Как можно определить величину индуктивности L катушки с помощью приборов установки?

9. Как можно определить величину емкости батареи конденсаторов с помощью приборов лабораторной установки?

4. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие ответы на них по разделу 3;
- схемы и результаты измерения электрических сопротивлений резисторов на постоянном токе по п. 2.2;
- схемы и результаты измерения величин L и C по п. 2.3 и 2.4;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 2

Исследование линейных цепей постоянного тока с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов

Цели работы:

- убедиться в соблюдении законов Кирхгофа в линейных цепях постоянного тока;
- уяснить режимы работы электрической цепи;
- экспериментально исследовать законы распределения токов, напряжений и мощностей в неразветвленной и разветвленной цепях с одним источником ЭДС.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Последовательное соединение

Последовательным называют такое соединение, при котором в каждом из элементов проходит один и тот же ток. Схема такой цепи представлена на рис. 2.1. Режим работы каждого элемента этой цепи и всей электрической цепи характеризуется значениями тока, напряжения и мощности:

– для тока: $I = \frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1 + R_2}$; при этом с уменьшением сопротивления резистора R_2 от бесконечности (режим холостого хода $R_2 = \infty$) до нуля (режим короткого замыкания $R_2 = 0$) величина тока изменяется от нуля до максимального значения;

– для напряжения на первом и втором резисторах: $U_1 = I_1 R_1$;
 $U_2 = U - U_1 = IR_2 = \frac{U}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$; причем напряжение U_1 увеличивается про-

порционально току, а напряжение U_2 равно напряжению источника ЭДС при холостом ходе и нулю при коротком замыкании;

– для мощностей, потребляемых первым и вторым резистором:
 $P_1 = U_1 I = I^2 R_1 = \frac{U_1^2}{R_1}$; $P_2 = U_2 I = I^2 R_2 = \frac{U_2^2}{R_2}$; причем мощность P_1 увеличивается пропорционально квадрату тока от нуля при холостом ходе до мощности, отдаваемой источником энергии в цепь $P = UI$, а мощность P_2 равна нулю при холостом ходе и при коротком замыкании.

Полная взаимозависимость режимов работы последовательно соединенных элементов является характерным признаком этого соединения. Если сопротивление R_1 отнести к внутреннему сопротивлению источника ЭДС, то при $R_2 = R_1$, от источника во внешнюю цепь (в резистор R_2) передается максимальная мощность $P_{2\max} = I^2 R_2 = \frac{U^2}{4R_1}$. Такой режим работы электрической цепи называют *согласованным*.

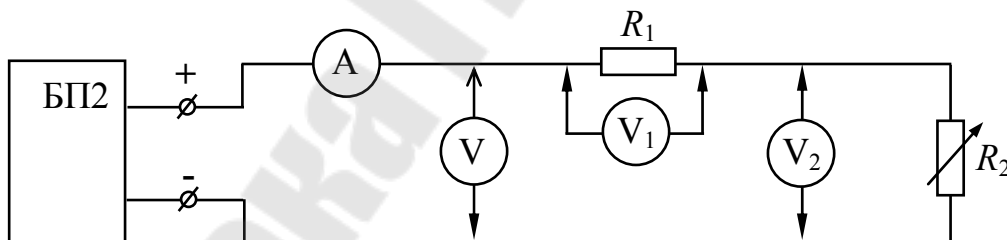


Рис. 2.1. Схема цепи постоянного тока с последовательным соединением приемников

Ток при согласованном режиме определяется из выражения

$$I = \frac{U}{2R_1} = 0,5I_k, \quad (2.1)$$

где $I_k = \frac{U}{R_1}$ – ток короткого замыкания; $U_2 = U_1 = 0,5U$.

Характер изменения напряжения и мощностей в функции тока нагрузки показан на рис. 2.2.

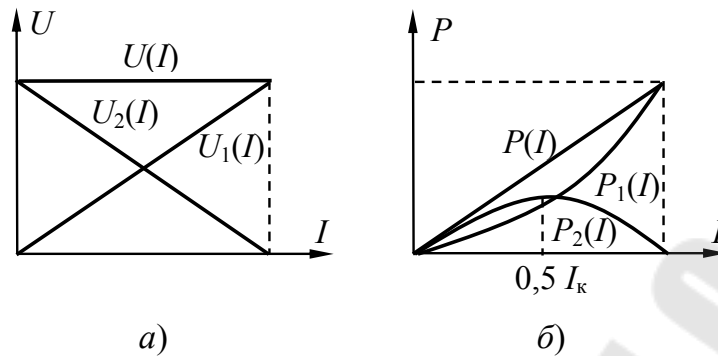


Рис. 2.2. Изменение напряжений и мощностей в зависимости от тока нагрузки для схемы с последовательным соединением элементов

1.2. Параллельное соединение

Параллельным называют такое соединение приемников, при котором напряжение на каждом из них одинаково, и режимы их работы не зависят друг от друга. Значения токов в ветвях определяются законом Ома, а тока в неразветвленной части цепи – первым законом Кирхгофа. Схема такой цепи представлена на рис. 2.3. Проводимости ветвей равны: $q_2 = \frac{1}{R_2}$; $q_3 = \frac{1}{R_3}$. Эквивалентная проводимость всей цепи равна: $q_{\text{эКВ}} = q_1 + q_2$. Мощность цепи, состоящей из параллельных ветвей, равна:

$$P = UI = U(I_2 + I_3) = P_2 + P_3 = I^2 R_{\text{эКВ}} = \frac{U^2}{R_{\text{эКВ}}}, \quad (2.2)$$

где $R_{\text{эКВ}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$ – эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных резисторов.

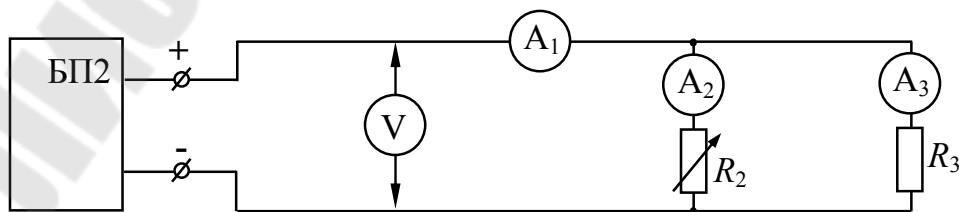


Рис. 2.3. Схема цепи постоянного тока с параллельным соединением приемников

1.3. Смешанное соединение

Смешанным называют такое соединение приемников, которое сочетает в себе и последовательное, и параллельное их соединение. Схема цепи со смешанным соединением приемников приведена на рис. 2.4.

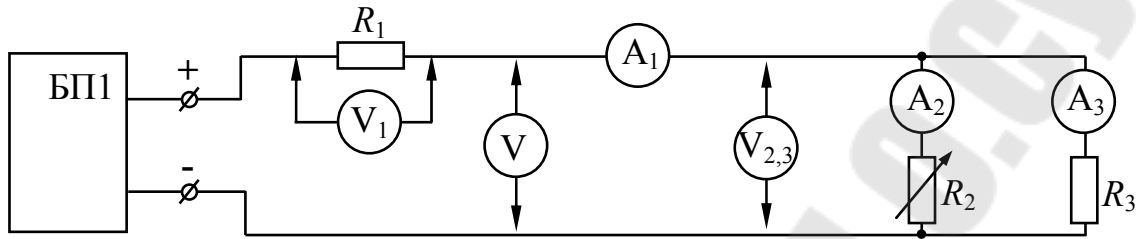


Рис. 2.4. Схема цепи постоянного тока со смешанным соединением приемников

Ток в неразветвленной части цепи определяется выражением $I_1 = \frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}$, а токи в параллельных ветвях равны:

$$I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1; \quad I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1.$$

Напряжение на резисторе с постоянным сопротивлением R_1 изменяется пропорционально току I_1 : $U_1 = I_1 R_1$, а напряжение на параллельно включенных сопротивлениях R_2 и R_3 равно:

$$U_{2,3} = U - U_1 = I_1 \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = I_1 \frac{R_3}{1 + \frac{R_3}{R_2}},$$

причем при холостом ходе (XX) $U_{2,3} = I_1 R_3$, а при коротком замыкании ($R_2 = 0$) $U_{2,3} = 0$.

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы освоить методы анализа линейных электрических цепей постоянного тока с одним источником ЭДС, с применением закона Ома, законов Кирхгофа и метода эквивалентных преобразований.

2.2. Произвести расчет токов, напряжений и мощностей в схемах (рис. 2.1, 2.3, 2.4). Величины электрических сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 и величина напряжения U источника питания берутся из первой строки табл. 2.1–2.3.

Примечание. Расчет выполнить после выполнения эксперимента.

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 2.1) и после проверки правильности сборки преподавателем включите блок питания БП2 и выставьте напряжение U_{\max} на входе схемы. Изменяя R_2 от $R_{2\min}$ до $R_{2\max}$ (с помощью ключей SA4, SA5, SA6), получите шесть отсчетов тока и напряжений. Показания приборов запишите в табл. 2.1 (в столбцы «измерено»). Выключите блок питания стенда. После проверки полученных результатов преподавателем разберите схему. Регулятор напряжения установите в исходное положение, соответствующее $U_{\text{вых}} = 0$.

Таблица 2.1

№ п/п	Измерено				Вычислено					
	I , А	U , В	U_1 , В	U_2 , В	P_1 , Вт	P_2 , Вт	R_1 , Ом	R_2 , Ом	$R_{\text{ЭКВ}}$, Ом	P , Вт
1										
2										
3										
4										
5										
6										

3.2. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 2.3), используя вместо амперметров А1, А2, А3 ключи SA1, SA2, SA3, и после проверки правильности сборки преподавателем включите блок питания и выставите на входе цепи *с помощью преподавателя* допустимое напряжение. Изменяя сопротивление реостата R_2 от $R_{2\min}$ до $R_{2\max}$ (с помощью ключей SA4, SA5, SA6), получите шесть отсчетов напряжений и токов. Показания приборов запишите в табл. 2.2. Выключите блок питания. После проверки результатов преподавателем приступите к выполнению п. 3.3, не разбирая схемы (рис. 2.3).

Таблица 2.2

№ п/п	Измерено				Вычислено								
	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$q_2,$ См	$q_3,$ См	$q_{\text{экв}},$ См	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт
1													
2													
3													
4													
5													
6													

3.3. Дополните схему (рис. 2.3) резистором R_1 . После проверки преподавателем включите блок питания и выставите напряжение U_{max} на входе цепи. Изменяя R_2 от $R_{2\text{min}}$ до $R_{2\text{max}}$, получите шесть отсчетов напряжений и токов. Показания приборов запишите в табл. 2.3. Выключите блок питания.

Таблица 2.3

№ п/п	Измерено						Вычислено							
	$U_1,$ В	$U_{2,3},$ В	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_{\text{экв}},$ Ом	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$P,$ Вт
1														
2														
3														
4														
5														

3.4. Результаты измерений предъявите на подпись преподавателю, а стенд приведите в исходное состояние.

4. Контрольные вопросы

1. Какие электрические цепи называются линейными?
2. Что физически выражает первый закон Кирхгофа?
3. Что физически выражает второй закон Кирхгофа?
4. Какое соединение называют последовательным, параллельным и смешанным?
5. Что означают режимы холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) электрической цепи?

6. При каком условии в цепи возможен режим согласованной нагрузки и чем он характеризуется?
7. Как определить эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов?
8. Что такое проводимость ветви и всей цепи?
9. Как определяется мощность источника и приемника в цепи постоянного тока?
10. Почему режим КЗ электрической цепи с параллельно соединенными элементами является аварийным?

5. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие ответы на них по разделу 4;
- результаты расчета токов, напряжений и мощностей в схемах по п. 2.2;
- схемы исследуемых цепей (рис. 2.1, 2.3, 2.4) и табл. 2.1–2.3 результатов измерений и проведенных по ним вычислений;
- графики зависимостей $U(I)$, $U_1(I)$, $U_2(I)$ и $P(I)$, $P_1(I)$ и $P_2(I)$, построенные по данным табл. 2.1 (рис. 2.2);
- графики зависимостей $I(I_2)$, $I_3(I_2)$ и $P(I_2)$, $P_2(I_2)$, $P_3(I_2)$, построенные по данным табл. 2.2;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 3

Исследование сложных линейных цепей постоянного тока с несколькими источниками ЭДС

Цели работы:

- освоить и экспериментально проверить расчет линейных цепей постоянного тока методами наложения и эквивалентного генератора;
- освоить методику расчета, измерения и построения потенциальной диаграммы.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Метод наложения

Метод наложения полагает, что каждая ЭДС вызывает в отдельных ветвях электрической цепи свои (частичные) токи независимо от действия всех остальных ЭДС, включенных в эту же цепь. Это позволяет найти ток в любой ветви как алгебраическую сумму токов, возникающих в этой ветви при действии каждой ЭДС отдельно. Так, расчет токораспределения в электрической цепи (рис. 3.1, а) методом наложения сводится к нахождению токов в двух более простых цепях с ЭДС E_1 (рис. 3.1, б) и ЭДС E_2 (рис. 3.1, в) при сохранении в них прежних значений внешних и внутренних сопротивлений.

В электрической цепи (рис. 3.1, б) токи в ветвях определяются из выражений:

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}; \quad I_2' = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1'; \quad I_3' = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1'.$$

Аналогично в электрической цепи (рис. 3.1, в) токи в ветвях определяются из выражений:

$$I_3'' = \frac{E_2}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}; \quad I_2'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_3''; \quad I_1'' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_3''.$$

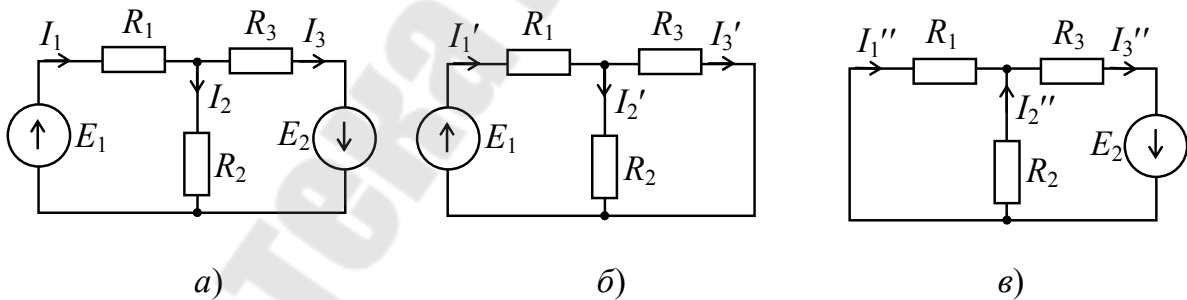


Рис. 3.1. Схемы для расчета токов в ветвях методом наложения

Наложение токов I_1' , I_2' , I_3' на токи I_1'' , I_2'' , I_3'' , с учетом их направлений, позволяет найти действительные токи в ветвях исходной схемы (рис. 3.1, а):

$$I_1 = I_1' + I_1''; \quad I_2 = I_2' - I_2''; \quad I_3 = I_3' + I_3''.$$

1.2. Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора позволяет определить ток в одной из ветвей разветвленной электрической цепи. При этом ветвь можно рассматривать как нагрузку, подключенную в точках 1 и 2 (рис. 3.2, а) к своеобразному генератору, которым является остальная сложная электрическая цепь. Такой условный генератор, обладающий некоторой эквивалентной ЭДС E_r и некоторым эквивалентным внутренним сопротивлением R_r , принято называть эквивалентным генератором, или активным (содержащим источники ЭДС) двухполюсником.

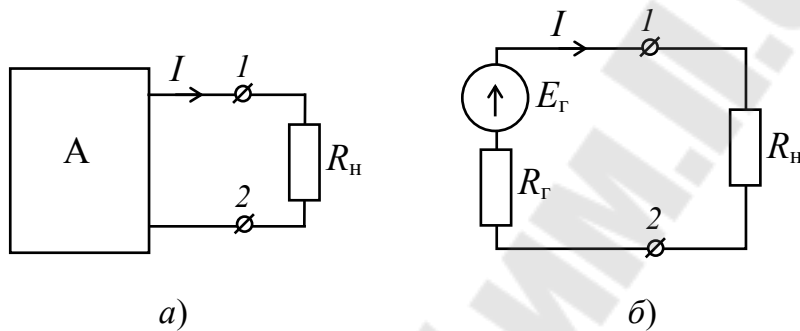


Рис. 3.2. Схемы, иллюстрирующие расчет тока в ветви сложной цепи методом эквивалентного генератора

Применительно к случаю, когда выделенная ветвь является пассивной (рис. 3.2), ток в ней находится по соотношению $I = \frac{E_r}{R_r + R_n}$.

При известных параметрах заданной электрической цепи параметры E_r и R_r эквивалентного генератора можно определить аналитически либо по результатам измерений.

Расчет величин E_r и R_r поясняется схемами, представленными на рис. 3.3, б, в, для исходной схемы – рис. 3.3, а.

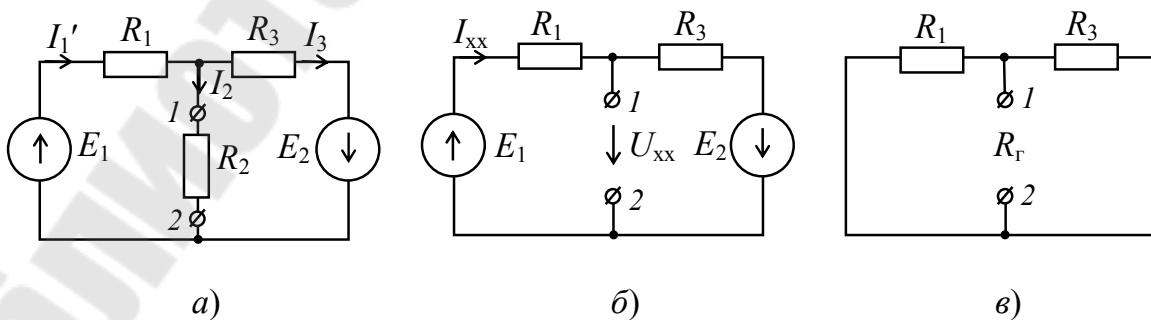


Рис. 3.3. Расчет E_r и R_r для случая определения тока в ветви R_2

ЭДС E_r равна разности потенциалов между зажимами 1 и 2 (рис. 3.3, б) при условии, что рассматриваемая ветвь $R_2 = R_H$ разомкнута, т. е.

$$E_r = U_{xx} = \varphi_1 - \varphi_2 = E_1 - I_{xx} R_1 = I_{xx} R_3 - E_2.$$

Так как $I_{xx} = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_3}$, то $E_r = E_1 - R_1 \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_3} = R_3 \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_3} - E_2$.

Сопротивление R_r равно сопротивлению всей цепи между зажимами 1 и 2 при отключенной нагрузке $R_2 = R_H$ и равенстве нулю всех имеющихся в цепи источников ЭДС (рис. 3.3, в) $R_r = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$.

Экспериментально параметры E_r и R_r определяются по соотношениям

$$E_r = U_{xx} \quad \text{и} \quad R_r = \frac{U_{xx}}{I_{кз}},$$

где U_{xx} – напряжение на зажимах 1 и 2 (рис. 3.3, б), при $R_2 = R_H = \infty$ (измеряется вольтметром, подключаемым к зажимам 1 и 2 при отключенной нагрузке); $I_{кз}$ – ток в ветви R_2 при $R_2 = 0$ (измеряется амперметром, включенным между зажимами 1 и 2 вместо R_H).

1.3. Потенциальная диаграмма

Под *потенциальной диаграммой* понимают график распределения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура, в зависимости от суммарного сопротивления от базовой точки (потенциал которой принимается равным нулю) до каждой характерной точки заданного контура. При этом по оси абсцисс откладываются суммарные сопротивления, а по оси ординат – потенциалы.

Для построения диаграммы определяется сумма сопротивлений всех резисторов, входящих в заданный контур, и выбирается масштаб $m_{R\Sigma}$ (Ом/мм) по оси абсцисс. Далее рассчитываются или измеряются вольтметром постоянного тока (чувствительным к полярности) потенциалы всех точек контура по отношению к базовой точке и выбирается масштаб m_φ (В/мм).

Для расчета потенциалов следует вначале определить величины и направления токов, протекающих через все элементы, входящие в контур и далее, перемещаясь от базовой точки по контуру в произвольном направлении, рассчитать потенциалы по соотношению

$$\varphi_2 = \varphi_1 \pm E \pm I R,$$

где φ_2 – потенциал последующей точки контура; φ_1 – потенциал предыдущей точки контура; E и R – ЭДС источника напряжения или электрическое сопротивление резистора, включенного между точками 1 и 2; I – величина тока, протекающего через резистор R .

Знак перед ЭДС берется положительным, если направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, а знак падения напряжения $U = IR$ положительный, если направление тока I через резистор R встречно направлению обхода.

Для измерения потенциалов всех точек контура вольтметром отрицательный зажим вольтметра соединяется с базовой точкой, а положительным поочередно касаются остальных точек контура. Результаты расчетов или (и) измерений заносятся в табл. 3.4 и строится диаграмма (рис. 3.4).

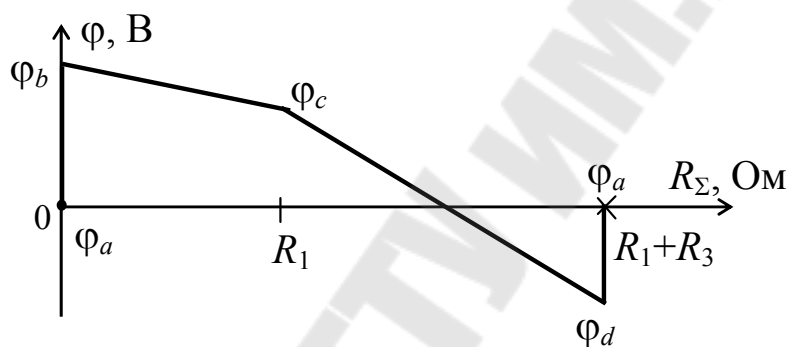


Рис. 3.4. Пример построения потенциальной диаграммы для внешнего контура схемы, представленной на рис. 3.5

Вертикальные участки диаграммы отвечают переходам через идеальные источники ЭДС.

Расчеты и экспериментальные измерения в данной работе приводятся применительно к схеме, приведенной на рис. 3.5.

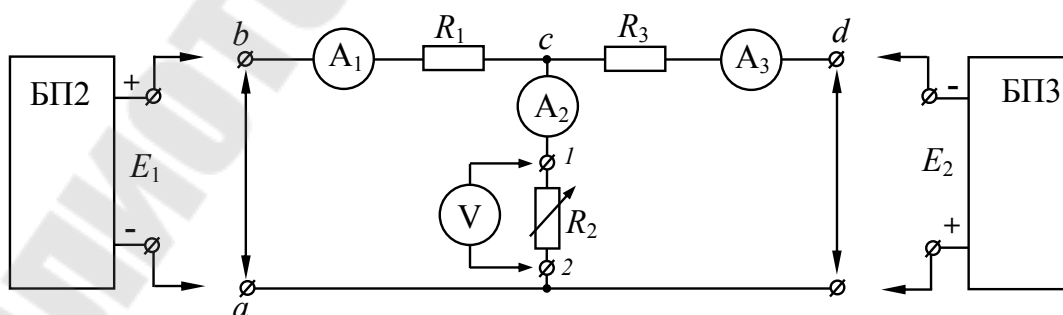


Рис. 3.5. Схема электрической цепи для проведения расчетов и измерений

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы освоить методы анализа линейных электрических цепей с несколькими источниками ЭДС (методы наложения и эквивалентного генератора).

2.2. По исходным данным E_1 , E_2 , R_1 , R_2 , R_3 рассчитать токи в ветвях схемы (рис. 3.5) для случая, когда вместо перемычек включены источники ЭДС E_1 и E_2 с указанной на схеме полярностью методом наложения, а также ток I_2 – методом эквивалентного генератора. Результаты расчетов занести в табл. 3.1 и 3.2.

Примечание. Расчет выполнить после выполнения эксперимента.

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Произвести проверку метода наложения, для чего:

– соберите схему (рис. 3.5), включив между точками a и b вместо перемычки источник ЭДС E_1 , соблюдая полярность. Вместо амперметров A_1 , A_2 , A_3 используйте ключи SA_1 , SA_2 , SA_3 .

– после проверки схемы преподавателем регулятор напряжения E_1 установите на нуль и, включив источник питания стенда, установите величину ЭДС $E_1 = \frac{E_{1\max}}{2}$.

Установите ключи резистора R_2 в положение $R_{2\max}$, измерьте и запишите в табл. 3.1 величины E_1 , I_1' , I_2' , I_3' . Выключите питание источника E_1 тумблером;

– замените источник ЭДС E_1 перемычкой, а перемычку между точками d и a – источником ЭДС E_2 , и, включив питание источника E_2 , измерьте и запишите в табл. 3.1 величины E_2 , I_1'' , I_2'' , I_3'' . Выключите питание источника E_2 ;

– замените перемычку между точками a и b схемы источником ЭДС E_1 и, включив питание обоих источников, измерьте и запишите в табл. 3.1 величины E_1 , E_2 , I_1 , I_2 , I_3 . Выключите питание источников ЭДС E_1 и E_2 .

3.2. Произведите проверку метода эквивалентного генератора, для чего:

– в схеме (рис. 3.5) с включенными источниками ЭДС E_1 и E_2 отсоедините от зажимов 1 и 2 резистор R_2 и, подключив к этим зажи-

мам вольтметр постоянного тока, измерьте и запишите в табл. 3.2 величину $U_{xx} = E_r$ (режим ХХ ветви R_2);

– отсоединив вольтметр от зажимов 1 и 2 и включив вместо него перемычку, измерьте и запишите в табл. 3.2 величину тока короткого замыкания $I_{2кз}$. Выключите питание источников ЭДС;

– по значениям U_{xx} и $I_{2кз}$ определите значения R_r и $I_{2расч}$ и запишите в табл. 3.2 эти величины;

– включите R_{2max} вместо перемычки между зажимами 1 и 2. Измерьте I_2 и U_{12} и запишите в табл. 3.2.

3.3. В схеме (рис. 3.5) измерьте зависимость напряжения на зажимах 1 и 2 от величины тока I_2 , т. е. снимите внешнюю характеристику эквивалентного генератора. Для этого:

– включив питание обоих источников, измерьте и запишите в табл. 3.3 указанную зависимость, регулируя ток I_2 величиной сопротивления резистора R_2 от R_{2max} до R_{2min} (шесть значений).

3.4. Измерьте потенциалы указанных на схеме (рис. 3.5) точек (относительно базовой точки a) по методике, изложенной в параграфе 1.3 для величины $R_2 = R_{2max}$ и занесите результаты измерений в табл. 3.4.

Таблица 3.1

Режим работы	Измерено			Вычислено		
	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_1, A	I_2, A	I_3, A
Включен источник ЭДС $E_1 =$; $E_2 = 0$						
Включен источник ЭДС $E_1 =$; $E_2 = 0$						
Включены оба источника ЭДС $E_1 =$; $E_2 =$						

Таблица 3.2

Измерено	Режим работы ветви	Холостой ход	Короткое замыкание	Нагрузка R_{2max}	Определено	Параметр	E_r, B	R_r, Om	I_2, A	P_2, Bt
	Параметр					Способ определения				
I_2, A						По данным измерений				
U_{12}, B						Расчетом				

Таблица 3.3

I_2	А						
U_{12}	В						
P_2	Вт						

Таблица 3.4

Точки контура Способ определения потенциалов	$\varphi_a, В$	$\varphi_b, В$	$\varphi_c, В$	$\varphi_d, В$	$\varphi_a, В$
	Расчет $\varphi_i, В$				
Измерение $\varphi_i, В$					
Суммарное сопротивление $R_{\Sigma}, Ом$					

4. Контрольные вопросы

1. Как осуществляется расчет электрических цепей по методу наложения?
2. В каких случаях можно использовать метод наложения для расчета электрических цепей?
3. Когда применяется метод эквивалентного генератора?
4. В чем сущность расчета по методу эквивалентного генератора?
5. Как осуществляется расчет параметров E_r и R_r ?
6. Как измеряются параметры E_r и R_r эквивалентного генератора (активного двухполюсника)?
7. В чем особенности применения метода эквивалентного генератора для активной ветви (т. е. ветви, содержащей R_H и источник ЭДС)?
8. Какая зависимость называется внешней характеристикой генератора?
9. Как при заданном сопротивлении нагрузки определить ток через нагрузку по внешней характеристике?
10. Что понимается под потенциальной диаграммой?
11. Как рассчитываются и как измеряются потенциалы узлов заданного контура схемы?

5. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;

- контрольные вопросы и краткие ответы на них по разделу 4;
- результаты расчета и измерения токов в ветвях схемы по методу наложения в виде заполненной табл. 3.1;
- схему (рис. 3.5);
- результаты расчета и измерения параметров эквивалентного генератора и тока в ветви R_2 по методу эквивалентного генератора в виде заполненной табл. 3.2;
- табл. 3.3 и графики зависимостей $U_{12}(I_2)$ и $P_2(I_2)$ эквивалентного генератора;
- табл. 3.4 и потенциальные диаграммы (расчетную и экспериментальную на одном рисунке);
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 4

Исследование нелинейных цепей постоянного тока

Цели работы:

- изучить различные нелинейные элементы электрических цепей, их параметры и характеристики на постоянном токе. Снять экспериментально их вольт-амперные характеристики;
- выполнить графический расчет нелинейных цепей постоянного тока и проверить их экспериментально.

1. Краткие теоретические сведения

В электрические цепи могут входить элементы, сопротивление которых не является величиной постоянной, вследствие чего ток в них не находится в прямой пропорциональной зависимости по отношению к напряжению. Такие элементы оказывают различное сопротивление перемещению электрических зарядов, которое зависит от величины и направления напряжения возникающего тока, и называются *нелинейными элементами*.

Основной характеристикой нелинейных элементов, по которой судят об их электрических свойствах, является вольт-амперная (ампер-вольтная) характеристика $I(U)$. Она не может быть установлена теоретически и определяется экспериментально. В зависимости от вида

вольт-амперной характеристики различают симметричные (электрические лампы накаливания (рис. 4.1, *а*), бареттеры (рис. 4.1, *б*) и несимметричные (полупроводниковый диод рис. 4.2) нелинейные элементы. Электрическая лампа накаливания имеет вольфрамовую нить в виде простой или двойной спирали (с выводами к цоколю), которая находится в стеклянном баллоне, обычно наполненном смесью азота и аргона или криптоном.

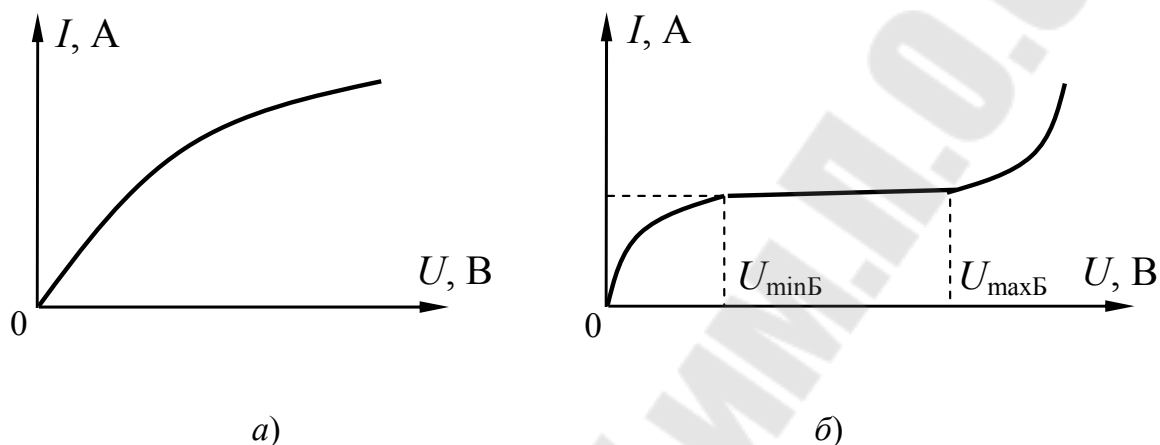


Рис. 4.1. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов:
а – лампы накаливания; *б* – бареттера

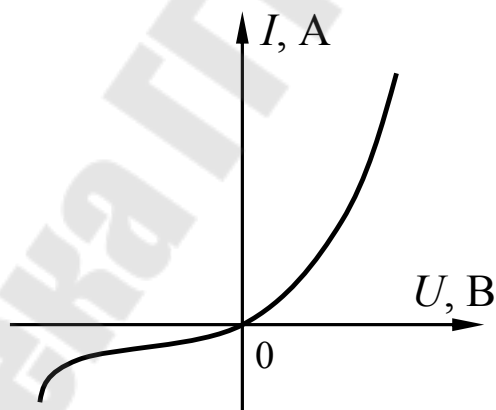


Рис. 4.2. Вольт-амперная характеристика
 полупроводникового диода

Бареттер устроен аналогично электрической лампе накаливания и имеет вольфрамовую или стальную нить (с выводами к цоколю), находящуюся в стеклянном баллоне, наполненном водородом. Размеры нити и давление водорода подобраны так, чтобы изменение величины напряжения в определенных пределах ($U_{\min Б}$ и $U_{\max Б}$) (рис. 4.1, *б*) вызвало соответственное изменение сопротивления нити, при котором

ток в цепи практически оставался неизменным. Бареттеры применяются в электрических цепях для стабилизации тока в отдельных ветвях при медленном изменении напряжения.

Полупроводниковые диоды – двухслойные приборы, обладающие практически односторонней проводимостью, т. е. при одинаковом по величине напряжении ток в прямом направлении («плюс» – к p -слою и «минус» – к n -слою) во много раз больше, чем в обратном направлении включения («плюс» – к n -слою и «минус» – к p -слою). Это свойство используют в выпрямителях – устройствах для преобразования переменного тока в ток постоянного (неизменного) направления.

При исследовании и расчете цепей с нелинейными элементами применяются такие параметры, как статическое и динамическое (дифференциальное) сопротивления, определяемые по вольт-амперным характеристикам.

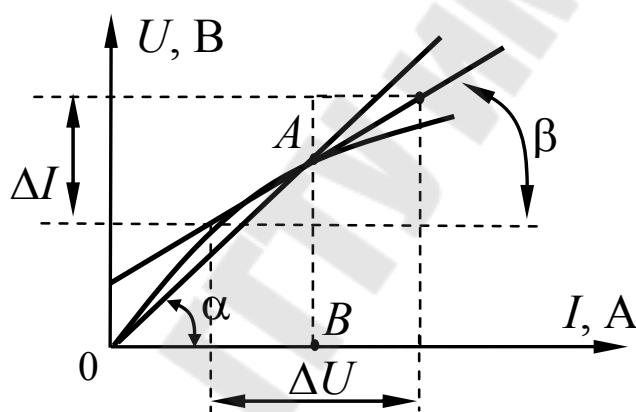


Рис. 4.3. Определение статического и дифференциального сопротивления нелинейного элемента

Статическим сопротивлением $R_{ст}$ нелинейного элемента в заданной точке A его характеристики называют *отношение напряжения на элементе к току в нем* (рис. 4.3):

$$R_{ст} = \frac{U_A}{I_A} = \frac{m_U}{m_I} \frac{AB}{OB} = m_R \operatorname{tg} \alpha,$$

где m_U , m_I , m_R – масштабы напряжения, тока и сопротивления.

Дифференциальным сопротивлением $R_{диф}$ нелинейного элемента в заданной точке его характеристики называют *отношение бесконечно малого приращения напряжения dU к соответствующему приращению тока dI* (рис. 4.3):

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = m_R \operatorname{tg} \beta.$$

Очевидно, что $R_{\text{ст}}$ и $R_{\text{диф}}$ нелинейного элемента зависят от тока и напряжения.

Расчет нелинейных электрических цепей постоянного тока обычно выполняют графически методом, в основу которого положены законы Кирхгофа. По известным (отснятым экспериментально или взятым из справочников) вольт-амперным характеристикам (ВАХ) отдельных нелинейных элементов, образующих рассматриваемую цепь, находят ВАХ всей цепи. При этом ВАХ последовательно соединенных нелинейных элементов (или нелинейного и линейного элементов) получают суммированием напряжений при одинаковых значениях тока для всех элементов. Вольт-амперная характеристика параллельного соединения линейных элементов (или линейного и нелинейного элементов) получают суммированием токов при одинаковых для всех элементов (для всех параллельных ветвей) значениях напряжения. Таким образом, ВАХ (АВХ), полученная для всей цепи в целом, позволяет найти распределение напряжений и токов в электрической цепи с нелинейными элементами.

Рассмотренный выше метод графического расчета нелинейных цепей постоянного тока получил название *метода эквивалентных преобразований*. Применительно к последовательному соединению линейного и нелинейного элементов этот метод проиллюстрирован на рис. 4.4.

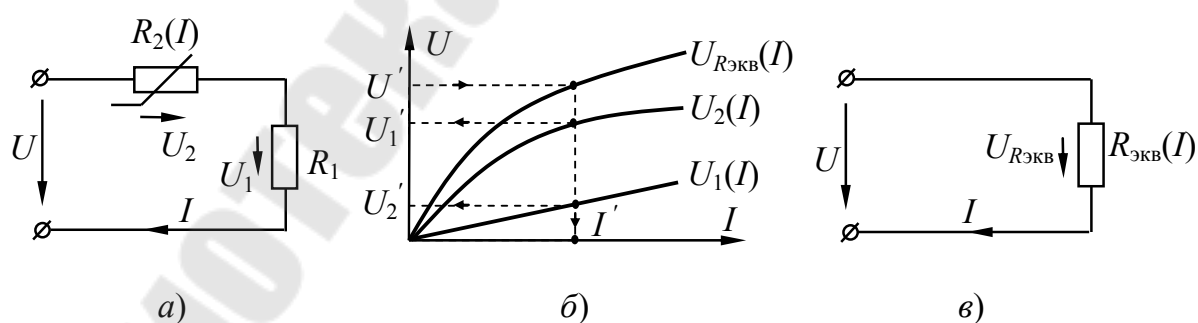


Рис. 4.4. Последовательное соединение линейного и нелинейного элементов:
 а – схема соединения; б – ВАХ; в – эквивалентная схема

Применительно к параллельному соединению линейного и нелинейного элементов метод эквивалентных преобразований проиллюстрирован на рис. 4.5.

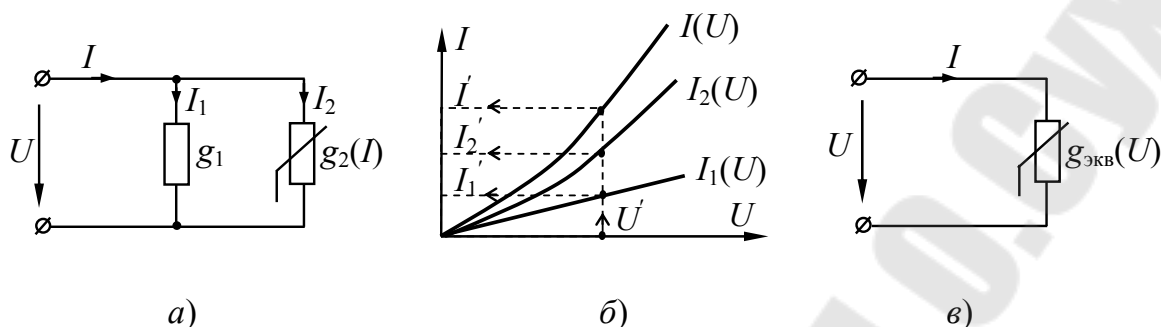


Рис. 4.5. Параллельное соединение линейного и нелинейного элементов:
 а – схема соединения; б – ВАХ; в – эквивалентная схема

Кроме метода эквивалентных преобразований, известны и широко применяются для графического расчета нелинейных цепей постоянного тока метод пересечения характеристик, метод линеаризации и метод эквивалентного активного двухполюсника (метод эквивалентного генератора).

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы освоить методы графического расчета нелинейных цепей постоянного тока.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 4.6).

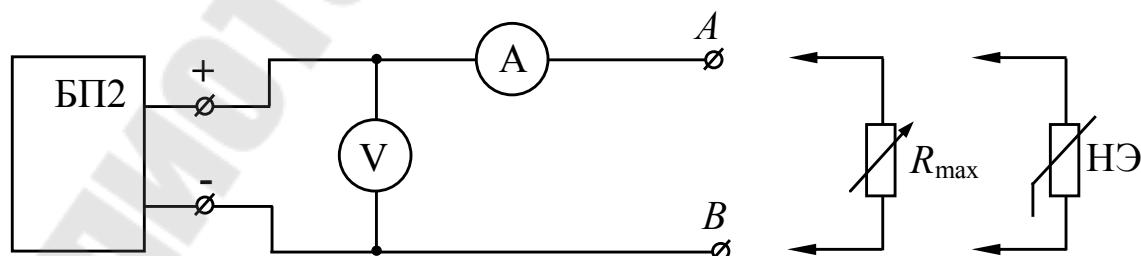


Рис. 4.6. Схема электрической цепи для снятия ВАХ элементов

3.2. Снимите ВАХ резистора $R_{a\max}$ и лампы накаливания, подключая их поочередно к зажимам A и B , устанавливая с помощью ЛАТРа блока питания напряжения, указанные в табл. 4.1. Измеренные значения токов запишите в данную таблицу.

Таблица 4.1

Измерено	$U, В$		0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12	13,5
			Тип элемента									
Вычислено	Реостат	$I, мА$										
	Лампа	$I, мА$										
	Реостат	$R_{ст}, Ом$										
		$R_{дин}, Ом$										
Лампа	$R_{ст}, Ом$											
	$R_{дин}, Ом$											

Постройте ВАХ на одном рисунке и $R_{ст}(I)$ – на втором рисунке для резистора и лампы.

3.3. Пользуясь графиками снятых экспериментально вольт-амперных характеристик резистора $U_1(I)$ и лампы накаливания $U_2(I)$, постройте на отдельных рисунках расчетные ВАХ (или АВХ) $U_{R_{экв}}(I)$ для последовательного их соединения и $I_{g_{экв}}(U)$ – для параллельного. Для построения этих характеристик следует вначале заполнить табл. 4.2.

Таблица 4.2

Рассчитано	Последовательное соединение	$I, мА$	0	3,0	6,0	9,0	12	15	18
		$U, В$							
	Параллельное соединение	$U, В$	0	2,5	5,0	7,5	10	12	15
		$I, мА$							

3.4. Для проверки результатов графического метода расчета электрической цепи при последовательном соединении лампы и резистора соберите электрическую цепь по схеме (рис. 4.7) и, изменяя напряжение в соответствии с данными табл. 4.2 для последовательного соединения, измерьте и занесите в табл. 4.3 значения U и I .

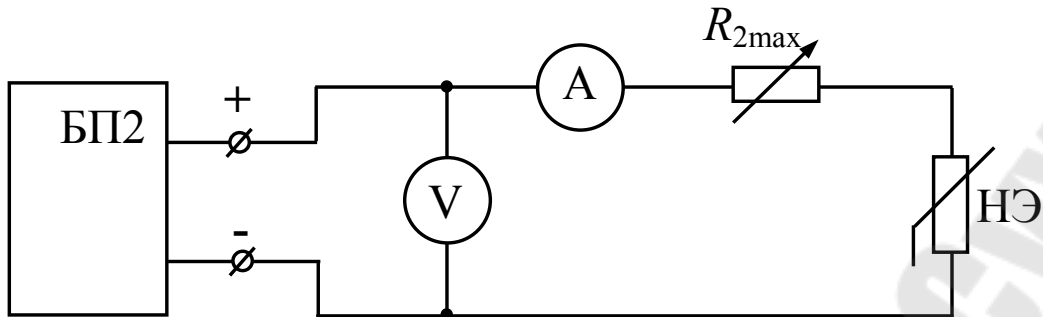


Рис. 4.7. Схема для снятия ВАХ последовательного соединения линейных и нелинейных элементов

Таблица 4.3

Измерено	Последовательное соединение	I , мА	0	3,0	6,0	9,0	12	15	18
		U , В							
	Параллельное соединение	U , В	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15
		I , мА							

3.5. Для проверки результатов графического метода расчета электрической цепи при параллельном соединении лампы и резистора соберите электрическую цепь по схеме (рис. 4.8). Изменяя напряжение в соответствии с данными табл. 4.2 для параллельного соединения, измерьте и занесите в табл. 4.3 значения U и I .

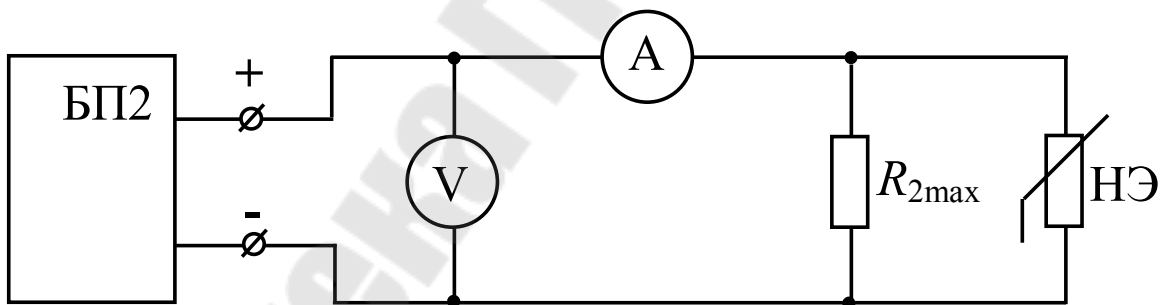


Рис. 4.8. Схема для снятия ВАХ параллельного соединения реостата и ламп накаливания

3.6. Экспериментально полученные данные по п. 3.4, 3.5 (т. е. данные табл. 4.3) отобразите графически на соответствующих рисунках, построенных по данным расчетов (по данным табл. 4.2). Оцените точность графического метода расчета путем сравнения.

4. Контрольные вопросы

1. Какие элементы электрической цепи называют нелинейными?
2. Что называют вольт-амперной (ампер-вольтной) характеристикой элемента электрической цепи?
3. Почему лампа накаливания является нелинейным элементом?
4. Как устроен бареттер и для чего он применяется?
5. Что представляет собой полупроводниковый диод?
6. Чем отличается статическое сопротивление нелинейного элемента от дифференциального?
7. Как построить ВАХ нелинейной электрической цепи из последовательно соединенных элементов, зная ВАХ элементов?
8. Как построить АВХ нелинейной электрической цепи из параллельно соединенных элементов, зная АВХ элементов?
9. Как рассчитывается нелинейная электрическая цепь постоянного тока по методу пересечения характеристик?
10. Как рассчитывается нелинейная электрическая цепь постоянного тока по методу активного двухполюсника (эквивалентного генератора)?
11. Что представляют собой управляемые нелинейные элементы? Приведите примеры.

5. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие письменные ответы на них по разделу 4;
- схемы опытов и заполненные табл. 4.1–4.3 результатов измерений и расчетов;
- вольт-амперные характеристики лампы накаливания и реостата на одном рисунке;
- зависимость $R_{ст}(I)$ резистора и ламп на одном рисунке;
- расчетную и экспериментальную ВАХ электрической цепи с последовательным соединением реостата и лампы на одном рисунке;
- расчетную и экспериментальную АВХ электрической цепи с параллельно соединенными резистором и лампой на одном рисунке;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 5

Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с последовательным соединением элементов

Цели работы:

- исследовать электрическое состояние линейной цепи синусоидального тока при последовательном соединении различных приемников;
- научиться вычислять параметры электрической цепи и строить векторные диаграммы, треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей по опытным данным;
- исследовать явление резонанса напряжений и определить параметры последовательной RLC -цепи.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Рассмотрим физические процессы в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных индуктивной катушки с параметрами R_k и L и резистора с регулируемым электрическим сопротивлением R_2 (рис. 5.1, а).

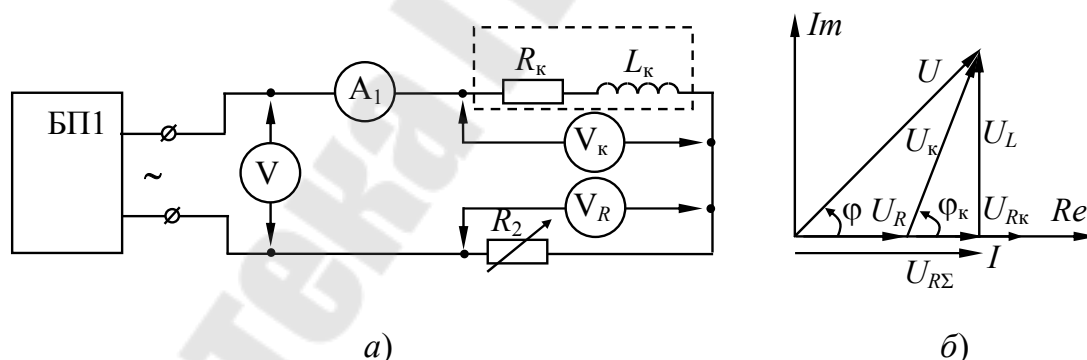


Рис. 5.1. Схема электрической цепи из последовательно соединенных индуктивной катушки и резистора (а) и векторная диаграмма цепи (б)

Величина (действующее значение) тока в этой цепи равна:

$$I = \frac{U}{Z},$$

где U – действующее значение напряжения на зажимах цепи; Z – модуль комплекса полного сопротивления, определяемый выражением

$Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_L^2}$; $R_{\Sigma} = R + R_k$ – суммарное активное сопротивление цепи; $X_L = \omega L = 2\pi f L$ – индуктивное сопротивление катушки; ω – угловая частота; f – циклическая частота.

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение для мгновенных значений напряжений в такой цепи имеет вид:

$$u = u_{R_k} + u_R + u_L = u_{R_{\Sigma}} + u_L. \quad (5.1)$$

Если принять начальную фазу тока в цепи $\psi_i = 0$, т. е. принять, что $i = I_m \sin \omega t$, то

$$\left. \begin{aligned} u_{R_{\Sigma}} &= I_m R_{\Sigma} \sin \omega t \\ u_L &= I_m X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (5.2)$$

и, следовательно,

$$u = I_m R_{\Sigma} \sin \omega t + I_m X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (5.3)$$

Из (5.2) следует, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, а напряжение на индуктивном элементе опережает на $\frac{\pi}{2}$ по фазе ток, протекающий через этот элемент.

Уравнение (5.1) в символической (комплексной) форме имеет вид:

$$\underline{U} = \underline{U}_{R_{\Sigma}} + \underline{U}_L, \quad (5.4)$$

где $\underline{U} = U e^{j\varphi}$ – комплекс действующего значения напряжения на входе цепи; $\underline{U}_{R_{\Sigma}} = \underline{I} R_{\Sigma} = I R_{\Sigma}$ – комплекс действующего значения падения напряжения на активной составляющей входного сопротивления цепи; $\underline{U}_L = \underline{I}(j X_L) = I X_L e^{j\frac{\pi}{2}}$ – комплекс действующего значения падения напряжения на индуктивном элементе.

Следовательно, уравнение (5.4) можно записать в виде

$$\underline{U} = \underline{I} R_{\Sigma} + \underline{I}(j X_L). \quad (5.5)$$

Решая (5.5) относительно комплекса тока, получим:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R_{\Sigma} + jX_L} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad (5.6)$$

где $\underline{Z} = R_{\Sigma} + jX_L$ – комплекс входного сопротивления цепи (рис. 5.1, а).

Так как напряжение \underline{U} , приложенное от блока питания к входным зажимам цепи «уравновешивается» векторной суммой напряжений $\underline{U}_{R_{\Sigma}}$ и \underline{U}_L , то векторную диаграмму цепи (рис. 5.1, б) можно построить методом засечек, зная (из эксперимента) U , $U_{R_{\Sigma}}$ и U_L . На этой диаграмме: φ – угол сдвига фаз между напряжением \underline{U} и током \underline{I} в цепи ($\varphi = \arg \underline{Z} = \arctg \frac{X_L}{R_{\Sigma}}$); $0 \leq \varphi \leq 90$; φ_k – угол сдвига фаз между напряжением \underline{U}_k и током \underline{I} для катушки индуктивности.

Векторы $\underline{U}_{R_{\Sigma}}$, \underline{U}_L и \underline{U} образуют треугольник напряжений.

Если каждую из сторон треугольника напряжений разделить на ток \underline{I} , то получим треугольник сопротивлений (рис. 5.2, а). Умножая стороны треугольника напряжений на ток \underline{I} , получим треугольник мощностей (рис. 5.2, б):

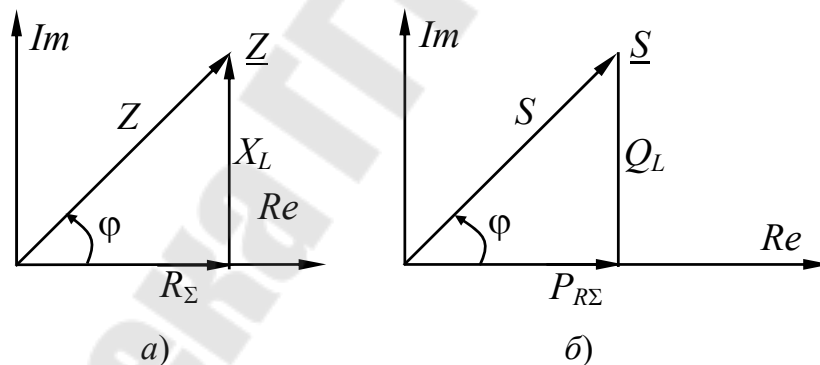


Рис. 5.2. Треугольник сопротивлений (а) и мощностей (б) для схемы, представленной на рис. 5.1, а

Из треугольника сопротивлений (рис. 5.2, а) следуют соотношения:

$$R_{\Sigma} = Z \cos \varphi; \quad X_L = Z \sin \varphi; \quad Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_L^2}; \quad \cos \varphi = \frac{R_{\Sigma}}{Z}. \quad (5.7)$$

Из треугольника мощностей (рис. 5.2, б) следуют соотношения:

$$P_{R_{\Sigma}} = S \cos \varphi; \quad Q_L = S \sin \varphi; \quad S = \sqrt{P_{R_{\Sigma}}^2 + Q_L^2}; \quad \cos \varphi = \frac{P_{R_{\Sigma}}}{S}, \quad (5.8)$$

где $\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^* = (P + jQ)$ – комплекс полной мощности цепи; $S = UI$ – полная мощность цепи.

С учетом закона Ома для действующих величин тока и напряжения, имеют место соотношения:

$$P = U_{R_\Sigma} I = UI \cos \varphi = I^2 R_\Sigma = \frac{U_{R_\Sigma}^2}{R_\Sigma} \text{ – активная мощность цепи;}$$

$$Q_L = U_L I = I^2 X_2 = UI \sin \varphi \text{ – реактивная мощность цепи.}$$

1.2. Рассмотрим аналогично процессы в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных конденсатора с электрической емкостью C и резистора с регулируемым электрическим сопротивлением R (рис. 5.3, а).

Величина тока в этой цепи равна:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (5.9)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ – модуль комплекса полного сопротивления;

$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ – емкостное сопротивление конденсатора.

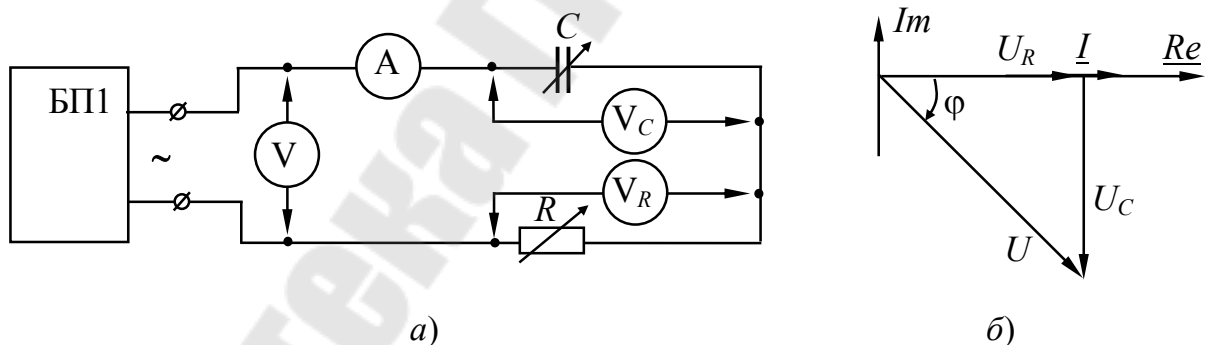


Рис. 5.3. Схема электрической цепи из последовательно соединенных конденсатора и резистора (а) и векторная диаграмма цепи (б)

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение для мгновенных значений напряжений имеет вид:

$$u = u_R + u_C. \quad (5.10)$$

Если $\psi_i = 0$, то $u_R = I_m R \sin \omega t$, а $u_C = I_m X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ и, следовательно,

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (5.11)$$

Следовательно, напряжение на конденсаторе отстает на 90° по фазе от тока, протекающего через него.

Уравнение (5.10) в символической форме имеет вид:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C, \quad (5.12)$$

где $\underline{U}_C = \underline{I}(-jX_C) = I X_C e^{-j\frac{\pi}{2}}$ – комплекс действующего значения падения напряжения на емкостном элементе.

Следовательно, уравнение (5.12) можно записать в виде

$$\underline{U} = \underline{I}R + \underline{I}(-jX_C), \quad (5.13)$$

или

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R - jX_C} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad (5.14)$$

где $\underline{Z} = R - jX_C$ – комплекс входного сопротивления цепи (рис. 5.3, а).

Векторная диаграмма этой цепи, построенная методом засечек по величинам U , U_R , U_C , приведена на рис. 5.3, б.

Угол φ сдвига фаз между напряжением \underline{U} на входе цепи и током \underline{I} в цепи отрицателен и может изменяться в пределах $-90^\circ \leq \varphi \leq 0$.

Треугольники сопротивлений и мощностей для этой цепи представлены на рис. 5.4, а, б.

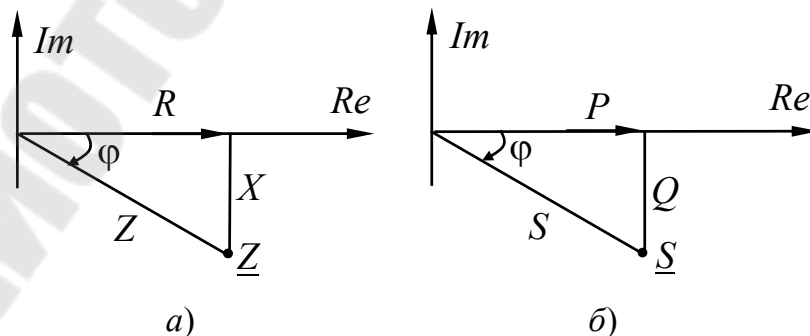


Рис. 5.4. Треугольник сопротивлений (а) и мощностей (б) для схемы, представленной на рис. 5.3, а

Из этих треугольников, с учетом закона Ома для действующих значений напряжения и тока, следуют соотношения, аналогичные соотношениям (5.7)–(5.9). Однако при этом реактивная мощность отрицательна, т. к. $\varphi < 0$ и, следовательно, $Q_C = UI \sin \varphi < 0$.

1.3. Рассмотрим схему (рис. 5.5, а) с последовательным соединением катушки индуктивности с параметрами R_k , L и конденсатора с электрической емкостью C .

Величина тока в этой цепи равна $I = \frac{U}{Z}$,

где $Z = \sqrt{R_k^2 + (X_L - X_C)^2}$ – модуль комплекса входного сопротивления цепи рис. 5.5, а (полное сопротивление цепи); $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ – реактивное сопротивление цепи.

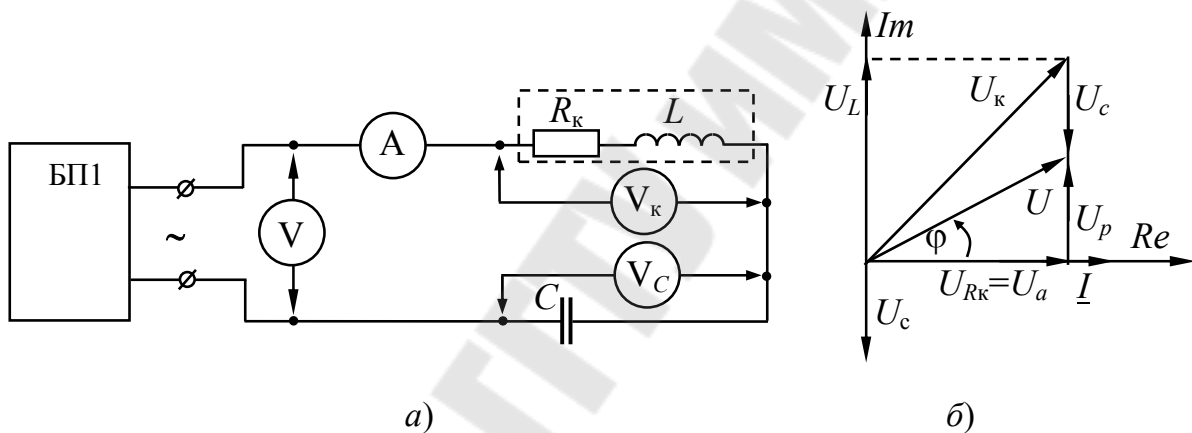


Рис. 5.5. Схема электрической цепи из последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора (а) и векторная диаграмма для случая, когда $X_L > X_C$ (б)

Уравнение для мгновенных значений напряжений, согласно второму закону Кирхгофа, имеет вид:

$$u = u_{R_k} + u_L + u_C. \quad (5.15)$$

Это уравнение, с учетом выражений $u_{R_k} = i R_k$; $u_L = L \frac{di}{dt} = I_m X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$; $u_C = \frac{1}{C} \int i dt = I_m X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$, можно представить в виде

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + I_m X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (5.16)$$

Из этих выражений следует, что угол φ сдвига фаз между напряжением \underline{U} на входе цепи (рис. 5.5, а) и током \underline{I} в цепи может быть положительным, когда $X_L > X_C$, отрицательным, когда $X_L < X_C$, и равным нулю, когда $X_L = X_C$.

Действительно, уравнение (5.15) в символической форме записи имеет вид:

$$\underline{U} = \underline{I} R_k + \underline{I}(j X_L) + \underline{I}(-j X_C), \quad (5.17)$$

или

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R_k + j(X_L - X_C)} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad (5.18)$$

где $\underline{Z} = R_k + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ – комплекс входного сопротивления цепи (рис. 5.5, а).

Поскольку из (5.18) следует, что

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = \frac{U}{I} e^{j\varphi},$$

то очевидно, что $\varphi = \psi_u - \psi_i = \arg \underline{Z} = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R_k}\right)$, и, следовательно, угол φ может быть положительным ($X_L - X_C > 0$), отрицательным ($X_L - X_C < 0$) или равным нулю ($X_L - X_C = 0$).

Векторно-топографическая диаграмма напряжений для случая $X_L - X_C > 0$ приведена на рис. 5.5, б.

Под резонансом напряжений понимают такой режим работы цепи из последовательно соединенных R -, L -, C -элементов, при котором разность фаз φ между напряжением \underline{U} на входе цепи и током \underline{I} в этой цепи равна нулю.

Так как $\varphi = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R_k}\right)$, то $\varphi = 0$ выполняется, если $X_L - X_C = 0$, или если $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, откуда следует, что при заданных L -, C -параметрах резонанс напряжений имеет место на определенной частоте:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (5.19)$$

называемой *резонансной частотой*.

Так как $\omega_0 = 2\pi f_0$, то

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5.20)$$

Величины ω_0 и f_0 называются *угловой* и *циклической резонансной частотой*.

Величины напряжений на реактивных элементах цепи (рис. 5.5, а) при резонансе в q раз больше, чем величина напряжения U , приложенная к входным клеммам цепи (рис. 5.5, а).

Действительно,

$$U_L = I\omega_0 L = \frac{U}{Z}\omega_0 L = U \frac{\omega_0 L}{R_k} = Uq, \quad (5.21)$$

где $q = \frac{U_L(\omega = \omega_0)}{U} = \frac{X_L(\omega = \omega_0)}{R_k} = \frac{\rho}{R_k}$ – добротность цепи или коэффициент резонанса; $\rho = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление цепи.

Аналогично,

$$U_C = I X_C = \frac{U}{Z} X_C = U \frac{X_C}{R_k} = Uq, \quad (5.22)$$

где $q = \frac{U_C(\omega = \omega_0)}{U} = \frac{X_C(\omega = \omega_0)}{R_k} = \frac{\rho}{R_k}$,

$$X_L(\omega = \omega_0) = X_C(\omega = \omega_0) = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5.23)$$

Таким образом, под добротностью q последовательной RLC -цепи (рис. 5.5, а) понимают отношение характеристического сопротивления $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ к активному сопротивлению R (для схемы (рис. 5.5, а) $R = R_k$).

Величина $d = \frac{1}{q} = \frac{R}{\rho}$ называется *затуханием контура*.

Комплексная мощность \underline{S} , развиваемая источником ЭДС, равна:

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{U} \underline{I}^* = P_{\text{ист}} + j Q_{\text{ист}}. \quad (5.24)$$

Активная мощность, потребляемая электрической цепью:

$$P_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i^2. \quad (5.25)$$

Реактивная мощность цепи равна:

$$Q_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^m I_j^2 X_j, \quad (5.26)$$

где слагаемые $I_j^2 X_j > 0$ для индуктивных элементов и < 0 – для емкостных.

Таким образом, баланс активной мощности выражается соотношением

$$P_{\text{ист}} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i^2, \text{ где } n \text{ – число резисторов в цепи, а баланс реактив-$$

ной мощности

$$Q_{\text{ист}} = \sum_{j=1}^m I_j^2 X_j, \text{ где } m \text{ – число реактивных элементов в цепи.}$$

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы изучить величины, применяемые при анализе процессов в линейных цепях синусоидального тока, особенности записи уравнений по закону Ома и законам Кирхгофа для мгновенных величин и в символической форме. Научиться строить векторно-топографические диаграммы напряжений, треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей. Изучить явление резонанса напряжений, методы расчета и измерения параметров последовательного колебательного контура.

2.2. Для схемы (рис. 5.1, а) записать выражения для расчета величин Z , P , $R_{\Sigma} = R + R_k$, R , $\cos \varphi$, Z_k , R_k , X_L , L , $\cos \varphi_k$ по заданным (экспериментальным) данным I , U , U_k , U_R , R_k и f .

2.3. Для схемы (рис. 5.3, а) записать выражения для расчета величин $Z, R, P, \cos \varphi, X_C$ и C , если заданы величины I, U, U_C, U_R, R_k и f .

2.4. Для схемы (рис. 5.5, а) записать выражения для расчета величин $Z, R_k, X, P, \cos \varphi, Z_k, X_k, L, X_C$ и C , если заданы величины I, U, U_C, U_k, R_k и f .

2.5. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 5.1, а), подключив ее входные зажимы к клеммам блока питания БП1, и установите величину напряжения U на входе цепи, заданную преподавателем. Изменением сопротивления R_2 установите величину тока в цепи в пределах 0,05–0,07 А. Измерьте и запишите в табл. 5.1 значения величин I, U, U_R, U_k, R_k . Выключите питание БП1. Схему не разбирать.

Таблица 5.1

Данные измерений					Результаты вычислений											
					для всей цепи				для индуктивной катушки						для резистора	
$U, В$	$U_k, В$	$U_R, В$	$I, А$	$P, Вт$	$Z, Ом$	$R_{\Sigma}, Ом$	$\cos \varphi$	$\varphi, град$	$Z_k, Ом$	$R_k, Ом$	$X_L, Ом$	$L, Гн$	$\cos \varphi_k$	$\varphi_k, град$	$R, Ом$	

3.2. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 5.3, а), заменив в схеме (рис. 5.1, а) индуктивную катушку на конденсатор регулируемой емкости C . Установите напряжение на входе схемы по п. 3.1 и изменением величины C установите ток в цепи, близкий к значению тока в п. 3.1. Измерьте и запишите в табл. 5.2 значения величин U, U_C, U_R, I . Выключите питание БП1. Схему не разбирать.

Таблица 5.2

Данные измерений					Результаты вычислений					
					для всей цепи				для конденсатора	
$U, В$	$U_C, В$	$U_R, В$	$I, А$	$P, Вт$	$Z, Ом$	$R, Ом$	$\cos \varphi$	$\varphi, град$	$X_C, Ом$	$C, мкФ$

3.3. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 5.5, а), заменив в схеме (рис. 5.3, а) R_2 индуктивной катушкой. Установите на входе цепи напряжение 10 В и, изменяя ступенями величину емкости C , установите в цепи режим резонанса напряжений по максимуму тока в цепи. По указанию преподавателя заполните колонку C табл. 5.3 значениями емкостей. Устанавливая далее величины емкостей, измерьте и запишите в табл. 5.3 значения величин U , U_k , U_C , I , R_k (для каждого значения емкости C заполняется строка данных).

Таблица 5.3

Данные измерений						Результаты вычислений								
						для всей цепи			для индуктивной катушки				для конденсатора	
$C_{уст},$ мкФ	$U,$ В	$U_k,$ В	$U_C,$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$Z,$ Ом	$X,$ Ом	$\cos \varphi$	$R_k,$ Ом	$Z_k,$ Ом	$X_k,$ Ом	$L,$ Гн	$X_C,$ Ом	$C_{выч},$ мкФ

4. Контрольные вопросы

1. Перечислите величины, применяемые при описании электрического состояния линейных цепей синусоидального тока. Укажите соотношения между ними.
2. Как рассчитать действующее значение тока в цепи с последовательно соединенными R -, L -, C -элементами?
3. От каких величин зависит значение угла сдвига фаз между напряжением и током?
4. Дайте определение режима резонанса напряжений. Каковы признаки наличия в цепи этого режима?
5. Дайте физическое толкование активной, реактивной и полной мощности.
6. Как рассчитать активную, реактивную и полную мощности источника ЭДС и цепи? Чему равны эти величины при резонансе напряжений?
7. Дайте определение добротности, характеристического сопротивления и резонансной частоты. Как эти величины связаны с R -, L -, C -параметрами?

8. Почему напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе больше, чем напряжение на входе цепи?

9. Дайте определение индуктивности. В каких единицах она измеряется и как реализуется на практике как элемент цепи?

10. Дайте определение емкости. В каких единицах она измеряется и как реализуется на практике как элемент цепи?

11. Запишите выражение для мгновенных и комплексных значений напряжений на R -, L - и C -элементах, если через них протекает синусоидальный ток.

5. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие ответы на них по разделу 4;
- схему (рис. 5.1, *a*), табл. 5.1, выражения для расчета величин Z , P , R_{Σ} , R , $\cos \varphi$, Z_k , R_k , X_L , L , $\cos \varphi_k$ по п. 2.2, результаты вычисления этих величин, помещенные в табл. 5.1, и векторную диаграмму (рис. 5.1, *б*), построенную в масштабе по данным табл. 5.1;
- схему (рис. 5.3, *a*), табл. 5.2, выражения для расчета величин Z , P , R , $\cos \varphi$, X_C и C по п. 2.3, результаты вычислений этих величин, помещенные в табл. 5.2 и векторную диаграмму (рис. 5.3, *б*), построенную в масштабе по данным табл. 5.2;
- схему (рис. 5.5, *a*), табл. 5.3, выражения для расчета величин Z , P , R_k , X , $\cos \varphi$, Z_k , X_k , L , X_C и C и результаты вычислений этих величин (для каждого значения емкости C), помещенные в табл. 5.3 и векторные диаграммы (рис. 5.5, *б*) для C_{\min} , $C_{\text{рез}}$ и C_{\max} , построенные в масштабе по данным табл. 5.3;
- графики зависимости величин I , U_k , U_C , P и $\cos \varphi$ в функции от емкости C по образцу (рис. 5.6);
- параметры f_0 , q , ρ резонансной цепи (рис. 5.5), найденные по экспериментальным данным L , $C_{\text{рез}}$ и R_k ;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

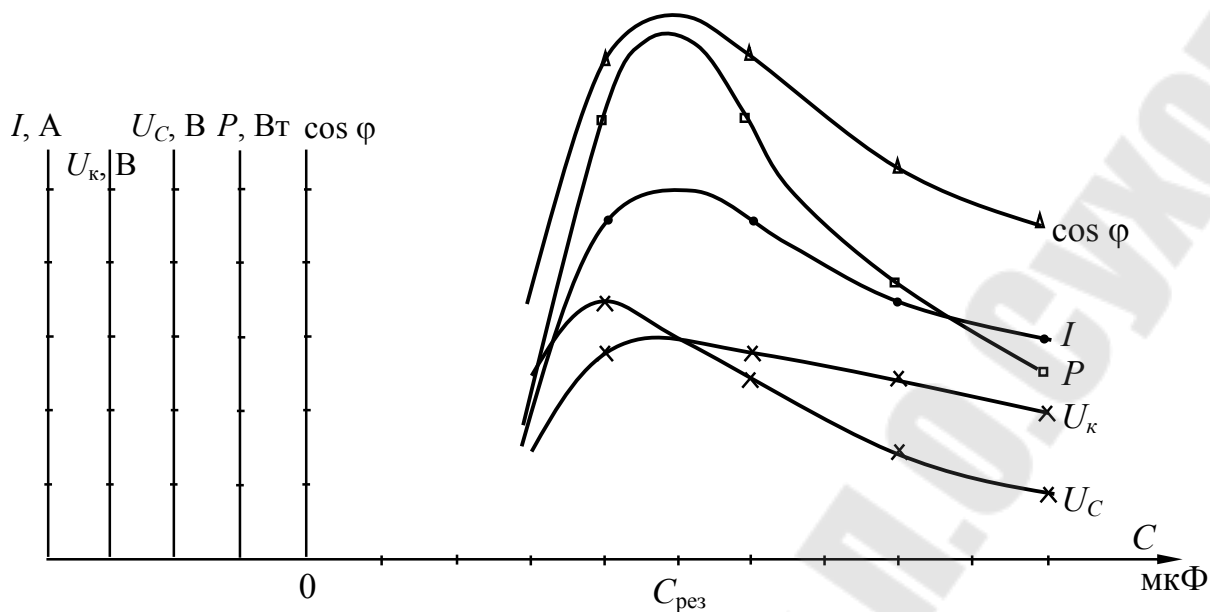


Рис. 5.6. Зависимость величин I , U_K , U_C , P , $\cos \varphi$ от величины емкости C батареи конденсаторов

Лабораторная работа № 6

Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с параллельным соединением элементов

Цели работы:

- исследовать электрическое состояние линейной цепи синусоидального тока с параллельным соединением различных приемников;
- научиться вычислять параметры электрической цепи и строить векторные диаграммы, треугольники токов, проводимостей и мощностей по опытным данным;
- исследовать явление резонанса токов и определить параметры колебательного контура.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. На рис. 6.1, а приведена электрическая цепь, содержащая реальную индуктивную катушку с параметрами R_K и L .

Величина (действующее значение) тока в такой цепи равна:

$$I = U y,$$

где U – действующее значение напряжения на зажимах цепи; y – полная проводимость всей цепи (модуль комплексной входной проводимости цепи $y = |y|$).

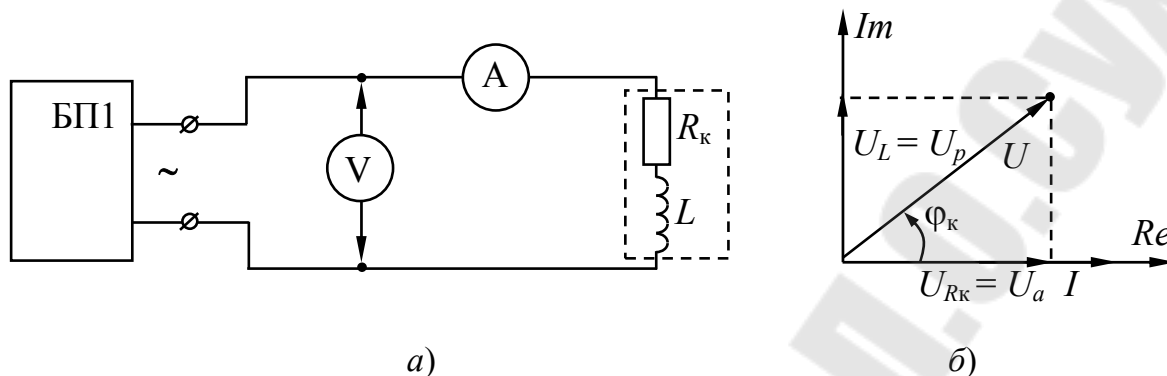


Рис. 6.1. Схема электрической цепи для определения параметров реальной индуктивной катушки (а) и векторная диаграмма (б)

Измерив экспериментально величины U , I и R_k , можно определить y_k , g_k , b_k , $\cos \varphi_k$, P :

$$\left. \begin{aligned} y_k = y = \frac{I}{U}; \quad g_k = R_k y_k^2; \quad b_k = \sqrt{y_k^2 - g_k^2}; \\ \cos \varphi_k = \frac{g_k}{y_k} = \frac{P}{UI}, \quad \text{где} \\ P = \cos \varphi_k = U^2 g_k; \quad g_k = \frac{R_k}{Z_k^2}; \quad b_k = \frac{-X_L}{Z_k^2}; \quad Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Записав закон Ома в символической (комплексной) форме, получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I} = \underline{U} \underline{y}, \quad \text{где} \\ \underline{y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R_k + jX_L} = \frac{R_k - jX_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{R_k}{Z_k^2} - j \frac{X_L}{Z_k^2} = g_k + jb_k. \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Из (6.2) следуют соотношения (6.1), причем проводимость $b_k < 0$.

Векторная диаграмма напряжений и токов для схемы (рис. 6.1, а) приведена на рис. 6.1, б. Она строится методом «засечек».

1.2. На рис. 6.2, а приведена электрическая цепь, составленная параллельным соединением реальной индуктивной катушки с параметрами R_k , L и резистора с регулируемым электрическим сопротивлением R .

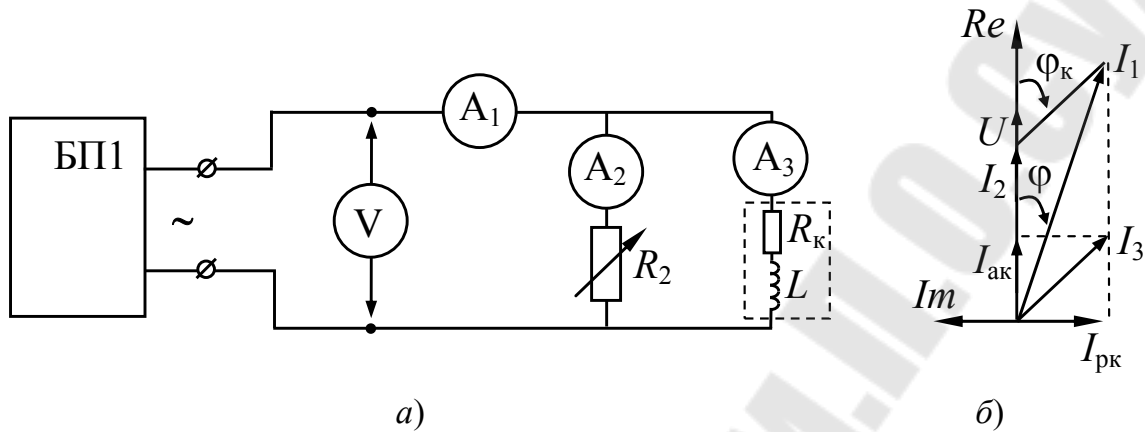


Рис. 6.2. Схема электрической цепи с параллельно соединенными реостатом и индуктивной катушкой (а) и векторная диаграмма (б)

Величина тока I_1 в неразветвленной части цепи равна:

$$I_1 = U y,$$

где U – действующее напряжение на входных зажимах цепи; y – полная входная проводимость цепи.

Токи в ветвях равны:

$$I_2 = U y_2 \text{ и } I_3 = U y_3, \text{ где } y_2 \text{ и } y_3 \text{ – полные проводимости ветвей.}$$

Измерив с помощью приборов величины U , I_1 , R_k , I_2 , I_3 , можно определить параметры всей цепи и катушки:

$$y = \frac{I_1}{U}; \quad y_k = \frac{I_3}{U}; \quad g_R = \frac{I_2}{U}; \quad g_k = R_k y_k^2; \quad g = g_R + g_k;$$

$$b = \sqrt{y^2 - g^2}; \quad \cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad b = b_k = \sqrt{y_k^2 - g_k^2}; \quad (6.3)$$

$$P = U I_1 \cos \varphi = U^2 g.$$

Записав уравнение по первому закону Кирхгофа в символической (комплексной) форме, получим:

$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3$, где $\underline{I}_1 = \underline{U} y$, $\underline{I}_2 = \underline{U} y_2$; $\underline{I}_3 = \underline{U} y_3$ и, следовательно, входная комплексная проводимость цепи y равна сумме комплексных проводимостей всех параллельно включенных ветвей:

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{y} &= \underline{y}_2 + \underline{y}_3, \text{ где} \\
 \underline{y} &= g + jb; \\
 \underline{y}_2 &= \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R} = g_2 + jb_2, \left(g_2 = \frac{1}{R}; b_2 = 0 \right); \\
 \underline{y}_3 &= \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{R_k + jX_L} = \frac{R_k}{Z_k^2} - j \frac{X_L}{Z_k^2} = g_k + jb_k, \left(g_k = \frac{R_k}{Z_k^2}; b_k = -\frac{X_L}{Z_k^2} \right).
 \end{aligned} \right\} (6.4)$$

Из соотношений (6.4), с учетом закона Ома для действующих U и I и треугольника проводимостей, следуют соотношения (6.3).

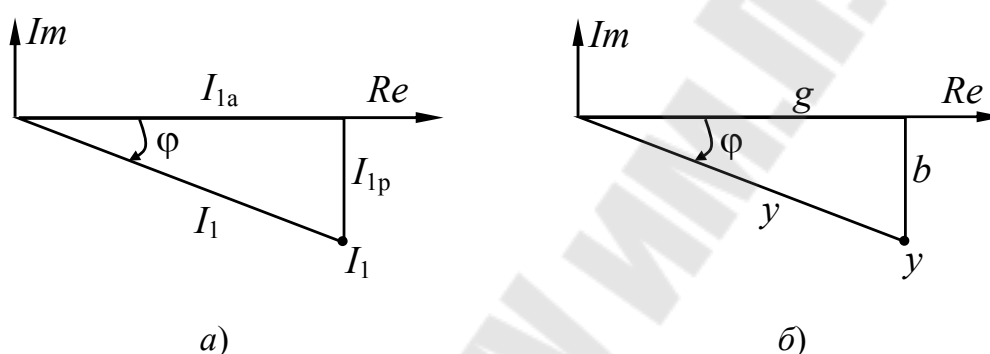


Рис. 6.3. Треугольник токов (а) и проводимостей (б) для схемы, представленной на рис. 6.2, а

На рис. 6.2, б приведена векторная диаграмма напряжений и токов, а на рис. 6.3, а, б – треугольники токов и проводимостей.

На рис. 6.4, а приведена электрическая цепь, составленная параллельным соединением резистора R и конденсатора C .

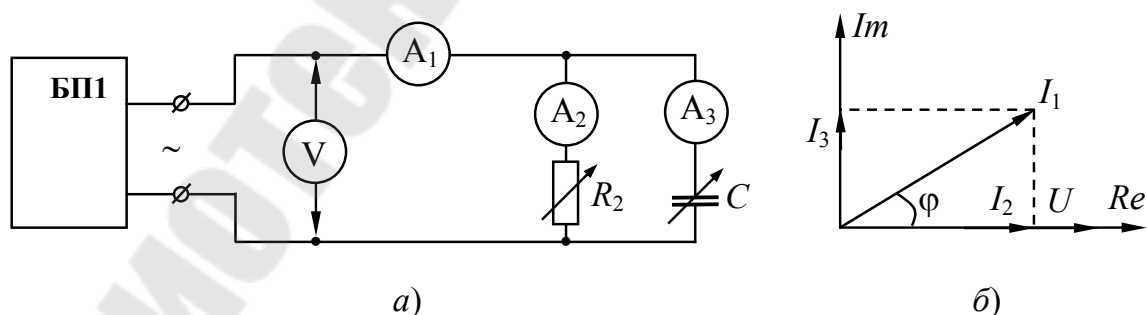


Рис. 6.4. Схема электрической цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора (а) и векторная диаграмма (б)

Параметры этой цепи можно определить по показаниям приборов аналогично предыдущим случаям.

На рис. 6.4, б приведена векторная диаграмма для этой цепи, а на рис. 6.5, а, б – треугольник токов и проводимостей.

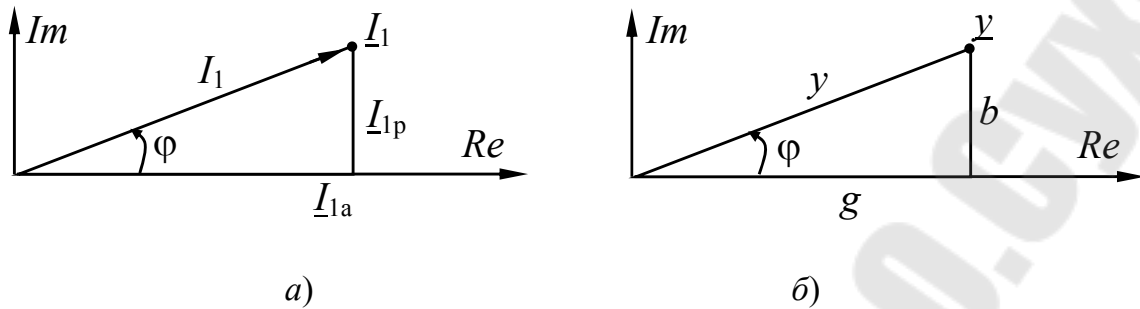


Рис. 6.5. Треугольник токов (а) и проводимостей (б) для схемы, представленной на рис. 6.4, а

На рис. 6.6 приведена схема электрической цепи из параллельно включенных индуктивной катушки и конденсатора.

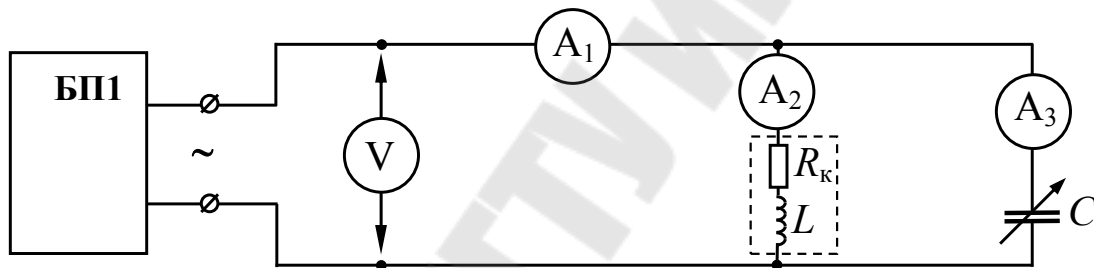


Рис. 6.6. Схема электрической цепи с параллельным соединением индуктивной катушки и конденсатора

Как и для схемы, приведенной на рис. 6.2, первый закон Кирхгофа в символической форме имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 + \underline{I}_3, \text{ или} \\ \underline{U} \underline{y} &= \underline{U} (\underline{y}_2 + \underline{y}_3); \quad \underline{y} = \underline{y}_2 + \underline{y}_3. \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

Следовательно, комплекс \underline{y} входной проводимости цепи равен сумме комплексных проводимостей параллельных ветвей.

При этом по закону Ома в символической форме:

$$\underline{y} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}}; \quad \underline{y}_2 = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}}; \quad \underline{y}_3 = \frac{\underline{I}_3}{\underline{U}}. \quad (6.6)$$

При построении векторных диаграмм (рис. 6.7) начальную фазу комплекса напряжения \underline{U} на входе цепи принимаем равной нулю ($\psi_U = 0$). На рис. 6.7, а построена диаграмма для случая, когда разность фаз φ между напряжением \underline{U} на входе и током \underline{I}_1 в неразветвленной части цепи больше нуля ($\varphi > 0$). Этот случай имеет место, когда $b_L > b_C$.

Так как сопротивление второй ветви активно-индуктивное, то ток \underline{I}_2 отстает по фазе от \underline{U} на угол $\varphi_2 = \arctg\left(\frac{X_L}{R_k}\right)$. Ток третьей ветви \underline{I}_3 опережает по фазе напряжение \underline{U} на угол $\varphi_3 = 90^\circ$. При этом вектор тока \underline{I}_1 равен векторной сумме векторов \underline{I}_2 и \underline{I}_3 , согласно первому закону Кирхгофа.

$$\varphi > 0, b_L > b_C, I_{2p} > I_{3p}$$

$$\varphi < 0, b_L < b_C, I_{2p} < I_{3p} \quad \varphi = 0, b_L = b_C, I_{2p} = I_{3p}$$

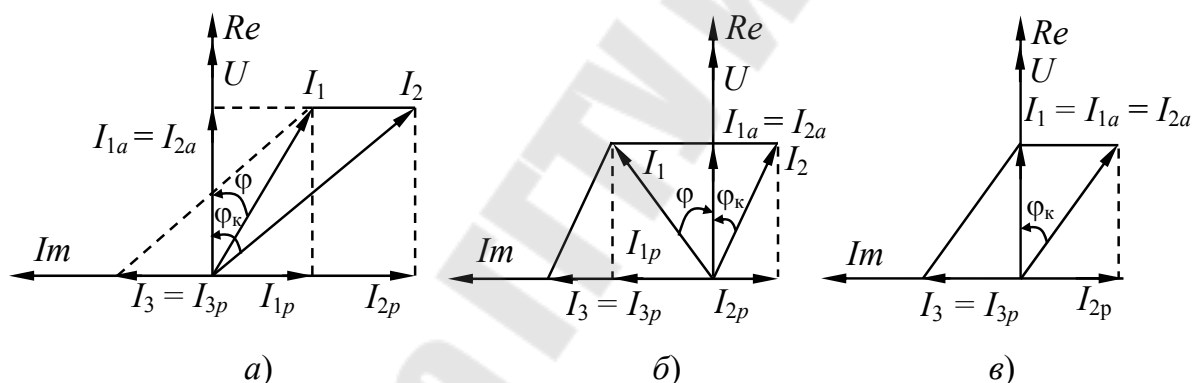


Рис. 6.7. Векторные диаграммы для схемы, представленной на рис. 6.6 для случаев:
 а - $b_L > b_C$; б - $b_L < b_C$; в - $b_L = b_C$

Режим, при котором в цепи, содержащей параллельные ветви с индуктивным и емкостным элементами, ток \underline{I}_1 в неразветвленном участке цепи совпадает по фазе с напряжением \underline{U} на входных зажимах этой цепи называют *резонансом токов*.

Как следует из рис. 6.7, в, резонансу токов отвечает равенство модулей реактивных составляющих токов ветвей:

$$I_{2p} = I_{3p}. \quad (6.7)$$

Так как $I_{2p} = U b_2$ и $I_{3p} = U b_3$, то условие резонанса можно записать в виде

$$b_2 = b_3, \quad (6.8)$$

или

$$\frac{\omega L}{R_k^2 + \omega^2 L^2} = \omega C. \quad (6.9)$$

При заданных параметрах R_k , L и C , условие резонанса может быть достигнуто на определенной частоте $\omega = \omega_0$, называемой *резонансной*:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - R_k^2 \frac{C}{L}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_k}{\rho}\right)^2}, \quad (6.10)$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление контура.

Из (6.10) следует, что резонанс возможен в цепи (рис. 6.6), если сопротивление $R_k < \rho$.

При резонансе токов полная проводимость цепи (рис. 6.6) минимальная ($y = g$), т. е. входное сопротивление достигает максимума, вследствие чего ток $I_1 = U g$ будет минимальный, что является одним из признаков настройки цепи в резонанс.

Отношение реактивных составляющих токов в ветвях к току I_1 при резонансе токов называется добротностью q параллельной RLC -цепи:

$$q = \frac{I_{2p}}{I_1} = \frac{I_{3p}}{I_1} = \frac{U b_2}{U g} = \frac{U b_3}{U g} = \frac{\omega_0 C}{g}. \quad (6.11)$$

Так как при резонансе токов $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$), то активная мощность равна полной мощности цепи, т. е.

$$P = U I_1 \cos \varphi = U I_1 = S. \quad (6.12)$$

Реактивная мощность Q при резонансе токов равна нулю:

$$Q = Q_L - Q_C = U I_1 \sin \varphi = 0. \quad (6.13)$$

Если в схеме (рис. 6.6) изменять величину емкости C , то величины I_1 , I_2 , I_3 , P и $\cos \varphi$ будут изменяться по рис. 6.8.

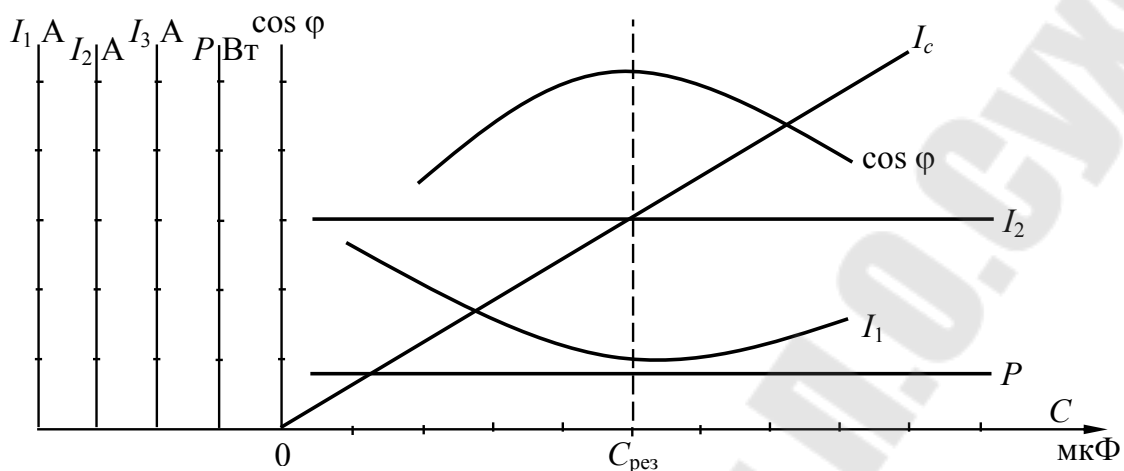


Рис. 6.8. Зависимость величин I_1 , I_2 , I_3 , P , $\cos \varphi$ от величины емкости батареи конденсаторов

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы изучить особенности анализа электрических процессов в линейных цепях однофазного синусоидального тока при параллельном соединении различных приемников. Научиться строить векторно-лучевые диаграммы токов, треугольники токов, проводимостей и мощностей. Изучить явление резонанса токов.

2.2. Для схем (рис. 6.1, а, 6.2, а, 6.4, а, 6.6) записать выражения для расчета величин, приведенных в табл. 6.1–6.4 (результаты вычислений) по показаниям приборов (данные измерений).

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 6.1, а). Установите на входе цепи заданное преподавателем напряжение U . Показания приборов запишите в табл. 6.1. Значение R_k паспортное.

Таблица 6.1

Данные измерений			Результаты вычислений					
U , В	I , А	R_k , Ом	Y_k , Ом ⁻¹	g_k , Ом ⁻¹	b_k , Ом ⁻¹	$\cos \varphi_k$	φ_k , град	P_k , Вт

3.2. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 6.2, а). Регулируя величину сопротивления R_2 и величину напряжения U на входе цепи, установите ток $I_2 \approx I_3$. Показания приборов запишите в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Данные измерений					Результаты вычислений						
U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	$R_{кв}$, Ом	g_R , Ом ⁻¹	y , Ом ⁻¹	g , Ом ⁻¹	b , Ом ⁻¹	$\cos \varphi$	φ , град	$g_{кв}$, Ом ⁻¹

3.3. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 6.4, а) и, изменяя величину емкости C и напряжения U на входе, установите ток $I_2 \approx I_3$. Показания приборов запишите в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Данные измерений				Результаты вычислений						
U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	y , Ом ⁻¹	g , Ом ⁻¹	b , Ом ⁻¹	$\cos \varphi$	φ , град	b_C , Ом ⁻¹	

3.4. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 6.6). Установите заданное преподавателем напряжение на входе цепи ($U = U_{\max}$) и, изменяя ступенями величину емкости, установите в цепи режим резонанса токов (по минимальному показанию амперметра). Запишите резонансное значение емкости $C_{рез}$ в третью строку колонки C табл. 6.4. С помощью преподавателя выберите два значения емкости меньших $C_{рез}$ и два значения емкости больших $C_{рез}$, заполнив колонку C табл. 6.4. Устанавливая поочередно значения емкости батареи конденсаторов от C_{\min} до C_{\max} , запишите в табл. 6.4 показания приборов.

Таблица 6.4

Данные измерений							Результаты вычислений						
							для всей цепи				для катушки		для конденсатора
C , мкФ	U , В	P , Вт	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	φ , град	y , Ом ⁻¹	g , Ом ⁻¹	b , Ом ⁻¹	$\cos \varphi$	$\varphi_{кв}$, град	$b_{кв}$, Ом ⁻¹	b_C , Ом ⁻¹

4. Контрольные вопросы

1. Чему равна эквивалентная реактивная проводимость параллельных ветвей, от каких параметров она зависит?
2. Как рассчитать действующее значение тока сети при параллельном соединении приемников?
3. Чему равен коэффициент мощности электрической цепи параллельно соединенных ветвей?
4. Могут ли токи в параллельных ветвях электрической цепи превышать ток сети?
5. Каковы условия возникновения резонанса токов? Каким способом он может быть получен?
6. Какие признаки характерны для цепи в режиме резонанса токов?
7. Как рассчитать резонансную частоту при параллельном соединении индуктивной катушки (R_k, L_k) и конденсатора (C)?
8. Каково соотношение токов I_2 и I_3 в схеме (рис. 6.6) при резонансе токов?
9. Какое практическое значение имеет явление резонанса токов, где оно применяется?
10. Чему равна мощность электрической цепи при резонансе токов?

5. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие ответы на них по разделу 4;
- схему (рис. 6.1, а), выражения для расчета величин $y_k, g_k, b_k, \cos \varphi_k, \varphi_k$ по измеренным значениям U, I, R_k , результаты вычисления этих величин (табл. 6.1) и векторную диаграмму (рис. 6.1, б), построенную в масштабе по данным табл. 6.1;
- схему (рис. 6.2, а), выражения для расчета величин $y, g, b, \cos \varphi, \varphi, g_k$ по измеренным значениям U, I_1, I_2, I_3, R_k , результаты вычисления этих величин (табл. 6.2) и векторную диаграмму (рис. 6.2, б) построенную в масштабе по данным табл. 6.2;
- схему (рис. 6.4, а), выражения для расчета величин $y, g, b, \cos \varphi, b_C$ по измеренным значениям U, I_1, I_2, I_3, R_k , результаты вычисления этих величин (табл. 6.3) и векторную диаграмму (рис. 6.4, б), построенную в масштабе по данным табл. 6.3;

– схему (рис. 6.6), выражения для расчета величин u , g , b , $\cos \varphi$, b_k , φ_k , b_C по измеренным значениям U , R_k , I_1 , I_2 , I_3 , результаты вычисления этих величин (табл. 6.4) и три векторные диаграммы по образцу рис. 6.7, построенные в масштабе по данным табл. 6.4 и для C_{\min} , $C_{\text{рез}}$ и C_{\max} ;

– выражения для расчета величин I_1 , I_2 , I_3 , R_k , $\cos \varphi$, как функции C для схемы (рис. 6.6) и графики зависимости этих величин от емкости C конденсатора по образцу (рис. 6.8), построенные в масштабах по данным табл. 6.4;

– выражение для расчета параметров ρ , f_0 и q для резонансной цепи рис. 6.6 и результаты расчета этих величин по данным табл. 6.4;

– анализ результатов и выводы;

– протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 7

Исследование электрического состояния трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников треугольником

Цели работы:

– исследовать трехфазную цепь при симметричной и несимметричной нагрузке фаз;

– установить экспериментально соотношение между линейными и фазовыми токами и построить по результатам измерений векторные диаграммы напряжений и токов;

– определить активную мощность, потребляемую трехфазной цепью.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Основные понятия и величины

Под трехфазной симметричной системой ЭДС (токов, напряжений) понимается совокупность трех ЭДС (токов, напряжений) одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120° . Графики мгновенных значений ЭДС и векторная диаграмма представлены на рис. 7.1, а, б.

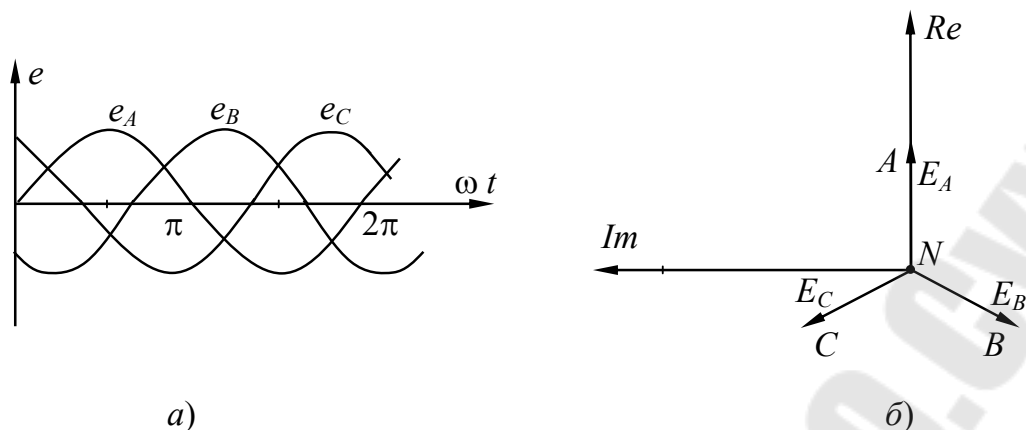


Рис. 7.1. Графики мгновенных значений ЭДС (а) и векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС (б)

Совокупность трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки и трехфазной линии передачи называется *трехфазной электрической цепью*.

На рис. 7.2 изображена трехфазная электрическая цепь при соединении генератора звездой «Y», а нагрузки – треугольником «Δ». Такая схема соединения называется *трехпроводной*.

Каждую из обмоток статора трехфазного генератора называют *фазой*, имеющей начало (точки A, B, C) и концы (точки X, Y, Z). Аналогичные точки (a, b, c) и (x, y, z) имеются и у трехфазного приемника.

При соединении трех однофазных приемников (Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca}) треугольником (рис. 7.2) конец x первого приемника соединяют с началом b второго, конец y второго – с началом с третьего, конец z третьего – с началом a первого приемника, а к узлам полученного треугольника подводят линейными проводами энергию от трехфазного генератора.

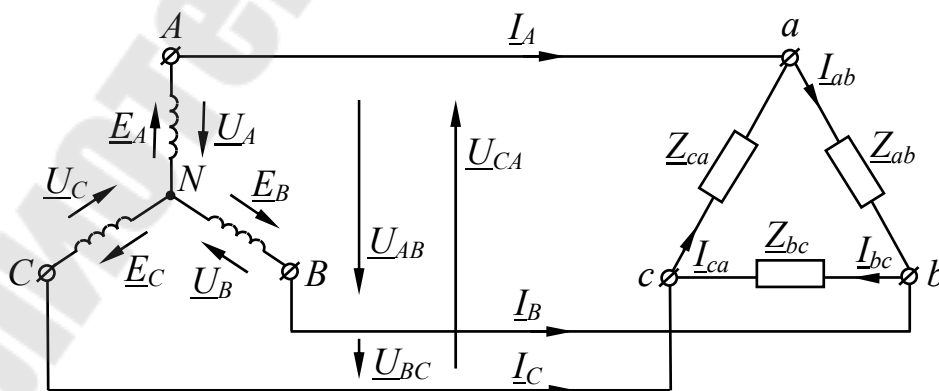


Рис. 7.2. Схема трехфазной цепи при соединении «звезда – треугольник» – «Y-Δ»

Если комплексные сопротивления фаз трехфазного приемника равны между собой ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = Z e^{j\varphi}$), то такой приемник называется *симметричным*; если это условие не выполняется, то – *несимметричным*. При этом если $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$, то трехфазный приемник называется *равномерным*, а если $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$ – то *однородным*.

Режим работы цепи (рис. 7.2) характеризуется линейными и фазовыми напряжениями и токами. При этом линейные напряжения на стороне генератора \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} являются одновременно фазовыми напряжениями на нагрузке, т. е.

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}. \quad (7.1)$$

Эти соотношения верны при условии пренебрежимо малых сопротивлений линейных проводов (Aa , Bb , Cc).

На стороне генератора линейные и фазовые напряжения связаны соотношениями:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (7.2)$$

При этом в симметричной системе ЭДС модули фазовых и линейных напряжений и токов связаны соотношением:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}; \quad U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (7.3)$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}, \quad (7.4)$$

вытекающими из уравнений по первому закону Кирхгофа, записанных для узлов a , b , c .

На нагрузке, фазы которой образуют треугольник, линейные и фазовые напряжения совпадают ($U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$), а линейные и фазовые токи связаны соотношениями (7.4).

Для симметричного приемника модули действующих значений комплексных линейных и фазовых токов связаны соотношением:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}; \quad I_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (7.5)$$

В трехфазной цепи возможны случаи обрыва фаз приемника и обрыва линейного провода. При обрыве одной из фаз режим работы двух других фаз не нарушается, т. к. на них по-прежнему действуют соответствующие линейные напряжения. При обрыве одного из линейных проводов режим работы одной фазы не изменится, а две дру-

гие окажутся включенными последовательно на линейное напряжение. Линейные токи на любом из указанных обрывов изменяют свое первоначальное значение.

1.2. Расчет трехфазной цепи при соединении «звезда – треугольник»

Задача расчета чаще всего заключается в определении фазовых и линейных токов по заданной трехфазной системе ЭДС генератора.

При этом фазовые токи находятся применением закона Ома в комплексной (символической) форме:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}, \quad (7.6)$$

где комплексы действующих значений напряжений на зажимах приемника \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} и \underline{U}_{ca} находятся по соотношениям (7.1).

В свою очередь, можно показать, что

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{j30^{\circ}}, \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{-j90^{\circ}}, \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{j150^{\circ}}. \quad (7.7)$$

После определения фазовых токов находятся комплексы действующих значений линейных токов по соотношениям (7.4)

1.3. Векторные диаграммы

На рис. 7.3 приведены примеры построения векторно-топографических диаграмм напряжений, совмещенных с диаграммой токов для трех режимов. Диаграмма (рис. 7.3, а) отвечает случаю, когда приемник симметричный.

Диаграмма (рис. 7.3, б) – для приемника с конденсатором в фазе ab и резисторами с одинаковыми электрическими сопротивлениями R в фазах bc и ca .

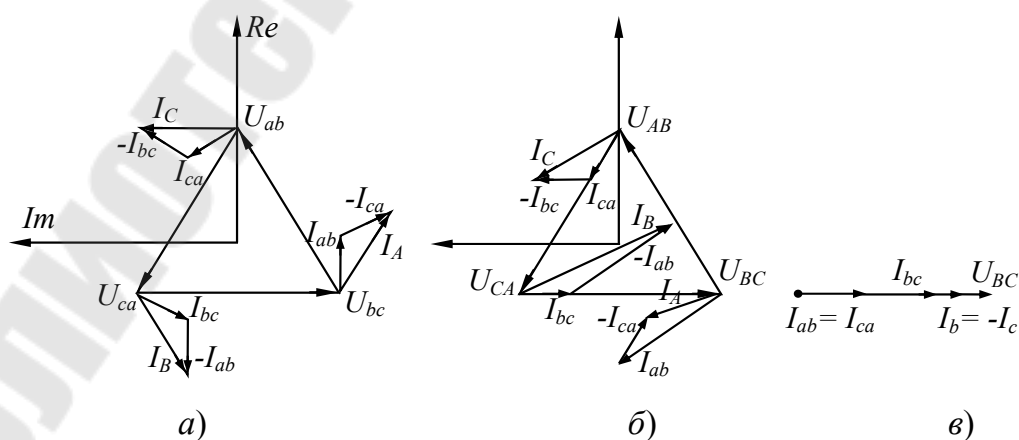


Рис. 7.3. Векторные диаграммы для схемы, представленной на рис. 7.2

Диаграмма (рис. 7.3, в) иллюстрирует режим в схеме (рис. 7.2), при обрыве линейного провода Aa и симметричном активном приемнике $\underline{Z}_{ab} = R$, $\underline{Z}_{bc} = R$, $\underline{Z}_{ca} = R$.

1.4. Мощность, потребляемая трехфазной цепью при соединении «звезда – треугольник». Измерение активной мощности.

При несимметричном приемнике активная мощность P , потребляемая этим приемником, равна сумме активных мощностей, потребляемых в каждой фазе, т. е.

$$P_{\text{пр}} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca}, \quad (7.8)$$

где U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} – действующие значения фазовых напряжений и токов; φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} – разности фаз между фазовым напряжением и фазовым током для каждой из фаз приемника.

Аналогично, активная мощность, развиваемая трехфазным генератором:

$$\begin{aligned} P_{\text{ист}} &= U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = \\ &= P_A + P_B + P_C. \end{aligned} \quad (7.9)$$

Аналогично рассчитываются реактивные мощности генератора и приемника для несимметричного приемника:

$$Q_{\text{ист}} = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C = Q_A + Q_B + Q_C; \quad (7.10)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{пр}} &= U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca} = \\ &= Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Мощность трехфазной цепи может быть определена в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_{\text{ист}} &= P_{\text{ист}} + j Q_{\text{ист}} = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^*, \\ \underline{S}_{\text{пр}} &= P_{\text{пр}} + j Q_{\text{пр}} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^*. \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

При симметричном приемнике:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{пр}} &= 3 P_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}, \\ Q_{\text{пр}} &= 3 Q_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi}, \\ S_{\text{пр}} &= \sqrt{P_{\text{пр}}^2 + Q_{\text{пр}}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7.13)$$

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы усвоить основные понятия, определения и величины, характеризующие процессы в трехфазной электрической цепи при соединении «звезда – треугольник». Изучить методику расчета токов, построение векторных диаграмм, расчета и измерения активной мощности.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. Соберите электрическую цепь согласно схеме (рис. 7.4). В фазах трехфазного приемника включите последовательно с резисторами ключи SA7, SA8, SA9. В линейных проводах вместо амперметров используйте ключи SA1, SA2, SA3.

3.2. Установите ключи SA1, SA2, SA3 в линейных проводах в замкнутое положение и, включив питание блока трехфазного напряжения (БП4), выровняйте резистором R_2 токи в фазах. Измерьте и запишите в табл. 7.1 значения фазовых и линейных токов. Токи измерьте амперметром, включая его поочередно вместо перемычек, устанавливая ключи в положение «разомкнуто»). После измерения каждого линейного тока ключ установите в исходное положение «замкнуто».

3.3. Отсоедините один из проводов от резистора R_3 фазы bc , и в режиме холостого хода этой фазы измерить и запишите в табл. 7.1 токи. Восстановите схему.

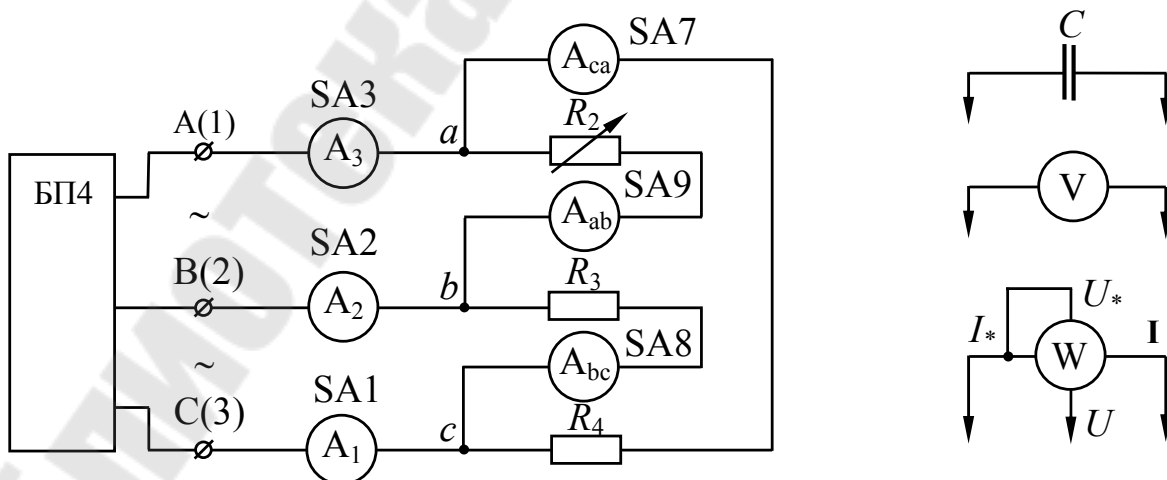


Рис. 7.4. Схема электрической цепи для экспериментальных исследований

3.4. Разомкните линейный провод Aa , измерьте и запишите в табл. 7.1 токи в режиме обрыва линейного провода. Восстановите схему.

3.5. Установите R_2 в положение, отвечающее максимуму электрического сопротивления (минимуму тока I_{ab}), измерьте и запишите в табл. 7.1 значения фазных и линейных токов.

3.6. Включив в фазу ab вместо R_2 конденсатор емкостью 20 мкФ, включите питание блока БП4 и повторите измерения фазовых и линейных токов. Результаты измерений занесите в табл. 7.1. Выключите питание. Вернитесь к предыдущей схеме.

3.7. Измерьте с помощью вольтметра значения линейных напряжений на клеммах трехфазного блока питания БП4.

Таблица 7.1

Нагрузка	Измерено						Вычислено			Линейные напряжения
	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	$\frac{I_A}{I_{ab}}$	$\frac{I_B}{I_{bc}}$	$\frac{I_C}{I_{ca}}$	
	А	А	А	А	А	А				В
Симметричная										$U_{ab} =$
Холостой ход фазы bc										$U_{bc} =$
Обрыв линейного провода Aa										$U_{ca} =$
Несимметричная										
В фазу ab включен конденсатор										

Таблица 7.2

Нагрузка	Расчет мощности P , Вт	Измерено		
		P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_3 , Вт
Симметричная				
Несимметричная				
Холостой ход фазы bc				

4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение симметричной трехфазной системы ЭДС (токов, напряжений).
2. Из каких элементов состоит трехфазная цепь?
3. Почему обмотки статора трехфазного генератора соединяют звездой?

4. Укажите соотношения между линейными и фазовыми токами при соединении фаз приемника треугольником.

5. Какие напряжения действуют между точками ab , bc и ca трехфазного приемника, соединенного треугольником?

6. Как изменится режим в трехфазной цепи «звезда – треугольник» при обрыве одной из фаз приемника?

7. Как три однофазных приемника соединить треугольником?

8. Будут ли верными результаты измерения мощности трехфазной цепи методом двух ваттметров при обрыве одной из фаз приемника, при обрыве одного из линейных проводов?

9. Перечислите этапы расчета токов в трехфазной цепи «звезда – треугольник» по заданной трехфазной симметричной системе ЭДС генератора и комплексных сопротивлений фаз приемника.

10. Как и для чего строится топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов?

5. Требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие письменные ответы на них по разделу 4;
- схему (рис. 7.5) и результаты измерения токов и мощностей для различных нагрузок, в виде заполненных табл. 7.1 и 7.2 (колонки «измерено»);
- результаты расчета отношения токов и мощностей для различных нагрузок (колонки «вычислено», «расчет мощности»);
- векторно-топографические диаграммы напряжений и токов для всех режимов, построенные в масштабе по данным табл. 7.1 (по образцу (рис. 7.3));
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Лабораторная работа № 8

Исследование электрического состояния трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников звездой

Цели работы:

- научиться определять нейтральный и линейные провода трехфазной четырехпроводной сети;
- исследовать влияние изменения параметров одного из трех однофазных приемников, а также влияние обрыва нейтрального и линейного проводов на работу трехфазной цепи (на соотношение линейных и фазовых напряжений, на ток в нейтральном проводе);
- научиться строить по опытным данным векторно-топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Основные понятия и величины

На рис. 8.1 приведена схема трехфазной цепи при соединении обмоток генератора и фаз приемника звездой. При этом потенциал точки N соединения концов X , Y и Z обмоток фаз генератора принимается равным нулю. Концы x , y , z фаз приемника также соединены в одну точку n . Точки N и n называют *нейтральными*, а провод, их соединяющий, – *нейтральным*. Провода Aa , Bb и Cc , соединяющие начала фаз генератора (трансформатора) и приемника, называют *линейными*.

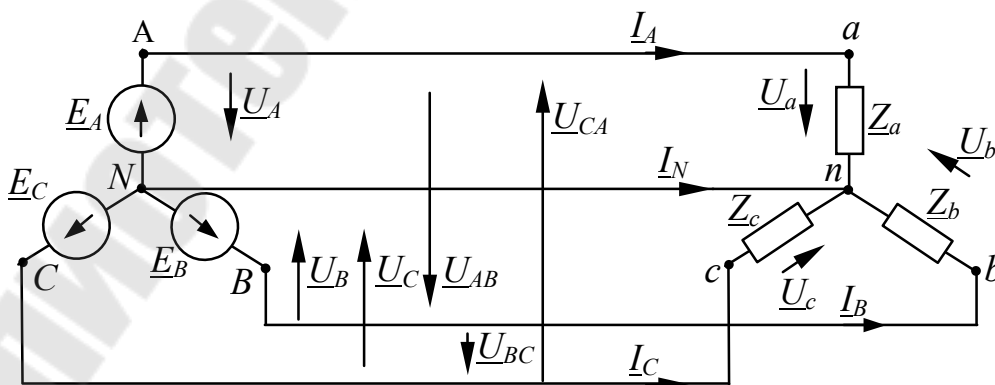


Рис. 8.1. Схема трехфазной четырехпроводной цепи

Положительное направление токов в фазах генератора совпадает с положительным направлением ЭДС, а положительные направления напряжений на фазах приемников совпадают с направлениями токов в фазах приемников. Положительные направления напряжений на фазах генератора противоположны направлениям соответствующих ЭДС (рис. 8.1). Так как обмотка генератора, линейный провод и приемник, принадлежащий одной фазе, соединены последовательно, то, при соединении звездой, линейный ток $\underline{I}_л$ равен фазному току $\underline{I}_ф$:

$$\underline{I}_л = \underline{I}_ф. \quad (8.1)$$

Соотношения между линейными и фазными напряжениями можно получить из уравнений, записываемых по второму закону Кирхгофа для контуров $ANBA$, $BNCB$ и $CNAC$:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A - \underline{U}_B &= \underline{U}_{AB} \\ \underline{U}_B - \underline{U}_C &= \underline{U}_{BC} \\ \underline{U}_C - \underline{U}_A &= \underline{U}_{CA} \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

При этом для симметричного трехфазного генератора соотношение между действующими значениями фазных и линейных напряжений имеет вид:

$$U_л = \sqrt{3} U_ф, \quad U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}. \quad (8.3)$$

1.2. Расчет трехфазной цепи при соединении «звезда – звезда»

Если пренебречь сопротивлениями проводов, то фазные напряжения приемника в четырехпроводной цепи (рис. 8.1) равны фазным напряжениям источника (генератора или трансформатора):

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C. \quad (8.4)$$

При этой схеме соединения источника и приемника, токи в фазах определяются по закону Ома:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}, \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}, \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}, \quad (8.5)$$

где $\underline{I}_a = \frac{U_a}{Z_a}$, $\varphi_a = \arctg\left(\frac{X_a}{R_a}\right)$, $\underline{I}_a = \underline{I}_л$.

Ток в нейтральном проводе \underline{I}_N определяется через токи в фазах по первому закону Кирхгофа для точки n :

$$\underline{I}_N = -(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c). \quad (8.6)$$

Фазные токи при симметричной нагрузке образуют симметричную систему токов, вследствие чего ток \underline{I}_N в нейтральном проводе равен нулю. При соединении источника и приемника по схеме «звезда – звезда» без нейтрального провода (рис. 8.2) расчет цепи ничем не отличается от предыдущего случая, если приемник симметричный.

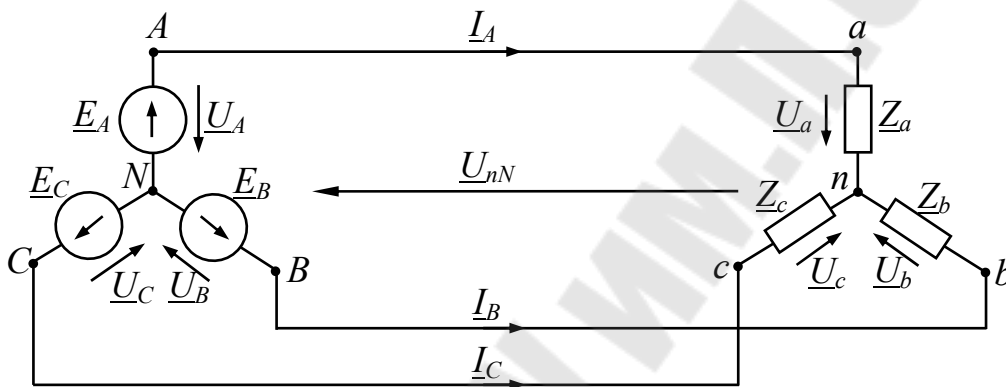


Рис. 8.2. Схема трехфазной трехпроводной цепи при соединении фаз источника и приемника звездой

В случае несимметричной нагрузки ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) симметрия фазных токов нарушается, что приводит к нарушению симметрии фазных напряжений на стороне приемника. Между нейтральными точками n приемника и N источника возникает напряжение \underline{U}_{nN} , называемое *напряжением между нейтралями*, или *напряжением смещения нейтрали*.

Из схемы (рис. 8.2) следует, что \underline{U}_{nN} можно определить по методу двух узлов:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{y}_a + \underline{E}_B \underline{y}_b + \underline{E}_C \underline{y}_c}{\underline{y}_a + \underline{y}_b + \underline{y}_c}, \quad (8.7)$$

$$\text{где } \underline{y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}; \quad \underline{y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}; \quad \underline{y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}; \quad (8.8)$$

– комплексные проводимости фаз приемника.

Записывая уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров $NAanN$, $NBbnN$, $NCcnN$, можно определить комплексные фазовые напряжения на стороне приемника:

$$\underline{U}_a + \underline{U}_{nN} = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_b + \underline{U}_{nN} = \underline{U}_B; \quad \underline{U}_c + \underline{U}_{nN} = \underline{U}_C,$$

или

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}. \quad (8.9)$$

Токи в фазах далее определяются по соотношениям (8.5).

При обрыве нейтрального провода схема, представленная на рис. 8.1, совпадает со схемой, приведенной на рис. 8.2, и при несимметричной нагрузке расчет ведется по соотношениям (8.7)–(8.9) и (8.5).

Таким образом, в схеме (рис. 8.1) нейтральный провод выравнивает фазные напряжения приемника и, следовательно, \underline{U}_{nN} в этом случае равно нулю, даже для несимметричного приемника.

При обрыве линейного провода приемники одной фазы остаются без энергии, а приемники двух других фаз получают питание от неповрежденных проводов трехфазной системы. При этом если имеется нейтральный провод, то обрыв линейного провода для двух других фаз не ощущается, а при отсутствии нейтрального провода две фазы оказываются включенными последовательно на линейное напряжение. При этом фазные напряжения на этих фазах пропорциональны величинам их полных сопротивлений.

1.3. Векторные диаграммы

На рис. 8.3 приведены примеры построения векторно-топографических диаграмм напряжений и токов для трех режимов. Диаграмма (рис. 8.3, а) отвечает случаю симметричного приемника.

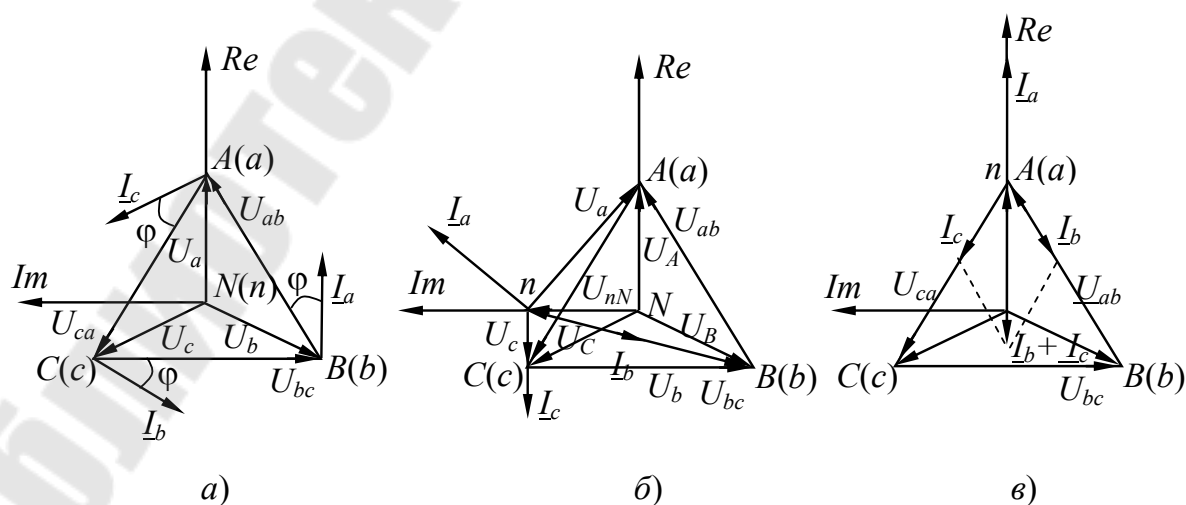


Рис. 8.3. Векторные диаграммы для схемы «звезда – звезда»

Диаграмма (рис. 8.3, б) – для трехпроводной цепи с конденсатором в фазе *a*. Диаграмма (рис. 8.3, в) – для режима короткого замыкания фазы *a*. (При этом в фазах *b* и *c* включены резисторы с одинаковыми сопротивлениями.)

2. Задание для самостоятельной подготовки

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной лабораторной работы усвоить основные понятия, определения и величины, характеризующие процессы в трехфазных цепях при соединении источника и приемника по схеме «звезда – звезда». Изучить методику расчета токов и построения векторных диаграмм.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

3. Лабораторное задание

3.1. С помощью вольтметра проверьте разметку зажимов трехфазного блока питания БП4. Определите нейтральную точку $N(0)$ по показаниям вольтметра, поочередно присоединяя вольтметр к каждой паре выходных зажимов. Измерьте и запишите в табл. 8.1 значения линейных напряжений на клеммах блока U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} .

3.2. Соберите электрическую цепь согласно схеме (рис. 8.5). В фазу *a* включите резистор R_2 . Последовательно с амперметрами в линейных и нулевом проводах включите ключи SA1, SA2, SA3 (для подключения амперметра и коммутации нулевого провода).

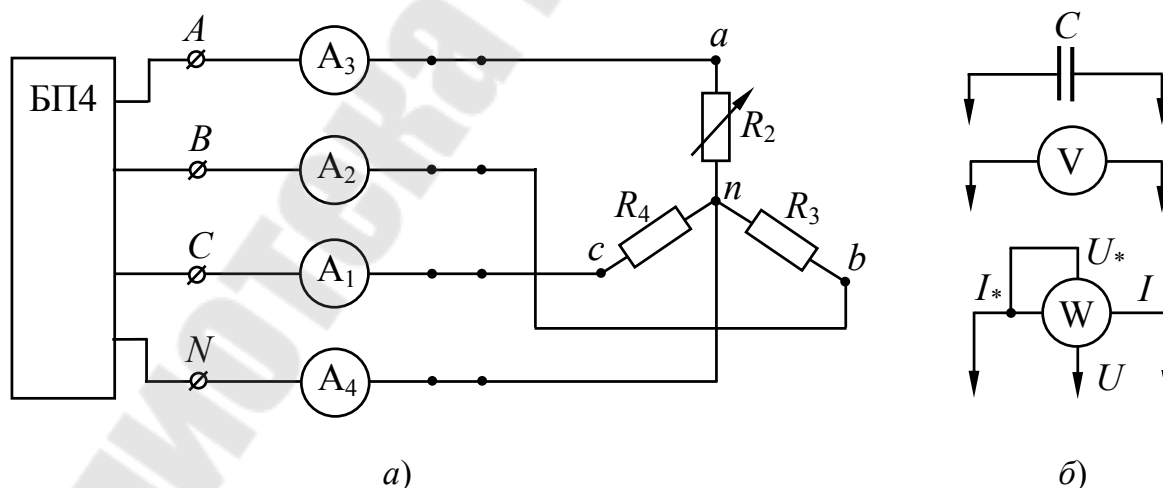


Рис. 8.4. Схема электрической цепи для экспериментальных исследований

3.3. Установите ключи в линейных и нулевом проводах в замкнутое положение и, включив питание блока БП4, выровняйте резистором R_2 токи в фазах (по минимальному току в нулевом проводе). Измерьте и запишите в табл. 8.1 значения токов и фазных напряжений.

3.4. Поочередно меняя режимы нагрузки фаз согласно табл. 8.1, запишите показания приборов в соответствующие строки табл. 8.1.

Несимметричный режим устанавливается изменением сопротивления резистора R_2 . Режим короткого замыкания устанавливается следующим образом:

- выключить блок питания БП4;
- выключить ключ в нулевом (нейтральном) проводе;
- нагрузку фазы a закоротить, соединив точки a и n проводником;
- включить блок питания БП4 и выполнить измерения.

Таблица 8.1

Нагрузка	Нейтральный провод	Измерено						Вычислено			Линейные напряжения, В	
		I_a	I_b	I_c	I_N	U_a	U_b	U_c	$\frac{U_{ab}}{U_a}$	$\frac{U_{bc}}{U_b}$		$\frac{U_{ca}}{U_c}$
		А	А	А	А	В	В	В				
1*. Симметричная	вкл.											$U_{AB} =$
2. ($R_a = R_b = R_c$)	откл.											
3*. Несимметричная	вкл.											$U_{BC} =$
4*. ($R_a > R_b = R_c$)	откл.											
5. В фазу a включен конденсатор	вкл.											$U_{CA} =$
6. ($R_b = R_c$)	откл.											
7. Холостой ход фазы a	вкл.											$U_{CA} =$
8. ($R_a = \infty; R_b = R_c$)	откл.											
9. Короткое замыкание фазы a ($R_a = 0; R_b = R_c$)	откл.											

Таблица 8.2

Нагрузка	Расчет мощности P , Вт	Измерено		
		P_a , Вт	P_b , Вт	P_c , Вт
Симметричная с нейтральным проводом				
Несимметричная с нейтральным проводом				

Нагрузка	Расчет мощности P , Вт	Измерено		
		P_a , Вт	P_b , Вт	P_c , Вт
Несимметричная без нейтрального провода				
Короткое замыкание фазы a				

4. Контрольные вопросы

1. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении «звезда – звезда» (нагрузка симметричная и несимметричная)?
2. Как в четырехпроводной линии опытным путем определить линейные и нейтральные провода?
3. Какое назначение имеет нейтральный провод? Почему в нейтральный провод не ставят предохранитель?
4. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной и несимметричной нагрузке?
5. Что происходит в трехфазной трехпроводной цепи (соединение «звезда – звезда») при обрыве одной из фаз?
6. Почему опасно короткое замыкание одной из фаз приемника в четырехпроводной цепи?
7. Что происходит в трехфазной трехпроводной цепи (соединение «звезда – звезда») при коротком замыкании одной из фаз?
8. Как аналитически и графически определить напряжение между нейтралями?
9. Какими способами можно измерить мощность в четырехпроводной и трехпроводной цепях?
10. Как три однофазных приемника соединить звездой?

5. Требования к содержанию отчета

- Отчет должен содержать:
- титульный лист;
 - тему и цель работы;
 - контрольные вопросы и краткие ответы на них по разделу 4;
 - схему (рис. 8.5) и результаты измерений токов, напряжений и мощностей для различных нагрузок в виде заполненных колонок «измерено» в табл. 8.1 и 8.2;

– результаты расчета отношения величин линейных и фазовых напряжений для различных нагрузок и мощности (колонки «вычислено» в табл. 8.1 и 8.2);

– векторно-топографические диаграммы напряжений и токов для всех режимов, указанных в табл. 8.1 и построенные в масштабах (m_U В/мм; m_I А/мм) по результатам измерений методом «засечек». Из построенных диаграмм определить напряжения между нейтралями. Значение U_{nN} указать рядом с диаграммами;

– анализ результатов и выводы;

– протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

Литература

1. Тиличенко, М. П. Электротехника, электрические машины и аппараты : учеб. пособие для вузов / М. П. Тиличенко, С. А. Грачев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 342 с.
2. Иванов, И. И. Электротехника / И. И. Иванов, В. С. Равдоник. – М. : Высш. шк., 1984. – С. 97–101, 104–107.
3. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – С. 131–137.
4. Общая электротехника / под ред. А. Т. Блажкина. – Л. : Энергия, 1979. – С. 109–118.
5. Электротехника : учеб. для неэлектротехн. специальностей вузов / под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1985. – С. 104–114, 117–121, 305–308.

Содержание

Введение.....	3
Организация работы в лабораториях кафедры ТОЭ	3
Правила техники безопасности во время лабораторных занятий.....	4
Требования к подготовке, выполнению, оформлению и защите лабораторных работ	5
Описание стенда	9
<i>Лабораторная работа № 1. Изучение лабораторного стенда.....</i>	<i>11</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование линейных цепей постоянного тока с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов</i>	<i>15</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование сложных линейных цепей постоянного тока с несколькими источниками ЭДС</i>	<i>21</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование нелинейных цепей постоянного тока</i>	<i>29</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с последовательным соединением элементов.....</i>	<i>37</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с параллельным соединением элементов</i>	<i>49</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование электрического состояния трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников треугольником.....</i>	<i>59</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Исследование электрического состояния трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников звездой</i>	<i>67</i>
Литература	75

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Тиличенко Михаил Павлович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу для студентов
специальностей 1-36 01 01 «Технология
машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое
оборудование машиностроительного производства»,
1-36 01 05 «Машины и технология обработки
материалов давлением» и 1-36 02 01 «Машины
и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор
Компьютерная верстка

*Н. Г. Мансурова
Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 28.02.12.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,75.

Изд. № 1.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр Учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48