



Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Брестский государственный  
технический университет»  
Филиал Учреждения образования «Брестский государственный  
технический университет» Политехнический колледж

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель директора  
по учебной работе  
\_\_\_\_\_ С.В. Маркина  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения лабораторных работ  
для учащихся специальности  
2–53 01 31 «Техническое обслуживание технологического оборудования и средств  
робототехники в автоматизированном производстве (по направлениям)»

Разработала: М.О. Храпунова, преподаватель Филиала БрГТУ  
Политехнический колледж

Методические указания разработаны на основании учебной программы «Теоретические основы электротехники», утвержденной первым проректором БрГТУ 15.07.2022 г.

Методические указания обсуждены и рекомендованы к использованию на заседании цикловой комиссии радиотехнических предметов

Протокол № \_\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Председатель цикловой комиссии \_\_\_\_\_ Л.П. Бойко

## Общие указания по выполнению лабораторных работ

*Подготовка к лабораторным работам.* Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий и в течение определенного времени. Поэтому для выполнения лабораторных работ учащийся должен руководствоваться следующими положениями:

- 1) предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;
- 2) внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задача этой работы;
- 3) по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;
- 4) до проведения лабораторной работы подготовить в рабочей тетради соответствующие схемы, миллиметровку для построения графиков, таблицы наблюдений и расчетные формулы;
- 5) неподготовленные к работе учащиеся к выполнению лабораторной работы не допускаются.

*Выполнение лабораторных работ.* Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований:

1. Перед сборкой электрической цепи учащиеся должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его номинальными данными, а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы.

2. Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые последовательно, а затем – параллельно. Электрические цепи, включаемые параллельно, рекомендуется соединять проводами другого цвета.

3. После окончания сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя.

4. Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро.

5. Результаты измерений заносятся учащимся в свою рабочую тетрадь.

6. После выполнения отдельного этапа лабораторной работы результаты опыта вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи.

7. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только по разрешению преподавателя.

8. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок.

9. В течение всего времени занятий в лаборатории учащиеся обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

# Лабораторная работа № 1

## **Измерение параметров электрической цепи постоянного тока. Подбор измерительных приборов для выполнения измерений**

Цель: ознакомиться с техникой безопасности, с устройством стенда, с аппаратурой и электроизмерительными приборами, с условными обозначениями их на схемах, с правилами отсчета показаний; получить общие представления о сборке электрических цепей постоянного тока и измерении их параметров.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

### **Правила безопасного поведения при выполнении лабораторных работ**

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками и в некоторых случаях могут стать источниками опасности поражения электрическим током. Известно, что тело человека обладает электропроводностью и при соприкосновении с двумя неизолированными элементами установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникший вследствие этого в теле человека электрический ток может вызвать ожог кожи или нанести тяжелые поражения нервной, дыхательной и сердечной системам человека. Поэтому при выполнении лабораторных работ учащиеся должны помнить о возможности поражения электрическим током и соблюдать следующие правила техники безопасности.

#### **1 Общие положения**

1. К выполнению лабораторной работы допускаются учащиеся, прошедшие обучение требованиям безопасного поведения.

2. Пребывание учащихся в помещении лаборатории допускается только в присутствии преподавателя.

3. При проведении занятий учащиеся обязаны:

- использовать оборудование кабинета только с разрешения и по команде преподавателя;

- соблюдать правила внутреннего распорядка и требования преподавателя;

- соблюдать правила личной гигиены, содержать в чистоте свое рабочее место.

#### **2 Выполнение требований безопасности перед началом работы**

1. Подготовить для безопасной работы рабочее место, убрать посторонние предметы.

2. Проверить отсутствие внешних повреждений у лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, наличие и исправность контрольных, измерительных и сигнальных приборов, тумблеров, переключателей и т.п.

3. Убедиться в целостности крышек электророзеток и выключателей, электровилки и подводящего электрокабеля.

4. Убедиться в наличии и целостности заземляющего проводника корпуса электроустановки.

5. До включения лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры в сеть необходимо убедиться в соответствии положения переключателя сетевого напряжения его номинальной величине, а также в исправности предохранителей (при необходимости).

6. Внимательно изучить содержание и порядок работы, а также безопасные приемы ее выполнения.

### **3 Выполнение требований безопасности во время работы**

1. Перед включением лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры в электрическую сеть, при необходимости, встать на диэлектрический коврик (если покрытие пола выполнено из токопроводящего материала).

2. Не включать лабораторное оборудование и контрольно-измерительную аппаратуру в электрическую сеть мокрыми и влажными руками.

3. Соблюдать правила эксплуатации лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, не подвергать ее механическим ударам, не допускать падений.

4. Следить за исправной работой лабораторного оборудования, целостностью изоляции и заземления.

5. Не разрешается работать на лабораторном оборудовании в случае его неисправности, искрения, нарушения изоляции и заземления.

6. При измерении напряжений и токов измерительные приборы присоединяются проводниками с надежной изоляцией, снабженными одно-, двухполюсными вилками. Присоединять вилки (щуп) к схеме следует одной рукой, причем вторая рука не должна касаться шасси, корпуса прибора и других электропроводящих предметов. Особую осторожность следует соблюдать при работе с печатными схемами, для которых характерны малые расстояния между соседними проводниками печатной платы.

7. Замена деталей, а также измерение сопротивлений в схемах лабораторного оборудования следует производить только после выключения этих схем и разряда конденсаторов с помощью изолированного проводника.

8. При необходимости настройки или регулировки лабораторного оборудования (подстройка контуров, регулировка подстроечных конденсаторов или резисторов и т.п.) во включенном состоянии пользуются инструментом с надежной изоляцией.

9. При работе с осциллографами и телевизорами необходимо с особой осторожностью обращаться с электронно-лучевой трубкой. Недопустимы удары по трубке или попадание на нее расплавленного припоя, так как это может вызвать взрыв трубки.

10. Запрещается включение без нагрузки выпрямителей, так как в этом случае, электролитические конденсаторы фильтра заметно нагреваются, что может привести его к взрыву.

11. При перегреве трансформаторов, появлении запаха гари, искрении внутри баллонов радиоламп или разогревании их анодов радиоустройство немедленно выключить.

#### **4 Выполнение требований безопасности по окончании работы**

1. Отключить лабораторное оборудование и контрольно-измерительную аппаратуру от электрической сети. При отключении лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры от электрической сети не дергать за электрический шнур (кабель).

2. Привести в порядок рабочее место.

#### **5 Выполнение требований безопасности в аварийных ситуациях**

1. При неисправности лабораторного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры прекратить работу и выключить электропитание. Работу, продолжать только после устранения неисправности и по команде преподавателя.

2. При поражении электрическим током немедленно отключить лабораторное оборудование, оказать пострадавшему первую медицинскую помощь, сообщить об этом преподавателю.

### **Теоретические сведения**

Для того чтобы получить электрический ток, нужно создать электрическую цепь. Электрическая цепь представляет собой совокупность отдельных компонентов, соединенных между собой определенным образом, и предназначена для протекания электрического тока. В состав цепи входят источники электрической энергии, потребители, соединительные провода, аппараты управления, защиты и сигнализации, электроизмерительные приборы, преобразующие устройства и т.д. Все элементы электрической цепи имеют условные обозначения на схемах.

Электрические цепи различают: по назначению; типу элементов; числу зажимов или полюсов; роду тока.

Электрические цепи могут быть неразветвленными и разветвленными. Узлом называют такую точку электрической цепи, где соединяются более двух проводников. Ветвью называют участок цепи, заключенный между двумя узлами, на протяжении которого сила тока имеет одно и то же значение.

Электрические цепи обязательно содержат источники электрической энергии. Часто на схемах сами источники не изображаются, но обозначаются их клеммы, от которых питается цепь.

Городская электрическая сеть имеет переменное напряжение 127 или 220 В и не всегда пригодна для нормальной работы исследуемой цепи, поэтому иногда применяют регуляторы напряжения. Обычно это лабораторный автотрансформатор (ЛАТР). Перемещая движок по его обмотке, можно изменять выходное напряжение от 0 до 220 В (рисунок 1).

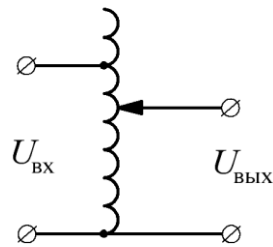


Рисунок 1 – ЛАТР

Если в лабораторных условиях требуется постоянное напряжение, то можно использовать аккумуляторы или выпрямители. В последнем случае можно получить постоянное регулируемое напряжение, если применить ЛАТР.

Для лабораторных работ применяют также трехфазную систему напряжений.

В качестве потребителей электрической энергии можно использовать лампы накаливания и реостаты, в которых электрическая энергия переходит в световую и тепловую. Сопротивление реостата можно регулировать от нуля до максимума при помощи движка. На табличке каждого реостата указаны номинальное сопротивление и номинальная сила тока. Следует иметь в виду, что действительное значение сопротивления может отличаться на 10–20 % от номинального в обе стороны. Номинальная мощность лампы накаливания, указанная на цоколе лампы, также отличается от номинальной.

Из ламп накаливания можно составить реостат, если их соединить параллельно. Чем больше ламп в таком реостате, тем меньше его сопротивление. Очевидно, что регулирование сопротивления возможно только ступенчатое, что является большим недостатком ламповых реостатов.

Конденсаторы соединяют в батарею параллельно и применяют в качестве нагрузки. Чем больше конденсаторов в батарее, тем больше ее емкость.










Весьма важным потребителем является катушка индуктивности. Индуктивность катушки можно изменять, перемещая катушку относительно ферромагнитного сердечника. Чем меньше витков в катушке и чем дальше она находится от сердечника, тем меньше индуктивность.

Для защиты от перегрузок и от коротких замыканий применяются автоматические выключатели или плавкие предохранители (в схемах лабораторных работ они, как правило, не указываются). Они разрывают цепь за сотые доли секунды после возникновения короткого замыкания. За это время элементы электрической цепи еще не успевают перегреться.

Существует множество электроизмерительных приборов, которые помогают контролировать и исследовать работу электрических цепей. В учебных лабораториях применяют лишь некоторые из них: амперметры, вольтметры, ваттметры и др. Измерительные приборы бывают щитовые и переносные, для измерения на постоянном и переменном токе. Приборы могут быть одно- и многопредельными, иметь различные конструктивные особенности.

По способу преобразования электромагнитной энергии в механическую приборы делят на несколько систем. Основные системы и их условные обозначения на шкалах приборов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условные обозначения на шкалах приборов (ГОСТ 23217-78)

Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Логометр электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Ток постоянный	—
Ток переменный (однофазный)	~
Ток постоянный и переменный	—~
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)	≈
Прибор применять при вертикальном положении шкалы	⊥
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	┌
Класс точности прибора, например 1,5	1,5 1,5 (1,5)
Напряжение испытательное, например 2 кВ	☆
Генераторный зажим	✱
Зажим, соединенный с корпусом	⊥
Зажим для заземления	⊥



## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со всеми приборами стенда. Записать технические характеристики приборов.

2. Ознакомиться с аппаратами стенда, записать их технические характеристики. Цепь не включать. Измерить ЭДС всех источников.

3. Собрать цепь (рисунок 2). Определить цену деления используемых приборов.

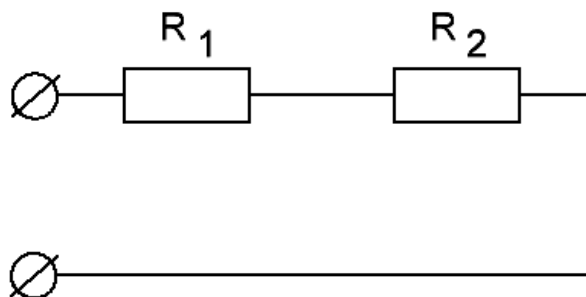


Рисунок 2 – Схема 1

4. Собрать цепь (рисунок 3). Определить цену деления используемых приборов.

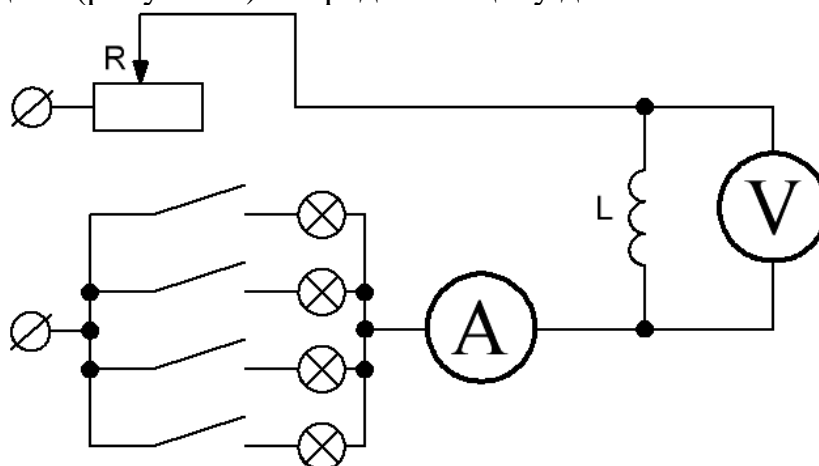


Рисунок 3 – Схема 2

5. Собрать цепь (рисунок 4). Определить цену деления используемых приборов.

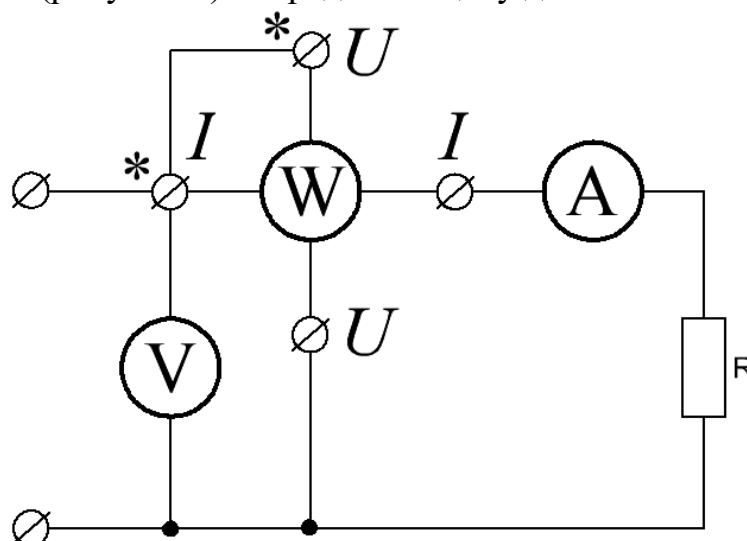


Рисунок 4 – Схема 3

6. Составить отчет по результатам выполненной работы.

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Схемы экспериментов.
4. Таблица с результатами.
5. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Укажите, какие требования по ТБ необходимо соблюдать.
2. Перечислите средства защиты, которые используются в лабораторном оборудовании.
3. Опишите принцип действия плавкого предохранителя.
4. Укажите, из каких элементов состоит электрическая цепь и каково их назначение.
5. Приведите порядок сборки электрической цепи.
6. Назовите, какие системы электроизмерительных приборов Вы знаете.
7. Объясните, как определить показания прибора при данном пределе измерений.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование режимов работы электрической цепи и ее элементов

Цель: исследовать режимы работы неразветвленной электрической цепи с переменным сопротивлением приёмника энергии и её элементов; проанализировать соотношение между ЭДС источника электрической энергии и напряжением на его зажимах.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Сила тока в цепи обратно пропорциональна сопротивлению:

$$I = \frac{E}{R + r}. \quad (1)$$

При изменении сопротивления нагрузки от 0 до  $\infty$  можно получить режимы: короткого замыкания, рабочий, холостого хода.

Короткое замыкание получим, если замкнем цепь накоротко или установим сопротивление нагрузки равным нулю. В цепи возникает наибольший ток (ток короткого замыкания):

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{E}{r + 0} = \frac{E}{r}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{к.з.}}$  – ток короткого замыкания;

$E$  – ЭДС источника питания;

$r$  – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Холостой ход можно получить, разомкнув цепь, при этом ток в цепи будет отсутствовать:

$$I_{\text{х.х.}} = \frac{E}{r + \infty} = 0, \quad (3)$$

где  $I_{\text{х.х.}}$  – ток холостого хода.

Все остальные значения сопротивления нагрузки соответствуют рабочему режиму.

Падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника ЭДС:

$$U_r = I \cdot r. \quad (4)$$

Падение напряжения на сопротивлении нагрузки можно определить по формуле:

$$U_R = E - I \cdot r = I \cdot R. \quad (5)$$

Мощность внутреннего сопротивления источника ЭДС пропорциональна квадрату силы тока:

$$P_r = I^2 \cdot r, \quad (6)$$

мощность нагрузки:

$$P_R = U_R \cdot I = P - P_r, \quad (7)$$

где  $P$  – полная мощность цепи.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{P_R}{P_R + P_r}. \quad (8)$$

### Порядок выполнения работы

1. Собрать простую электрическую цепь, приведенную на рисунке 1.

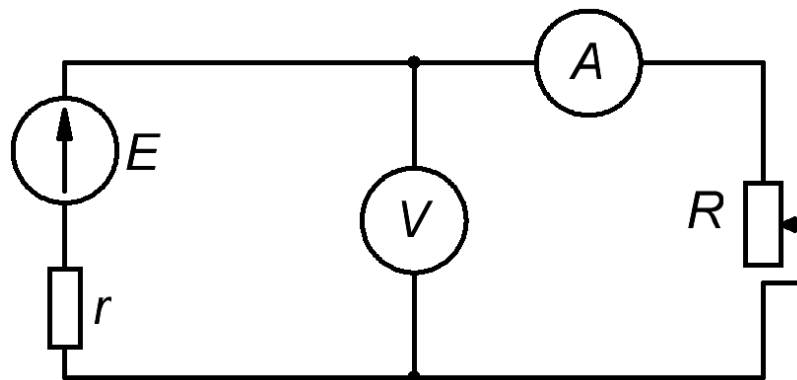


Рисунок 1 – Электрическая цепь

2. Выставить на источнике ЭДС значение, заданное преподавателем.
3. Снять зависимости напряжения на зажимах источника  $U$  от тока в цепи при изменении сопротивления нагрузки от  $\infty$  до 0, при постоянном напряжении источника. Значение  $r$  принять равным 0,1 Ом. Занести измеренные значения в таблицу 1.
4. Рассчитать величины мощностей источника:  $P_u = E \cdot I$ , приемника:  $P_n = I^2 \cdot R$ , КПД:  $\eta = \frac{P_n}{P_u}$  для каждого случая и занести их значения в таблицу 1.
5. По данным измерений построить зависимости  $U$ ,  $P_u$ ,  $P_n$ ,  $\eta$  от тока в цепи.

**Таблица 1**

Измеренные величины								
$R$ , Ом	$\infty$							0
$U$ , В								
$I$ , А								
Рассчитанные величины								
$P_u$ , Вт								
$P_n$ , Вт								
$\eta$								

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Принципиальная схема эксперимента.
3. Таблица с результатами измерений и вычислений.
4. Графики зависимостей  $U$ ,  $P_u$ ,  $P_n$ ,  $\eta$  от тока через нагрузку.
5. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Объясните, почему схему замещения изображают в виде двух резисторов: регулируемого и нерегулируемого.
2. Покажите, как изменяется сила тока при увеличении сопротивления.
3. Объясните, как изменяются значения напряжения, мощности и КПД при увеличении силы тока.
4. Приведите, условия получения максимальной мощности и максимального КПД.
5. Перечислите режимы работы электрической цепи и объясните, чем они характерны.

## Лабораторная работа № 3

### Исследование электрических цепей при последовательном и параллельном соединении сопротивлений

Цель: проверка на опыте особенностей последовательного и параллельного соединения сопротивлений.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

На практике производят расчет цепей с различными схемами соединения приемников. Если приемники соединены так, что по ним проходит один и тот же ток, то такое соединение приемников называется *последовательным* (рисунок 1). Следовательно, ток на отдельных участках последовательной цепи имеет одинаковое значение:  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ . Сумма падений напряжений на отдельных участках равна напряжению всей цепи:  $U = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + \dots + I_n \cdot R_n = I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$ . Напряжение цепи можно представить как  $U = I \cdot R_{\text{ЭКВ}}$ , где  $R_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентное (общее) сопротивление всей цепи. Следовательно,  $I \cdot R_{\text{ЭКВ}} = I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$ . Сократив обе части равенства на  $I$ , получим  $R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ . Общее сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных резисторов, равно сумме сопротивлений этих резисторов.

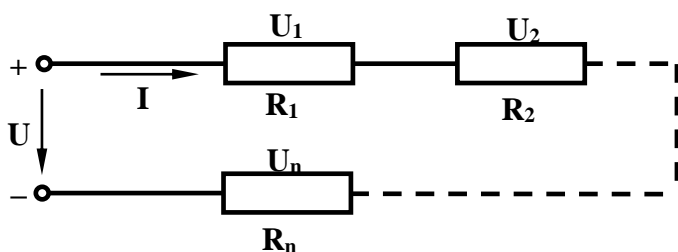


Рисунок 1 – Последовательное соединение резисторов

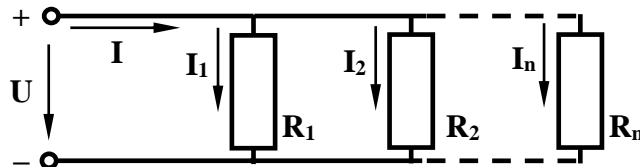


Рисунок 2 – Параллельное соединение резисторов

*Параллельным* называется такое соединение приемников, при котором соединяются между собой как условные начала приемников, так и их концы (рисунок 2). Для параллельного соединения характерно одно и то же напряжение на выводах всех приемников:  $U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$ . Согласно первому закону Кирхгофа,  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ , а согласно закону Ома можно записать  $I = \frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}}$ ;  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ;  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ; ...;  $I_n = \frac{U}{R_n}$ . Тогда  $\frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$ ;

Сокращая обе части равенства на  $U$ , получаем формулу подсчета эквивалентной (общей) проводимости:  $\frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$  или  $G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$ .

## Порядок выполнения работы

### Исследование цепи при последовательном соединении резисторов

1. Собрать электрическую схему рисунок 3. С помощью амперметра измерить ток в цепи, с помощью вольтметра – падение напряжений на отдельных ее участках для двух положений движков реостатов.

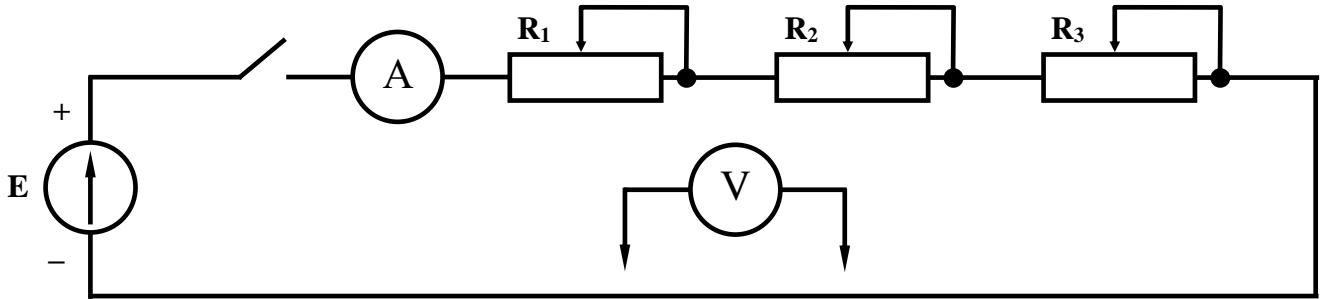


Рисунок 3 – Схема для исследования цепи с последовательным соединением резисторов

2. Используя данные наблюдений, вычислить:

$$R_{\text{экв}} = \frac{U_{\text{общ}}}{I}, \quad R_1 = \frac{U_1}{I}, \quad R_2 = \frac{U_2}{I}, \quad R_3 = \frac{U_3}{I},$$

$$R'_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3, \quad U'_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3$$

$$P_1 = U_1 \cdot I = I^2 \cdot R_1 = \frac{U_1^2}{R_1}, \quad P_2 = U_2 \cdot I = I^2 \cdot R_2 = \frac{U_2^2}{R_2}, \quad \text{и т.д.}$$

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R_{\text{экв}} = \frac{U^2}{R_{\text{экв}}}$$

3. Данные наблюдений и результаты вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер опыта	Данные наблюдений					Результаты вычислений										
	U <sub>общ</sub> , В	U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В	I, А	R <sub>экв</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R' <sub>экв</sub> , Ом	U' <sub>общ</sub> , В	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	P <sub>3</sub> , Вт	P, Вт	

### Исследование цепи при параллельном соединении резисторов

1. Собрать электрическую схему рисунок 4. Измерить токи и напряжения для двух положений движков реостатов.

2. Используя данные наблюдений, вычислить:

$$R_{\text{экв}} = \frac{U_{\text{общ}}}{I_{\text{общ}}}, \quad R_1 = \frac{U_{\text{общ}}}{I_1}, \quad R_2 = \frac{U_{\text{общ}}}{I_2}, \quad R_3 = \frac{U_{\text{общ}}}{I_3},$$

$$G_1 = \frac{1}{R_1}, \quad G_2 = \frac{1}{R_2}, \quad G_3 = \frac{1}{R_3}, \quad G_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}}, \quad G'_{\text{ЭКВ}} = G_1 + G_2 + G_3.$$

$$P_1 = U \cdot I_1 = I_1^2 \cdot R_1 = \frac{U^2}{R_1} = U_1^2 \cdot G_1, \quad P_2 = U \cdot I_2 = I_2^2 \cdot R_2 = \frac{U^2}{R_2} = U_2^2 \cdot G_2 \text{ и т.д.}$$

3. Данные наблюдений и результаты вычислений занести в таблицу 2.

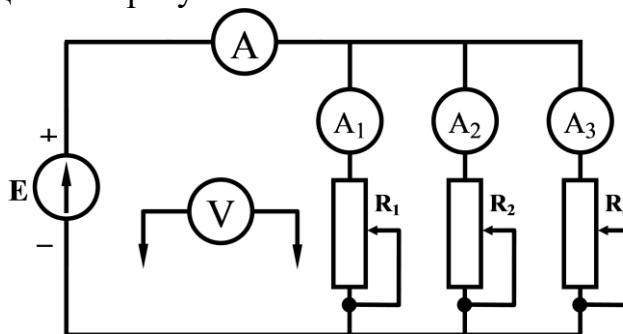


Рисунок 4 – Схема для исследования цепи с параллельным соединением резисторов

Таблица 2

Номер опыта	Данные наблюдений					Результаты вычислений													
	U <sub>общ</sub> , В	I <sub>1</sub> , А	I <sub>2</sub> , А	I <sub>3</sub> , А	I <sub>общ</sub> , А	R <sub>ЭКВ</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	G <sub>1</sub> , См	G <sub>2</sub> , См	G <sub>3</sub> , См	G <sub>ЭКВ</sub> , См	G' <sub>ЭКВ</sub> , См	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	P <sub>3</sub> , Вт	P, Вт	

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальные схемы экспериментов.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «последовательное» и «параллельное» соединение.
2. Запишите формулы для расчета эквивалентного сопротивления при последовательном и параллельном соединении.
3. Запишите, как рассчитать проводимость ветвей и эквивалентную проводимость при параллельном соединении резисторов.
4. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа и запишите их обобщенное выражение.
5. Объясните, как изменится мощность, потребляемая двумя резисторами, если с последовательного соединения переключить их на параллельное соединение к тому же источнику.
6. Объясните, как изменится накал двух последовательно соединенных ламп, если параллельно одной из них подключить третью лампу.



## Лабораторная работа № 4

### Исследование обобщённой цепи «источник-четырёхполюсник-приёмник» (на примере модели линии электропередачи)

Цель: исследовать зависимость падения напряжения, КПД и потерь мощности в проводах от величины тока нагрузки и длины линии.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Передача электрической энергии от генератора к приемникам происходит по проводам. При передаче энергии постоянного тока по двухпроводной линии имеет место потеря (или падение) напряжения в линии, а также потеря мощности.

Потерей напряжения  $\Delta U$  называется разность между напряжением  $U_1$  в начале линии и в конце линии  $U_2$  (напряжением на зажимах приемника энергии - на нагрузке):

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (1)$$

С другой стороны, потеря напряжения  $\Delta U$  пропорциональна току  $I$  в линии и сопротивлению проводов линии  $r_{л}$ :

$$\Delta U = I \cdot r_{л} = I \cdot \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{S}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина линии электропередач;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление;

$S$  – сечение провода.

Влияние различных факторов на потерю напряжения можно определить по формуле:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot I \cdot \rho \cdot l}{S}, \quad (3)$$

Иногда потерю напряжения выражают в процентах:

$$e = \frac{\Delta U}{U_2} \cdot 100\%. \quad (4)$$

В практических расчетах значение  $e$  задают в пределах от 2 до 10% и рассчитывают необходимое сечение провода по формуле:

$$S = \frac{2 \cdot P_2 \cdot l \cdot \rho}{e \cdot U_2^2} \cdot 100\% . \quad (5)$$

Ток в линии зависит от нагрузки, которая определяется величиной сопротивления  $R$  потребителя, а также от сопротивления проводов линии  $r_{л}$ :

$$I = \frac{U_1}{R + r_{л}} = \frac{U_2}{R} . \quad (6)$$

Кроме потери напряжения, в линии электропередачи происходит потеря мощности: провода бесполезно нагреваются. Мощность потерь:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I = I^2 \cdot r_{л} = P_1 - P_2 , \quad (7)$$

где  $P_1$  – мощность в начале линии (мощность отдаваемая источником питания в линию);

$P_2$  – мощность приёмника энергии.

Коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$  линии передачи энергии есть отношение мощности на конце линии  $P_2$  к мощности  $P_1$  на входных зажимах линии, то есть:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% = \frac{R}{R + r_{л}} \cdot 100\% = \frac{U_1 - \Delta U}{U_1} \cdot 100\% = \left( 1 - \frac{\Delta U}{U_1} \right) \cdot 100\% . \quad (8)$$

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием. Собрать схему электрической цепи, представленную на рисунке 1.

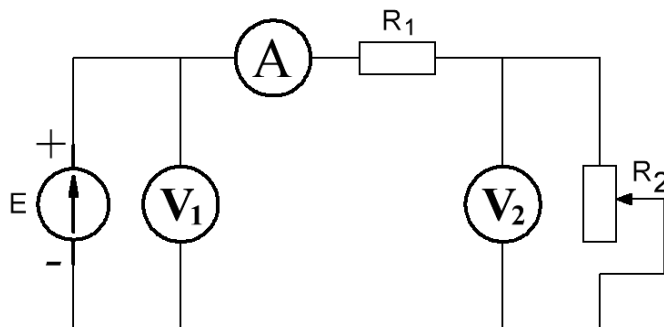


Рисунок 1 – Схема электрической цепи

2. Включить цепь, установить необходимое напряжение. Убедиться, что оба вольтметра при отключенной нагрузке показывают одинаковые значения. Исследовать влияние силы тока на потерю напряжения в проводах. Результаты записать в таблицу 1.

**Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений**

Номер опыта	Результаты измерений			Результаты вычислений					
	$I, A$	$U_1, B$	$U_2, B$	$\Delta U, B$	$P_1, Bт$	$P_2, Bт$	$\Delta P, Bт$	$\eta, \%$	$S, м^2$
1									
2									
3									

3. Определить потерю напряжения, мощности в начале и в конце линии передачи для всех значений нагрузки и КПД, используя формулы (1, 7, 8).

4. Определить сечение линии электропередачи, приняв её длину равной 100 м, материал: медь ( $\rho = 0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ), или алюминий ( $\rho = 0,029 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ), или сталь ( $\rho = 0,13 - 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ). Вычисления произвести для всех точек измерений, а затем определить среднее значение сечения. Результаты расчетов записать в таблицу 1.

5. По полученным данным построить графики зависимостей  $U_1 = f(I)$ ,  $U_2 = f(I)$ ,  $\Delta U = f(I)$  в одних осях координат и  $\Delta P = f(P_2)$  и  $\eta = f(P_2)$  в других осях координат.

6. Составить отчет по результатам выполненной работы.

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений, графики зависимостей.
5. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите факторы, от которых зависит сопротивление линии.
2. Перечислите факторы, от которых зависит потеря напряжения в проводах.
3. Объясните, как будет изменяться напряжение на зажимах приёмника энергии при уменьшении его сопротивления, если напряжение в начале линии неизменно.
4. Определите, при каком значении соотношения сопротивления приёмника к сопротивлению проводов линии мощность приёмника будет максимальной. Каков при этом КПД линии?
5. Перечислите факторы, от которых зависит мощность потерь в проводах.
6. Укажите, от чего зависит КПД линии электропередачи.

# Лабораторная работа № 5

## Изучение законов Кирхгофа в применении к многоконтурной цепи

Цель: проверить на опыте законы Кирхгофа и сопоставить опытные результаты с расчетными.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

### Теоретические сведения

В разветвленной электрической цепи токи в разных участках имеют различные значения. Сумма токов, направленных к узлу электрической цепи, равна сумме токов, направленных от узла. Это и есть первый закон Кирхгофа. Справедливо и другое определение: алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum I = 0. \quad (1)$$

В сложных электрических цепях образуется несколько контуров. Алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в этом же контуре (второй закон Кирхгофа):

$$\sum E = \sum I \cdot R. \quad (2)$$

Оба закона Кирхгофа можно проверить на одной электрической цепи (рисунок 1).

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рисунке 1.
2. Установить заданные преподавателем значения ЭДС источников питания  $E_1$  и  $E_2$ .
3. Измерить значение напряжения на резисторах и значение тока, проходящего через каждый из резисторов.
4. Результаты измерений занести в таблицу 1.
5. Произвести расчёт сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , по закону Ома для участка цепи. Результаты занести в таблицу 1.
6. Проверить по первому закону Кирхгофа баланс токов для различных узлов.
7. Проверить по второму закону Кирхгофа баланс напряжений и ЭДС для всех контуров цепи.
8. Произвести расчёт цепи теоретически по методу узловых и контурных уравнений, считая известными значения ЭДС и сопротивлений, и сравнить с полученными экспериментальными значениями токов.

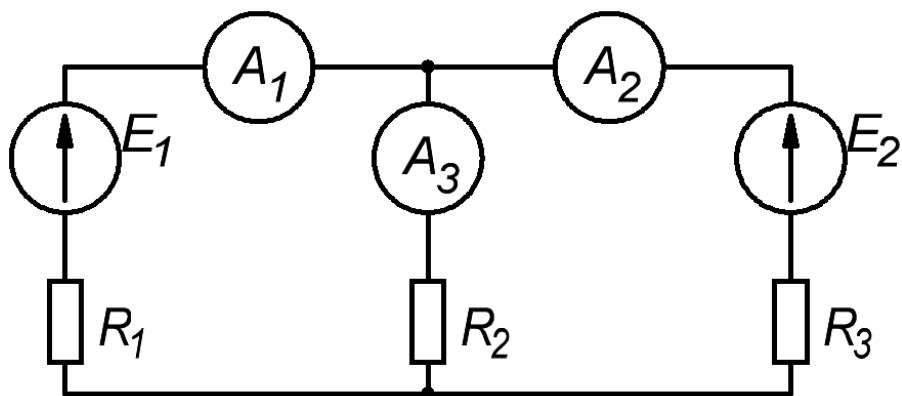


Рисунок 1 – Схема эксперимента

Таблица 1

Данные измерений								Результаты расчета		
$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и расчётов.
5. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл первого закона Кирхгофа.
2. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
3. Объясните правило знаков, которое соблюдается при написании уравнений по второму закону Кирхгофа.
4. Покажите, как изменится уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа, если обходить контур в обратном направлении.
5. Объясните, как выбирается знак перед падением напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

## Лабораторная работа № 6

### Измерение потенциалов в неразветвленной электрической цепи

Цель: измерить потенциалы точек в электрической цепи и сравнить их с расчетными значениями, а также построить потенциальные диаграммы по результатам опытов и расчетов.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Потенциал какой-либо точки электрической цепи равен напряжению между этой точкой и точкой цепи, потенциал которой принимают равным нулю, например, соединённой с землей.

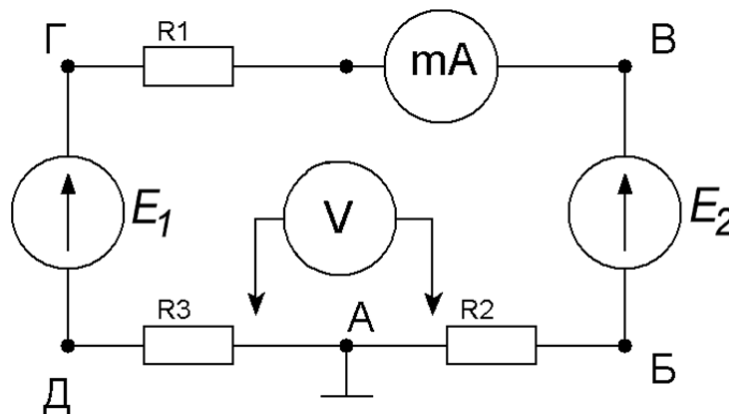


Рисунок 1 – Схема эксперимента

Ток в резисторе всегда направлен от большего потенциала к меньшему, поэтому признаку можно определить направление тока следующим образом: если стрелка магнитоэлектрического вольтметра, подключенного к концам резистора, отклоняется вправо, то положительный зажим вольтметра присоединен к точке с большим потенциалом.

Силу тока для последовательного соединения двух источников и трех потребителей можно рассчитать по формуле:

$$I = \frac{E_1 \pm E_2}{R_1 + R_2 + R_3 + r_1 + r_2} \quad (1)$$

Знак «+» в числителе означает, что источники соединены согласно, и знак «-» – встречно. В расчетах внутренним сопротивлением источников часто пренебрегают, так как они малы по сравнению с сопротивлениями потребителей, тогда расчетное значение силы тока несколько больше, чем опытное. В опыте же эти сопротивления учитываются автоматически.

Если между точками А и Б электрической цепи включен резистор, а один из потенциалов  $\varphi_A$  известен, то потенциал другой точки определяется по формуле:

$$\varphi_B = \varphi_A \pm I \cdot R_2. \quad (2)$$

Знак «+» ставят при направлении тока в резисторе от точки Б к точке А, т.е.  $\varphi_B > \varphi_A$ , а знак «-» при обратном направлении тока.

Если между точками включен источник без внутреннего сопротивления, то направление тока не имеет значение для расчета потенциала:

$$\varphi_B = \varphi_B \pm E_2 \quad (3)$$

Здесь знак «+» выбирается, если точка В соединена с положительным зажимом, так как  $\varphi_B > \varphi_B$  на величину ЭДС, а знак «-» – при обратном направлении ЭДС.

Если источник имеет внутреннее сопротивление, отличное от нуля, то необходимо учитывать и направление тока, и направление ЭДС.

$$\varphi_B = \varphi_B \pm E_2 \pm I \cdot r_2 \quad (4)$$

Отметим, что при встречном направлении тока и ЭДС источник работает в режиме потребителя.

Графическое изображение изменения потенциала в электрической цепи в зависимости от сопротивления участков (элементов) этой цепи называется **потенциальной диаграммой**. На графике по оси абсцисс откладывают в масштабе сопротивления участков (элементов) цепи в порядке следования их друг за другом в цепи. По оси ординат откладывают в масштабе значения потенциалов.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему согласно рисунку 1.
2. На первом и втором источнике установить напряжение, заданное преподавателем.
3. Измерить потенциалы  $\varphi_B$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_G$ ,  $\varphi_D$  и напряжение  $U_{BG}$ , данные занести в таблицу 1.
4. Измерить сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $r_1$ ,  $r_2$  или получить данные о них у преподавателя.
5. Произвести теоретический расчет цепи, данные занести в таблицу 1.
6. По результатам опыта и расчета построить в масштабе потенциальные диаграммы.

**Таблица 1**

$\varphi_A$	$\varphi_B$	$\varphi_B$	$\varphi_G$	$\varphi_D$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$r_1$	$r_2$

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Потенциальные диаграммы, построенные в масштабе на миллиметровой бумаге.
6. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объясните, какие соединения источников электрической энергии называются согласным и встречным.
2. Покажите, как рассчитать потенциал точки электрической цепи.
3. Объясните, как определить направление тока в неразветвленной цепи, имеющей несколько источников.
4. Укажите, можно ли определить направление тока в резисторе, если известны потенциалы на его зажимах.
5. Объясните, что представляет собой потенциальная диаграмма и как она строится.
6. Укажите, как изменяется потенциал при переходе через сопротивление навстречу току, протекающему через него.
7. Укажите, как изменяется потенциал при переходе через источник ЭДС по направлению, встречному стрелке источника.



## Лабораторная работа № 7

### Снятие вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и проверка опытным путем нелинейных цепей

Цель: получить навыки снятия вольт-амперных характеристик и построения графических зависимостей тока от напряжения при последовательных и параллельных соединениях нелинейных элементов; проверить на опыте графический метод расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Элемент электрической цепи, сопротивление которого зависит от тока в нем или от напряжения на его выводах называется *нелинейным элементом*.

Нелинейной цепью называется цепь, в которой имеется хотя бы один нелинейный элемент.

ВАХ (вольт-амперные характеристики) нелинейных элементов делятся на симметричные и несимметричные относительно начала координат.

К нелинейным элементам относятся полупроводниковые, электровакуумные, газоразрядные и другие приборы.

Для расчета нелинейных цепей применяются графические и аналитические методы расчёта цепей.

В данной работе проверяется наиболее простой графический метод расчёта нелинейных цепей постоянного тока.

Расчет нелинейных цепей производится графическим способом с использованием ВАХ нелинейных элементов. При последовательном соединении нелинейных элементов их характеристики складываются по правилам последовательного соединения резисторов:

$$I = const, \quad (1)$$

где  $I$  – ток в цепи.

$$U = \sum U_n, \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение на входе схемы;

$U_n$  – напряжение на отдельных сопротивлениях.

При параллельном соединении нелинейных элементов их характеристики складываются по правилам параллельного соединения резисторов:

$$U = const, \quad (3)$$

$$I = \sum I_n, \quad (4)$$

где  $I_n$  –токи в параллельных ветвях.

### Порядок выполнения работы

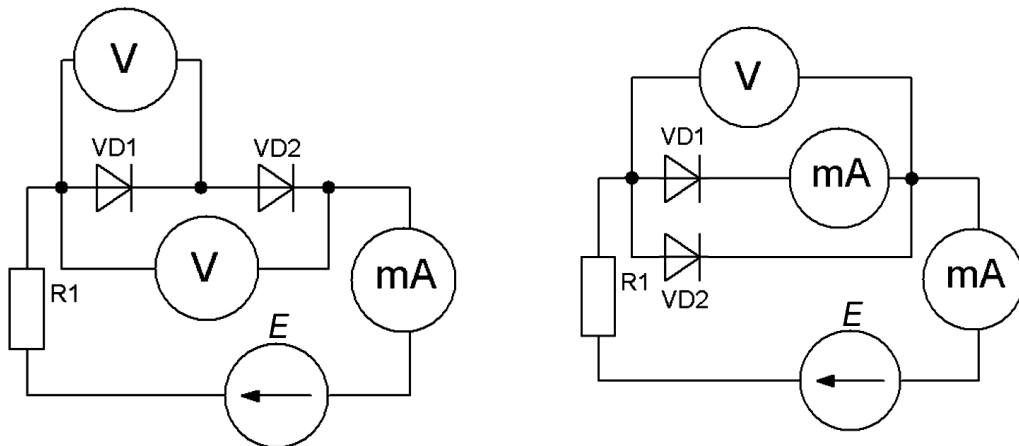
1. Собрать схему последовательного соединения нелинейных элементов (НЭ). В качестве НЭ использовать диоды рисунок 1.
2. Снять ВАХ двух последовательно соединённых диодов. Одновременно снимать зависимость тока от напряжения на одном из диодов.
3. Результаты измерений занести в таблицу 1.
4. По результатам измерений построить ВАХ в одной системе координат. Применяя графический метод для последовательного соединения построить ВАХ второго диода.
5. Собрать схему параллельного соединения нелинейных элементов рисунок 1.
6. Снять ВАХ двух параллельно соединённых диодов. Показания тока измерять в общей цепи  $I$  и в одной из ветвей  $I_1$ .
7. Результаты измерений занести в таблицу 2.
8. По результатам измерений построить ВАХ в одной системе координат. Применяя графический метод для параллельного соединения построить ВАХ второго диода.

**Таблица 1**

$U, B$							
$U_1, B$							
$I, A$							

**Таблица 2**

$U, B$							
$I, A$							
$I_1, A$							



**Рисунок 1 – Схемы экспериментов**

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальные схемы экспериментов.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Графическая часть со всеми построениями (построения рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге).
6. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объясните, какие цепи называются нелинейными.
2. Запишите, как определяется статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного элемента.
3. Укажите, в чём заключается графический расчёт при последовательном, параллельном и смешанном соединении нелинейных элементов.
4. Назовите область применения исследуемых в работе нелинейных элементов.

## Лабораторная работа № 8

### Исследование электростатических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединении конденсаторов

Цель: изучить законы распределения заряда, напряжения, энергии в батарее конденсаторов.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Конденсатором называется система, состоящая из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, в которой обеспечивается сильная электрическая связь между накопленными на этих проводниках зарядами. Проводники, образующие конденсатор, называются обкладками. В зависимости от формы обкладок конденсаторы бывают сферические, цилиндрические, плоские. За заряд конденсатора принимается заряд одной обкладки, взятый по абсолютной величине.

Ёмкостью конденсатора называется скалярная физическая величина, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд и численно равная заряду, который должен быть перенесен с одной обкладки конденсатора на другую, чтобы разность потенциалов между ними изменилась на единицу.

$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi}. \quad (1)$$

Ёмкость конденсатора зависит от формы и размеров его обкладок, диэлектрической проницаемости материала диэлектрика и не зависит от свойств проводников, из которых изготовлены обкладки. Единицей измерения электрической емкости в системе СИ является фарад ( $\Phi = \text{Кл/В}$ ).

При необходимости получить на всех конденсаторах батареи одинаковый заряд конденсаторы соединяются последовательно.

Соотношение для расчета полной емкости батареи при последовательном соединении конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_N}, \quad (2)$$

где  $C$  – ёмкость батареи конденсаторов при их последовательном соединении;  
 $C_N$  – ёмкость отдельного конденсатора.

Соотношение для расчета полной ёмкости батареи при параллельном соединении конденсаторов:

$$C = \sum C_N, \quad (3)$$

где  $C$  – ёмкость батареи конденсаторов при их параллельном соединении;  
 $C_N$  – ёмкость отдельного конденсатора.

Энергия электрического поля конденсатора определяется по формуле:

$$W_{\text{Э}} = \frac{C \cdot U^2}{2}. \quad (4)$$

Энергия конденсатора обычно не очень велика - не более сотен джоулей. К тому же она не сохраняется долго из-за неизбежной утечки заряда. Поэтому заряженные конденсаторы не могут заменить, например, аккумуляторы в качестве источников электрической энергии.

Но это совсем не означает, что конденсаторы как накопители энергии не получили практического применения. Они имеют одно важное свойство: конденсаторы могут накапливать энергию более или менее длительное время, а при разрядке через цепь с малым сопротивлением они отдают энергию почти мгновенно. Именно это свойство широко используют на практике. Основное применение конденсаторы находят в радиотехнике.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь, представленную на рисунке 1.

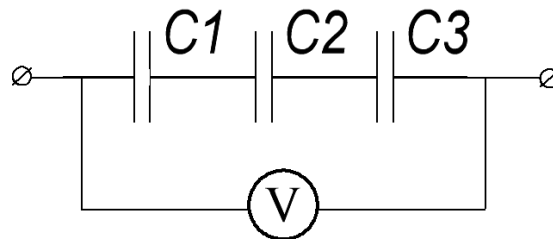


Рисунок 1 – Схема электрической цепи при последовательном соединении конденсаторов

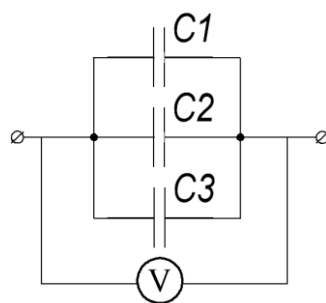
2. Определить значения ёмкостей и входного напряжения. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

Данные измерений				Результаты вычислений										
U, В	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	C, мкФ	Q <sub>1</sub> , Кл	Q <sub>2</sub> , Кл	Q <sub>3</sub> , Кл	Q, Кл	U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В	W <sub>1</sub> , Дж	W <sub>2</sub> , Дж	W <sub>3</sub> , Дж

3. Рассчитать заряды, напряжения, энергию на каждом конденсаторе. Результаты занести в таблицу 1.

4. Собрать цепь, представленную на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема электрической цепи при параллельном соединении конденсаторов**

5. Определить значения ёмкостей и входного напряжения. Данные занести в таблицу 2.

**Таблица 2**

Данные измерений				Результаты вычислений										
U, В	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	C, мкФ	U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В	Q <sub>1</sub> , Кл	Q <sub>2</sub> , Кл	Q <sub>3</sub> , Кл	Q, Кл	W <sub>1</sub> , Дж	W <sub>2</sub> , Дж	W <sub>3</sub> , Дж

6. Рассчитать заряды, напряжения, энергию на каждом конденсаторе. Результаты занести в таблицу 2.

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальные схемы экспериментов.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «электростатическая цепь».
2. Объясните, как зависит величина ёмкости батареи от способа соединения конденсаторов.
3. Объясните, как зависит величина заряда батареи от способа соединения конденсаторов.
4. Укажите, как нужно изменить размеры одного плоского конденсатора, чтобы он мог заменить по ёмкости два таких же конденсатора, соединенных параллельно.
5. Определите электроёмкость батареи конденсаторов, соединенных смешанно, заряд и падение напряжения на каждом конденсаторе, энергию электрического поля (расчетная схема согласно заданному варианту).

# Лабораторная работа № 9

## Исследование магнитной цепи

Цель: исследовать параметры катушки с ферромагнитным сердечником.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

### Теоретические сведения

Магнитная цепь – это устройство из ферромагнитных сердечников с воздушными зазорами или без них, по которым замыкается магнитный поток. Магнитные цепи могут быть разветвленными (рисунок 1) и неразветвленными (рисунок 3). Отдельные участки цепей выполняются из одного или разных материалов. Примером таких цепей являются сердечники трансформаторов, магнитных усилителей, электрических машин и т.д.

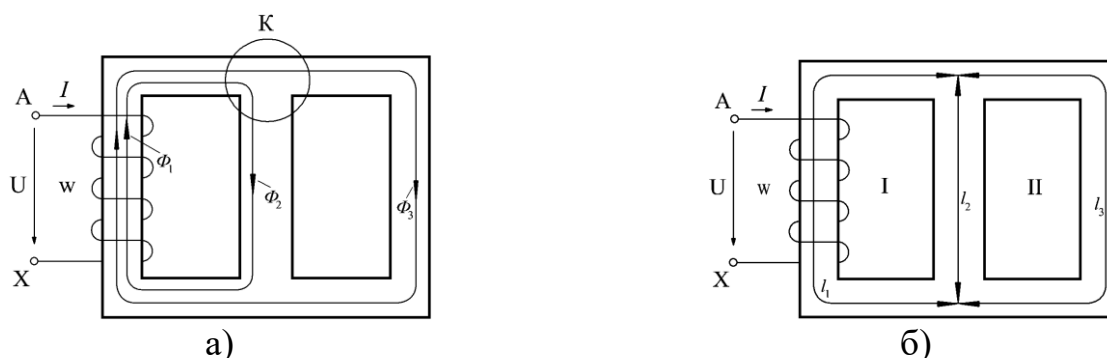


Рисунок 1 – Разветвленная магнитная цепь: а – распределения магнитных потоков; б – разделение цепи на однородные участки

Задача расчета магнитной цепи сводится к определению магнитодвижущей силы (МДС) катушки или системы катушек, необходимой для создания заданного магнитного потока. Часто встречается и обратная задача – по известной МДС определить магнитные потоки.

Одним из важнейших соотношений для разветвленных магнитных цепей является соотношение между магнитными потоками, согласно которому алгебраическая сумма магнитных потоков ветвей, сходящихся в узле разветвления потоков, равна нулю:  $\sum \Phi = 0$ . Это определение выражает *первый закон Кирхгофа для магнитной цепи*. Магнитные потоки, направленные к узлу и от него, обозначаются разными знаками. Направление магнитного потока определяется по правилу правой руки, согласно которому, если охватить катушку (виток) правой рукой так, чтобы четыре пальца ее расположились по направлению тока в витках катушки, отогнутый большой палец руки укажет направление магнитных линий. Применительно к узлу К (рисунок 1.а) первый закон Кирхгофа для магнитной цепи запишем в виде:  $\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$ .

При расчете и анализе магнитных цепей пользуются обычно величиной  $H$ , называемой напряженностью магнитного поля. Зависимость между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$  у ферромагнитных материалов обычно выражается графически в виде кривой намагничивания (рисунок 2), из которой видно, что отношение  $\frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \mu$  не является постоянной величиной; с увеличением  $H$  и  $B$  магнитная проницаемость уменьшается. Для воздушных промежутков магнитопровода  $H_0 = \frac{B}{\mu_0}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – абсолютная магнитная проницаемость.

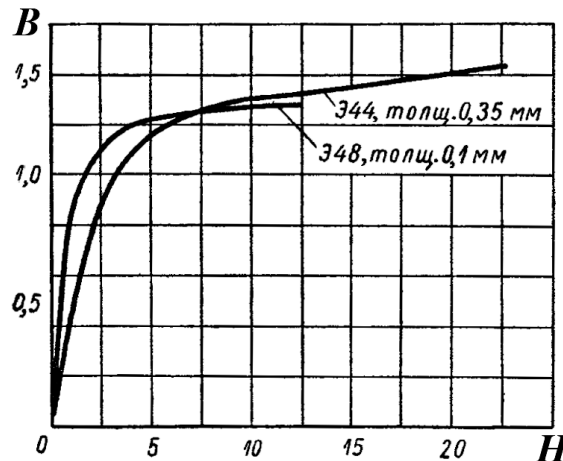


Рисунок 2 – Зависимость магнитной индукции  $B$  ферромагнетика от напряженности поля  $H$

Напряженность магнитного поля связана с токами, возбуждающими поле, законом полного тока:  $F = \sum I = \sum H \cdot l$ . Величину  $\sum I$  называют полным током или МДС и обозначают буквой  $F$ , а произведение  $H \cdot l = U_M$  – магнитным напряжением.

Тогда закон полного тока можно сформулировать следующим и образом: магнитодвижущая сила вдоль контура равна полному току, проходящему через поверхность, ограниченную этим контуром. В формулу, выражающую закон полного тока, со знаком «+» следует включать напряженности, положительные направления которых совпадают с направлением обхода контура, и токи, положительные направления которых связаны с направлением обхода контура правилом правого винта.

Применим закон полного тока к контуру  $I$  (рисунок 1.6). Полный ток, проходящий через поверхность, ограниченную этим контуром,  $\sum I = Iw$ . МДС вдоль этого контура  $F = \sum H \cdot l = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2$ , где  $H_1$  и  $H_2$  – напряженности магнитного поля на участках, в пределах которого оно однородно.

На основании закона полного тока получим  $I \cdot w = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2$ , т.е. для данного контура МДС катушки равна сумме магнитных напряжений на отдельных участках. Если имеется не одна, а несколько катушек и во всех стержнях напряженность поля различна, то уравнение принимает вид:

$$I_1 \cdot w_1 + I_2 \cdot w_2 + \dots + I_n \cdot w_n = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_m \cdot l_m.$$



Следовательно, алгебраическая сумма МДС для любого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений на отдельных участках. Это определение является *вторым законом Кирхгофа* для магнитной цепи.

Если в выражении  $U_M = Hl$  заменить  $H$  на  $\frac{B}{\mu_a}$  и положить  $B = \frac{\Phi}{S}$ , то  $U_M = \frac{\Phi l}{\mu_a S}$ , откуда  $\Phi = \frac{U_M}{l/(\mu_a S)}$ .

Полагая  $\Phi$  аналогом тока, а  $R_M = l/(\mu_a S)$  – аналогом сопротивления электрической цепи, можно считать, что выражение  $\Phi = \frac{U_M}{R_M}$  является аналогом закона Ома. Важно подчеркнуть, что сходство между законами магнитной и электрической цепи чисто формальное, никакой общности физических явлений в этих законах нет.

Пусть имеется неразветвленная однородная магнитная цепь некоторого электротехнического устройства (рисунок 3). На основании закона полного тока имеем  $I \cdot w = H \cdot l = U_M$ . Применяя закон Ома для магнитной цепи и учитывая, что  $I \cdot w = U_M$ , получаем  $\Phi = \frac{U_M}{R_M}$ , отсюда  $\frac{I \cdot w}{\Phi} = R_M$ .

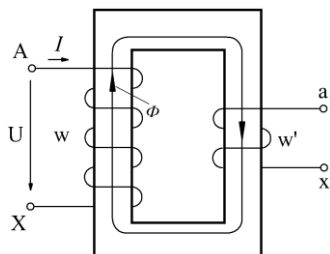


Рисунок 3 – Схема неразветвленной магнитной цепи

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы.

2. Собрать электрическую схему для исследования неразветвленной магнитной цепи (рисунок 4) и представить её для проверки преподавателю.

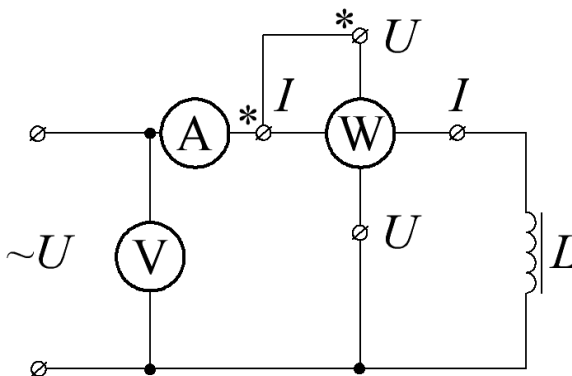


Рисунок 4 – Схема магнитной цепи

3. Подать в электрическую цепь напряжение.

4. С помощью амперметра измерить значения тока для каждого значения напряжения (7 измерений). Данные записать в таблицу 1.

**Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений**

Номер опыта	Результаты измерений		Результаты вычислений		
	$U$ , В	$I$ , А	$H$ , А/м	$B$ , Тл	$\Phi$ , Вб
1					
...					
7					

5. Для каждого значения тока рассчитать по формуле напряженность, где число витков ( $w$ ), длина средней линии ( $l$ ), площадь сечения магнитопровода ( $S$ ):

$$H = \frac{I \cdot w}{l}$$

6. Используя данные таблицы 2 для ферромагнитного материала сердечника определить значения магнитной индукции для каждого значения напряженности. Результаты занести в таблицу 1.

7. Для каждого значения магнитной индукции вычислить величину магнитного потока по формуле:

$$\Phi = B \cdot S$$

Полученные значения записать в таблицу 1.

8. Построить график зависимости  $\Phi = f(I)$ .

**Таблица 2 – Характеристика намагничивания сталей**

$B$ , Тл	Марка стали				$B$ , Тл	Марка стали			
	1211, 1212, 1311	1511, 1512	Литая сталь	Пермендюр		1211, 1212, 1311	1511, 1512	Литая сталь	Пермендюр
	$H$ , А/м					$H$ , А/м			
0,10	–	40	80	57	1,00	502	300	920	97
0,20	–	50	160	70	1,05	570	340	1004	100
0,30	–	60	240	73	1,10	647	395	1090	105
0,40	140	70	320	76	1,15	739	460	1187	110
0,45	152	75	360	79	1,20	840	540	1290	115
0,50	171	85	400	82	1,25	976	640	1430	120
0,55	191	94	443	–	1,30	1140	770	1590	125
0,60	211	110	448	85	1,35	1340	970	1810	132
0,65	236	127	535	–	1,40	1580	1300	2090	140
0,70	261	145	548	88	1,45	1950	1800	2440	150
0,75	287	165	632	–	1,50	2500	2750	2890	162
0,80	318	185	682	91	1,55	3280	3850	3430	180
0,85	352	210	745	–	1,60	7370	5150	4100	200
0,90	397	235	798	94	1,65	5880	6950	4870	225
0,95	447	270	850	–	1,70	7780	8900	5750	260

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. График  $\Phi = f(I)$ .
6. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «магнитная цепь».
2. Объясните, в чем заключается расчет магнитной цепи.
3. Сформулируйте и приведите формулу закона полного тока.
4. Укажите, по какому правилу устанавливают направление магнитного потока.
5. Напишите уравнения для разветвленной магнитной цепи, аналогичные уравнениям Кирхгофа для электрической цепи.
6. Объясните, почему магнитопровод изготавливают из магнитомягких материалов.
7. Объясните, как полностью размагнитить магнитопровод.
8. Укажите, как уменьшить потери на вихревые токи.

## Лабораторная работа № 10

### Измерение параметров катушки индуктивности. Построение векторных диаграмм

Цель: измерить параметры катушки индуктивности; построить векторные диаграммы.  
Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ–07», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Явления, происходящие в цепях переменного тока, отличаются от процессов в цепях постоянного тока. В цепях переменного тока проявляются три параметра: сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$ , которые и вызывают в электрических цепях несовпадение по фазе напряжения и тока. Сдвиг фаз между напряжением и током можно изобразить геометрически в виде векторных диаграмм.

Основной закон цепей переменного тока – закон Ома:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток в цепи;

$U$  – напряжение в цепи;

$Z$  – полное сопротивление цепи.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (2)$$

где  $R$  – активное сопротивление;

$X_L$  – реактивное индуктивное сопротивление.

К параметрам индуктивных катушек относятся активное сопротивление и индуктивность. Активное сопротивление зависит от длины ( $l$ ), сечения ( $S$ ) и материала ( $\rho$ ) провода обмотки:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (3)$$

Индуктивность катушки зависит от ее конструкции: числа витков ( $N$ ), сечения катушки ( $S$ ), её длины ( $l$ ) и магнитной проницаемости среды (сердечника):

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S \cdot N^2}{l}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  
 $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды.

Полная мощность рассчитывается по формуле:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2)$$

где  $S$  – полная мощность;  
 $P$  – активная мощность;  
 $Q$  – реактивная мощность.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, представленную на рисунке 1.

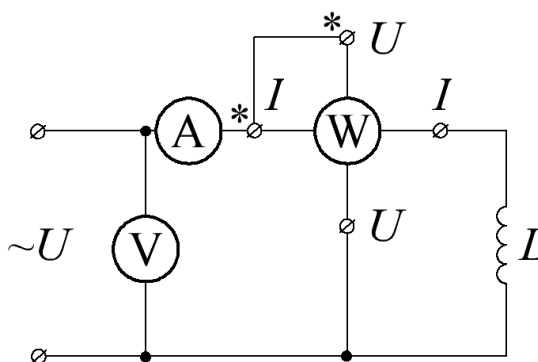


Рисунок 1 – Схема электрической цепи переменного тока

2. Измерить напряжение, ток в цепи, мощность. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

Катушка	Результаты измерений				Результаты вычислений			
	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$R$ , Ом	$X_L$ , Ом	$L$ , Гн	$Q$ , вар	$S$ , В·А

3. Произвести необходимые расчеты и заполнить таблицу 1.

4. Построить векторные диаграммы, треугольники сопротивлений и мощностей в масштабе.

5. Составить отчет по результатам выполненной работы.

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Графическая часть.
6. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объясните, от чего зависит индуктивность катушки. Объясните, в каком случае индуктивность катушки при изменении тока в ней остается постоянной.
2. Укажите, что необходимо предпринять для увеличения индуктивности катушки.
3. Перечислите параметры, которыми характеризуется катушка и укажите, как их определить.
4. Проанализируйте, как изменяются параметры катушки в зависимости от материала и конструкции сердечника.
5. Укажите, как изменится ток в реальной катушке индуктивности, если в неё ввести железный сердечник.
6. Приведите пример векторной диаграммы для активно-индуктивной нагрузки.

## Лабораторная работа № 11

### Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и ёмкостью. Построение векторных диаграмм, треугольников сопротивлений и мощностей

Цель: изучить неразветвленную цепь переменного тока, содержащую активное и реактивное сопротивление (ёмкостное). Рассчитать параметры отдельных элементов электрической цепи. Построить по опытным данным векторные диаграммы и треугольники сопротивлений и мощностей.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

В цепи, содержащей активное сопротивление и ёмкость, вектор активного напряжения совпадает с вектором тока, вектор ёмкостного напряжения отстает от тока на угол  $90^\circ$  (рисунок 1).

Полное напряжение равно геометрической сумме напряжений на отдельных участках:  $U = \sqrt{U_a^2 + U_C^2}$  и отстает от вектора тока на угол  $\varphi$ .

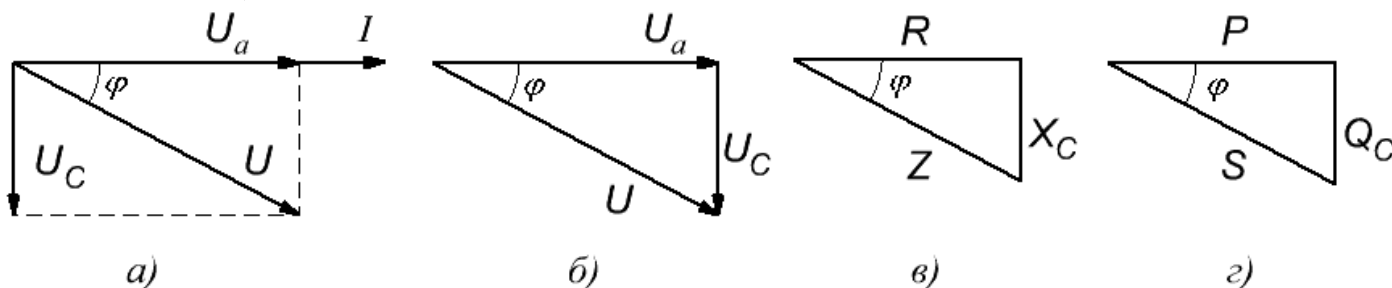


Рисунок 1

Полное сопротивление цепи  $Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  содержит активную и ёмкостную

составляющие:  $R = \frac{U_a}{I}$ ,  $X_C = \frac{U_C}{I}$

Полная мощность цепи  $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q_C^2}$ ,

где  $P = U_a \cdot I$  – активная мощность;

$Q_C = U_C \cdot I$  – ёмкостная мощность.

Применяя закон Ома, можно записать формулы для расчета мощностей:

$$S = I^2 \cdot Z = \frac{U^2}{Z}; \quad P = I^2 \cdot R = \frac{U_a^2}{R}; \quad Q_C = I^2 \cdot X_C = \frac{U_C^2}{X_C}.$$

На основе векторной диаграммы можно построить треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей (рисунок 1, б, в, г). Все эти треугольники подобны,

причем в противоположность треугольникам напряжений треугольники мощностей и сопротивлений состоят из отрезков, а не из векторов, так как сопротивления и мощности – скалярные величины.

Силу тока в цепи можно определить по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}.$$

Величина угла  $\varphi$  определяется из прямоугольных треугольников, рассмотренных ранее, по формулам:

$$\sin \varphi = \frac{U_C}{U} = \frac{X_C}{Z} = \frac{Q_C}{S}, \quad \cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C}{U_a} = \frac{X_C}{R} = \frac{Q_C}{P},$$

где  $U_C$ ,  $X_C$ ,  $Q_C$  – реактивное напряжение, сопротивление и мощность, соответственно.

Последние формулы позволяют связать активное и реактивное сопротивления, напряжения и мощности с помощью тригонометрических функций:

$$R = Z \cdot \cos \varphi, \quad X_C = Z \cdot \sin \varphi, \quad U_a = U \cdot \cos \varphi, \quad U_C = U \cdot \sin \varphi, \quad P = S \cdot \cos \varphi, \quad Q_C = S \cdot \sin \varphi.$$

Особое значение имеет  $\cos \varphi$ , который называется коэффициентом мощности и входит в формулу активной мощности  $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ .

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и другим оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы, записать их технические характеристики.

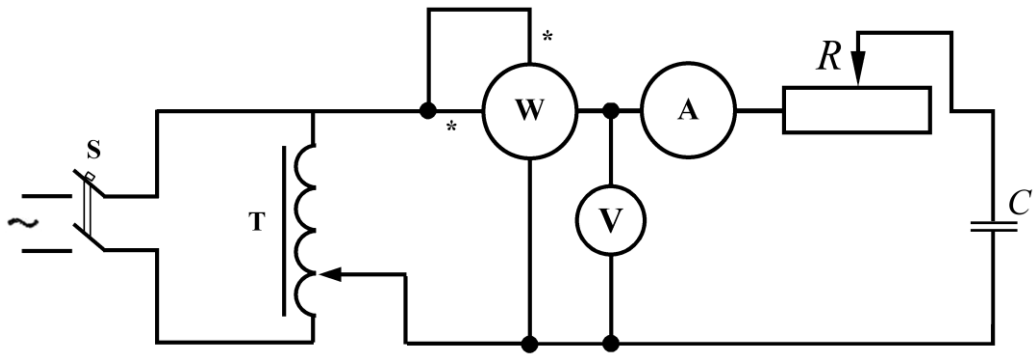
2. Присоединить к сети переменного напряжения, как показано на рисунке 2, через двухполюсный автоматический выключатель S ЛАТР, собрать последовательную часть электрической цепи, а затем присоединить параллельную обмотку ваттметра. Установить ручку ЛАТР в положение, обеспечивающее нулевое напряжение на зажимах электрической цепи. После проверки преподавателем правильности соединений включить двухполюсный автоматический выключатель S, увеличить напряжение до заданного значения. При двух или трех различных значениях активного сопротивления измерить силу тока, напряжение и активную мощность цепи. Результаты записать в таблицу 1.

3. По результатам наблюдений произвести вычисления величин, указанных в таблице 1.

4. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы действующих значений тока и напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей.

5. Составить отчет по результатам выполненной работы.





**Рисунок 2 – Схема для исследования последовательной цепи переменного тока, содержащей реостат и конденсатор**

**Таблица 1**

Номер опыта	Данные наблюдений			Результаты вычислений										
	U, В	I, А	P, Вт	Z, Ом	R, Ом	X <sub>C</sub> , Ом	C, мкФ	cos φ	sin φ	φ, рад	U <sub>a</sub> , В	U <sub>C</sub> , В	S, В·А	Q <sub>C</sub> , вар

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Графическая часть (построения рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге).
6. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Укажите, какими величинами определяется синусоидально изменяющаяся функция.
2. Запишите формулы для расчета угла сдвига фаз между векторами напряжения и тока в цепи с активно–ёмкостной нагрузкой.
3. Укажите, как рассчитать полное сопротивление цепи, если известны активное и ёмкостное сопротивление, соединенные последовательно.
4. Запишите формулу для расчета активной мощности в цепи с активно–ёмкостной нагрузкой.
5. Запишите формулы для расчета силы тока в цепи, содержащей реальный конденсатор.
6. Объясните, может ли через конденсатор протекать постоянный ток.
7. Укажите особенности энергетических процессов в цепи с реальным конденсатором.

## Лабораторная работа № 12

### Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью. Построение векторных диаграмм, треугольников сопротивлений и мощностей

Цель: изучить неразветвленную цепь переменного тока, содержащую активное и реактивное сопротивление (индуктивное). Рассчитать параметры отдельных элементов электрической цепи. Построить по опытным данным векторные диаграммы и треугольники сопротивлений и мощностей.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

В цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность, вектор активного напряжения совпадает с вектором тока, вектор индуктивного напряжения опережает ток на угол  $90^\circ$  (рисунок 1).

Полное напряжение равно геометрической сумме напряжений на отдельных участках:  $U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}$  и опережает вектор тока на угол  $\varphi$ .

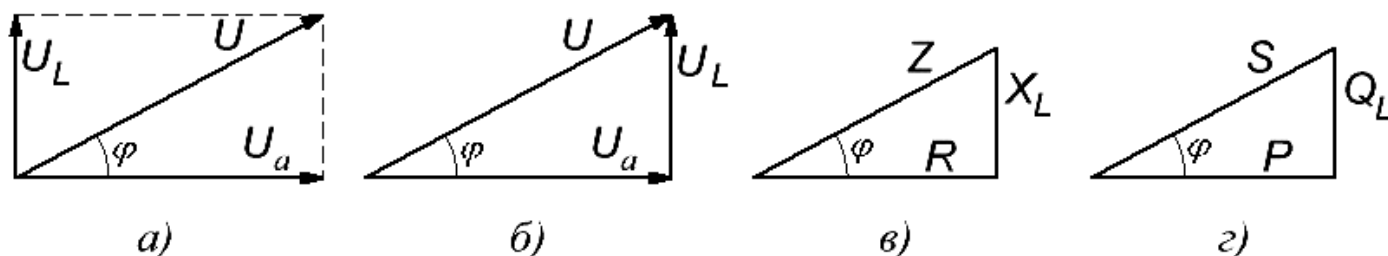


Рисунок 1

Полное сопротивление цепи  $Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + x_L^2}$  содержит активную и индуктивную

составляющие:  $R = \frac{U_a}{I}$ ,  $x_L = \frac{U_L}{I}$

Полная мощность цепи  $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$ ,

где  $P = U_a \cdot I$  – активная мощность;

$Q_L = U_L \cdot I$  – индуктивная мощность.

Применяя закон Ома, можно записать формулы для расчета мощностей:

$$S = I^2 \cdot Z = \frac{U^2}{Z}; \quad P = I^2 \cdot R = \frac{U_a^2}{R}; \quad Q_L = I^2 \cdot x_L = \frac{U_L^2}{x_L}.$$

На основе векторной диаграммы можно построить треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей (рисунок 1, б, в, г). Все эти треугольники подобны, причем в противоположность треугольникам напряжений треугольники мощностей и сопротивлений состоят из отрезков, а не из векторов, так как сопротивления и мощности – скалярные величины.

Силу тока в цепи можно определить по закону Ома

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}.$$

Величина угла  $\varphi$  определяется из прямоугольных треугольников, рассмотренных ранее, по формулам:

$$\sin \varphi = \frac{U_L}{U} = \frac{X_L}{Z} = \frac{Q_L}{S}, \quad \cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{X_L}{R} = \frac{Q_L}{P},$$

где  $U_L$ ,  $X_L$ ,  $Q_L$  – реактивное напряжение, сопротивление и мощность, соответственно.

Последние формулы позволяют связать активное и реактивное сопротивления, напряжения и мощности с помощью тригонометрических функций:

$$R = Z \cdot \cos \varphi, \quad X_L = Z \cdot \sin \varphi,$$

$$U_a = U \cdot \cos \varphi, \quad U_L = U \cdot \sin \varphi, \quad P = S \cdot \cos \varphi, \quad Q_L = S \cdot \sin \varphi.$$

Особое значение имеет  $\cos \varphi$ , который называется коэффициентом мощности и входит в формулу активной мощности  $P = U \cdot I \cos \varphi$ .

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и другим оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы, записать их технические характеристики.

2. Присоединить к сети переменного напряжения, как показано на рисунке 2, через двухполюсный автоматический выключатель S ЛАТР, собрать последовательную часть электрической цепи, а затем присоединить параллельную обмотку ваттметра. Установить ручку ЛАТР в положение, обеспечивающее нулевое напряжение на зажимах электрической цепи. После проверки преподавателем правильности соединений включить двухполюсный автоматический выключатель S, увеличить напряжение до заданного значения. При двух- или трех различных значениях активного сопротивления измерить силу тока, напряжение и активную мощность цепи. Результаты записать в таблицу 1.

3. По результатам наблюдений произвести вычисления величин, указанных в таблице 1.

4. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы действующих значений тока и напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей.

5. Составить отчет по результатам выполненной работы.

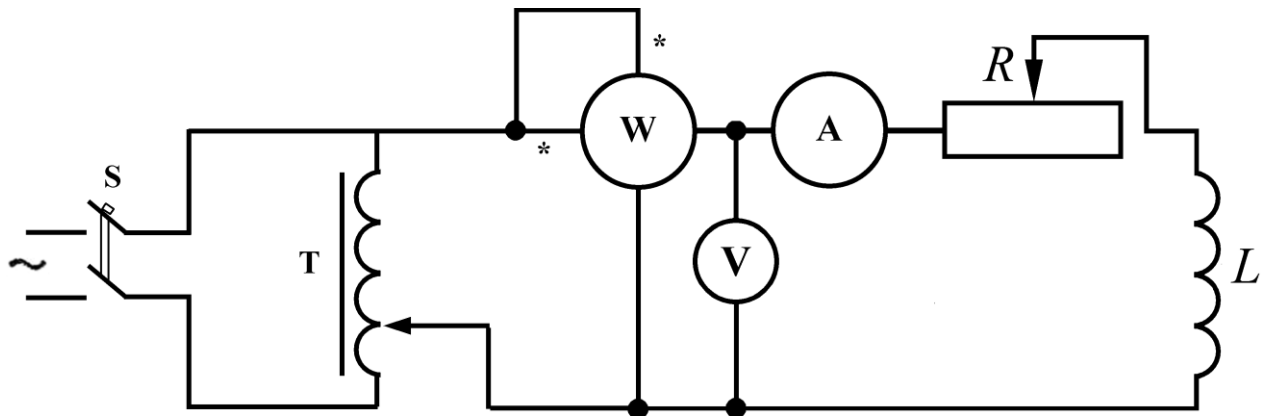


Рисунок 2 – Схема для исследования последовательной цепи переменного тока, содержащей реостат и катушку

Таблица 1

Номер опыта	Данные наблюдений			Результаты вычислений										
	U, В	I, А	P, Вт	Z, Ом	R, Ом	X <sub>L</sub> , Ом	L, Гн	cos φ	Sin φ	φ, рад	U <sub>а</sub> , В	U <sub>L</sub> , В	S, В·А	Q <sub>L</sub> , вар

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Графическая часть (построения рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге).
6. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Укажите, от каких величин зависит угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи с активно-индуктивной нагрузкой.
2. Покажите, как рассчитать полное сопротивление цепи, если известны активное и индуктивное сопротивления, соединенные последовательно.
3. Запишите формулу для расчета активной мощности в цепи с активно-индуктивной нагрузкой.
4. Изобразите треугольники сопротивлений и мощностей для цепи с активно-индуктивной нагрузкой.
5. Запишите формулы для расчета силы тока в цепи, содержащей реальную катушку.
6. Опишите особенности энергетических процессов в цепи с реальной катушкой.

## Лабораторная работа № 13

### Исследование цепи переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора. Построение векторных диаграмм, треугольников сопротивлений и мощностей

Цель: проверить практически и уяснить, какие физические явления происходят в цепи переменного тока; рассчитать параметры отдельных элементов электрической цепи; построить по опытным данным векторные диаграммы, треугольники сопротивлений и мощностей.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

При подведении к зажимам последовательно соединенных активного сопротивления  $r$ , индуктивности  $L$ , и емкости  $C$  синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$  (рисунок 1) в цепи устанавливается ток  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ . Сдвиг фаз между напряжением и током определяется по формуле  $\varphi = \arctg(x_L - x_C) / r$ , где  $x_L = 2\pi fL$ ,  $x_C = 1/(2\pi fC)$  – соответственно индуктивное и ёмкостное сопротивления.

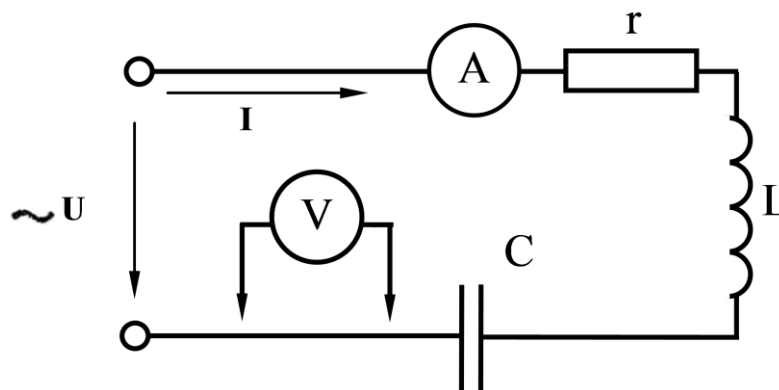


Рисунок 1 – Цепь переменного тока с последовательным соединением элементов

Действующее значение тока в цепи можно найти по закону Ома:  $I = U / \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = U / Z$ , где  $Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$  – полное сопротивление цепи.

Если  $x_L > x_C$ , то и  $U_L > U_C$  – ток в этом случае отстает от напряжения сети (рисунок 2, а). В случае  $x_L < x_C$  и  $U_L < U_C$  – ток опережает напряжение (рисунок 2, в). Когда  $x_L = x_C$ , то и  $U_L = U_C$  – ток и напряжение совпадают по фазе (рисунок 2, б). Этот случай называется *резонансом напряжений*, он имеет место при резонансной частоте  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ .

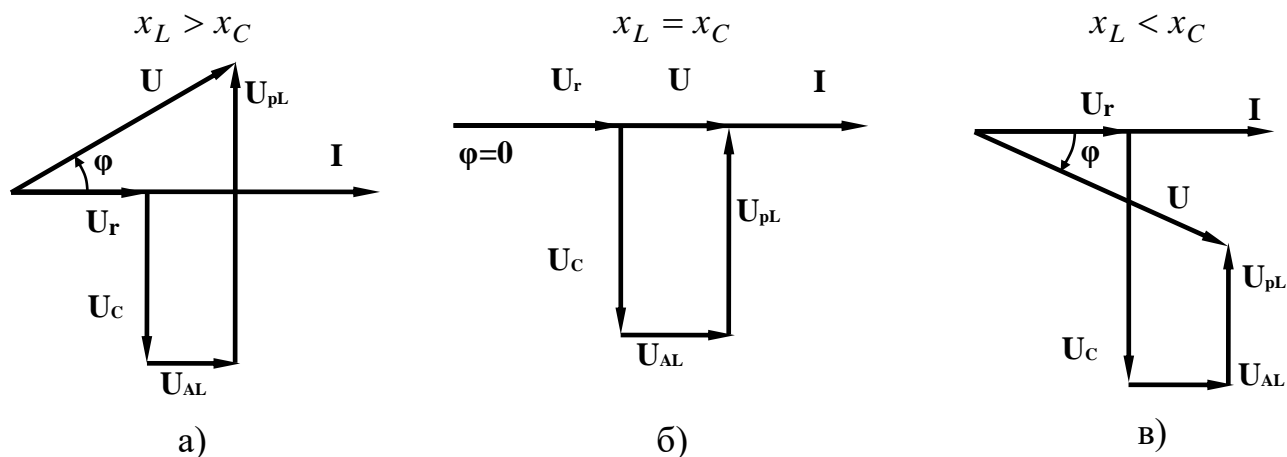


Рисунок 2 – Векторные диаграммы при последовательном соединении резистора, индуктивной катушки и конденсатора

Цепь при резонансе ведет себя так, как будто содержит только одно активное сопротивление. Действительно, когда наступает резонанс, то реактивное сопротивление цепи  $x = x_L - x_C = 0$ ; полное сопротивление цепи  $Z = r$ , ток  $I_0 = U / r$ , коэффициент мощности  $\cos(\varphi) = 1$ .

Резонанс может быть получен подбором параметров цепи при заданной частоте сети или частоты сети при заданных параметрах цепи. Для цепи с последовательным соединением резистора, индуктивной катушки и конденсатора по измеренным значениям напряжения  $U_r, U_C, U_L, U$ , тока  $I$  и активной мощности  $P$  можно определить параметры цепи. Сопротивление резистора  $r = U_r / I$ , емкостное сопротивление  $x_C = U_C / I$ . Определив  $x_C$  и зная промышленную частоту тока  $f = 50$  Гц, можно найти емкость конденсатора:  $C = 1 / (2\pi \cdot f \cdot x_C)$ . Мощность  $P$  найдем из формулы  $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ , значение  $\varphi$  определим из выражения  $\varphi = \arcsin \frac{U_{pL} - U_C}{U}$ .

Параметры катушки определяются следующим образом: полное сопротивление  $Z_L = U_L / I$ , т.к.  $Z_L = \sqrt{R_L^2 + x_L^2}$ , где  $R_L$  – активное сопротивление, то  $x_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}$ . Определив активное сопротивление катушки как  $R_L = R - r$ , где  $R = P / I^2$  – активное сопротивление всей цепи, находим  $x_L$ . Из формулы  $x_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ , определяем индуктивность катушки:  $L = x_L / (2\pi \cdot f)$ . Зная параметры катушки, можно вычислить активное  $U_{AL} = I \cdot R_L$  и индуктивное  $U_{pL} = I \cdot x_L$  напряжения катушки.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы.
2. Собрать схему согласно рисунку 1 и подключить её к источнику питания.

3. После проверки преподавателем правильности соединений включить «сеть». Измерить напряжение на приемниках цепи. Результаты наблюдений занести в таблицу 1.
4. Повторить наблюдения при различных значениях индуктивности катушки. Показания приборов занести в таблицу 1.
5. По результатам наблюдений произвести вычисления величин, указанных в таблице 1.
6. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы тока и напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей.
7. Составить отчет по результатам выполненной работы.

**Таблица 1**

Номер опыта	Данные наблюдений					Результаты вычислений												
	U, В	I, А	U <sub>r</sub> , В	U <sub>L</sub> , В	U <sub>C</sub> , В	r, Ом	Z <sub>L</sub> , Ом	R <sub>L</sub> , Ом	U <sub>AL</sub> , В	x <sub>L</sub> , Ом	U <sub>pL</sub> , В	L, Гн	x <sub>C</sub> , Ом	C, мкФ	φ, град	Cos φ	P, Вт	

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Векторные диаграммы.
6. Выводы, сделанные по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Раскройте физический смысл активного, индуктивного и ёмкостного сопротивлений.
2. Покажите, как зависит активное, индуктивное и ёмкостное сопротивления от частоты.
3. Запишите, чему равны углы сдвига фаз между напряжением и током в активном сопротивлении, индуктивном и ёмкостном.
4. Объясните, что понимают под активной, реактивной и полной мощностями цепи.
5. Объясните, какой режим работы называют резонансным.
6. Укажите условия, при которых возникает резонанс напряжений.
7. Покажите, чему равен коэффициент мощности в момент резонанса напряжений.

### Исследование цепи переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора. Построение векторных диаграмм, треугольников сопротивлений и мощностей

Цель: проверить практически и уяснить, какие физические явления происходят в цепи переменного тока; рассчитать параметры отдельных элементов электрической цепи; построить по опытным данным векторные диаграммы, треугольники сопротивлений и мощностей.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

#### Теоретические сведения

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух параллельных ветвей, одна из которых содержит активное сопротивление  $R_1$ , индуктивность  $L_1$ , а другая емкость  $C_2$  (рисунок 1). Действующее значение тока в каждой ветви определяется по закону Ома.

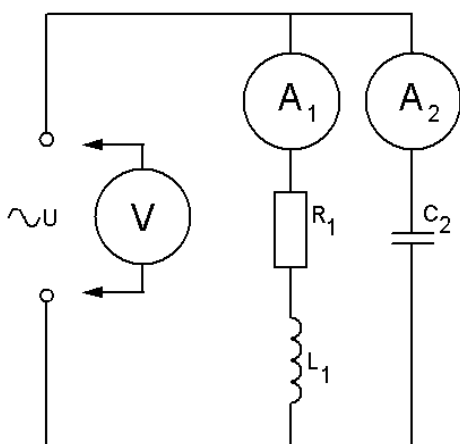


Рисунок 1 – Цепь переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора

Ток в первой цепи:  $I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{L_1}^2}}$ . Этот ток отстает по фазе от напряжения

на угол  $\varphi_1$  (рисунок 2), косинус которого  $\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}$ . Активная составляющая тока в первой ветви  $I_{a_1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1$ , а реактивная составляющая в этой ветви  $I_{p_1} = I_{L_1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1$ .

Ток во второй ветви, содержит емкость, опережает приложенное напряжение на угол  $90^\circ$  и находится по формуле  $I_2 = I_{C_2} = \frac{U}{X_{C_2}}$ .



Ток до разветвления может быть определен как геометрическая сумма токов ветвей, тогда  $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$  или  $I = \sqrt{I_a^2 + (I_{L_1} - I_{C_2})^2}$ , где  $I_a = I_{a_1}$ , а  $I_p = I_{L_1} - I_{C_2}$ . Этот ток может отставать на угол  $\varphi$  от напряжения цепи, если  $I_L > I_C$  (рисунок 2); опережать его, если  $I_L < I_C$  (рисунок 4); или совпадать по фазе с ним, если  $I_L = I_C$  (рисунок 3). В последнем случае наступает явление резонанса токов.

При резонансе токов  $I_p = 0$ ,  $I = I_a$ ,  $P = UI$ , так как  $\varphi = 0$ , а  $\cos\varphi = 1$ . Отсутствие влияния реактивных сопротивлений на значение тока  $I$  при резонансе токов объясняется взаимной компенсацией реактивных составляющих токов  $I_L$  и  $I_C$ , которые сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  и имеют одинаковые абсолютные значения. Следует помнить, что при резонансе токов токи ветвей могут быть больше тока в неразветвленной части цепи, который в момент резонанса достигает минимального значения.

Для цепи с последовательным соединением элементов можно определить параметры по измеренным значениям напряжений  $U_{L_1}, U_{R_1}, U$  и токов  $I_1, I_2, I$ .

Мощность  $P_1$  определим как  $P_1 = UI_1 \cos\varphi_1$ , где значение  $\varphi_1$  определим из выражения:

$\varphi_1 = \arcsin \frac{U_{L_1}}{U}$ . Сопротивление резистора  $R_1$  определим как  $R_1 = \frac{U_{R_1}}{I_1}$ . Емкостное

сопротивление определим по формуле:  $X_{C_2} = \frac{U_{C_2}}{I_2}$ . Зная промышленную частоту тока

определим емкость конденсатора  $C_2 = \frac{1}{\omega X_{C_2}}$ . Параметры катушки определим

следующим образом: полное сопротивление  $Z_{L_1} = \frac{U_{L_1}}{I_1}$  или  $Z_{L_1} = \sqrt{r_1^2 + X_{L_1}^2}$ , где  $r_1$  –

активное сопротивление катушки. Сопротивление цепи определим как  $R_{1a} = \frac{P_1}{I_1^2}$ , тогда

$r_1 = R_{1a} - R_1$ , а  $X_{L_1} = \sqrt{Z_{L_1}^2 - r_1^2}$ . Индуктивность катушки равна  $L_1 = \frac{X_{L_1}}{\omega}$ .

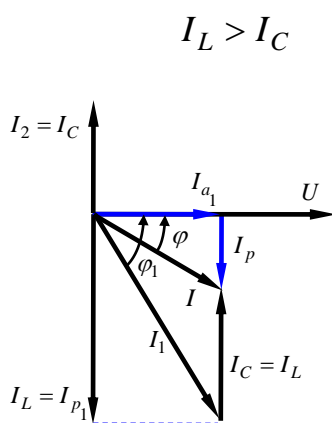


Рисунок 2

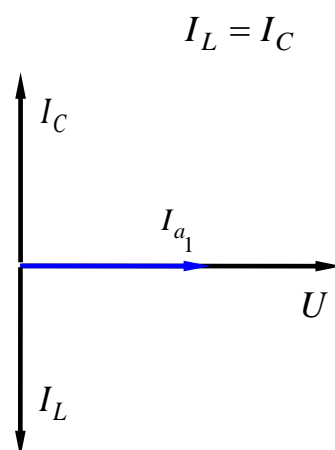


Рисунок 3

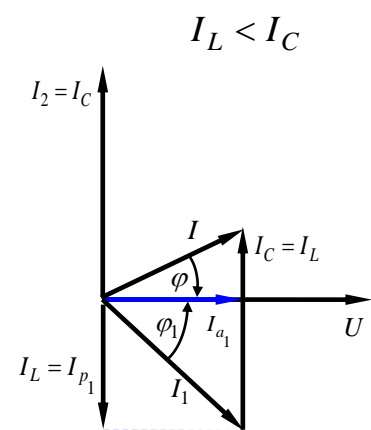


Рисунок 4

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы.
2. Собрать схему согласно рисунку 1 и подключить ее к источнику питания.
3. После проверки преподавателем правильности соединений включить «сеть».
4. Измерить токи в ветвях и напряжение на приемниках цепи. Результаты наблюдений занести в таблицу 1.
5. Повторить наблюдения при различных значениях ёмкости конденсатора. Показания приборов занести в таблицу 1.
6. По результатам наблюдений произвести вычисления величин, указанных в таблице 1.
7. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы тока и напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей.
8. Составить отчет по результатам выполненной работы.

**Таблица 1**

Номер опыта	Данные наблюдений						Результаты вычислений							
	$U, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$U_{L_1}, В$	$U_{R_1}, В$	$I, А$	$\sin \varphi_1$	$\cos \varphi_1$	$L_1, Гн$	$I_{a_1}, А$	$I_{p_1}, А$	$C_2, мкФ$	$R_1, Ом$	$I, А$

### Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Векторные диаграммы.
6. Выводы, сделанные по работе.

### Контрольные вопросы

1. Объясните, какие токи называют активными и реактивными.
2. Запишите, как определяются активная, реактивная и полная проводимости.
3. Укажите условия, при которых в электрических цепях возникает резонанс токов.
4. Объясните, как практически может быть получен резонанс токов.
5. Объясните, могут ли действующие токи параллельно соединенных ветвей электрической цепи превышать действующий ток в её неразветвленной части.
6. Укажите, какими величинами нужно располагать для расчета ёмкости конденсаторной батареи, повышающий коэффициент мощности до заданного значения.

## Исследование трёхфазной цепи при соединении приёмника звездой

Цель: установить соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями при различной нагрузке фаз; выявить роль нейтрального провода, построить векторные диаграммы.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

### Теоретические сведения

Как видно из схемы (рисунок 1), при соединении звездой фазные напряжения приёмника  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  не равны линейным напряжениям  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ . Эти напряжения связаны между собой векторными уравнениями:

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{BC} = U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A.$$

Из схемы (рисунок 1) видно, что при соединении звездой линейные токи равны соответствующим фазным токам:

$$I_L = I_\phi.$$

Фазный ток  $I_\phi$  зависит от фазного напряжения  $U_\phi$  на зажимах приёмника и его полного сопротивления  $Z_\phi$ , что следует из формулы:

$$I_\phi = U_\phi / Z_\phi.$$

Ток в нейтральном проводе (для векторов):

$$I_N = I_A + I_B + I_C.$$

Если полные сопротивления  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  приёмников одинаковые,  $Z_A = Z_B = Z_C = Z_\phi$ , и сдвиги фаз  $\phi_A$ ,  $\phi_B$ ,  $\phi_C$  между фазными напряжениями и соответствующими им фазными токами равны между собой, т. е.  $\phi_A = \phi_B = \phi_C = \phi$ , нагрузку называют симметричной. При симметричной нагрузке фазные напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ , и  $U_C$  одинаковы, фазные токи равны между собой:

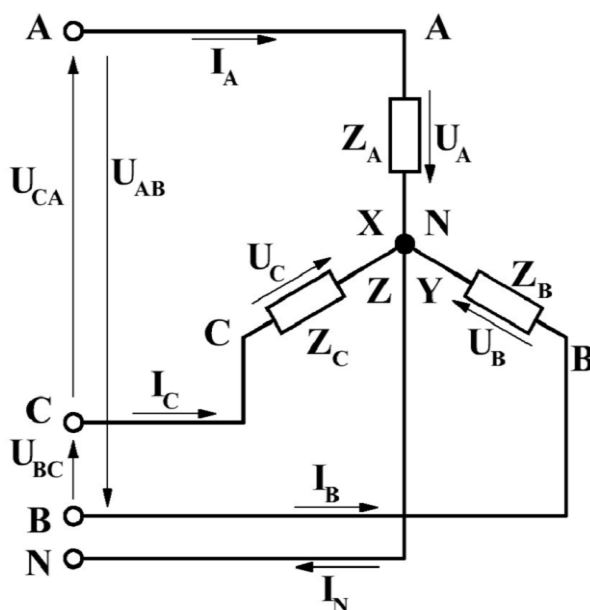


Рисунок 1– Схема соединения фаз приёмника звездой

$$I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi},$$

сдвиги фаз между напряжениями и токами  $U_A$  и  $I_A$ ,  $U_B$  и  $I_B$ ,  $U_C$  и  $I_C$  одинаковы и находятся по формуле:

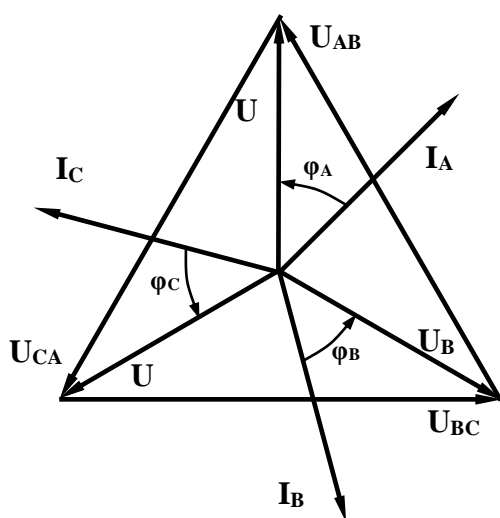
$$\varphi = \text{arctg}(x_{\phi} / R_{\phi}),$$

где  $x_{\phi}$  – реактивное сопротивление фазы нагрузки;

$R_{\phi}$  – ее активное сопротивление.

В этом случае между линейными и фазными напряжениями существует зависимость:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}.$$



**Рисунок 2 – Векторная диаграмма при соединении приёмника звездой в случае симметричной нагрузки**

Векторная диаграмма при симметричной активно-индуктивной нагрузке приведена на рисунке 2. Ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке  $I_N = I_A + I_B + I_C = 0$ . Отсюда следует, что при симметричной нагрузке нейтральный провод не нужен.

Активная мощность трехфазного приемника может быть выражена так:

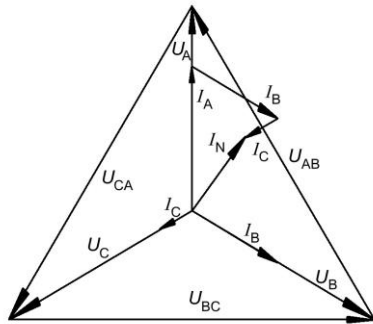
$$P = 3 \cdot P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi_{\phi}$$

или

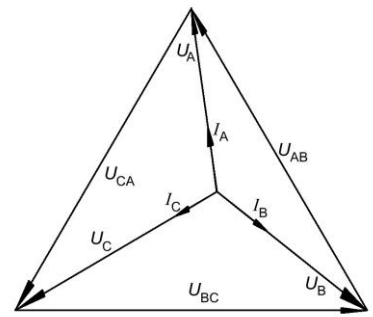
$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi_{\phi}.$$

Если  $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$  или  $\varphi_A \neq \varphi_B \neq \varphi_C$  либо два этих условия выполняются вместе, то нагрузка будет несимметричной. При несимметричной нагрузке и наличии нейтрального провода фазные напряжения приемников практически одинаковы:  $U_A \approx U_B \approx U_C$ , а в нейтральном проводе возникает ток  $I_N \neq 0$ , который можно определить графически (рисунок 3) исходя из векторного уравнения  $I_N = I_A + I_B + I_C$ .

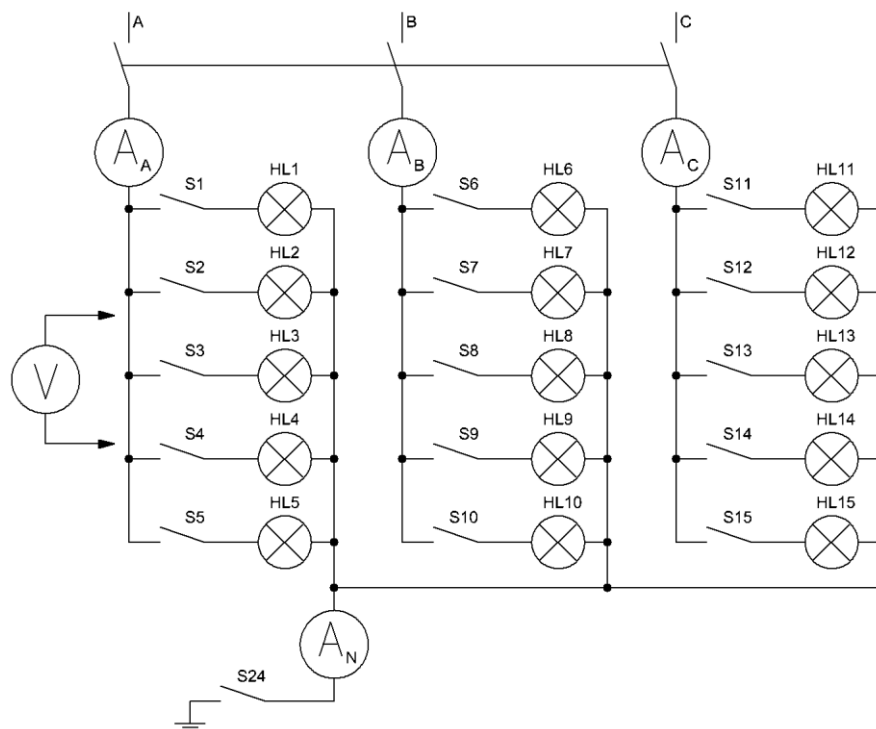
Особенностью электрической цепи при несимметричной нагрузке является то, что она должна иметь обязательно нейтральный провод. При обрыве нейтрального провода ток  $I_N = 0$ . В этом случае токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  должны измениться так, чтобы их векторная сумма оказалась равной нулю:  $I_N = I_A + I_B + I_C = 0$ .



**Рисунок 3 – Векторная диаграмма при соединении приёмника звездой в случае несимметричной нагрузки и при наличии нейтрального провода**



**Рисунок 4 – Векторная диаграмма при соединении приёмника звездой в случае несимметричной нагрузки и обрыве нейтрального провода**



**Рисунок 5 – Схема для исследования трёхфазной электрической цепи при соединении приёмников звездой**

При заданных сопротивлениях нагрузки  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  токи могут измениться только за счет изменения фазных напряжений. Следовательно, обрыв нейтрального провода в общем случае приводит к изменению фазных напряжений (рисунок 4). В результате приемники оказываются под напряжениями, отличающимися от номинального значения фазного напряжения, что недопустимо. Чтобы этого не произошло, необходимо обращать внимание на целостность нейтрального провода, в цепь которого нельзя ставить выключатели и даже защитные устройства, например, предохранители.

Для несимметричной нагрузки активная мощность всех фаз определяется по формуле:  $P = P_A + P_B + P_C$ .

Однофазные приёмники можно включать в трёхфазную четырёхпроводную сеть как на фазное  $U_\phi$ , так и на линейное  $U_L$  напряжение, что позволяет питать от одной

сети приёмники, рассчитанные на номинальные напряжения, отличающиеся друг от друга в  $\sqrt{3}$  раза.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы.

2. Собрать и изучить схему электрической цепи (рисунок 5).

3. Представить собранную цепь для проверки преподавателю. Получив разрешение преподавателя, включить стенд тумблером “ABC”.

4. При замкнутом тумблере “S24” (нейтраль замкнута), установить симметричную нагрузку, для чего, изменяя число включенных ламп в каждой фазе, добиться, чтобы показания амперметров  $A_A, A_B$  и  $A_C$  были одинаковы. С помощью вольтметра измерить фазные  $U_A, U_B, U_C$  и линейные  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  напряжения. Показания всех приборов занести в таблицу 1.

5. Не изменяя числа включенных ламп в фазах, произвести те же измерения, записав показания приборов в таблицу 1 при отключенном нейтральном проводе “S24”.

6. Изменением числа включенных ламп в фазах создать несимметричную нагрузку. Включить нейтральный провод (“S24”). Повторить те же измерения и записать в таблицу 1 показания всех приборов.

7. Не изменяя числа включенных ламп в фазах отключить нейтральный провод и снова произвести те же измерения, записать показания приборов в ту же таблицу. Обратит внимание на то, как влияет наличие нейтрального провода на степень накала ламп при несимметричной нагрузке фаз.

8. Рассчитать мощность каждой фазы и полную мощность, потребляемую нагрузкой, результаты вычислений занести в таблицу 1.

9. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов, используя данные таблицы 1, для трех случаев: а) при симметричной нагрузке с нейтральным проводом; б) при несимметричной нагрузке с нейтральным проводом; в) при той же несимметричной нагрузке без нейтрального провода.

10. Составить отчет по результатам выполненной работы.

**Таблица 1**

Номер опыта	Состояние системы	Данные наблюдений										Результаты вычислений				
		Напряжение, В						Ток, А				Активная мощность, Вт				
		Линейное			Фазное											
		$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P$	
1	Симметричная нагрузка с нейтральным проводом															
2	Симметричная нагрузка без нейтрального провода															
3	Несимметричная нагрузка с нейтральным проводом															
4	Несимметричная нагрузка без нейтрального провода															

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Векторные диаграммы.
6. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объясните, как соединить фазы токоприемника звездой.
2. Дайте определение понятиям «фазное» и «линейное» напряжение.
3. Напишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приёмников звездой.
4. Перечислите условия, при которых трехфазная система называется симметричной.
5. Укажите условия, при которых можно применять трёхфазную трёхпроводную цепь.
6. Объясните, какое назначение имеет нулевой провод в трёхфазных цепях.
7. Укажите, как определить ток в нейтральном проводе.
8. Объясните, к чему может привести обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке.

## Исследование трёхфазной цепи при соединении приемника треугольником

Цель: установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при различной нагрузке фаз, выявить на опыте влияние обрыва линейного провода на работу трехфазного потребителя, построить векторные диаграммы при симметричной и несимметричной нагрузке фаз.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода.

### Теоретические сведения

Каждая фаза приёмника при соединении треугольником (рисунок 1) подключена к двум линейным проводам. Поэтому независимо от значения и характера сопротивлений приёмника каждое фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению  $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$

Ток каждого приёмника, входящего в соединение треугольника, является фазным:  $I_{\Phi} = U_{\Phi} / Z_{\Phi}$ , где  $U_{\Phi}$  – фазное напряжение данного приёмника;  $Z_{\Phi}$  – его полное сопротивление.

Фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  в общем случае не равны линейным токам  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$ . Применяя первый закон Кирхгофа к узловым токам А, В и С, можно получить следующие соотношения между линейными и фазными токами:  $I_A = I_{AB} - I_{CA}$ ,  $I_B = I_{BC} - I_{AB}$ ,  $I_C = I_{CA} - I_{BC}$ .

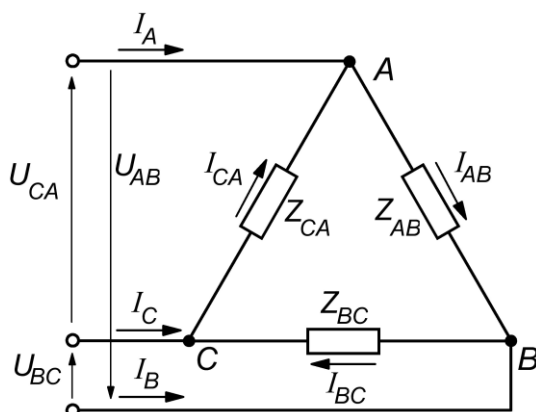
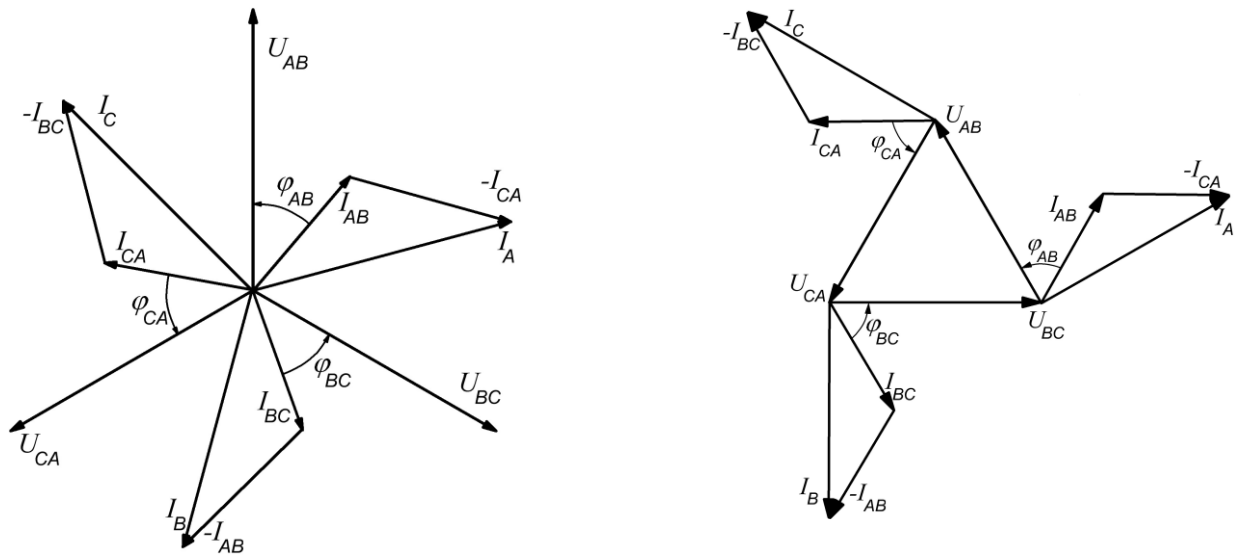


Рисунок 1 – Схема соединения фаз приёмника треугольником

Нагрузку называют симметричной, если  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$  и  $Z_{CA}$  приёмников одинаковы (по величине и характеру):  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_{\Phi}$ ; сдвиги фаз  $\varphi_{AB}$ ,  $\varphi_{BC}$  и  $\varphi_{CA}$  между фазными напряжениями и соответствующими им фазными токами равны между собой:  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi$ . При симметричной нагрузке фазные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  одинаковы, фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  равны между собой, сдвиги фаз между напряжениями и токами  $U_{AB}$  и  $I_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $I_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и  $I_{CA}$  одинаковы и определяются по формуле  $\varphi = \arctg(X_{\Phi} / R_{\Phi})$ , где  $X_{\Phi}$  – реактивное сопротивление фазных нагрузок;  $R_{\Phi}$  – её активное сопротивление.

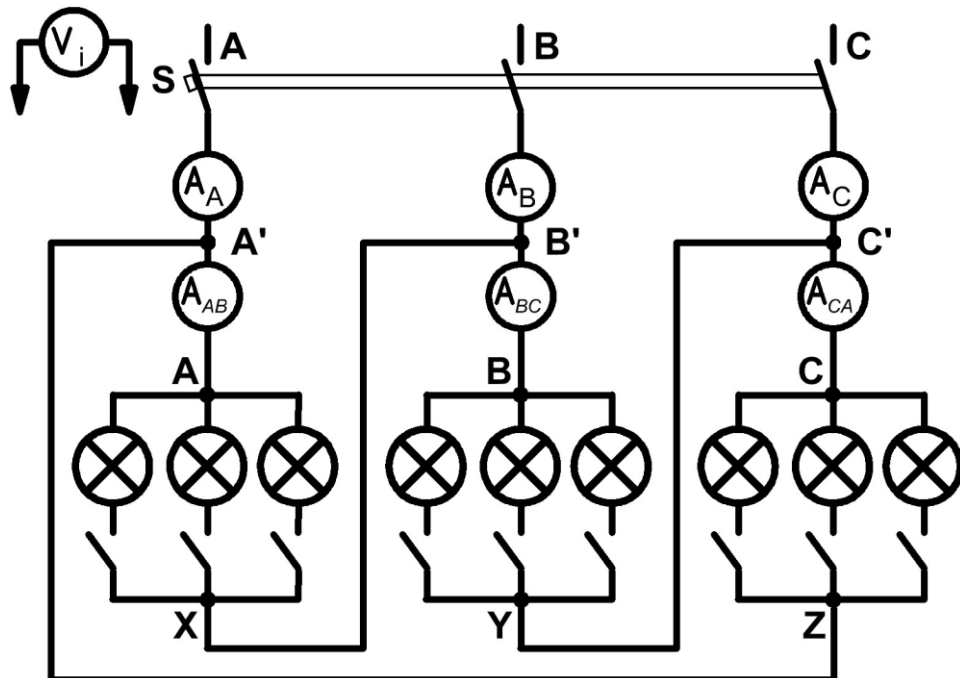


Векторные диаграммы фазных (линейных) напряжений, а также фазных и линейных токов при симметричной активно-индуктивной нагрузке приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Векторные диаграммы при соединении приёмника треугольником в случае симметричной нагрузки**

При симметричной нагрузке равные линейные токи отстают от соответствующих фазных токов на  $\pi/6$  и превышают их в  $\sqrt{3}$  раза, т.е.  $I_L = \sqrt{3} I_\phi$ . При несимметричной нагрузке, имеющей место при несоблюдении равенства  $Z_{AB} \neq Z_{BC} \neq Z_{CA}$  или  $\varphi_{AB} \neq \varphi_{BC} \neq \varphi_{CA}$  либо обоих равенств, нарушается симметрия как фазных, так и линейных токов.



**Рисунок 3 – Схема для исследования трёхфазной электрической цепи при соединении приёмника треугольником**

Всякое изменение нагрузки одной из фаз, при соединении приёмников треугольником, вызывает одновременное изменение соответствующих фазного и двух

линейных токов, однако не влияет на фазные напряжения и токи других фаз, а также на третий линейный ток.

Обрыв линейного провода нарушает нормальный режим работы трехфазной цепи. При этом приёмники одной фазы находятся под номинальным фазным напряжением, а приёмники двух других фаз оказываются последовательно соединенными и находятся под этим же напряжением. Фазные напряжения этих приемников прямо пропорциональны их полным сопротивлениям, т.е. приёмники оказываются под напряжением, отличающимся от номинального значения фазного напряжения.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы.

2. Изучить схему электрической цепи (рисунок 3).

3. По схеме собрать все последовательные цепи до входных зажимов А, В, С приёмников. Полученные цепи соединить треугольником. Представить собранную цепь для проверки преподавателю.

4. Получив разрешение преподавателя, включить стенд тумблером «АВС». Установить симметричную нагрузку, для чего, изменяя число включенных ламп, добиться, чтобы показания амперметров  $A_{AB}$ ,  $A_{BC}$  и  $A_{CA}$  были одинаковы. С помощью вольтметра со щупами измерить напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ . Записать показания всех приборов в таблицу 1.

5. Создать несимметричную нагрузку фаз, изменяя число включенных ламп. Повторить измерения токов и напряжений, показания приборов записать в ту же таблицу 1. Не изменяя присоединенную нагрузку, отсоединить одни из линейных проводов, включить трёхфазную установку и вновь записать показания всех приборов в таблицу 1.

6. Определить отношение линейного тока к фазному для случая симметричной нагрузки фаз, сравнить его с теоретическим значением этой величины.

7. Подсчитать мощность каждой фазы и полную мощность, потребляемую нагрузкой, результаты вычислений занести в таблицу 1.

8. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов симметричной и несимметричной нагрузки фаз, используя данные таблицы 1.

9. Составить отчет по результатам выполненной работы.

**Таблица 1**

Номер опыта	Состояние системы	Данные наблюдений									Результаты вычислений			
		Напряжение, В			Ток, А						Активная мощность, Вт			
		$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$	$P_{AB}$	$P_{BC}$	$P_{CA}$	$P$
1	Симметричная нагрузка													
2	Несимметричная нагрузка													
3	Несимметричная нагрузка с обрывом линейного провода													

## Содержание отчета

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Построенные в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов симметричной и несимметричной нагрузки фаз (построения рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге).
6. Выводы, сделанные по работе.

## Контрольные вопросы

1. Объясните, как три однофазных приёмника соединить треугольником.
2. Напишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приёмников треугольником.
3. Объясните, как изменяются линейные токи симметричного приёмника при переключении его сопротивлений со звезды на треугольник при питании от одного и того же источника.
4. Проанализируйте, как изменяются линейные токи симметричного приемника, соединенного треугольником, при обрыве одной из его фаз.
5. Перечислите преимущества и недостатки схемы соединения треугольником по сравнению со схемой соединения звездой.
6. Проанализируйте, как изменяются линейные и фазные токи симметричного приемника, соединенного треугольником, при обрыве одного из линейных проводов.

## Лабораторная работа № 17

### Исследование переходных процессов зарядки и разрядки конденсаторов. Построение графиков изменения тока и напряжения в функции времени

Цель: исследовать процессы, происходящие в неразветвленной цепи, содержащей сопротивление и емкость, при включении на постоянное напряжение, а также при разрядке конденсатора на резистор. Построить графики изменения тока и напряжения в функции времени, определить постоянную времени.

Приборы и оборудование: стенд лабораторный «НТЦ-07», соединительные провода, секундомер.

#### Теоретические сведения

При включении конденсатора на постоянное напряжение (рисунок 1) в цепи возникает электрический ток, пластины конденсатора начинают заряжаться. В первый момент ток от нулевого значения скачком возрастает, затем начинает уменьшаться по экспоненциальному закону (рисунок 2):

$$i = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

где  $i$  – сила тока в момент времени  $t$ , отсчитанный от начала переходного процесса, т. е. от момента коммутации;

$I$  – сила тока в момент коммутации определяется по формуле:  $I = \frac{U}{R}$ ;

$\tau = R \cdot C$  – постоянная времени (характеризующая скорость переходного процесса), измеряемая в секундах.

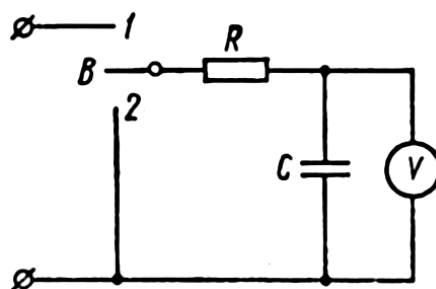


Рисунок 1

Напряжение на резисторе равно:

$$u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

т. е. оно изменяется аналогично изменению тока: скачком возрастает, а затем постепенно падает.

Напряжение на конденсаторе изменяется по возрастающей экспоненте:

$$u_C = U \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3)$$

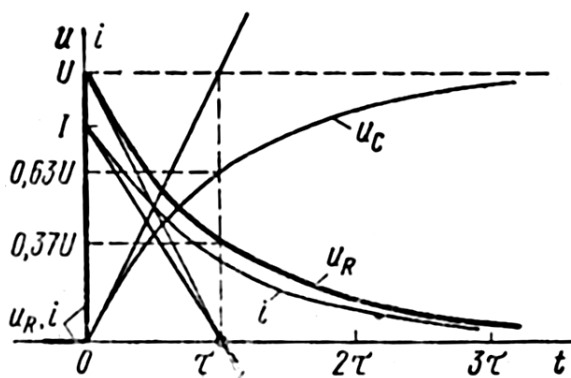


Рисунок 2

За время  $t = \tau$  напряжение  $u_C$  при зарядке конденсатора возрастает до значения  $0,63 \cdot U$ . Отсюда следует простой способ нахождения  $\tau$  графическим методом по известной кривой напряжения (рисунок 2). Приняв значение  $U$  за единицу, находят величину  $0,63 \cdot U$ , а затем, отложив эту ординату, по графику определяют абсциссу  $\tau$ . Если известна кривая тока, то откладываем ординату  $0,63 \cdot I$  и аналогично определяем абсциссу  $\tau$ .

Существует второй способ, он также показан на рисунке 2. Постоянная времени равна отрезку на прямой напряжения сети  $U$ , отсекаемому касательной, которая проведена через точку  $t=0$  к кривой напряжения  $u_C$ . Если провести касательные к кривым тока и напряжения  $u_R$ , то они пересекут горизонтальную ось в момент  $t = \tau$ .

При разрядке конденсатора на резистор, напряжения  $u_C$  и  $u_R$  и ток  $i$  уменьшаются, асимптотически приближаясь к нулю (рисунок 3):

$$i_C = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; u_C = u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4)$$

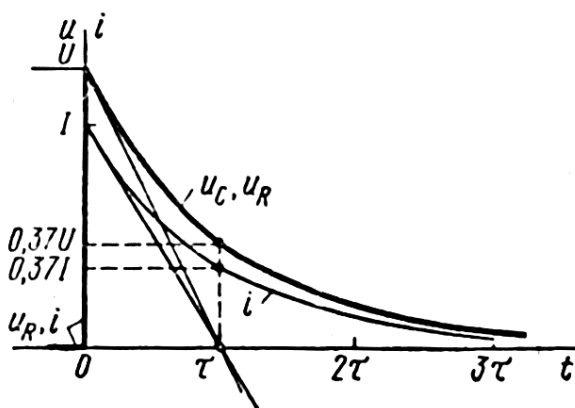


Рисунок 3

В момент коммутации кривые тока и напряжения  $u_R$  делают скачок от нулевого значения до максимального, а напряжение  $u_C$  остается в первый момент времени неизменным.

Из рассмотрения переходных процессов можно сделать вывод: в момент коммутации ёмкостное напряжение не может измениться скачком. Это положение называют *вторым законом коммутации* (первый закон относится к цепи с индуктивностью).

### Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь (рисунок 1) и показать её преподавателю для проверки.
2. Замкнуть резистор проводником, установить заданную преподавателем ёмкость батареи конденсаторов. Подготовить конденсатор к зарядке, для чего поставить переключатель в положение 2, разрядив тем самым конденсатор. Поставить переключатель в положение 1, включить цепь, установить необходимое напряжение на конденсаторе. Вернуть переключатель в положение 2 и снять перемычку с резистора. На этом заканчивается подготовка конденсатора к зарядке.
3. Подключить конденсатор к сети (переключатель поставить в положение 1) и через различные промежутки времени записать показания вольтметра в таблицу 1. Опыт зарядки конденсатора продолжать до практического окончания переходного процесса.
4. Перевести переключатель в положение 2 и повторить измерение напряжения при разрядке конденсатора. Опыт продолжать до практического окончания переходного процесса. Результаты записать в таблицу 1.
5. Повторить зарядку и разрядку конденсатора при другой какой-либо ёмкости.
6. Повторить зарядку и разрядку конденсатора при другом каком-либо сопротивлении.

Таблица 1 – Результаты измерений

Задано			Расчет $\tau, c$	Зарядка				Разрядка			
$R,$ Ом	$C,$ мкФ	$U,$ В		$t, c$	$u_C, B$	$u_R, B$	$i, A$	$t, c$	$u_C, B$	$u_R, B$	$i, A$

7. Рассчитать постоянную времени по известным параметрам цепи:  $\tau = R \cdot C$ .
8. Определить напряжение на резисторе для различных моментов времени  $u_R = U - u_C$ .
9. Определить силу тока, в цепи для различных моментов времени:  $i = \frac{u_R}{R}$ .
10. По результатам опытов построить графики токов в одной системе координат, а графики напряжений – в другой.
11. Графическим методом определить постоянную времени.

12. По лабораторной работе сделать заключение относительно: а) зависимости постоянной времени и длительности переходного процесса от сопротивления и ёмкости цепи; б) причин неполного совпадения значения, полученного расчетным и графическим методам.

13. Выводы записать в отчет.

### **Содержание отчета**

1. Тема, цель лабораторной работы, оборудование.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Графическая часть (выполненная на миллиметровой бумаге).
6. Выводы, сделанные по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение понятию «переходный процесс».
2. Изобразите графики тока и напряжений при зарядке конденсатора.
3. Запишите уравнения кривых тока и напряжения при зарядке конденсатора.
4. Дайте определение понятию «постоянная времени цепи». Объясните, каким способом её можно определить.
5. Изобразите графики тока и напряжений при разрядке конденсатора.
6. Запишите уравнения кривых тока и напряжения при разрядке конденсатора.
7. Укажите направление энергии при зарядке и разрядке конденсатора.
8. Объясните, почему конденсатор не может зарядиться или разрядиться мгновенно.
9. Сформулируйте второй закон коммутации.

## Критерии оценки результатов учебной деятельности учащихся

Оценка результатов	Показатели оценки
<b>не зачтено</b>	<p>Работа выполнена не полностью и объем выполненной части работы не позволяет сделать правильные выводы. В ходе проведения опыта и измерения были допущены ошибки: неумение подготовить к работе лабораторное оборудование, несоблюдение условий проведения опыта или измерений, неумение провести необходимые расчеты или использовать полученные данные для выводов. При выполнении лабораторной работы нарушались требования Правил безопасного поведения в лаборатории. Не предоставлен отчет о выполнении лабораторной работы или отчет выполнен не в полном объеме</p>
<b>зачтено</b>	<p>Работа выполнена в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности проведения опытов и измерений. Проведен самостоятельный и рациональный монтаж необходимого оборудования. Все опыты проведены в условиях и режимах, обеспечивающих получение правильных результатов и выводов. Соблюдены требования Правил безопасного поведения в лаборатории. Предоставлен отчет о выполнении лабораторной работы, в котором указаны: номер лабораторной работы, тема, цель, оборудование, схема, программа работы, расчетные формулы и сами расчеты, таблицы, графики, выводы. Текст написан четким понятным почерком. Схемы, таблицы, графики и другие построения выполнены карандашом и с помощью чертежных инструментов. При изображении схем соблюдены ГОСТы. Математическая обработка экспериментальных данных приведена полностью с указанием расчетных формул и порядка расчета. Сделан вывод, касающийся выполнения поставленной задачи, подтверждения опытным путем тех законов, правил и формул, которые изучались на теоретических занятиях, в котором прослеживается умение проанализировать полученные результаты и объяснить причины расхождения расчетных и опытных данных</p>



## Список рекомендуемой литературы

- [1] **Евдокимов, Ф.Е.** Теоретические основы электротехники / Ф.Е. Евдокимов. 9-е изд. М.: Академия, 2004. 560 с.
- [2] **Лоторейчук, Е.А.** Теоретические основы электротехники / Е.А. Лоторейчук. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2021. 320 с.
- [3] **Попов, В.С.** Теоретическая электротехника / В.П. Попов. 6-е изд., испр. М.: Высш. шк., 2007. 576 с.
- [4] **Цейтлин, Л.С.** Руководство к лабораторным работам / Л.С. Цейтлин. М.: Высш. шк., 1977. 206 с.

