



Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Физика и электротехника»

**Д. В. Комнатный, М. П. Тиличенко**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

### **ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности**

**1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»  
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2023

УДК 621.3+621.313(075.8)  
ББК 31.2+31.261я73  
К63

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 2 от 25.10.2022 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *А. О. Добродей*

**Комнатный, Д. В.**

К63      Электротехника и электроника : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» днев. и заоч. форм обучения / Д. В. Комнатный, М. П. Тиличенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 103 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: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит описание 12 лабораторных работ, каждое из которых включает тему, цель работы, краткие теоретические сведения, задание, выполняемое при подготовке, лабораторное задание, контрольные вопросы и требования к содержанию отчета. Тематика работ соответствует разделу «Электротехника» программы курса «Электротехника и электроника».

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения.

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

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2023

## **ВВЕДЕНИЕ**

В учебные планы подготовки инженеров теплотехнической специальности входит целый ряд общеобразовательных дисциплин, к которым относится, в частности, электротехника и электроника – наука о техническом применении электрических и магнитных явлений, а также явлений в полупроводниках.

Необходимость в усвоении базовой системы знаний, умений и навыков в области электротехники будущими инженерами-теплотехниками обусловлена широким использованием электромагнитных явлений, электрических аппаратов и электрических методов измерений в промышленном, в том числе теплотехническом, оборудовании.

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 «Физика и электротехника»**

В лаборатории 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, электрических аппаратов и 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 его защита.

### *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 расчетного задания (если оно имеется в описании лабораторной работы).

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 ключ для подключения амперметра при измерении тока. 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 (см. рис. 1). Страницы отчета оформляются с нумерацией (см. рис. 2), титульный лист не нумеруется.

Весь отчет в целом должен быть оформлен аккуратно.

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.



↕ 5

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
“Гомельский государственный технический  
университет им. П.О.Сухого”

Кафедра «Физика и электротехника»

**ОТЧЕТ**  
по лабораторной работе №1.01  
**«Изучение лабораторного стенда»**

Стенд №

Выполнил студент гр. ТЭ-21  
Иванов И.И. (дата)

Принял преподаватель  
Петров П.Н. (дата)

Гомель 2023

↕ 5

20

5

Рис. 1. Образец титульного листа

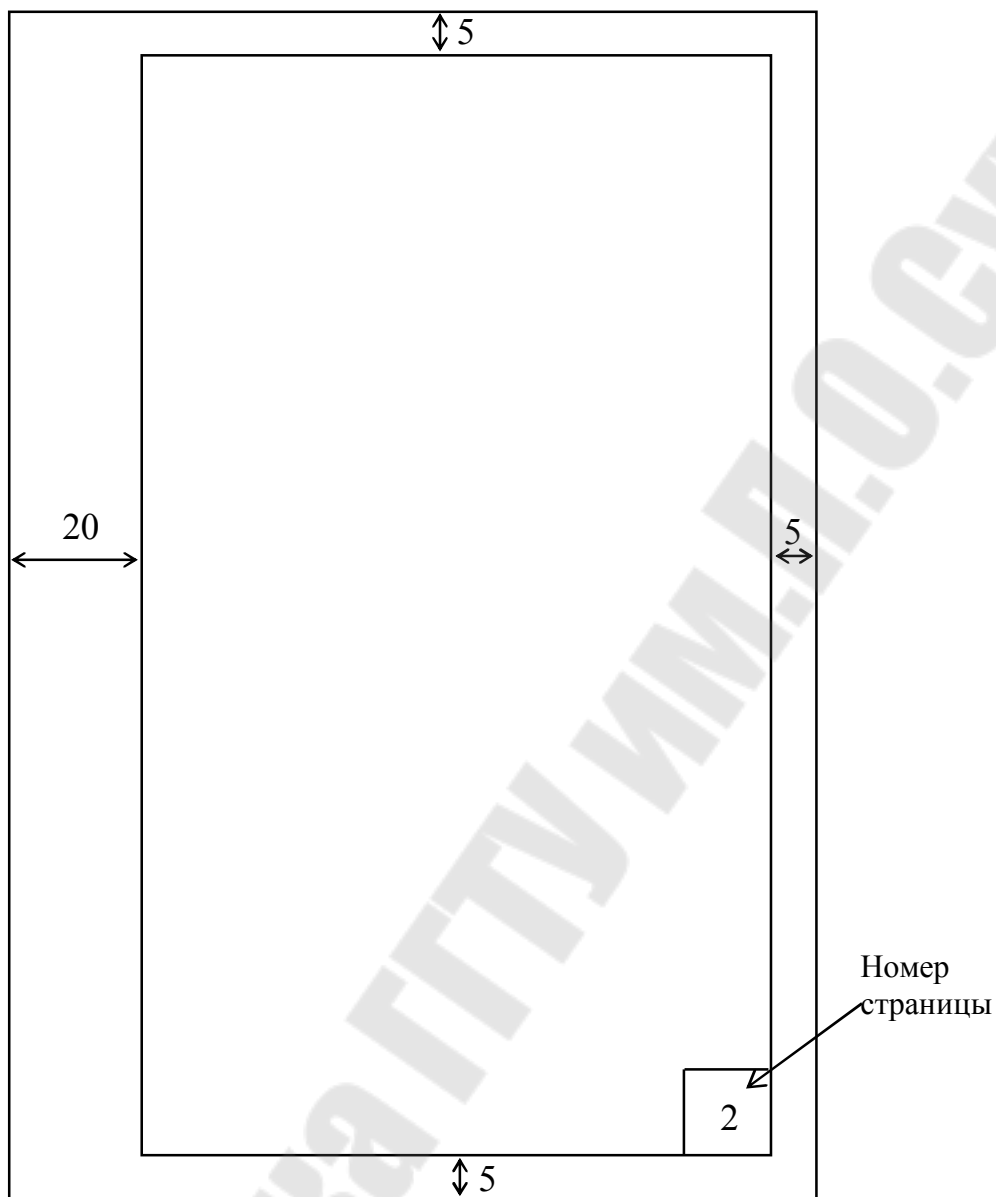


Рис.2. Образец оформления страницы отчета

# Лабораторная работа № 1

## Изучение лабораторного стенда

### Цель 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. 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.

## 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.

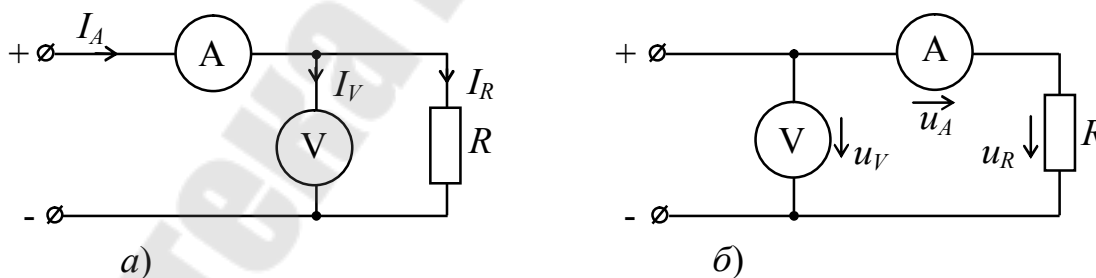


Рис. 1.1. Схемы измерения малых (а) и средних (б) значений электрических сопротивлений по методу амперметра-вольтметра

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

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 и др. с помощью приборов, входящих в лабораторную установку, можно определить косвенным методом по следующей методике:

– методом вольтметра-амперметра измеряется активное сопротивление  $R_x = \frac{U_-}{I_-}$  на постоянном токе по схеме (рис.1.1, а) для малых сопротивлений или по схеме (рис 1.1, б) для средних сопротивлений, где вместо  $R_x$  подключается катушка;

– подав на вход схемы (рис.1.2, а) переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц, определяется полное сопротивление катушки

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

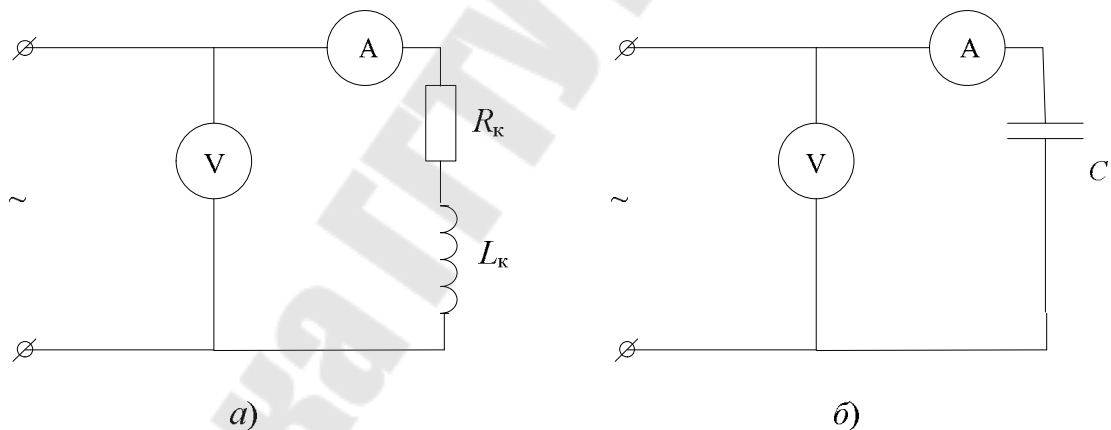


Рис 1.2. Схема измерения полных сопротивлений на переменном синусоидальном токе

– 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.1.2, б), запитав ее переменным синусоидальным напряжением  $U_{\sim}$  частотой  $f = 50$  Гц. 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. Задание для самостоятельной подготовки

Изучить устройство лабораторного стенда К4822-2 по Приложению 1 данного пособия. Изучить правила эксплуатации мультиметра МУ-68 по Приложению 2 данного пособия.

## 3. Лабораторное задание

3.1. Изучить методы измерения параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  -элементов по разделу 1 данного пособия.

3.2. По методике раздела 1.4 измерить и записать значения электрических сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ . Для резистора  $R_2$  измерить и записать максимальное и минимальное значения сопротивления, изменяя его величину ключами SA4, SA5, SA6.

3.3. По методике раздела 1.5 определить величину омического сопротивления  $R$  и индуктивности  $L$  катушки.

3.4. По методике раздела 1.6 определить величины емкостей батареи конденсаторов. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

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

#### 4. 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?

#### 5. Требования к оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- тему и цель работы;
- контрольные вопросы и краткие письменные 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 п.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

#### Цель 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 характеризуются 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:  $U_1 = I_1 R_1$  ;  
 $U_2 = U - U_1 = I R_2 = \frac{U}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$ ; причем напряжение  $U_1$  увеличивается

пропорционально 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  $P_1$  уве-



личивается 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*.

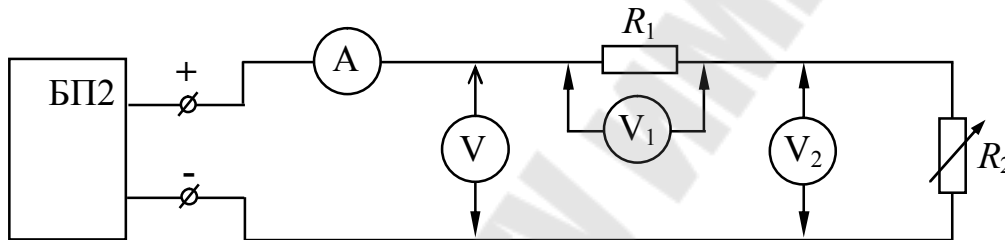


Рис. 2.1. Схема цепи постоянного тока с последовательным соединением приемников

Ток при согласованном режиме определяется из выражения:

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

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.

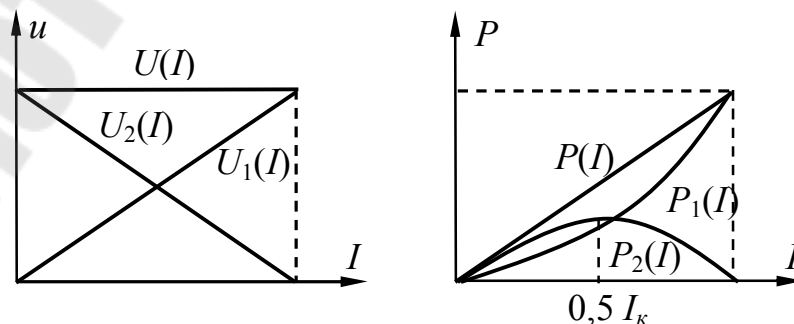


Рис. 2.2. Изменение напряжений и мощностей в зависимости от тока нагрузки для схемы с последовательным соединением элементов

## 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  $g_2 = \frac{1}{R_2}$ ;  $g_3 = \frac{1}{R_3}$ . Эквивалентная проводимость всей

цепи равна  $g_{\text{эКВ}} = g_1 + g_2$ . 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.

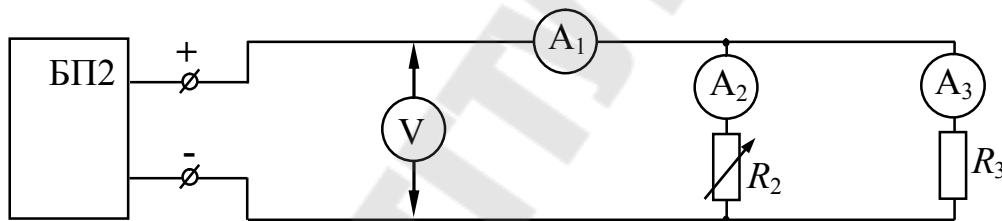


Рис.2.3. Схема цепи постоянного тока с параллельным соединением приемников

## 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.

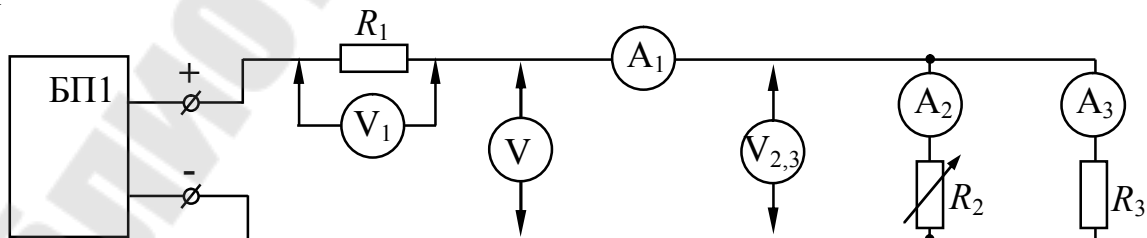


Рис. 2.4. Схема цепи постоянного тока со смешанным соединением приемников

Ток в неразветвленной части цепи определяется выражением

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}, \text{ а токи в параллельных ветвях вычис-}$$

ляются по формулам разброса:  $I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1$ ;  $I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1$ .

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 (х.х.)  $U_{2,3} = I_1 R_3$ , 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 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 таблиц 2.1, 2.2, 2.3.

*Примечание.* Расчет выполнить после выполнения эксперимента.

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

### 3. Лабораторное задание

3.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис.2.1 и после проверки правильности сборки преподавателем включить блок питания БП2 и выставить напряжение  $U_{\max}$  на входе схемы. Изменяя  $R_2$  от  $R_{2\min}$  до  $R_{2\max}$ , получить 6 отсчетов тока и напряжений. Показания приборов записать в табл. 2.1 (в столбцы “измерено”). Выключить блок питания стенда и после проверки полученных результатов преподавателем разобрать схему. Регулятор напряжения установить 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. Собрать электрическую цепь по схеме рис.2.3, используя вместо амперметров А1, А2, А3 ключи SA1, SA2, SA3, и после проверки правильности сборки преподавателем включить блок питания и выставить на входе цепи с помощью преподавателя необходимое напряжение. Изменяя сопротивление реостата  $R_2$  от  $R_{2\min}$  до  $R_{2\max}$  получить 6 отсчетов напряжений и токов. Показания приборов записать в табл. 2.2. Выключить блок питания и после проверки результатов преподавателем, разобрать схему.

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	$g_2$ , См	$g_3$ , См	$g_{\text{экв}}$ , См	$P_2$ , Вт	$P_3$ , Вт	$P$ , Вт
1													
2													
3													
4													
5													
6													

3.3. Дополнить схему рис.2.3 резистором  $R_1$  и после проверки преподавателем, включить блок питания и выставить напряжение  $U_{\text{max}}$  на входе цепи. Изменяя  $R_2$  от  $R_{2\text{min}}$  до  $R_{2\text{max}}$ , получить 6 отсчетов напряжений и токов. Показания приборов записать в табл. 2.3. Выключить 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 предъявить на подпись преподавателю, а стенд привести 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 (х.х.) и короткого замыкания (к.з.) 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 к.з. 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 письменные ответы на них по разделу 4;
- результаты расчета токов, напряжений и мощностей в схемах по пункту 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

### Цель работы:

– освоить и экспериментально проверить расчет линейных цепей постоянного тока методами наложения и эквивалентного генератора;

### 1. Краткие теоретические сведения

#### 1.1. Метод наложения

Метод наложения основан на принципе суперпозиции, который применительно к электрическим цепям утверждает: каждая ЭДС вызывает в отдельных ветвях электрической цепи токи независимо от действия всех остальных ЭДС, включенных в эту же цепь. Это позволяет найти ток в любой ветви (полный ток) как алгебраическую сумму токов, возникающих в этой ветви при действии каждой ЭДС отдельно (частичных токов). При суммировании токов принимается правило знаков: если частичный ток ветви совпадает по направлению с полным током, то частичный ток имеет знак “плюс”, иначе при несовпадении направлений полного и частичного токов частичный ток имеет знак ‘минус’. Направление частичных токов определяется с учетом полярности источника ЭДС, который вызывает эти токи. Расчет токов в электрической цепи методом наложения сводится к нахождению частичных токов в более простых цепях. Каждая такая цепь получается путем исключения из исходной цепи всех источников ЭДС, кроме одного, при сохранении в них прежних значений сопротивлений резисторов. Для исключения источник ЭДС исключается, а его внутреннее сопротивление (при его наличии) выносится во внешнюю цепь.

Рассмотрим расчет методом наложения цепи на рис.3.1, а. Первая группа частичных токов определяется по схеме рис.3.1, б, с исключенным источником ЭДС  $E_1$ . 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) с исключенным источником ЭДС  $E_2$  токи в ветвях определяются из выражений

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

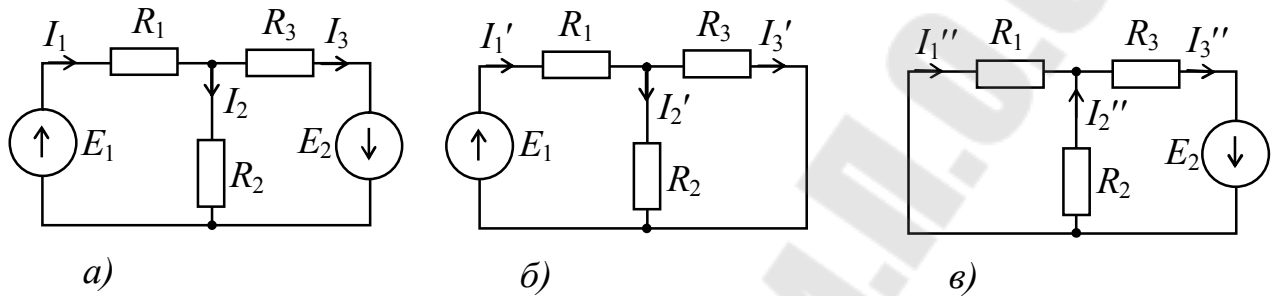


Рис. 3.1. Схемы для расчета токов в ветвях методом наложения

Алгебраическое суммирование частичных токов  $I_1'$ ,  $I_2'$ ,  $I_3'$  и  $I_1''$ ,  $I_2''$ ,  $I_3''$ , с учетом их направлений, позволяет найти полные 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 генератору, эквивалентному активному двуполуснику, которым является остальная сложная электрическая цепь. Такой условный генератор, обладающий некоторой эквивалентной ЭДС  $E_r$  и некоторым эквивалентным внутренним сопротивлением  $R_r$ , называется эквивалентным генератором.



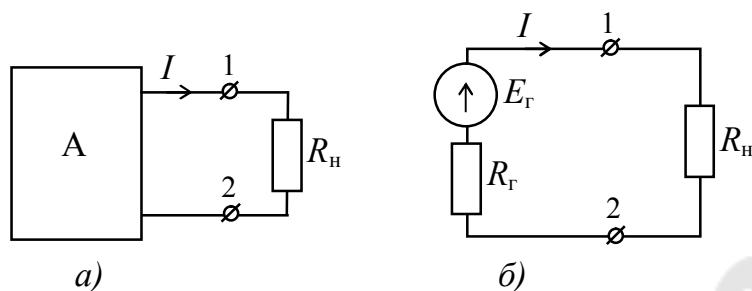


Рис.3.2. Схемы, иллюстрирующие расчет тока в ветви сложной цепи методом эквивалентного генератора

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

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  $R_r$  для исходной схемы, представленной на рис.3.3 а, поясняется схемами, приведенными на рис.3.3 б, 3.3 в.

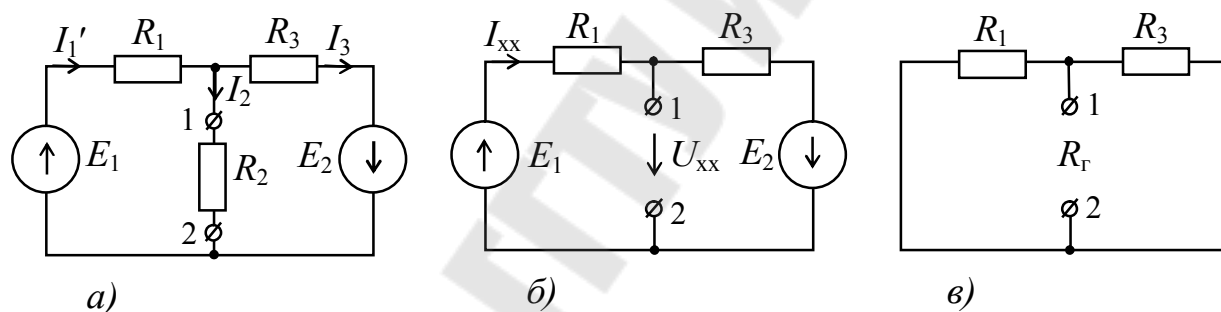


Рис. 3.3. Расчет  $E_r$  и  $R_r$  для случая определения тока в ветви  $R_2$

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

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

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

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

$$E_{\Gamma} = U_{xx} \text{ и } R_{\Gamma} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}},$$

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  $R_H = 0$  (измеряется амперметром, включенным между зажимами 1 и 2 вместо  $R_H$ ).

Расчеты и экспериментальные измерения в данной работе проводятся для экспериментальной цепи, представленной на рис.3.4.

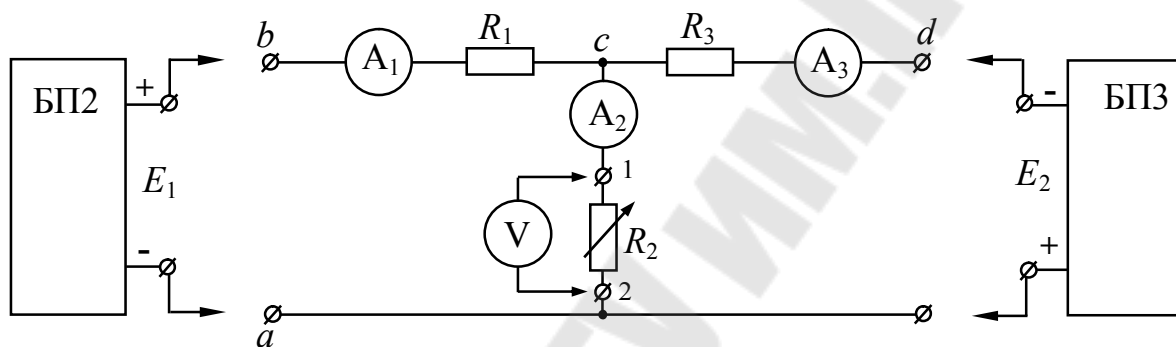


Рис.3.4. Схема электрической цепи для проведения расчетов и измерений

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной 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.3.4) 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.3.4). При сборке схемы строго соблюдать полярности источников ЭДС указанные на рисунке. Для подключения амперметров использовать ключи  $SA1$ ,  $SA2$ ,  $SA3$ .
- 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 на резисторе  $R_2$  сопротивление  $R_{2\max}$ , измерьте и запишите в табл. 3.1 величины  $E_1$ ,  $I_1'$ ,  $I_2'$ ,  $I_3'$ . Выключите питание источника  $E_1$  тумблером.
- Включите питание источника  $E_2$ , измерьте и запишите в табл. 3.1 величины  $E_2$ ,  $I_1''$ ,  $I_2''$ ,  $I_3''$ . Выключите питание источника  $E_2$ .
- Включите 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.3.4) с включенными источниками ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  отсоедините от зажимов 1 и 2 резистор  $R_2$  и, подключив к этим зажимам вольтметр постоянного тока, измерьте и запишите в табл. 3.2 величину  $U_{xx} = E_r$  (режим х.х. ветви  $R_2$ ).
- отсоединив вольтметр от зажимов 1 и 2 и включив вместо него амперметр, 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  $R_{2\max}$  вместо амперметра между зажимами 1 и 2. Измерьте  $I_2$  и  $U_{12}$  и запишите в табл. 3.2.

3.3. В схеме (рис.3.4) измерьте зависимость напряжения на зажимах 1 и 2 от величины тока  $I_2$ , т.е. снимите внешнюю характеристику эквивалентного генератора. Для этого включите питание обоих источников, измерьте и запишите в табл. 3.3 указанную за-

зависимость, регулируя ток  $I_2$  величиной сопротивления резистора  $R_2$  от  $R_{2\max}$  до  $R_{2\min}$  (6 значений).

Таблица 3.1

Режим работы	Измерено			Вычислено		
	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$
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	Хол. ход	Коротк. замыкание	Нагр. $R_{2\max}$	Определено	Параметр	$E_2, \text{В}$	$R_2, \text{Ом}$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	
	Параметр					Способ определения					
	$I_2, \text{А}$					По данным измерений					
	$U_{12}, \text{В}$					Расчетом					

Таблица 3.3

$I_2$	$A$						
$U_{12}$	$B$						
$P_2$	$BT$						

#### 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  $R_n$  и источник ЭДС)?
8. Какая зависимость называется внешней характеристикой генератора?
9. Как при заданном сопротивлении нагрузки определить ток через нагрузку по внешней характеристике?

## 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;
- 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;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## Лабораторная работа № 4

### Исследование нелинейных цепей постоянного тока

#### Цель 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.

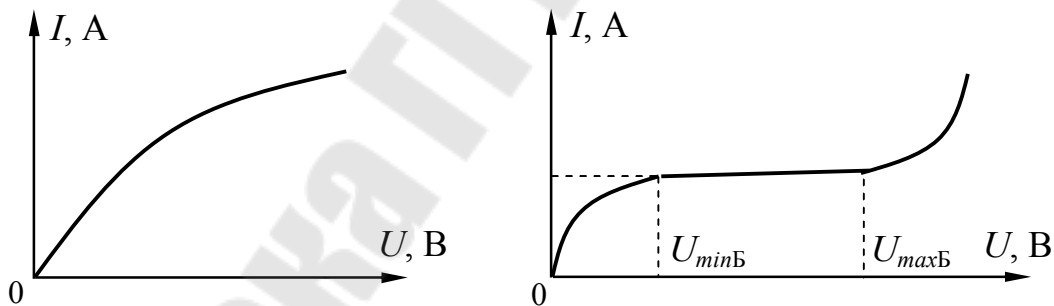


Рис. 4.1. Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов:  
а) лампы накаливания; б) бареттера

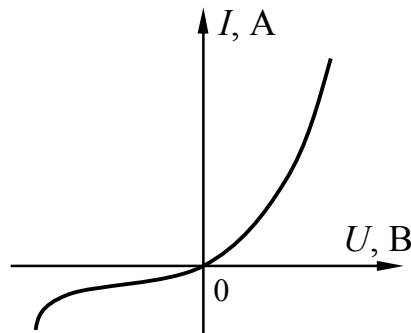


Рис. 4.2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

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.

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) вызывало 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.

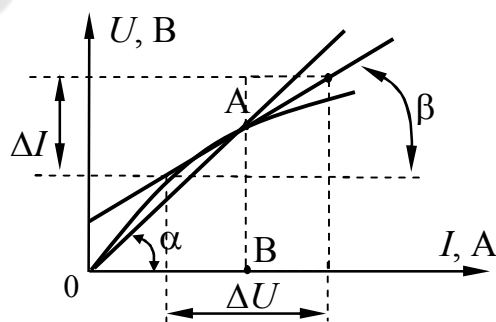


Рис.4.3. Определение статического и дифференциального сопротивления нелинейного элемента

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)

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

Очевидно, что  $R_{ст}$  и  $R_{диф}$  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.



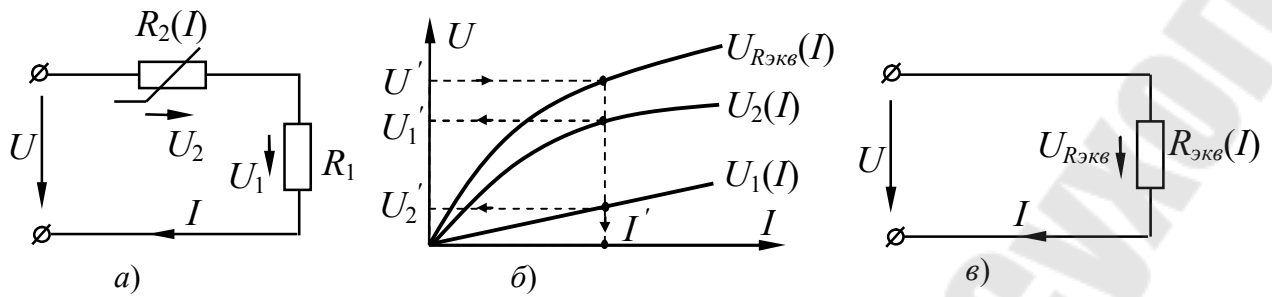


Рис. 4.4. Последовательное соединение линейного и нелинейного элементов:  
а) схема соединения; б) ВАХ; в) эквивалентная схема

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

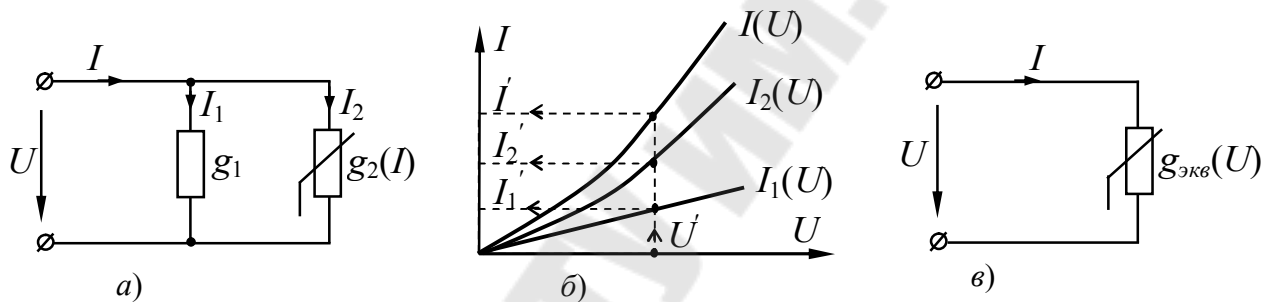


Рис. 4.5. Параллельное соединение линейного и нелинейного элементов:  
а) схема соединения; б) ВАХ; в) эквивалентная схема

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

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной 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 на рис.4.6.

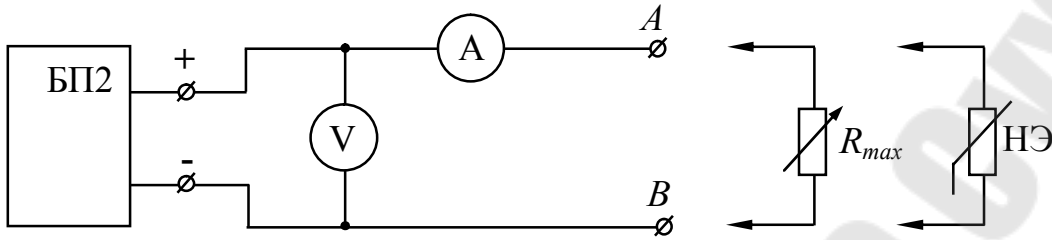


Рис.4.6. Схема электрической цепи для снятия ВАХ элементов

3.2. Снимите ВАХ резистора  $R_{2\max}$  и лампы накаливания, подключая их поочередно к зажимам А и В, устанавливая с помощью ЛАТРа блока питания напряжения, указанные в табл. 4.1. Измеренные значения токов запишите в эту таблицу.

Таблица 4.1

Измерено	Тип элемента \ U, В		0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12	13,5
		Реостат	$I$ , мА									
	Лампа	$I$ , мА										
Вычислено	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.

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	$I, \text{ mA}$	0	3,0	6,0	9,0	12	15	18
		$U, \text{ B}$							
	Параллельное соединение	$U, \text{ B}$	0	2,5	5,0	7,5	10	12	15
		$I, \text{ mA}$							

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  $I$ .

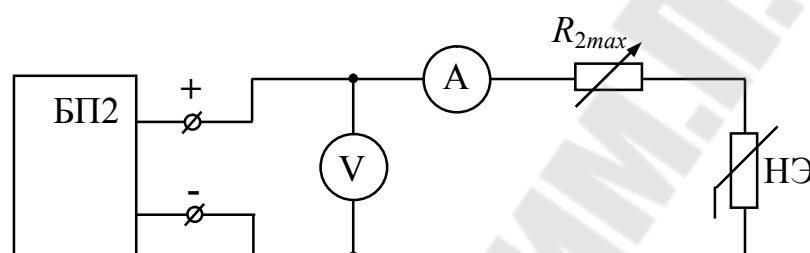


Рис.4.7. Схема для снятия ВАХ последовательного соединения линейных и нелинейных элементов

Таблица 4.3

Измерено	Последовательное соединение	$I, \text{ mA}$	0	3,0	6,0	9,0	12	15	18
		$U, \text{ B}$							
	Параллельное соединение	$U, \text{ B}$	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15
		$I, \text{ mA}$							

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  $I$ .

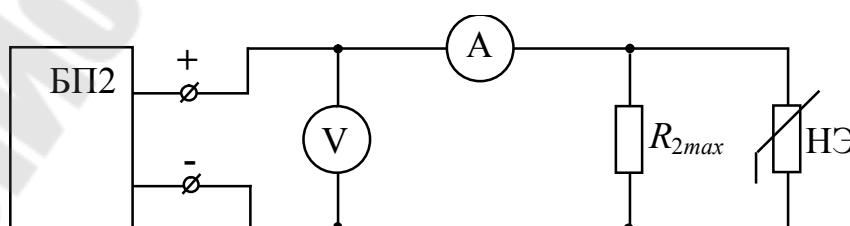


Рис.4.8. Схема для снятия ВАХ параллельного соединения сопротивления и нелинейного элемента

3.6. Экспериментально полученные данные по пунктам 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 характеристикой элемента электрической цепи?
3. Что представляет собой полупроводниковый диод?
4. Чем отличается статическое сопротивление нелинейного элемента от дифференциального?
5. Как построить ВАХ нелинейной электрической цепи из последовательно соединенных элементов, зная ВАХ элементов?
6. Как построить ВАХ нелинейной электрической цепи из параллельно соединенных элементов, зная ВАХ элементов?
7. Как рассчитывается нелинейная электрическая цепь постоянного тока по методу нагрузочной прямой?

#### 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, 4.2, 4.3 результатов измерений и расчетов;
- вольт-амперные характеристики лампы накаливания и резистора на одном рисунке;
- расчетную и экспериментальную ВАХ электрической цепи с последовательным соединением резистора 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

#### Цель 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).

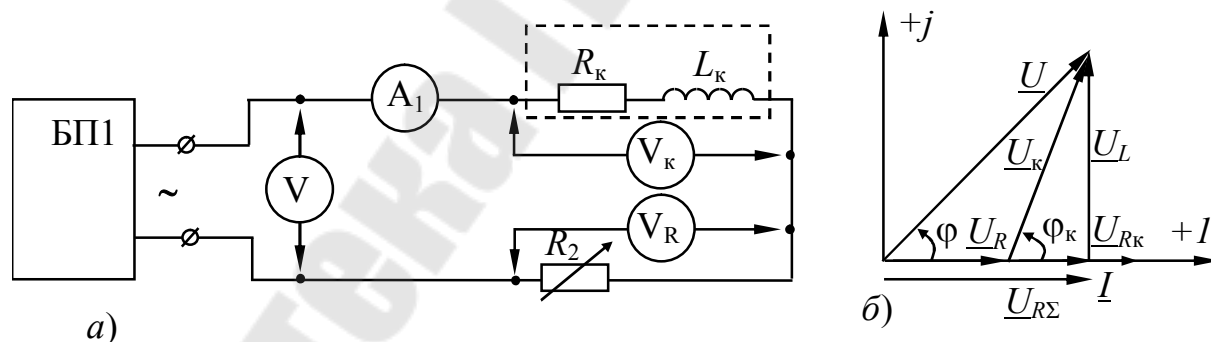


Рис. 5.1. Схема электрической цепи из последовательно соединенных индуктивной катушки и резистора (а) и векторная диаграмма цепи (б)

Действующее значение переменного синусоидального тока в этой цепи равно

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

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;

$\omega$  – 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:

$\varphi$  - угол сдвига фаз между напряжением  $\underline{U}$  и током  $\underline{I}$  в цепи ( $\varphi = \arg \underline{Z} = \arctg \frac{X_L}{R_{\Sigma}}$ );  $0 \leq \varphi \leq 90$ ;

$\varphi_k$  – угол сдвига фаз между напряжением  $\underline{U}_k$  и током  $\underline{I}$  для катушки индуктивности.

Если каждую из сторон треугольника напряжений на векторной диаграмме 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)

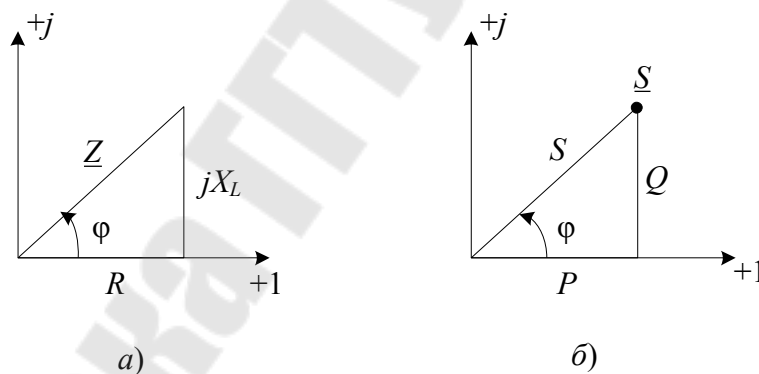


Рис. 5.2. Треугольник сопротивлений (а) и мощностей (б) для схемы рис. 5.1 а

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

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

Из треугольника мощностей (рис.5.2 б) следуют соотношения

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

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.

Действующее значение тока в этой цепи равно

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

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

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

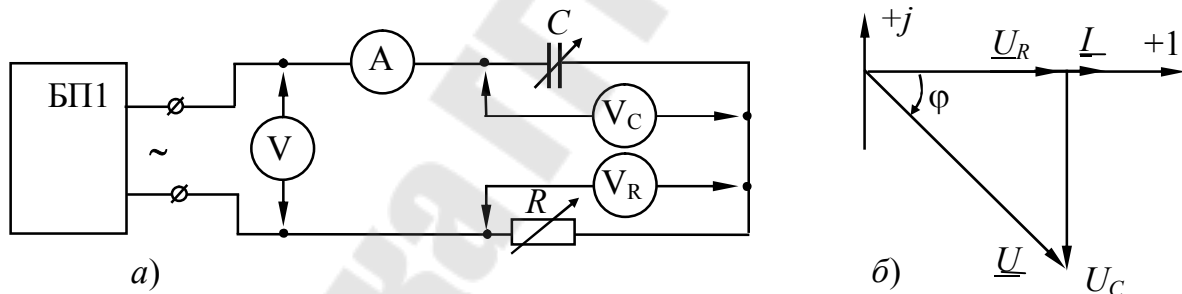


Рис. 5.3. Схема электрической цепи из последовательно соединенных конденсатора и резистора (а) и векторная диаграмма цепи (б)

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  $90^\circ$  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.5.3а.

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

Угол  $\varphi$  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.

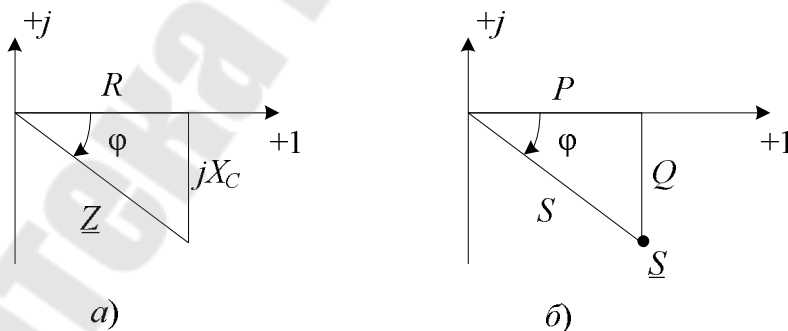


Рис. 5.4. Треугольник сопротивлений (а) и мощностей (б) для схемы рис.5.3, а

Из этих треугольников, с учетом закона Ома для действующих значений напряжения и тока следуют соотношения, аналогичные соотношениям (5.7), (5.8), (5.9). Однако, при этом реактивная мощность отрицательна, так как  $\varphi < 0$  и, следовательно,  $Q_C = U I \sin \varphi < 0$ .

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

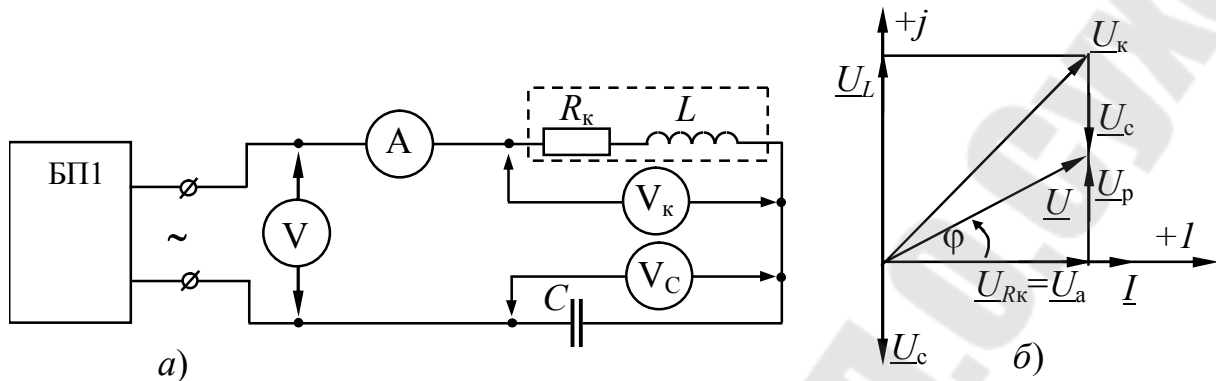


Рис. 5.5. Схема электрической цепи из последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора (а) и векторная диаграмма для случая, когда  $X_L > X_C$  (б)

Действующее значение тока в этой цепи равно  $I = \frac{U}{Z}$ ,

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.

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  $\phi$  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  $\varphi$  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  $\varphi$  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  $\omega_0$  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,

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

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;

$$\rho = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ – характеристическое сопротивление цепи.}$$

Аналогично,

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

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

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

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

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

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

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

тивной мощности

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

В настоящей лабораторной работе режим резонанса напряжений достигается путем изменения емкости батареи конденсаторов. Поэтому резонансные кривые имеют особенности, по сравнению с обычно приводимыми в литературе.

Действующее значение тока в цепи зависит от емкости согласно формуле

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

поэтому при резонансе напряжений оно имеет максимум, а при увеличении емкости стремится к значению  $I_{\infty} = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L)^2}}$ .

Действующее значение напряжения на реальной катушке зависит от действующего значения тока в цепи, и, следовательно, от емкости

$$U_{RL} = I \sqrt{R_k^2 + (\omega L)^2} = \frac{U \sqrt{R_k^2 + (\omega L)^2}}{\sqrt{R_k^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Тогда в режиме резонанса напряжений действующее значение напряжения на реальной катушке максимально, а при увеличении емкости монотонно стремится к действующему напряжению питания.

Действующее значение напряжения на конденсаторе рассчитывается по формуле

$$U_C = I \frac{1}{\omega C} = \frac{U \frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R_k^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

В резонансе напряжений это значение максимально, однако не равно действующему значению напряжения на реальной катушке индуктивности. При дальнейшем увеличении емкости, действующее значение напряжения на конденсаторе спадает до нуля.

Очевидно, что графики зависимости активной мощности и коэффициента мощности в режиме резонанса напряжений имеют максимум.

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной 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 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, *a*, 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.

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	$R_K,$ Ом	$Z,$ Ом	$R_{\Sigma},$ Ом	$\cos\varphi$	$\varphi,$ град	$P,$ Вт	$Z_K,$ Ом	$X_L,$ Ом	$L,$ Гн	$\cos\varphi_K$	$\varphi_K,$ град	$R,$ Ом

3.2. Соберите электрическую цепь по схеме (рис.5.3, *a*), заменив в схеме (рис.5.1, *a*) индуктивную катушку на конденсатор регулируемой емкости  $C$ . Установите напряжение на входе схемы по пункту 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.

Таблица 5.2

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

3.3. Соберите электрическую цепь по схеме (рис.5.5, *a*), заменив в схеме на рис.5.3, *a*  $R_2$  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	
$C_{уст},$ мкФ	$U,$ В	$U_k,$ В	$U_C,$ В	$I,$ А	$R_k,$ Ом	$P,$ Вт	$\cos\varphi$

#### 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 письменные ответы на них по разделу 4;
- схему (рис.5.1, *а*), табл. 5.1, выражения для расчета величин  $Z$ ,  $P$ ,  $R_{\Sigma}$ ,  $R$ ,  $\cos \varphi$ ,  $Z_k$ ,  $X_L$ ,  $L$ ,  $\cos \varphi_k$  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, *а*), 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, *а*), табл. 5.3, выражения для расчета величин  $P$ ,  $\cos \varphi$ , и результаты вычислений этих величин (для каждого значения емкости  $C$ ), помещенные в табл. 5.3;
- графики зависимости величин  $I$ ,  $U_k$ ,  $U_C$ ,  $P$  и  $\cos \varphi$  от емкости  $C$  по образцу рис.5.6;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

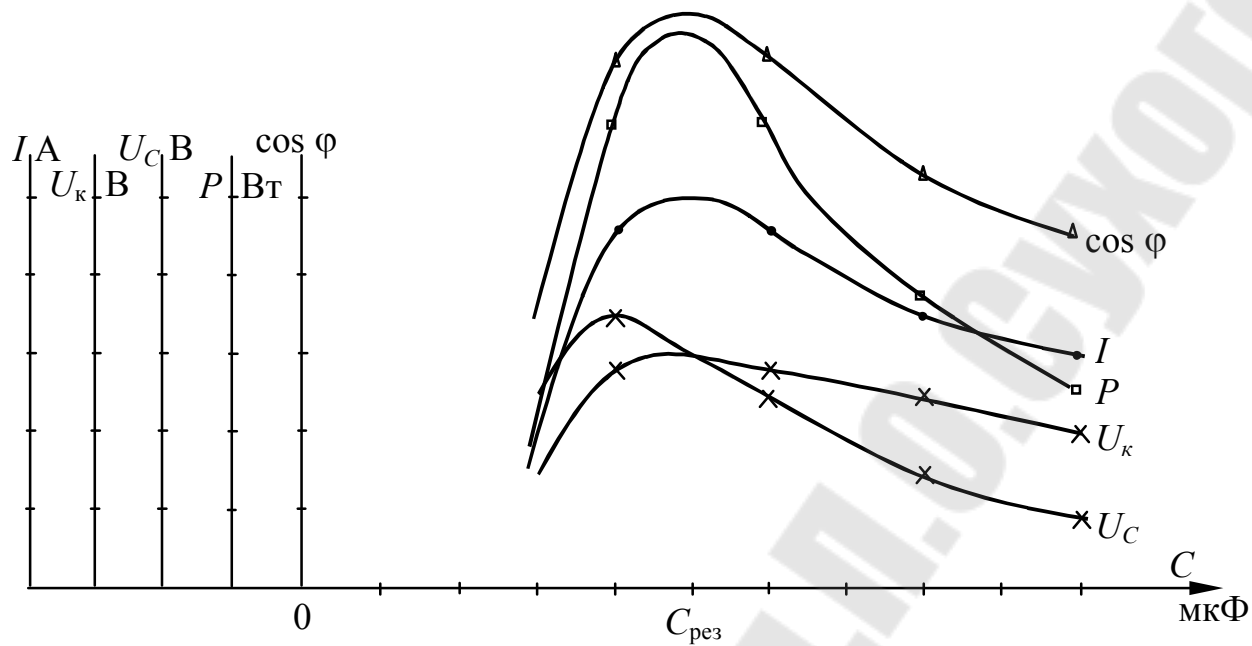


Рис. 5.6. Зависимость величин  $I$ ,  $U_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{с}}$ ,  $P$ ,  $\cos \varphi$  от величины емкости  $C$  батареи конденсаторов

## Лабораторная работа № 6

### Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с параллельным соединением элементов

#### Цель 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, *a* приведена электрическая цепь, составленная параллельным соединением реальной индуктивной катушки с параметрами  $R_k$ ,  $L$  и резистора с регулируемым электрическим сопротивлением  $R$ .

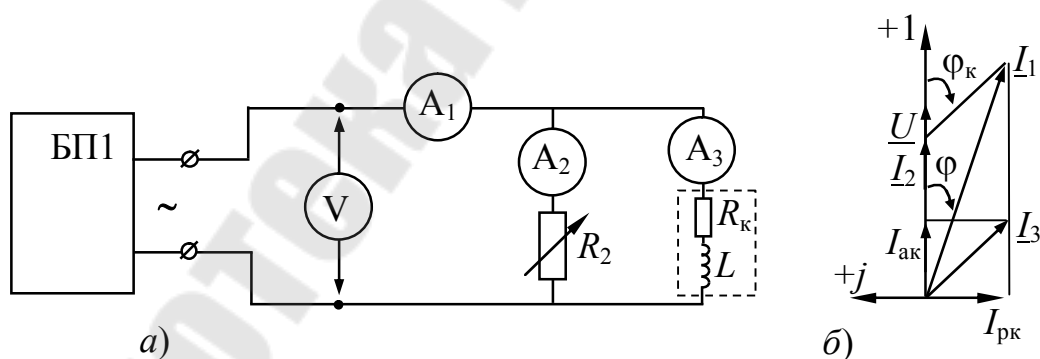


Рис.6.1. Схема электрической цепи с параллельно соединенными реостатом и индуктивной катушкой (*a*) и векторная диаграмма (*б*)

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

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

$$\left. \begin{aligned} \underline{y} &= \underline{y}_2 + \underline{y}_3, \text{ где} \\ \underline{y} &= g + jb; \\ \underline{y}_2 &= \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R} = g_2 + jb_2, \left( g_2 = \frac{1}{R}; b_2 = 0 \right) \\ \underline{y}_3 &= \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{R_k + jX_L} = \frac{R_k}{Z_k^2} - j \frac{X_L}{Z_k^2} = g_k + jb_k, \left( g_k = \frac{R_k}{Z_k^2}; b_k = -\frac{X_L}{Z_k^2} \right) \end{aligned} \right\} (6.1)$$

На рис.6.1, б приведена векторная диаграмма напряжений и токов для параллельной  $RL$ - цепи (рис. 6. 1, а). На основании соотношений (6.1) может быть построен треугольник проводимостей для этой цепи (рис 6.2).

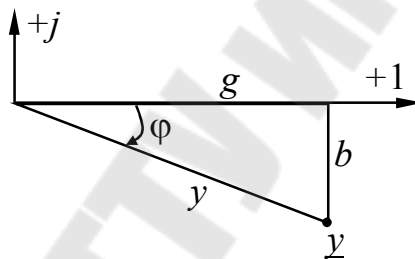


Рис. 6.2. Треугольник проводимостей для схемы, изображенной на рис.6.2 а

Из соотношений (6.1), с учетом закона Ома для действующих значений  $U$  и  $I$  и треугольника проводимостей, следует, что, действующее значение тока  $I_1$  в неразветвленной части цепи равно

$$I_1 = U y,$$

где  $U$  – действующее напряжение на входных зажимах цепи;

$y$  – полная входная проводимость цепи.

Действующие значения токов в ветвях равны  $I_2 = U y_2$  и  $I_3 = U y_3$ , где  $y_2$  и  $y_3$  – полные проводимости ветвей.

Из (6.1) можно получить формулы для определения параметров параллельной  $RL$  цепи по результатам измерения  $U, I_1, R_k, I_2$  (6.2)

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

$$b = \sqrt{y^2 - g^2}; \quad \cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad b = b_k = \sqrt{y_k^2 - g_k^2}; \quad (6.2)$$

$$P = UI_1 \cos \varphi = U^2 g.$$

На рис. 6.3, а приведена электрическая цепь, составленная параллельным соединением резистора  $R$  и конденсатора  $C$ .

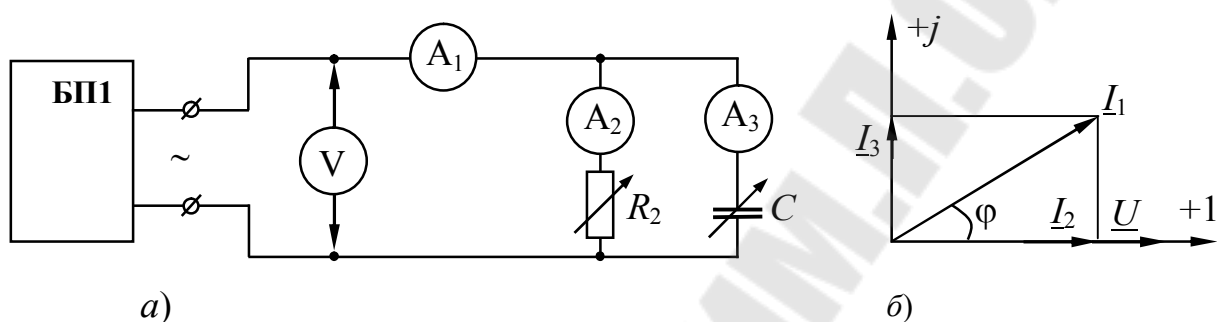


Рис. 6.3. Схема электрической цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора (а) и векторная диаграмма (б)

Параметры этой цепи можно определить по показаниям приборов аналогично предыдущему случаю.

На рис.6.3, б приведена векторная диаграмма для этой цепи, а на рис.6.4 – треугольник проводимостей.

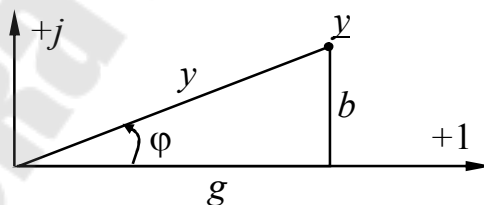


Рис. 6.4. Треугольник проводимостей для схемы рис.6.4 а

На рис.6.5 приведена схема электрической цепи из параллельно включенных индуктивной катушки и конденсатора.

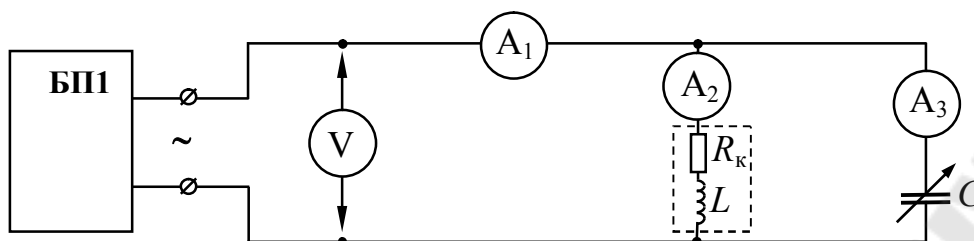


Рис.6.5. Схема электрической цепи с параллельным соединением индуктивной катушки и конденсатора

Как и для схемы (рис.6.1), первый закон Кирхгофа в символической форме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 + \underline{I}_3, \quad \text{или} \\ \underline{U} \underline{y} &= \underline{U} (\underline{y}_2 + \underline{y}_3); \quad \underline{y} = \underline{y}_2 + \underline{y}_3 \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

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

При этом, по закону Ома в символической форме

$$\underline{y} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}}; \quad \underline{y}_2 = \frac{\underline{I}_2}{\underline{U}}; \quad \underline{y}_3 = \frac{\underline{I}_3}{\underline{U}}. \quad (6.4)$$

При построении векторных диаграмм (рис.6.6) начальную фазу комплекса напряжения  $\underline{U}$  на входе цепи принимаем равной нулю ( $\psi_U = 0$ ). На рис.6.6 а построена диаграмма для случая, когда разность фаз  $\varphi$  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.

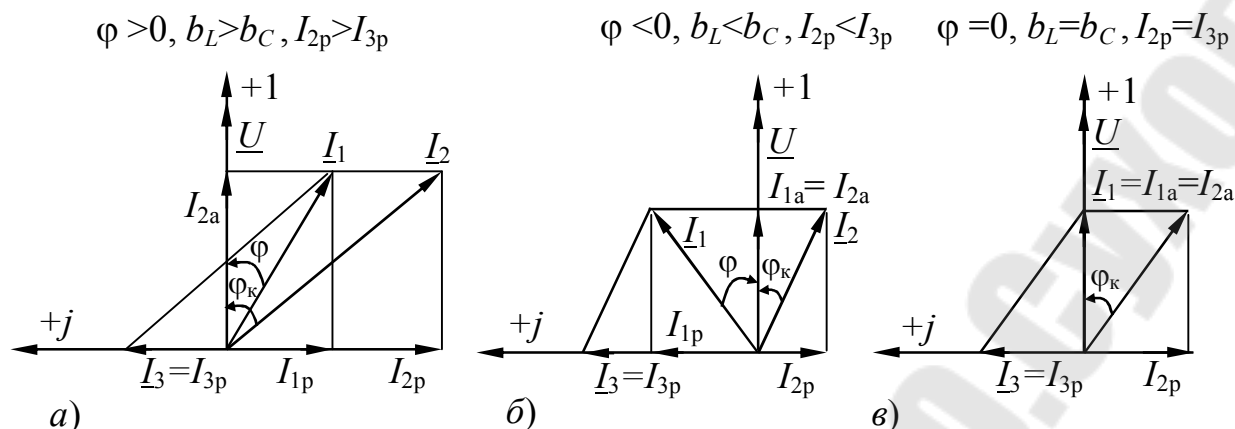


Рис. 6.6. Векторные диаграммы для схемы рис. 6.5 для случаев:  
 а)  $b_L > b_C$ ; б)  $b_L < b_C$ ; в)  $b_L = b_C$

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.6.6, в, резонансу токов отвечает равенство модулей реактивных составляющих токов ветвей

$$I_{2p} = I_{3p} \quad (6.5)$$

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

$$b_2 = b_3, \quad (6.6)$$

или

$$\frac{\omega L}{R_k^2 + \omega^2 L^2} = \omega C. \quad (6.7)$$

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

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - R_k^2 \frac{C}{L}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_k}{\rho}\right)^2}, \quad (6.8)$$

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

Из (6.8) следует, что резонанс возможен в цепи рис.6.5, 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

$$q = \frac{I_{2p}}{I_1} = \frac{I_{3p}}{I_1} = \frac{U b_2}{U g} = \frac{U b_3}{U g} = \frac{\omega_0 C}{g}. \quad (6.9)$$

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

$$P = U I_1 \cos \varphi = U I_1 = S. \quad (6.10)$$

Реактивная мощность  $Q$  при резонансе токов равна нулю

$$Q = Q_L - Q_C = U I_1 \sin \varphi = 0. \quad (6.11)$$

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.6.7.

Действующее значение тока  $I_1$  может быть найдено по формуле

$$I_1 = U \sqrt{\frac{R_k^2}{(R_k^2 + (\omega L)^2)^2} + \left( \omega C - \frac{\omega L}{R_k^2 + (\omega L)^2} \right)^2}.$$

При резонансе токов выражение в скобке по формуле (6.7) равно нулю, тогда при резонансе токов действующее значение тока  $I_1$  минимально и равно  $I_1 = U \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega L)^2}$

Действующее значение тока  $I_2$  зависит от параметров цепи по формуле  $I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L)^2}}$ . Очевидно, что при изменении емкости батареи конденсаторов, эта величина не меняется.

Величина  $I_3$  зависит от емкости конденсатора по формуле  $I_3 = \omega C U$ , графиком которой является прямая линия.

В режиме резонанса токов коэффициент мощности максимален. Так как в схеме на рис 6.5 активное сопротивление катушки и ток в ней не зависят от емкости, то и активная мощность в цепи не зависит от емкости.



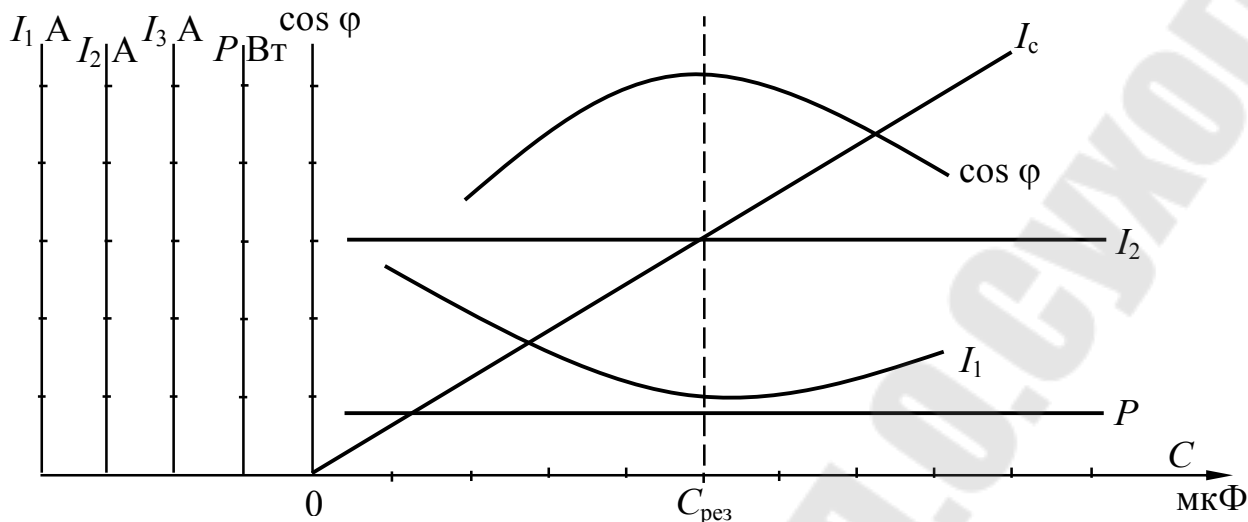


Рис. 6.7. Зависимость величин  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $P$ ,  $\cos \varphi$  от величины емкости батареи конденсаторов

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

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

2.2. Для схем (рис.6.1, а, 6.3, а, рис.6.5, а), записать выражения для расчета величин, приведенных в таблицах 6.1-6.4 (результаты вычислений) по показаниям приборов (данные измерений).

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

## 3. Лабораторное задание

3.1. Собрать электрическую цепь по схеме на рис.6.1 а. Регулируя величину сопротивления  $R_2$  и величину напряжения  $U$  на входе цепи, установить ток  $I_2 \approx I_3$ . Показания приборов записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Данные измерений					Результаты вычислений						
$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$R_k,$ Ом	$g_R,$ См	$y,$ См	$g,$ См	$b,$ См	$\cos \varphi$	$\varphi,$ град	$g_k,$ См

3.3. Собрать электрическую цепь по схеме на рис.6.3 а и, изменяя величину емкости  $C$  и напряжения  $U$  на входе, установить ток  $I_2 \approx I_3$ . Показания приборов записать в табл. 6.2.

Таблица 6.2

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

3.4. Собрать электрическую цепь по схеме рис.6.5. Установить заданное преподавателем напряжение на входе цепи и, изменяя ступенями величину емкости, установить в цепи режим резонанса токов (по минимальному показанию амперметра). Записать резонансное значение емкости  $C_{рез}$  в третью строку колонки  $C$  табл. 6.3. С помощью преподавателя выбрать два значения емкости меньших  $C_{рез}$  и два значения емкости больших  $C_{рез}$ , заполнив колонку  $C$  табл. 6.3. Устанавливая поочередно значения емкости батареи конденсаторов от  $C_{min}$  до  $C_{max}$ , записать в табл. 6.3 показания приборов.

Таблица 6.3

Данные измерений					Результаты вычислений	
$C,$ мкФ	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$P,$ Вт	$\cos \varphi$

#### 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.6.5 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 письменные ответы на них по разделу 4;
- схему (рис.6.1 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. 6.1);
- схему (рис.6.3 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. 6.2);

– схему (рис.6.5), выражения для расчета величин  $\cos \varphi, P$  по измеренным значениям  $U, R_k, I_1, I_2, I_3$ , результаты вычисления этих величин (табл 6.3);

– графики зависимости величин  $U, I_1, I_2, I_3, \cos \varphi, P$  от емкости  $C$  конденсатора по образцу рис.6.7, построенные в масштабах по данным табл 6.3.

– анализ результатов и выводы;

– протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## Лабораторная работа № 7

### Измерение активной, реактивной и полной мощности, коэффициента мощности в цепи переменного синусоидального тока

#### Цель работы:

- научиться измерять активную, реактивную и полную мощности в цепи переменного синусоидального тока;
- изучить конструкцию и способы включения в цепь электродинамических и ферродинамических ваттметров.

#### 1. Краткие теоретические сведения

Измерение активной мощности цепи переменного тока низкой, и, в частности, промышленной частоты в большинстве случаев осуществляется электродинамическими или ферродинамическими ваттметрами. Конструкция измерительного механизма ваттметра электродинамической системы приведена на рис. 9.1.

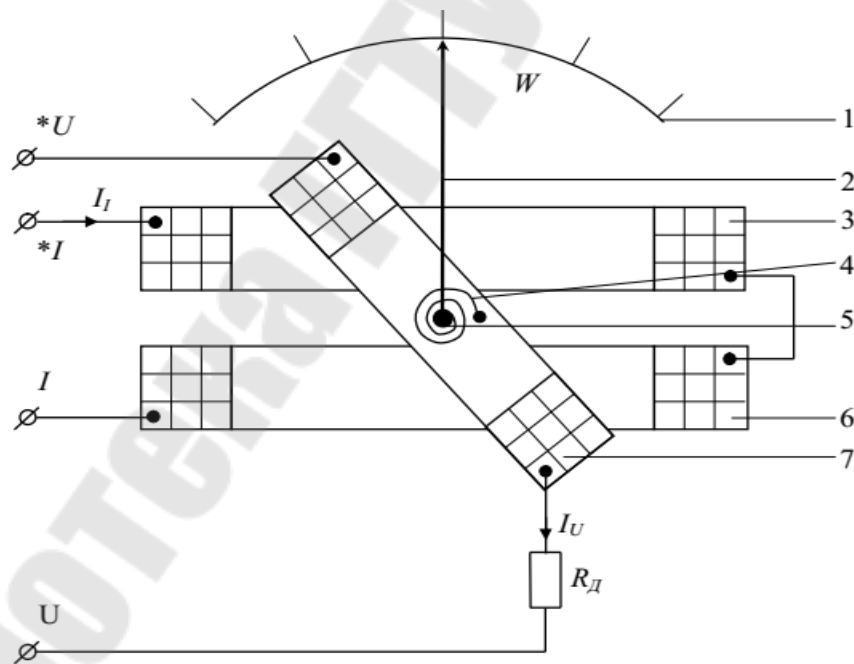


Рис. 7.1. Измерительный механизм электродинамического ваттметра

1 – шкала делений; 2 – указательная стрелка; 3 – первая часть токовой катушки; 4 – возвратная спираль; 5 – ось на которой крепится подвижная катушка напряжения и указательная стрелка; 6 – вторая часть токовой катушки; 7 – подвижная катушка напряжения

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей неподвижной (3, 6) и подвижной (7) катушек с токами  $I_I$  и  $I_U$ .

Неподвижная катушка обычно состоит из двух одинаковых частей (3, 6), разделенных воздушным зазором. Благодаря этому обеспечивается требуемая конфигурация магнитного поля и удобство расположения оси (5). Подвижная катушка (7), расположенная на оси на растяжках, может поворачиваться внутри неподвижной (3, 6). Неподвижная и подвижная катушки имеют круглую или прямоугольную форму. Они изготавливаются из медного или алюминиевого провода и обычно бывают бескаркасными. Электродинамический ваттметр имеет две катушки, одна из которых неподвижна, называемая последовательной катушкой или катушкой тока, она включается последовательно с приемником, активная мощность которого измеряется. Вторая катушка – подвижная, называемая параллельной катушкой или катушкой напряжения крепится на одной оси с указательной стрелкой прибора. Эта катушка вместе с добавочным сопротивлением  $R_d$  образует параллельную цепь ваттметра, которая включается параллельно приемнику.

Взаимодействие тока последовательной катушки  $I_I$  и тока параллельной катушки  $I_U$  создает вращающий момент, действующий на подвижную катушку. Мгновенное значение этого момента пропорционально мгновенным значениям токов  $I_I$  и  $I_U$ . Вращающий момент вызывает поворот подвижной части ваттметра на угол  $\alpha$ , при котором он уравнивается противодействующим моментом, создаваемым специальными пружинами (4). Противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружины. Отклонение стрелки прибора пропорционально активной мощности, которая определяется током  $I$  последовательной катушки ваттметра, напряжением на параллельной катушке  $U$  и сдвигом фаз  $\varphi$  между ними:  $P=IU\cos\varphi$ .

Изменение фазы тока в одной из обмоток ваттметра на угол  $180^\circ$ , т.е. на полпериода, изменяет направление вращающего момента, а значит, и направление отклонения стрелки ваттметра. Для правильного подключения ваттметра в схеме зажим последовательной катушки ваттметра, соединенный с источником питания обозначается звездочкой (\*I) и называется генераторным. Зажим параллельной цепи ваттметра, соединенный с токовой обмоткой также называется генераторным и обозначается звездочкой (\*U). Поэтому подключение ваттметра следует производить так, как показано на рис 7.2.

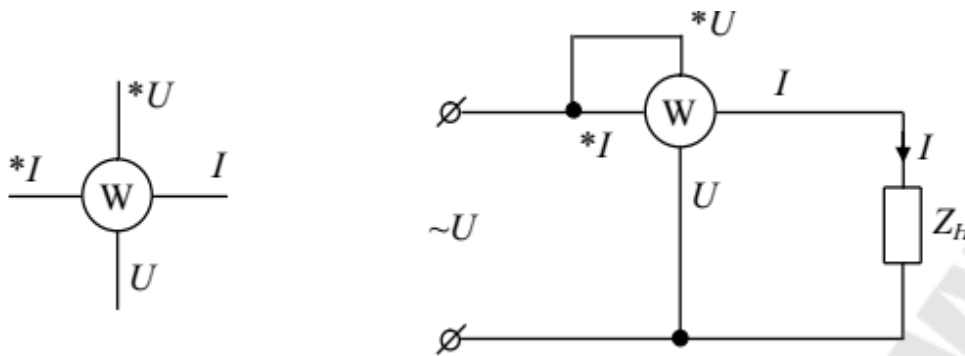


Рис 7.2. Схема подключения ваттметра к источнику питания и к нагрузке

Ферродинамические приборы отличаются от электродинамических наличием стального магнитопровода, уменьшающего магнитное сопротивление цепи, в которой замыкается магнитный поток. Вследствие этого, при малой намагничивающей силе получается большой магнитный поток, а следовательно, и большой вращающий момент. Кроме того, значительное магнитное поле в измерительном механизме снижает влияние на механизм внешних магнитных полей. Но ферромагнитный сердечник обладает свойством насыщения, что приводит к низкому классу точности прибора и узкому частотному диапазону, в котором обеспечивается корректность измерений.

Для увеличения диапазона допустимых токов и напряжений ваттметры изготавливаются многопредельными.

Определить показания многопредельного ваттметра можно по формуле

$$P = \frac{U_{\text{пр}} I_{\text{пр}}}{N_{\text{ш}}} N, \quad (7.1)$$

где  $P$  – активная мощность, Вт;  $U_{\text{пр}}$  – предел по напряжению, установленный органами управления прибора, В;  $I_{\text{пр}}$  – предел по току, установленный органами управления прибора, А;  $N_{\text{ш}}$  – число делений шкалы прибора;  $N$  – число делений, показанное стрелкой прибора.

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы изучить метод измерения активной мощности и конструкцию ваттметра.

2.2. По тем же источникам повторить понятия мгновенной мощности, активной мощности, реактивной мощности, полной мощности, коэффициента мощности.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

### 3. Лабораторное задание

3.1. Соберите электрическую цепь, согласно рис 7.3. Установите минимальное значение сопротивления резистора  $R_2$ . Установите величину напряжения на входе цепи, заданную преподавателем. Измерьте и запишите в табл. 7.1 и табл. 7.2 значения  $I$ ,  $U$ ,  $U_K$ ,  $U_{R2}$ ,  $P$ ,  $R_K$ .

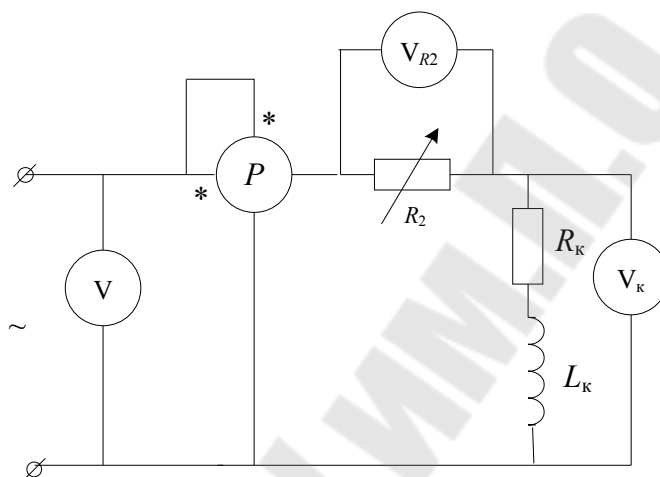


Рис. 7.3. Схема для измерения активной мощности в активно-индуктивном сопротивлении

Таблица 7.1

Данные измерений			Результаты вычислений		
$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$Q$ , ВАР	$S$ , ВА	$\cos\varphi$

Таблица 7.2

Данные измерений					Результаты вычислений						
$U$ , В	$I$ , А	$U_K$ , В	$U_{R2}$ , В	$R_K$ , Ом	$Z_K$ , Ом	$X_K$ , Ом	$R_2$ , Ом	$P$ , Вт	$Q$ , ВАР	$S$ , ВА	$\cos\varphi$



#### 4. Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл активной мощности?
2. Как рассчитать активную мощность при заданных действующих значениях тока в цепи, напряжения питания и угла сдвига фаз?
3. Как рассчитать активную мощность в цепи по действующему значению тока и сопротивлениям?
4. Каково определение полной мощности?
5. Каково определение коэффициента мощности?
6. Как связаны активная, реактивная и полная мощности?
7. Как изображается треугольник мощностей для индуктивного режима?
8. Как изображается треугольник мощностей для емкостного режима?
9. Каков принцип действия электродинамического ваттметра?
10. В чем отличие ферродинамического ваттметра?
11. Каковы достоинства и недостатки ферродинамического ваттметра?

#### 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.7.3), выражения для расчетов активной, реактивной, полной мощностей и коэффициента мощности, а также результаты расчетов и измерения и мощности в виде заполненных табл.7.1 и 7.2;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## Лабораторная работа № 8

### Определение емкости конденсатора, необходимого для повышения коэффициента мощности в цепи переменного синусоидального тока

**Цель работы:** ознакомиться с методом повышения коэффициента мощности цепи переменного синусоидального тока при помощи компенсирующего конденсатора.

#### 1. Краткие теоретические сведения

На производственных объектах большинство потребителей электрической энергии представляют собой электрические машины. Сопротивление обмоток электрических машин носит активно-индуктивный характер, причем активные сопротивления значительно меньше индуктивных. Из треугольника сопротивлений (рис 5.2 а) следует, что в этом случае угол сдвига фаз близок к  $90^\circ$ , а коэффициент мощности мал.

Одним из способов повышения экономичности и энергоэффективности такого оборудования является включение параллельно активно-индуктивной нагрузке конденсатора или батареи конденсаторов. Как следует из треугольников мощностей на рис 5.2. б и 5.4 б при неизменной активной мощности потребителя угол сдвига фаз при таком включении снижается. Такой способ называется компенсацией реактивной мощности.

Рассмотрим расчет емкости конденсатора по паспортным данным потребителя:  $P$  – активная мощность потребителя, Вт;  $U$  – напряжение питания потребителя, В;  $\omega$  – круговая частота питания, рад/с,  $\varphi_{п}$  – угол сдвига фаз потребителя, рад. Также задается угол сдвига фаз, который должен быть после компенсации  $\varphi$ , рад.

На рис. 8.1 показана схема замещения при компенсации реактивной мощности.

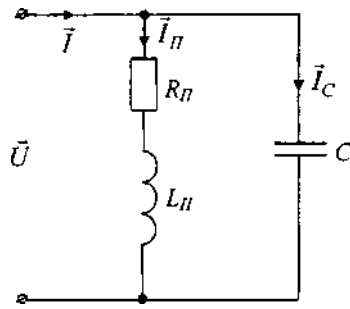


Рис 8.1. Схема замещения потребителя с подключенным компенсирующим конденсатором

Для анализа процессов в этой схеме будем рассматривать активную и реактивную составляющие токов, как показано на векторных диаграммах (рис 8.2).

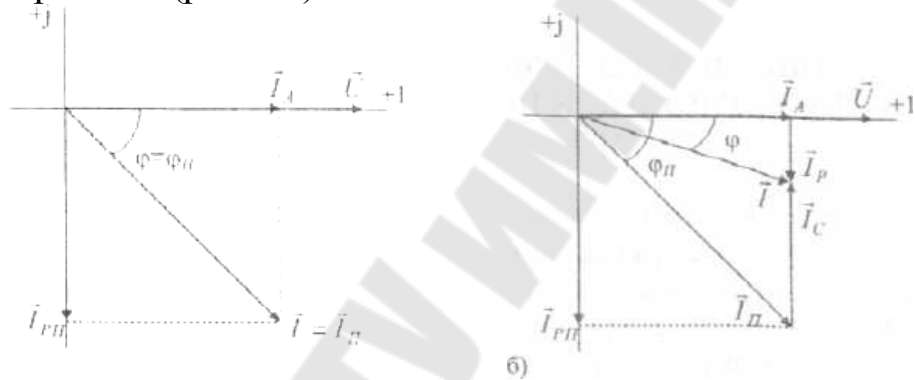


Рис. 8.2. Векторные диаграммы для анализа процесса компенсации реактивной мощности

При подключении конденсатора активная составляющая тока в неразветвленной части цепи остается неизменной и равной активной составляющей тока в цепи до подключения. Реактивная составляющая тока в неразветвленной части цепи определяется как разность реактивной составляющей тока потребителя до компенсации  $I_{P\Pi}$  и тока конденсатора  $I_C$

$$I_P = I_{P\Pi} - I_C.$$

Реактивные составляющие токов выражаются через активную составляющую тока потребителя

$$I_P = I_A \operatorname{tg}(\varphi), \quad I_{P\Pi} = I_A \operatorname{tg}(\varphi_{\Pi}).$$

Тогда  $I_C = I_A \operatorname{tg}(\varphi_{\Pi}) - I_A \operatorname{tg}(\varphi)$ .

Ток через конденсатор выражается по формуле  $I_C = \omega C U$ .

Активная составляющая тока потребителя  $I_A = \frac{P}{U}$ .

После подстановки значений составляющих токов и преобразований получается расчетная формула для емкости компенсирующего конденсатора

$$C = \frac{P}{\omega U^2} [\operatorname{tg}(\varphi_{\Pi}) - \operatorname{tg}(\varphi)] .$$

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы изучить метод компенсации реактивной мощности.

2.2. По тем же источникам повторить понятия мгновенной мощности, активной мощности, реактивной мощности, полной мощности, коэффициента мощности.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

## 3. Лабораторное задание

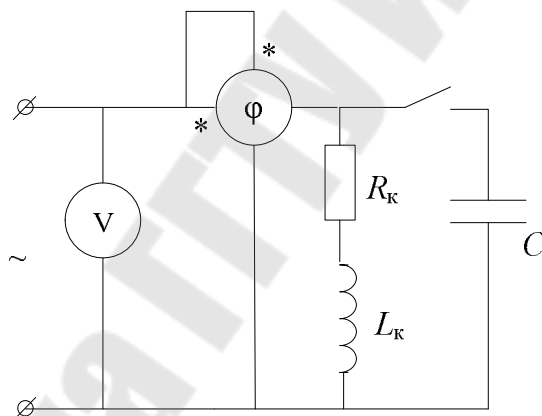


Рис 8.3. Схема для исследований компенсации реактивной мощности

3.1. Соберите электрическую цепь, согласно рис. 8.3. Отключите все конденсаторы батареи. Установите величину напряжения на входе цепи, заданную преподавателем. Измерьте угол сдвига фаз в цепи и напряжение питания. Подключая конденсаторы батареи, добейтесь снижения угла сдвига фаз в 1,5\ 2 раза и измерьте его. Запишите емкость батареи конденсаторов.

3.2. По расчетной формуле определите емкость компенсирующего конденсатора при измеренном напряжении питания, известному активному сопротивлению катушки измеренным углам сдвига фаз.

*Примечание.* Для измерения сдвига фаз в цепи используются приборы, называемые фазометрами. Подключение фазометра в цепь, назначение и обозначения его выводов аналогичны ваттметру.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Каково определение коэффициента мощности??
2. Для чего следует иметь коэффициент мощности, близкий к 1?
3. В чем физический смысл компенсации реактивной мощности?
4. Какие выгоды приносит компенсация реактивной мощности?
5. Как рассчитать емкость конденсатора, необходимую для компенсации реактивной мощности?
6. Как находится ток конденсатора в схеме (рис 8.1)?
7. Как комплекс тока представляется в виде активной и реактивной составляющих?
8. Как перейти от экспоненциальной формы комплекса тока к алгебраической?
9. Как изменяются активная и реактивная составляющие ток в цепи после подключения компенсирующего конденсатора?
10. Для чего служит фазометр?
11. Как подключить фазометр в цепь?

#### **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.8.4), выражения для расчетов компенсирующей емкости, а также результаты расчетов и измерения компенсирующей емкости;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## Лабораторная работа № 9

### Исследование разветвленной цепи синусоидального тока при смешанном соединении приемников

#### Цель работы:

- изучить символический метод расчета цепей переменного синусоидального тока и научиться применять его на практике;
- исследовать цепь переменного тока смешанного соединения.

### 1. Краткие теоретические сведения

#### 1.1. Основные понятия и величины.

Для разветвленных цепей переменного синусоидального тока законы Кирхгофа могут быть представлены в комплексной форме.

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0. \quad (9.1)$$

$$\sum_{k=1}^m \underline{U}_k = \sum_{k=1}^p \underline{E}_k. \quad (9.2)$$

Все методы расчета цепей постоянного тока основаны на законе Ома и законах Кирхгофа. Поэтому для расчета цепей переменного синусоидального тока допустимо применять все методы, которые использовались для расчета цепей постоянного тока. При этом ЭДС, токи, напряжения и сопротивления цепи представляются в комплексной форме. Полные комплексные сопротивления ветвей при этом выражаются как сумма активных и реактивных сопротивлений элементов в ветви.

$$\underline{Z} = \sum R + j(\sum X_L - \sum X_C). \quad (9.3)$$

Такой метод расчета цепей синусоидального тока получил название символического метода.

Из закона сохранения энергии следует, что для цепи синусоидального тока выполняется баланс активной мощности и баланс реактивной мощности: сумма всех отдаваемых источником мощностей (активных и реактивных) равна сумме потребляемых приемником мощностей (активной и реактивной).

Комплексная полная мощность источника питания определяется по выражению

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{U}_{\text{ист}} \underline{I}_{\text{ист}}^* = P_{\text{ист}} + jQ_{\text{ист}}, \quad (9.4)$$

где  $\underline{I}_{\text{ист}}^*$  – комплекс, сопряженный комплексу тока, протекающего через источник питания.

Активная мощность приемника определяется как сумма активных мощностей, рассеиваемых в активных сопротивлениях

$$P_{\text{пр}} = \sum I^2 R. \quad (9.5)$$

Реактивная мощность приемника определяется как алгебраическая сумма реактивных мощностей, накапливаемых в реактивных сопротивлениях

$$Q = \sum I^2 X_L - \sum I^2 X_C. \quad (9.6)$$

Баланс мощностей составляют для проверки расчета электрической цепи.

### 1.2. Пример расчета

Требуется рассчитать символическим методом токи в ветвях цепи на рис 9.1, а. Действующее значение напряжения питания  $U=200$  В. Сопротивление резистора  $R=100$  Ом. Емкостное сопротивление конденсатора  $X_C=100$  Ом, активное сопротивление катушки  $R_k = 100$  Ом, индуктивное –  $X_L = 100$  Ом.

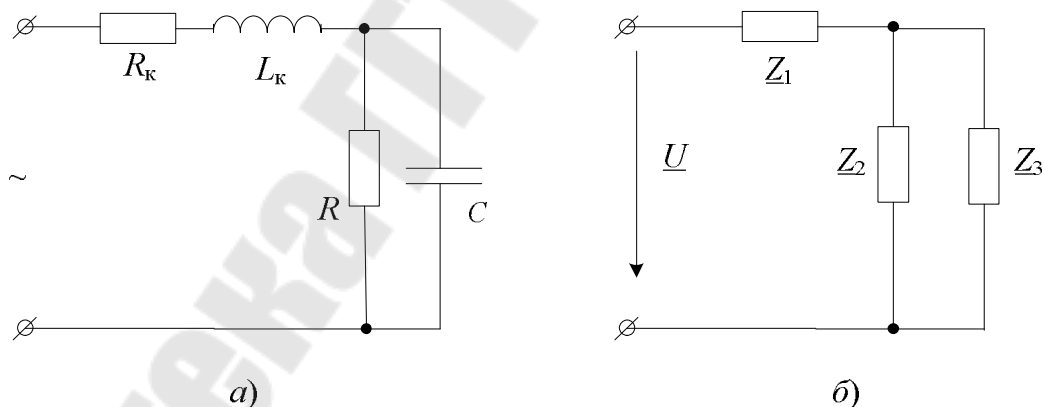


Рис. 9.1 Схема синусоидального тока смешанного соединения (а) и ее комплексная схема замещения (б)

Для выполнения расчета составляется комплексная схема замещения (рис. 9.1, б). Комплексное сопротивление простейшей цепи смешанного соединения равно

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

Комплексное сопротивление катушки равно

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_k = R_k + jX_k = 100 + j100 \text{ Ом.}$$

Комплексное сопротивление параллельно включенных резистора и конденсатора равно

$$\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{RC} = \frac{R(-jX_C)}{R - jX_C} = \frac{100(-j100)}{100 - j100} = \frac{-j100}{1-j} \frac{1+j}{1+j} = \frac{-j100}{2}(1+j) =$$

$$50 - j50 \text{ Ом.}$$

(Для деления комплексных чисел исходное выражение умножается и делится на число, комплексно сопряженное к делителю. Это является одним из возможных способов деления.)

Тогда комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \underline{Z}_k + \underline{Z}_{RC} = 100 + j100 + 50 - j50 = 150 + j50 \text{ Ом.}$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{200}{150 + j50} = \frac{200}{158,144e^{j18,4}} = 1,265e^{-j18,4} \text{ А.}$$

Сопротивление цепи имеет индуктивный характер, поэтому ток отстает от напряжения.

Токи в параллельно включенных ветвях рассчитываются по формулам разброса

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 &= \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \underline{I}_1 \frac{-jX_C}{R - jX_C} = 1,256e^{-j18,4} \frac{-j100}{100 - j100} = \\ &= 1,256e^{-j18,4} \frac{100e^{-j90}}{100\sqrt{2}e^{-j45}} = 0,894e^{-j63,44} \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_3 &= \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \underline{I}_1 \frac{R}{R - jX_C} = 1,256e^{-j18,4} \frac{100}{100 - j100} = \\ &= 1,256e^{-j18,4} \frac{100}{100\sqrt{2}e^{-j45}} = 0,894e^{-j26,57} \text{ А.} \end{aligned}$$

Для проверки расчета составляется баланс мощности

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{U} \underline{I}_1^* = 200 \cdot 1,256e^{j18,4} = 240 + j80 \text{ ВА.}$$

$$P_{\text{пр}} = I_1^2 R_k + I_2^2 R = (1,256)^2 100 + (0,894)^2 100 = 240 \text{ Вт.}$$

$$Q_{\text{пр}} = I_1^2 X_L - I_3^2 X_C = (1,256)^2 100 - (0,894)^2 100 = 80 \text{ ВАР.}$$

Очевидно, баланс мощностей выполняется, следовательно, расчет выполнен верно.



## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы усвоить основные понятия, определения и величины, символического метода. Изучить методику расчета токов в цепи синусоидального тока смешанного соединения.

2.2. Выполнить расчет цепи смешанного соединения (рис. 9.2). При этом параметры катушки принять по данным измерений предыдущих лабораторных работ. Сопротивление резистора  $R$  принять равным среднему значению регулируемого сопротивления  $R_2$ . Емкость конденсатора  $C$  принять по указанию преподавателя. Напряжение источника питания выбрать самостоятельно так, чтобы действующие значения токов в ветвях не превышали 100 мА.

*Примечание.* Если при расчете комплексное входное сопротивление цепи получается чисто активным, то следует изменить емкость конденсатора так, чтобы комплексное входное сопротивление цепи стало активно-реактивным. Резонансные режимы в этой работе не допускаются.

2.3. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

## 3. Лабораторное задание

Собрать электрическую цепь согласно схеме рис.9.2. После проверки преподавателем измерить токи в ветвях схемы. Занести их в табл. 9.1.

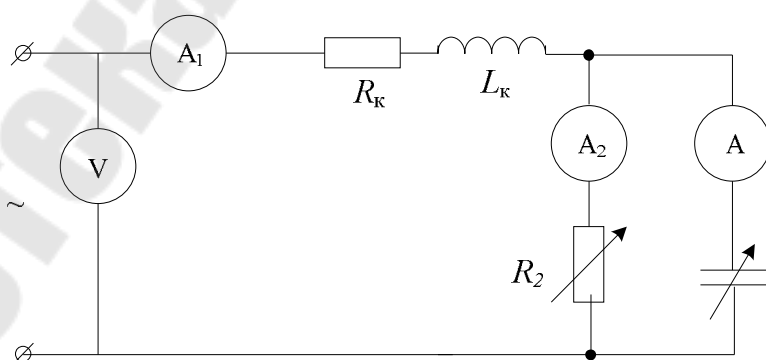


Рис. 9.2. Схема для проведения измерений токов в цепи синусоидального тока смешанного соединения

Таблица 9.1

Значение тока	$I_1$	$I_2$	$I_3$
	А		
Рассчитано			
Измерено			

#### 4. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Кирхгофа в символической форме.
2. Как вычислить комплексное сопротивление ветви схемы?
3. Как представляются величины, описывающие электрическую цепь синусоидального тока, при ее расчете символическим методом?
4. Почему для расчета цепей синусоидального тока применимы все методы расчета цепей постоянного тока?
5. Сформулируйте баланс мощностей для цепей синусоидального тока.
6. Как вычислить полную комплексную мощность источника питания?
7. Каков физический смысл активной и реактивной составляющих комплексной полной мощности источника питания?
8. как найти активную мощность приемника электрической энергии?
9. Как найти реактивную мощность приемника электрической энергии?
10. Поясните расчет электрической цепи на рис. 9.1.

#### 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.9.3) и результаты расчетов и измерения токов в виде заполненной табл.9.1;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## Лабораторная работа № 10

### Исследование трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников треугольником

#### Цель работы:

- исследовать трехфазную цепь «звезда-треугольник» при симметричной и несимметричной нагрузке фаз;
- измерить линейные и фазные токи;
- измерить 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  $120^\circ$ . Графики мгновенных значений ЭДС показаны на рис.10.1, а. Соответствующая векторная диаграмма представлена на рис.10.1, б.

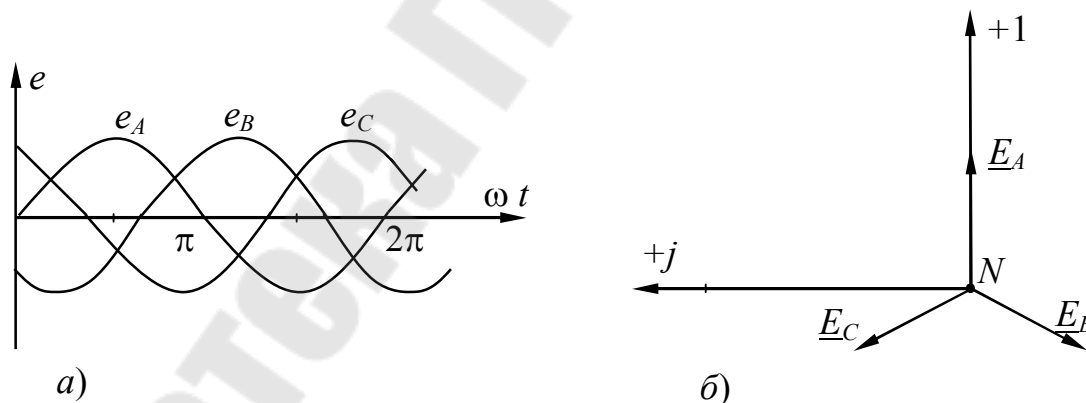


Рис.10.1. Графики мгновенных значений ЭДС (а) и векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС (б)

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

На рис.10.2 изображена трехфазная электрическая цепь при соединении генератора звездой (условное обозначение “Y”), а нагрузки

– треугольником (условное обозначение “ $\Delta$ ”). Такая схема соединения относится к трехпроводным.

Каждую из обмоток статора трехфазного генератора называют фазой, имеющей начало (точки  $A, B, C$ ) и концы (точки  $X, Y, Z$ ). При соединении обмоток статора звездой концы фаз объединяются в нейтральную точку  $N$ .

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.10.2) 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.

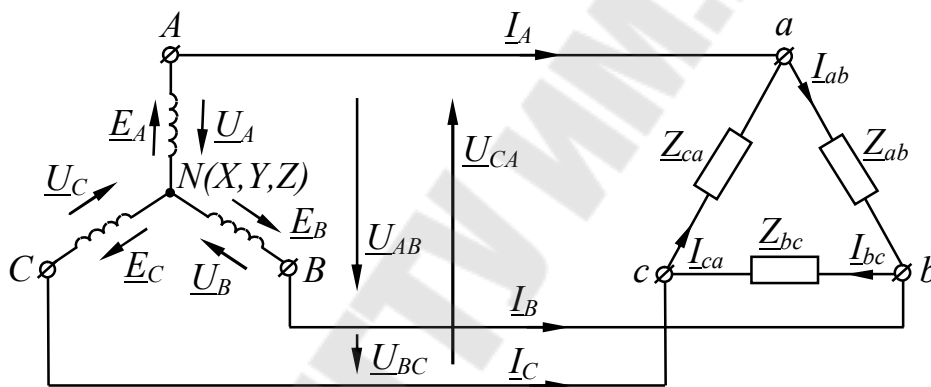


Рис.10.2. Схема трехфазной цепи при соединении “звезда-треугольник” – “ $\Upsilon$ - $\Delta$ ”

Если комплексные сопротивления фаз трехфазного приемника равны между собой ( $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z e^{j\varphi}$ ), 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.10.2 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.

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}. \quad (10.1)$$

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

На стороне генератора линейные и фазовые напряжения связаны соотношениями

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (10.2)$$

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

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}; \quad U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (10.3)$$

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

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}, \quad (10.4)$$

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

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

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}; \quad I_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (10.5)$$

## 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 форме

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}, \quad (10.6)$$

где комплексы действующих значений напряжений на зажимах приемника  $\underline{U}_{ab}$ ,  $\underline{U}_{bc}$  и  $\underline{U}_{ca}$  находятся по соотношениям (10.1).

В свою очередь, можно показать, что

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} e^{j30^\circ}, \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} e^{-j90^\circ}, \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} e^{j150^\circ}. \quad (10.7)$$

После определения фазовых токов, находятся комплексы действующих значений линейных токов по соотношениям (10.4)

### 1.3. Мощность, потребляемая трехфазной цепью при соединении звезда-треугольник.

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

$$P_{\text{пр}} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca}, \quad (10.8)$$

где  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ ,  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  и  $I_{ca}$  - действующие значения фазовых напряжений и токов;

$\varphi_{ab}$ ,  $\varphi_{bc}$ ,  $\varphi_{ca}$  - разности фаз между фазовым напряжением и фазовым током для каждой из фаз приемника.

Активная мощность, развиваемая трехфазным генератором

$$P_{\text{ист}} = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = P_A + P_B + P_C. \quad (10.9)$$

Аналогично рассчитываются реактивные мощности генератора и приемника для несимметричного приемника

$$Q_{\text{ист}} = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (10.10)$$

$$Q_{\text{пр}} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca} = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}. \quad (10.11)$$

Мощность трехфазной цепи может быть определена в комплексной форме

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_{\text{ист}} &= P_{\text{ист}} + j Q_{\text{ист}} = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^* \\ \underline{S}_{\text{пр}} &= P_{\text{пр}} + j Q_{\text{пр}} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* \end{aligned} \right\}. \quad (10.12)$$

При симметричном приемнике

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{пр}} &= 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi} \\ Q_{\text{пр}} &= 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi} \\ S_{\text{пр}} &= \sqrt{P_{\text{пр}}^2 + Q_{\text{пр}}^2} \end{aligned} \right\} \quad (10.13)$$

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы усвоить основные понятия, определения и величины, характеризующие процессы в трехфазной электрической цепи при соединении “звезда-треугольник”. Изучить методику расчета фазных токов нагрузки и линейных токов, расчета активной мощности.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

## 3. Лабораторное задание

3.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме рис.10.3. В фазах трехфазного приемника включить последовательно с резисторами ключи SA4, SA5, SA6. В линейных проводах для подключения амперметров использовать ключи SA1, SA2, SA3.

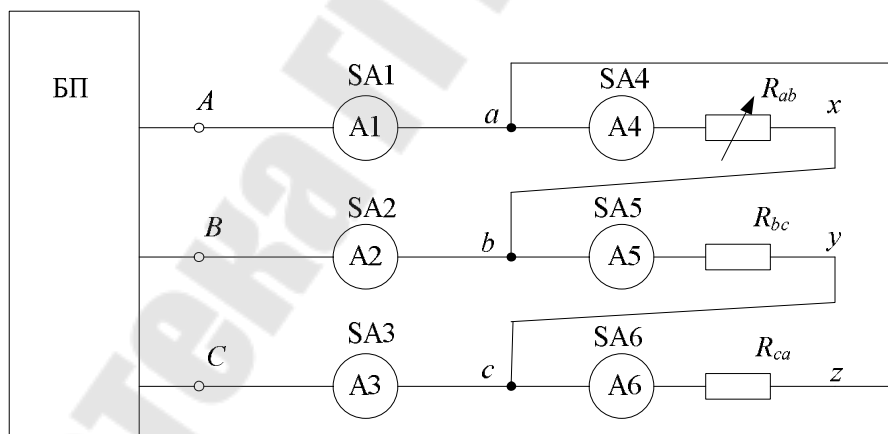


Рис.10.3. Схема электрической цепи звезда-треугольник для проведения измерений

3.2. Установить резистором  $R_2$  симметричную нагрузку. Измерить и записать в табл. 10.1 значения фазовых и линейных токов.

3.3. Установить  $R_2$  в положение, отвечающее максимуму электрического сопротивления (минимуму тока  $I_{ab}$ ), измерить и записать в таблицу 10.1 значения фазных и линейных токов.

3.4. Рассчитать активные мощности, потребляемые цепью. Определить активные мощности фаз по результатам измерений. Результаты занести в табл. 10.2.

Таблица 10.1

Нагрузка	Измерено						Вычислено					
	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
Симметричная												
Несимметричная												

Таблица 10.2

Нагрузка	Расчет мощности $P$ , Вт	Измерено		
		$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$P_3$ , Вт
Симметричная				
Несимметричная				

#### 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.

#### 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.10.3) и результаты расчетов и измерения токов и мощностей для различных нагрузок, в виде заполненных табл.10.1 и 10.2;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## Лабораторная работа № 11

### Исследование трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников звездой

#### Цель работы:

- исследовать трехфазную цепь «звезда-звезда» при симметричной и несимметричной нагрузке фаз;
- измерить линейные токи;
- измерить активную мощность, потребляемую трехфазной цепью.

#### 1. Краткие теоретические сведения

##### 1.1. Основные понятия и величины

На рис.11.1 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.

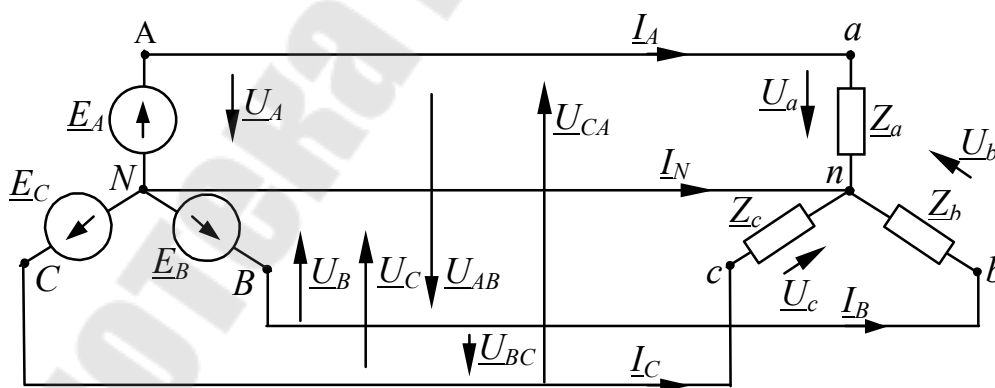


Рис.11.1. Схема трехфазной четырехпроводной цепи

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 фа-

зах генератора противоположны направлениям соответствующих ЭДС (рис.10.1). 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  $\underline{I}_ф$

$$\underline{I}_л = \underline{I}_ф \cdot \quad (11.1)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A - \underline{U}_B &= \underline{U}_{AB} \\ \underline{U}_B - \underline{U}_C &= \underline{U}_{BC} \\ \underline{U}_C - \underline{U}_A &= \underline{U}_{CA} \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

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

$$U_л = \sqrt{3} U_ф, \quad U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}. \quad (11.3)$$

### **1.2. Расчет трехфазной цепи при соединении “звезда-звезда”**

Если пренебречь сопротивлениями проводов, то фазные напряжения приемника в четырехпроводной цепи (рис. 11.1) равны фазным напряжениям источника (генератора или трансформатора)

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C. \quad (11.4)$$

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

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}, \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}, \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}, \quad (11.5)$$

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

$$\underline{I}_N = -(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c). \quad (11.6)$$

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.11.2 расчет цепи ничем не отличается от предыдущего случая, если приемник симметричный.

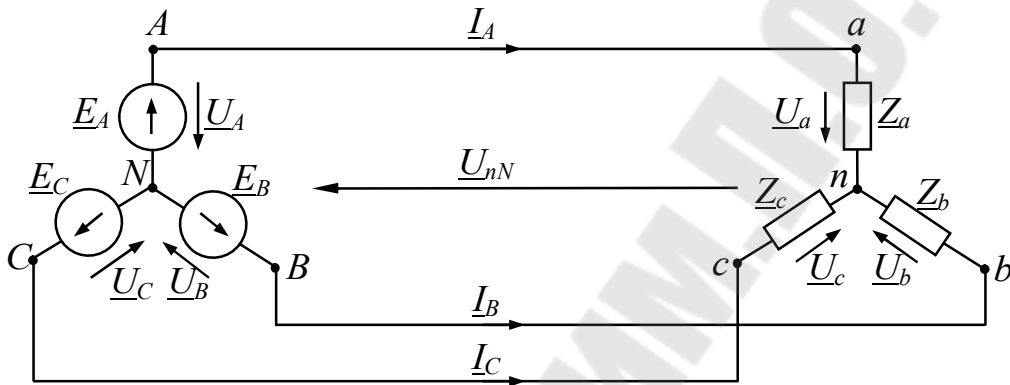


Рис.11.2. Схема трехфазной трехпроводной цепи при соединении фаз источника и приемника звездой

В случае несимметричной нагрузки ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ) 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.11.2) следует, что  $\underline{U}_{nN}$  можно определить по методу двух узлов

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{y}_a + \underline{E}_B \underline{y}_b + \underline{E}_C \underline{y}_c}{\underline{y}_a + \underline{y}_b + \underline{y}_c}, \quad (11.7)$$

$$\text{где } \underline{y}_a = \frac{1}{Z_a}; \quad \underline{y}_b = \frac{1}{Z_b}; \quad \underline{y}_c = \frac{1}{Z_c} \quad (11.8)$$

– 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

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}. \quad (11.9)$$

Токи в фазах далее определяются по соотношениям (11.5).

В схеме (рис.11.1) нейтральный провод выравнивает фазные напряжения приемника и, следовательно,  $\underline{U}_{nN}$  в этом случае равно нулю, даже для несимметричного приемника.

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы усвоить основные понятия, определения и величины, характеризующие процессы в трехфазных цепях при соединении источника и приемника по схеме “звезда-звезда”.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

## 3. Лабораторное задание

3.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме (рис.11.4). В фазу  $a$  включить резистор  $R_2$ . В линейных проводах включить ключи SA1, SA2, SA3 для подключения амперметра. В нейтральный провод включить ключ SA4 для подключения амперметра и коммутации нулевого провода.

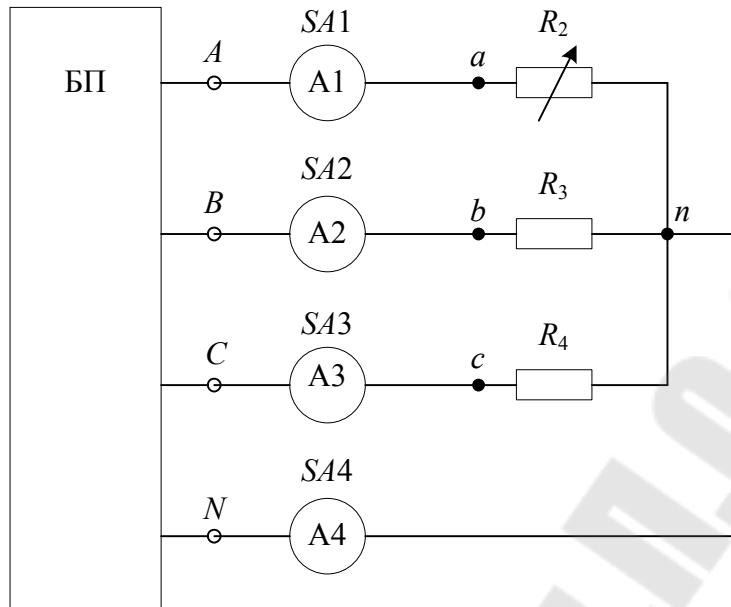


Рис.11.5. Схема электрической цепи звезда-звезда для проведения измерений

3.2. Установить симметричную нагрузку резистором  $R_2$ . Поочередно включая и отключая нейтральный провод согласно табл. 11.1, измерить и записать в табл. 11.1 значения токов и фазных напряжений нагрузки.

3.4. Установить несимметричный режим изменением сопротивления резистора  $R_2$ . Поочередно включая и отключая нейтральный провод согласно табл. 11.1, записать показания приборов в соответствующие строки табл.11.1.

Таблица 11.1

Нагрузка	Нейтральный провод	Измерено							Вычислено			
		$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_N$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_N$
		А	А	А	А	В	В	В	А	А	А	А
1 Симметричная	вкл.											
	откл.											
2 Несимметричная	вкл.											
	откл.											

3.3. Рассчитать активную мощность, потребляемую цепью. Вычислить активную мощность по данным измерений фазных токов нагрузки. Результат внести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Нагрузка	Расчет мощности $P$ , Вт	Измерено		
		$P_a$ , Вт	$P_b$ , Вт	$P_c$ , Вт
Симметричная				
Несимметричная с нейтральным проводом				
Несимметричная без нейтрального провода				

#### 4. Контрольные вопросы

1. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении “звезда-звезда” (нагрузка симметричная и несимметричная)?
2. Какое назначение имеет нейтральный провод? Почему в нейтральный провод не ставят предохранитель?
3. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке?
4. Как рассчитать ток нейтрального провода при несимметричной нагрузке?
5. Почему опасно короткое замыкание одной из фаз приемника в четырехпроводной цепи?
6. Как определить напряжение между нейтральными точками генератора и нагрузки?
7. Как рассчитать фазные напряжения нагрузки при несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода?
8. Чему равны фазные напряжения нагрузки при несимметричной нагрузке и наличии нейтрального провода?
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 письменные ответы на них по разделу 4;
- схему рис.11.5 и результаты измерений токов и напряжений для различных нагрузок в виде заполненных колонок “измерено” в табл. 11.1;
- результаты расчета мощности (табл. 11.2);
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.



## Лабораторная работа № 12

### Определение параметров схемы замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником

#### Цель работы:

- изучить схему замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником;
- научиться измерять параметры схемы замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником;
- освоить метод трех вольтметров измерения параметров пассивных элементов электрических цепей.

#### 1. Краткие теоретические сведения

##### *1.1. Схема замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником*

Для усиления магнитного поля в катушке индуктивности катушку снабжают сердечником из ферромагнитных материалов. Как правило, эти материалы являются магнитомягкими (в электромашиностроении).

Ферромагнитные материалы являются нелинейными, зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в них имеет характерный вид петли гистерезиса. Можно показать, что при приложении синусоидального напряжения к катушке с сердечником из такого материала поток магнитного поля в ней является синусоидальным и отстает по фазе от напряжения на  $90^\circ$ . Если сердечник катушки не насыщен, то ток в катушке пренебрежимо мало отличается от синусоидального. Поэтому допустимо для анализа цепей с такими катушками применять символический метод и векторные диаграммы.

Поток магнитного поля в катушке с ферромагнитным сердечником замыкается частью по сердечнику (основной магнитный поток), частью по воздуху вокруг обмоток (магнитный поток рассеяния). Основной магнитный поток создает намагничивание сердечника, а так-

же вихревые токи в сердечнике, вызывающие потери на нагрев сердечника, и потери на перемагничивание сердечника. По причине потерь ток в катушке отстает от напряжения. Удобно разложить ток на две составляющие (рис 12.1. а):  $I_a$  – ток, совпадающий по фазе с напряжением на катушке и намагничивающий ток  $I_\mu$ , который совпадает по фазе с магнитным потоком. В схеме замещения (рис 12.1 б) на основании рис 12.1 а ток  $I_a$  протекает через сопротивление  $R_M$ . Ток  $I_\mu$  протекает через нелинейную, в общем случае индуктивность. Эти сопротивление и индуктивность включены параллельно. Кроме того необходимо учесть, что магнитный поток рассеяния прямо пропорционален току в катушке (воздух – линейная среда) и коэффициент пропорциональности имеет смысл индуктивности рассеяния  $L_\sigma$ . Также необходимо учесть тепловые потери в витках обмотки катушки, которые зависят от омического сопротивления  $R_{обм}$ .

Таким образом, схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником имеет вид, представленный на рис 12.1, б.

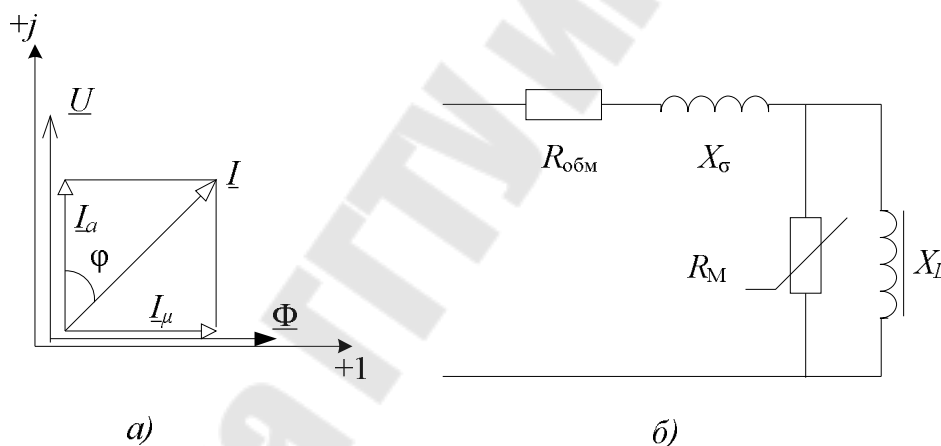


Рис 12.1. Векторная диаграмма (а) и схема замещения (б) катушки с ферромагнитным сердечником

### 1.2 Определение параметров катушки индуктивности методом трех вольтметров.

Для экспериментального определения параметров схемы замещения катушки индуктивности удобно применить метод трех вольтметров. Схема измерений метода представлена на рис 12.2, а; векторная диаграмма схемы – на рис 12.2, б.

Если измерены напряжения на катушке  $U_K$ , на вспомогательном резисторе  $U_R$ , и напряжение источника питания  $U$ , то параметры схемы замещения катушки индуктивности рассчитываются по формулам.

$$\text{Действующее значение тока } I = \frac{U_R}{R}$$

Полное сопротивление катушки  $Z = \frac{U}{I}$ .

Угол сдвига фаз между напряжением питания и током в цепи  $\varphi_K = 180^\circ - \psi$ , где  $\psi$  – вспомогательный угол, косинус которого находится по теореме косинусов из векторной диаграммы на рис 12.2, б.

$$\cos \psi = \frac{U^2 - (U_R^2 + U_K^2)}{-2U_R U_K}.$$

Тогда по рис. 5.2. а  $R_K = Z \cos \varphi_K$ ,  $X_{LK} = Z \sin \varphi_K$ .

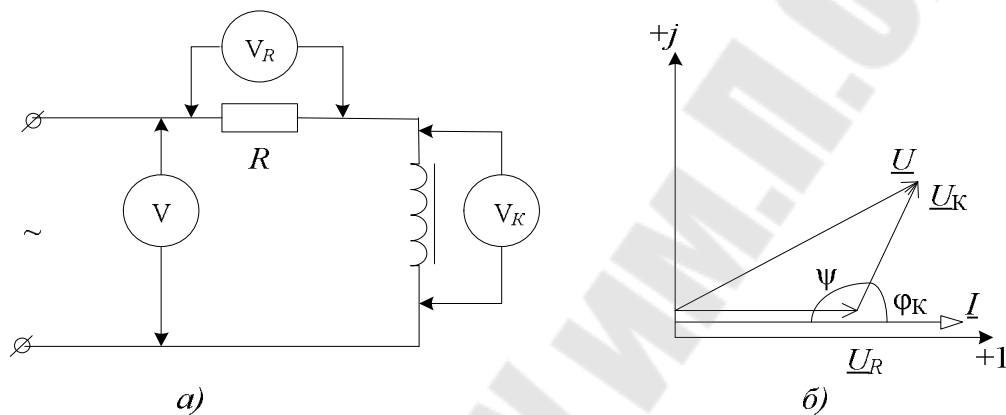


Рис. 12.2 Схема измерений (а) и векторная диаграмма (б) метода трех вольтметров

### 1.3. Методика измерения параметров схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником

В данной лабораторной работе используется катушка индуктивности с извлекаемым сердечником. Поэтому для измерения параметров схемы замещения необходимо.

Измерить активное и индуктивное сопротивление катушки без сердечника. Предполагается, что при этом определены активное сопротивление обмотки  $R_{обм}$  и индуктивное сопротивление рассеяния  $X_\sigma$ .

Вставить ферромагнитный сердечник в катушку и измерить активное сопротивление катушки  $R_{изм}$  и индуктивное сопротивление катушки  $X_{изм}$ . Предполагается, что в этом случае активное сопротивление катушки равно сумме активного сопротивления обмотки и сопротивления потерь в сердечнике  $R_C$ . Аналогично индуктивное сопротивление катушки равно сумме индуктивного сопротивления рассеяния и индуктивного сопротивления для основного магнитного потока  $X_\mu$ . Тогда  $R_C = R_{изм} - R_{обм}$ ;  $X_\mu = X_{изм} - X_\sigma$ .

Параметры схемы замещения выражаются через найденные сопротивления по известным в теории цепей формулам перехода от последовательной  $RL$  цепи к параллельной

$$R_M = \frac{R_C + X_\mu}{R_C} \quad X_L = \frac{R_C + X_\mu}{X_\mu}.$$

## 2. Задание, выполняемое при домашней подготовке

2.1. По конспекту лекций, рекомендуемой литературе и разделу 1 данной работы усвоить основные понятия, определения и величины, характеризующие процессы в катушках индуктивности с ферромагнитными сердечниками. Изучить схему замещения катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником. Изучить методику измерений методом трех вольтметров.

2.2. Заготовить отчет по требованиям раздела 5.

## 3. Лабораторное задание

3.1. Собрать схему измерения параметров катушки индуктивности по методу трех вольтметров. Сопротивление вспомогательного резистора установить по указанию преподавателя.

3.2. Измерить параметры катушки индуктивности: активное сопротивление обмотки  $R_{обм}$  и индуктивное сопротивление рассеяния  $X_\sigma$  без ферромагнитного сердечника.

3.3. Вставить сердечник в катушку и измерить параметры схемы замещения, описывающие процессы в сердечнике.

## 4. Контрольные вопросы

1. Какие материалы являются ферромагнитными?
2. Как выглядит петля гистерезиса магнитомягкого материала?
3. Что такое основная кривая намагничивания и вебер-амперная характеристика?
4. Какую форму имеет магнитный поток в катушке с ферромагнитным сердечником при приложении переменного синусоидального напряжения?
5. Почему для ненасыщенных катушек с ферромагнитным сердечником допустимо использовать символический метод расчета?

6. Что такое потери на вихревые токи в ферромагнитном сердечнике?
7. Что такое потери на перемагничивание ферромагнитного сердечника?
8. Поясните векторную диаграмму для тока в катушке с ферромагнитным сердечником
9. Как осуществить измерение параметров катушки индуктивности методом трех вольтметров?
10. Какие магнитные потоки выделяются в катушках с сердечниками?

### 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.12.2, а) и результаты измерений и расчетов параметров схемы замещения катушки
- схему замещения катушки с ферромагнитным сердечником;
- анализ результатов и выводы;
- протокол экспериментальных данных, подписанный преподавателем.

## **ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ**

1. Тиличенко, М. П. Электротехника, электрические машины и аппараты: Учебное пособие для вузов / М. П. Тиличенко, С. А. Грачев. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 342 с.
2. Тиличенко, М. П. Электротехника и электроника: Учебно-методическое пособие / М. П. Тиличенко, А. В. Козлов. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 437 с.
3. Чубриков, Л. Г. Электротехника, электрические машины и аппараты: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей / Л. Г. Чубриков. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 267 с.
4. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин. – М.: Академия, 2005. – 539 с.
5. Вольтинский, Б. А. Электротехника / Б. А. Вольтинский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 525 с.

## **ЛИТЕРАТУРА, ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ПРИ НАПИСАНИИ ПОСОБИЯ**

1. Изотов, П. П. Электротехника: Лабораторный практикум : в 4-х ч. / П. П. Изотов. – Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008.
2. Соленков, В. В. Линейные электрические цепи постоянного и однофазного синусоидального тока. Практикум / В. В. Соленков, А. В. Козлов, А. В. Бусленко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 139 с.
3. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
4. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники / П. В. Ермуратский [и др.]. Под. ред. А. В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1986. – 248 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Описание лабораторного стенда К4822-2

Лабораторный стенд по электротехнике К4822-2 состоит из лабораторного стола (ЛС), блока питания (БП), приборного штатива (ПШ), плат, находящихся в тумбе стола (ТС), измерительных приборов (вольтметра, амперметра), лабораторной катушки индуктивности и металлического сердечника к ней (см. рис. П1.1).

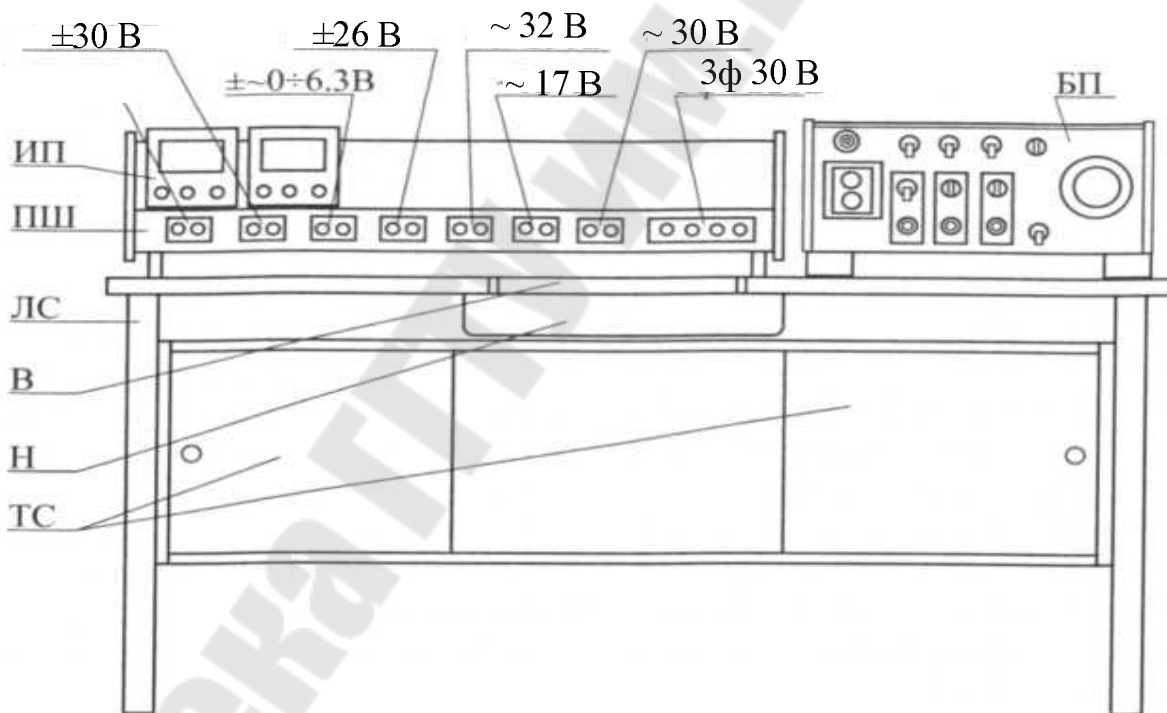


Рис П.1.1. Вид лабораторного стенда К4822-2

На крышке лабораторного стола находятся блок питания и приборный штатив, снизу которого находятся клеммы всех напряжений блока питания:

- два постоянных напряжения нерегулируемых 30 В и 6,3 В и регулируемое от 0 до 26 В;
- переменное напряжение регулируемое от 0 до 32 В;
- два переменных напряжения 17 В и 30 В;
- трехфазное напряжение  $U_{\phi} = 30$  В.

Крышка стола имеет съемный вкладыш (В), на место которого устанавливается плата для выполнения лабораторных работ.

На передней панели блока питания размещены тумблеры: В1; В2; В3; В4; В5, переключатели: П1; П2; П3, кнопки включения черная (Кн ВКЛ) и выключения красная (Кн ВЫКЛ), ручка лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), а также сигнальная лампочка (Л) (см. рис. П 1.2).

Для того чтобы на клеммах приборного штатива появилось необходимое напряжение, на передней панели блока питания включаются соответствующие, выбранному напряжению, тумблер или переключатель.

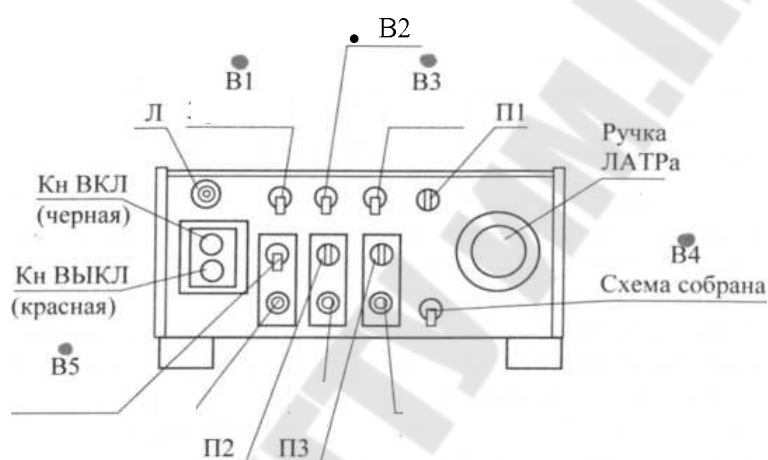


Рис. П.1.2. Эскиз передней панели блока питания

На рис. П.1.2 тумблеры В1- В5 (вниз) и переключатели П1 - П3 (в центральном положении) находятся в положении выключено. При этом ручка ЛАТРа должна быть выведена в крайнее правое положение (регулируемое напряжение равно 0).

При включении блока питания необходимо вначале проверить схему проводимой лабораторной работы, подключенную к клеммам блока питания.

Чтобы включить нерегулируемые напряжения:

- трехфазное напряжение (3ф~30В) необходимо поднять вверх тумблер В1;
- однофазное напряжение 30 В - поднять вверх тумблер В2;
- однофазное напряжение 17 В - поднять вверх тумблер В3.

Чтобы включить постоянное напряжение регулируемое от 0 до 26 В необходимо переключатель П1 поставить в крайнее левое положение. Для включения переменного напряжения регулируемое от



0 до 30 В - переключатель П1 в крайнее правое положение. Регулировка напряжения осуществляется ручкой ЛАТРа.

Нерегулируемый и регулируемый источники постоянного напряжения снабжены дополнительными выключателями, расположенными под штативом. Источник включен, если переключатель находится в правом положении. Это необходимо для выполнения лабораторной работы № 3.

МУЛЬТИМЕТР МУ - 68

Мультиметр предназначен для измерения: постоянного и переменного напряжения; постоянного и переменного тока; омического сопротивления; емкости; частоты. Также позволяет осуществлять проверку диодов, транзисторов, а также звуковую прозвонку (наличие соединения с малым сопротивлением) электрических цепей. Технические характеристики прибора приведены в табл. П.2.1.

Таблица П.2.1.

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Разрешающая способность	Точность
Постоянное напряжение (автоматический выбор диапазона)	326 тВ	0,1 тВ	$\pm 0,5\% \pm 2 \text{ Ц}$
	3,26 В	1 тВ	$\pm 0,3\% \pm 2 \text{ Ц}$
	32,6 В	10тВ	$\pm 0,3\% \pm 2 \text{ Ц}$
	326 В	0,1 В	$\pm 0,3\% \pm 2 \text{ Ц}$
	1000 В	1 В	$\pm 0,5\% \pm 2 \text{ Ц}$
	Входное сопротивление: 10 МОм.		
Переменное напряжение (автоматический выбор диапазона)	3,26 В	1 тВ	$\pm 0,8\% \pm 2 \text{ Ц}$
	32,6 В	10 тВ	$\pm 0,8\% \pm 2 \text{ Ц}$
	326 В	0,1 В	$\pm 0,8\% \pm 2 \text{ Ц}$
	750 В	1 В	$\pm 0,8\% \pm 2 \text{ Ц}$
	Входное сопротивление: 10 МОм. Диапазон рабочих частот: 40 - 400 Гц. Для диапазона 3,26 В: 40 - 200 Гц. Калибруется на действующее значение синусоидального сигнала.		
Постоянный ток (автоматический выбор диапазона) для мкА и мА)	326 мкА	0,1 мкА	$\pm 1,2\% \pm 3 \text{ Ц}$
	3,26 мА	1 мкА	$\pm 1,2\% \pm 3 \text{ Ц}$
	32,6 мА	10 мкА	$\pm 1,2\% \pm 3 \text{ Ц}$
	326 мА	0,1 мА	$\pm 1,2\% \pm 3 \text{ Ц}$
	10 А	10 мА	$\pm 2,0\% \pm 5 \text{ Ц}$
Защита от перегрузки: для диапазонов мкА и мА плавкий предохранитель 300 мА. Для диапазона 10А плавкий предохранитель 10А.			
Переменный ток (автоматический выбор диапазона) для мкА и мА)	326 мкА	0,1 мкА	$\pm 1,5\% \pm 5 \text{ Ц}$
	3,26 мА	1 мкА	$\pm 1,5\% \pm 5 \text{ Ц}$
	32,6 мА	10 мкА	$\pm 1,5\% \pm 5 \text{ Ц}$
	326 мА	0,1 мА	$\pm 1,5\% \pm 5 \text{ Ц}$
	10 А	10 мА	$\pm 3,0\% \pm 7 \text{ Ц}$

	Защита от перегрузки: для диапазонов мкА и mA плавкий предохранитель 300 mA. Для диапазона 10A плавкий предохранитель 10A. Диапазон рабочих частот: 40 - 400 Гц. Калибруется на действующее значение синусоидального сигнала.		
Частота (автоматический выбор диапазона)	32,6 КГц	10 Гц	$\pm 1,2\% \pm 3 \text{ Ц}$
	200 КГц	100 Гц	$\pm 2,5\% \pm 3 \text{ Ц}$
	Чувствительность; 200 тВ до 50 КГц и 1В от 50 КГц до 200 КГц.		
Емкость (ручной выбор диапазона)	326 нФ	0,1 нФ	$\pm 3,0\% \pm 5 \text{ Ц}$
	3,26 мкФ	10 нФ	$\pm 3,0\% \pm 5 \text{ Ц}$
Сопротивление (автоматический выбор пределов)	326 Ом	0,1 Ом	$\pm 0,8\% \pm 3 \text{ Ц}$
	3,26 КОм	1 Ом	$\pm 0,8\% \pm 1 \text{ Ц}$
	32,6 КОм	10 Ом	$\pm 0,8\% \pm 1 \text{ Ц}$
	326 КОм	100 Ом	$\pm 0,8\% \pm 1 \text{ Ц}$
	3,26 МОм	1 КОм	$\pm 0,8\% \pm 1 \text{ Ц}$
	32,6 МОм	10 КОм	$\pm 1,2\% \pm 2 \text{ Ц}$
	Максимальное напряжение подаваемое на резистор: 1,3 В		

### Устройство мультиметра

Мультиметр имеет цифровой дисплей с максимальным числом индикации 3260, аналоговую шкалу и автоматический выбор пределов. Измерения осуществляются при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Информация, отображаемая на дисплее:

- аналоговая шкала имеет 32 деления, обновляется 12,5 раз в секунду;
- цифровая информация отображается четырьмя цифрами и точкой между ними (максимальное число показываемая цифровым индикатором 3260), обновляется 2 раза в секунду;
- высвечивание цифровым индикатором символа: “ **OL** ” означает переполнение предела;
- “ — ” означает отрицательное напряжение или ток;
- вспомогательные знаки слева:

**АС** - включена функция измерения переменного напряжения или тока;

**nF**- включена функция измерения емкости на пределе 326 нФ;

- pF**- включена функция измерения емкости на пределе 3,26 мкФ;
  - hFE**- включена функция проверки транзисторов;
  - D-H**- включена фиксация цифровой информации;
  - R-H**- включен ручной выбор диапазона измерений;
  - вспомогательные знаки справа:
    - единицы измерения цифровой информации напряжения и тока:
    - mV**- милливольты, **V** - вольты, **μA** - микроамперы, **mA**- миллиамперы, **A** - амперы;
    - при включении функция измерения сопротивления: **Ω**- Омы, **KΩ** - килоомы, **MΩ**- мегаомы;
    - KГц** (килогерц) - включение функции измерения частоты;
    - изображение батарейки - индикация разряда батареи.
- Внешний вид панели представлен на рис.П2.1.

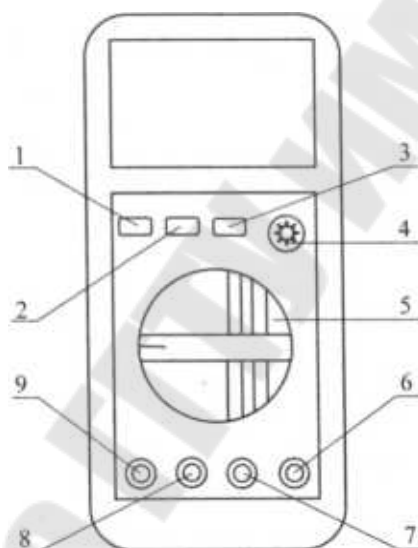


Рис. П.2.1. Внешний вид мультиметра

На рисунке обозначены:

- 1 - кнопка выбора пределов измерения (**RANGE**);
- 2 - кнопка фиксации цифровой информации (**DATA-H**);
- 3 - кнопка выбора постоянного или переменного сигнала;
- 4 - разъем для транзистора;
- 5 - переключатель функций;
- 6 - входной разъем **V/12/F**;
- 7 - входной разъем **COM**;
- 8 - входной разъем **mA/C<sub>x</sub>**;
- 9 - входной разъем **10A**.

При выбранной функции измерения силы тока нажатие кнопки 3

приведет к переключению мультиметра на измерение силы тока переменного сигнала. При этом на дисплее появится надпись AC. Повторное нажатие кнопки 3 приведет к переключению мультиметра на измерение силы тока постоянного сигнала. Надпись AC на дисплее пропадает.

### Указания мер безопасности

Для того, чтобы избежать поломки мультиметра, не прикладывайте входной сигнал, превышающий следующие пределы:

Функция	Разъемы	Входные пределы
Измерение постоянного и переменного напряжения	V/ $\Omega$ /F и COM	Постоянное напряжение 1000В, переменное напряжение 750В
Измерения частоты	V/ $\Omega$ /F и COM	Пост, или перемен, напряж. 250В
Измерение сопротивления	V/ $\Omega$ /F и COM	Пост, или перемен, напряж. 250В
Измерение постоянного и переменного тока	mA/C <sub>x</sub> и COM	Пост, или перемен, ток 300 mA
Измерение емкости	mA/C <sub>x</sub> и COM	Пост, или перемен, ток 300 mA
Измерение тока 10А	A и COM	Пост, или перемен, ток 10А

### Измерение переменного или постоянного напряжения

Подключите щупы в гнезда COM и V/ $\Omega$ /F. Установите переключатель функций в положение V~ (для измерения переменного напряжения) или V= (для измерения постоянного напряжения) и подсоедините щупы мультиметра к измеряемому напряжению. При измерении постоянного отрицательного напряжения появится знак минус на дисплее.

### Измерение сопротивления

Подключите щупы в гнезда COM и V/ $\Omega$ /F (ВНИМАНИЕ: полярность гнезда V/ $\Omega$ /F положительна +). Установите переключатель функций в положение  $\Omega$  и подсоедините щупы мультиметра к измеряемому сопротивлению.

ВНИМАНИЕ: Когда вход прибора не подсоединен к нагрузке, т.е. при разомкнутой цепи на дисплее высветится «OL» – перегрузка.

При проверке резистора в схеме убедитесь, что все напряжения отключены и все конденсаторы полностью разряжены.

### **Измерение частоты**

Подключите щупы в гнезда COM и V/ $\Omega$ /F. Установите переключатель функций в положение «KHz» и подсоедините щупы мультиметра к измеряемому источнику сигнала.

**ВНИМАНИЕ:** входное напряжение должно быть в пределах между 200 мВ и 10 В. Если напряжение больше 10 В, точность измерений не гарантируется.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Организация работы в лабораториях кафедры «Физика и электротехника» .....	3
Правила техники безопасности во время лабораторных занятий	4
Требования к подготовке, выполнению, оформлению и защите лабораторных работ.....	6
<i>Лабораторная работа № 1. Изучение лабораторного стенда .....</i>	11
<i>Лабораторная работа № 2. Исследование линейных цепей постоянного тока с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов .....</i>	16
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование сложных линейных цепей постоянного тока с несколькими источниками ЭДС .....</i>	23
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование нелинейных цепей постоянного тока .....</i>	30
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с последовательным соединением элементов .....</i>	37
<i>Лабораторная работа № 6. Исследование линейной однофазной электрической цепи синусоидального тока с параллельным соединением элементов .....</i>	51
<i>Лабораторная работа № 7. Измерение активной реактивной и полной мощности, коэффициента мощности в цепи переменного синусоидального тока.....</i>	61
<i>Лабораторная работа № 8. Определение емкости конденсатора, необходимого для повышения коэффициента мощности в цепи переменного синусоидального тока.....</i>	66
<i>Лабораторная работа № 9. Исследование разветвленной цепи синусоидального тока при смешанном соединении приемников...</i>	70
<i>Лабораторная работа № 10. Исследование трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников треугольником</i>	75
<i>Лабораторная работа № 11. Исследование трехфазной цепи синусоидального тока при соединении приемников звездой .....</i>	82
<i>Лабораторная работа № 12. Определение параметров схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником.....</i>	89
Литература.....	94
Приложение 1. Описание лабораторного стенда К4822-2.....	95
Приложение 2. Мультиметр МУ-68.....	98

**Комнатный Дмитрий Викторович  
Тиличенко Михаил Павлович**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

**Практикум  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности  
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 15.02.23.

Рег. № 77Е.

<http://www.gstu.by>