



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

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора  
по учебной работе

\_\_\_\_\_ С.В. Маркина

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения лабораторных работ

для учащихся специальности

2–39 02 32 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств»

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

Методические указания разработаны на основании учебной программы  
«Теоретические основы электротехники», утвержденной директором Филиала  
БрГТУ Политехнический колледж 14.06.2016 г.

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

Протокол № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

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

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

## **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.

# **Лабораторная работа № 1**

## **Изучение оборудования лаборатории, методов подбора аппаратуры и измерительных приборов для сборки схем**

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.

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

### **Правила техники безопасности 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. К проведению лабораторных работ допускаются только учащиеся, знающие правила внутреннего распорядка и правила техники безопасности. Инструктаж по технике безопасности проводит преподаватель, что фиксируется в специальном журнале по ТБ.
2. При проведении работ запрещается громко разговаривать, отвлекать работающих за рабочим местом, покидать рабочие места без разрешения преподавателя и переходить от одного стенда к другому, а также оставлять без наблюдения включенную лабораторную установку.
3. Приступая к работе в лаборатории, группа делится на бригады, которые затем распределяются по лабораторным столам.
4. Электрические цепи собираются при отключенном источнике питания (все выключатели должны находиться в положении «Выключено»). При необходимости изменений в цепи в процессе работы нужно отключить источник питания.
5. Сборку электрической цепи производят соединительными проводами в строгом соответствии со схемой, представленной в методических указаниях, обеспечивая при этом надежность электрических контактов всех разъемных соединений. При сборке необходимо следить, чтобы соединительные провода не скручивались петлями. При монтаже схем используются только изолированные провода. Пользоваться оголенными проводами или с поврежденной изоляцией запрещается. При сборке схемы следует обратить внимание на высокую надежность контактов всех разъемных соединений.

6. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю. Учащемуся категорически запрещается включать схему без проверки ее преподавателем.
7. Включение электрической цепи под напряжение производится после проверки её преподавателем с его разрешения и в его присутствии.
8. Напряжение к рабочему месту подается только преподавателем.
9. Устранение замеченных в рабочей цепи неисправностей, а также все пересоединения, необходимые по ходу работы, производятся только при отключенном напряжении. Повторное включение схемы после этих пересоединений допускается только после разрешения преподавателя.
10. Во время работы запрещается прикасаться к оголенным частям электрической цепи.
11. При обнаружении (выявлении) неисправности в цепи или в работе лабораторного оборудования, появления специфичного запаха, повреждения оборудования или приборов необходимо немедленно отключить электропитание стенда (оборудования) и известить об этом преподавателя.
12. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания. При потере сознания и остановке дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.
13. Перед включением регулируемого источника питания необходимо убедиться, что его ручка стоит в положении, соответствующем минимальному выходному напряжению.
14. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, который может быть причиной поражения электрическим током.
15. При работе с мультиметром следует правильно выбирать род измеряемой величины, предел её измерения и гнезда для подключения щупов. При работе с осциллографом во избежание перегрузки по входу необходимо правильно выбирать предел измерения его усилителя.
16. При использовании электрических машин необходимо строго выполнять правила и порядок их пуска.
17. По окончании работы напряжение у рабочего места необходимо немедленно отключить. После утверждения преподавателем результатов лабораторной работы необходимо разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.
18. Смена перегоревших предохранителей и т.п. производится только обслуживающим персоналом лаборатории.
19. Не следует загромождать свое рабочее место на стенде вещами, не относящимися к данной работе.
20. Запрещается во время работы загромождать подходы к стендам стульями, скамейками и т.п. Доступ к стендам, включенным под напряжение, должен быть свободен.

## 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.

## 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).

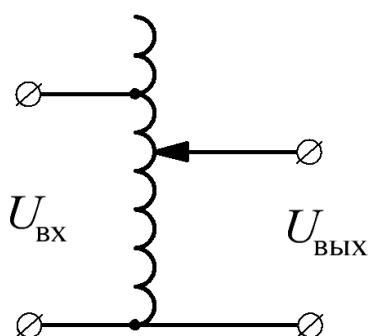


Рисунок 1 – ЛАТР

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.




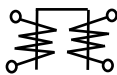











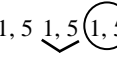




Весьма важным потребителем является катушка индуктивности. Индуктивность катушки можно изменять, перемещая катушку относительно ферромагнитного сердечника. Чем меньше витков в катушке и чем дальше она находится от сердечника, тем меньше индуктивность.

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	
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.

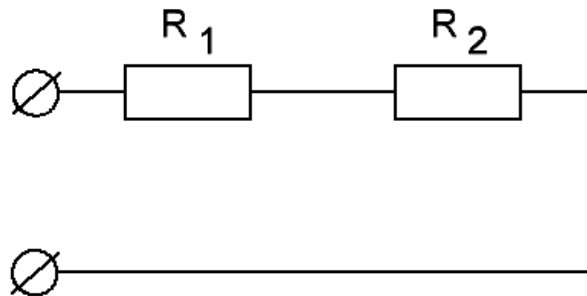


Рисунок 2 – Схема 1

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

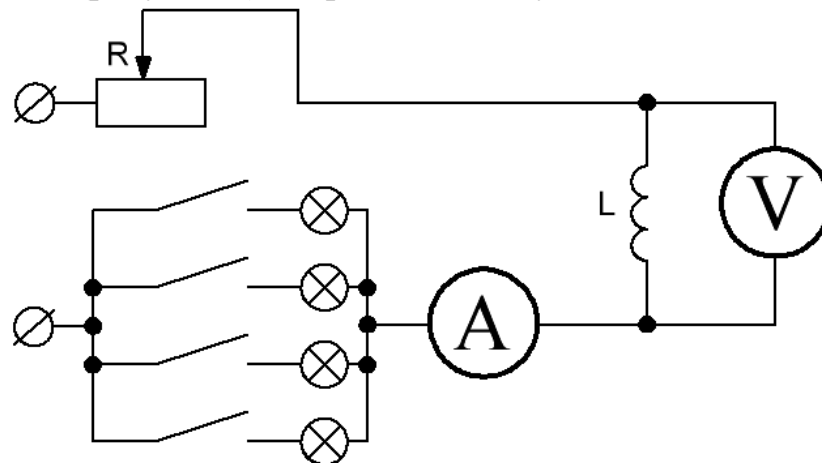


Рисунок 3 – Схема 2

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

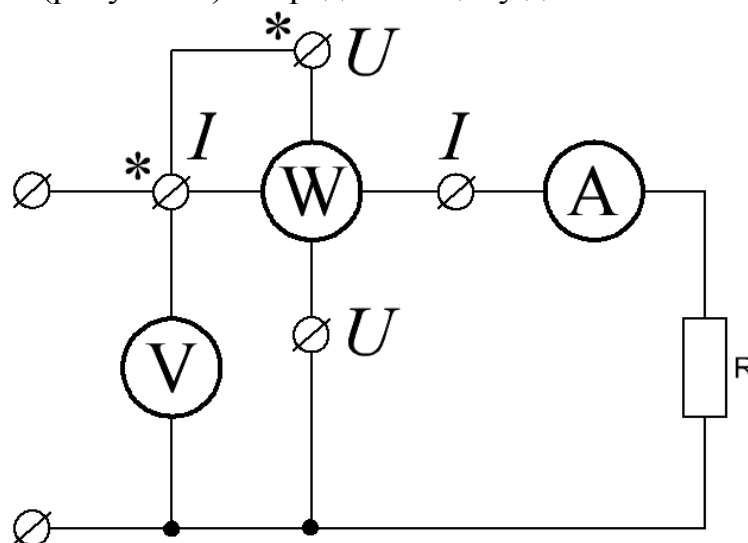


Рисунок 4 – Схема 3

6. Составить отчет по результатам выполненной работы.

## **Содержание отчета**

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

## **Контрольные вопросы**

1. Какие требования по ТБ необходимо соблюдать?
2. Какие средства защиты используются в лабораторном оборудовании?
3. Опишите принцип действия плавкого предохранителя.
4. Из каких элементов состоит электрическая цепь и каково их назначение?
5. Каков порядок сборки электрической цепи?
6. Какие системы электроизмерительных приборов Вы знаете?
7. Как определить показания прибора при данном пределе измерений?

## Лабораторная работа № 2

### Исследование режимов работы электрической цепи и ее элементов (неразветвленной электрической цепи с переменным сопротивлением приемника энергии)

Цель: изучить режимы работы источника электрической энергии, проанализировать соотношение между ЭДС и напряжением на его зажимах.

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

#### Порядок выполнения работы

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

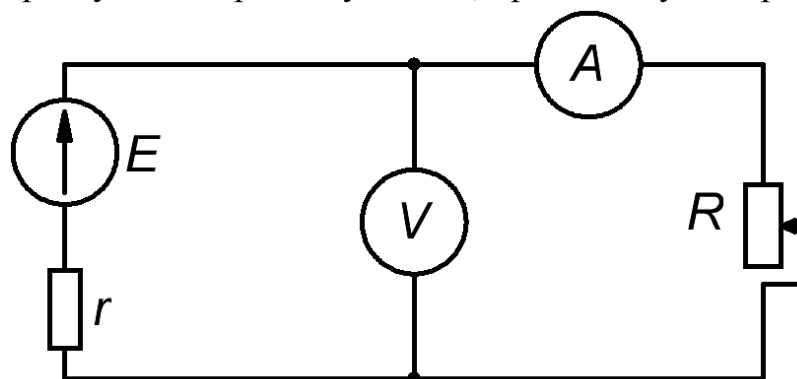


Рисунок 1 – Электрическая цепь

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 и цель лабораторной работы.
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. При каком соотношении  $r$  и  $R$  мощность приемника получается наибольшей.
2. Почему уменьшается напряжение на зажимах источника при увеличении тока в цепи.
3. Объясните режим холостого хода электрической цепи.
4. Объясните номинальный режим электрической цепи и ее элементов.
5. Объясните рабочий режим электрической цепи и ее элементов.
6. Объясните режим короткого замыкания электрической цепи.

## 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.

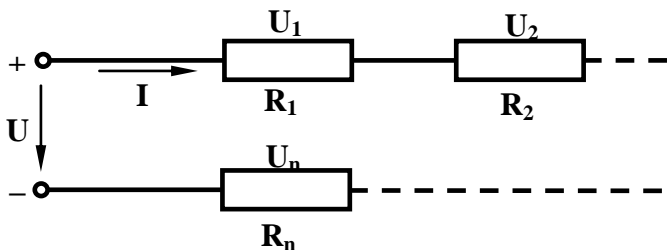


Рисунок 1 – Последовательное соединение резисторов

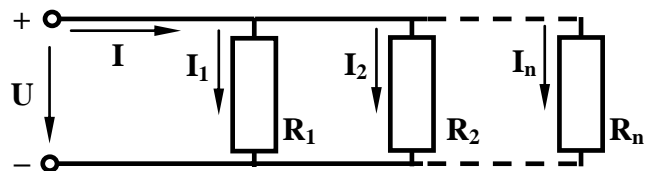


Рисунок 2 – Параллельное соединение резисторов

*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.

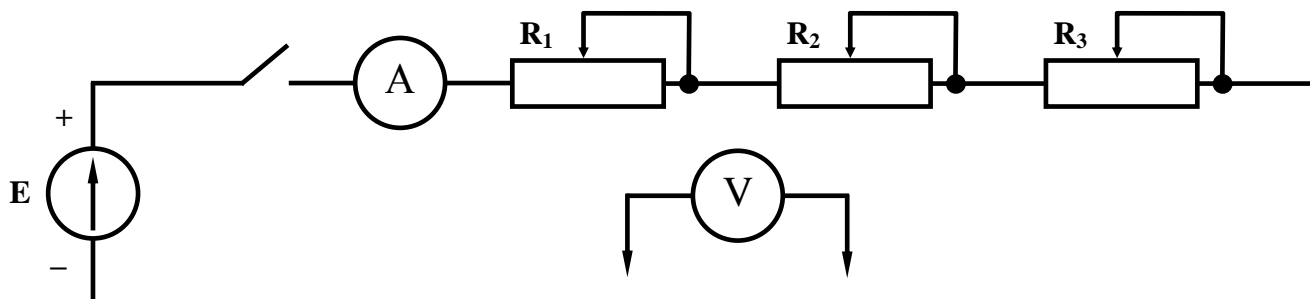


Рисунок 3 – Схема для исследования цепи с последовательным соединением резисторов

2. Вычислить:

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

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

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

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

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

Таблица 1

Номер опыта	Данные наблюдений					Результаты вычислений									
	$U_{\text{общ}}, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R_{\text{экв}}, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R'_{\text{экв}}, \text{Ом}$	$U'_{\text{общ}}, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_3, \text{Вт}$	$P, \text{Вт}$

### Исследование цепи при параллельном соединении резисторов

1. Собрать электрическую схему рисунок 4. Измерить токи и напряжения для двухположений 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.

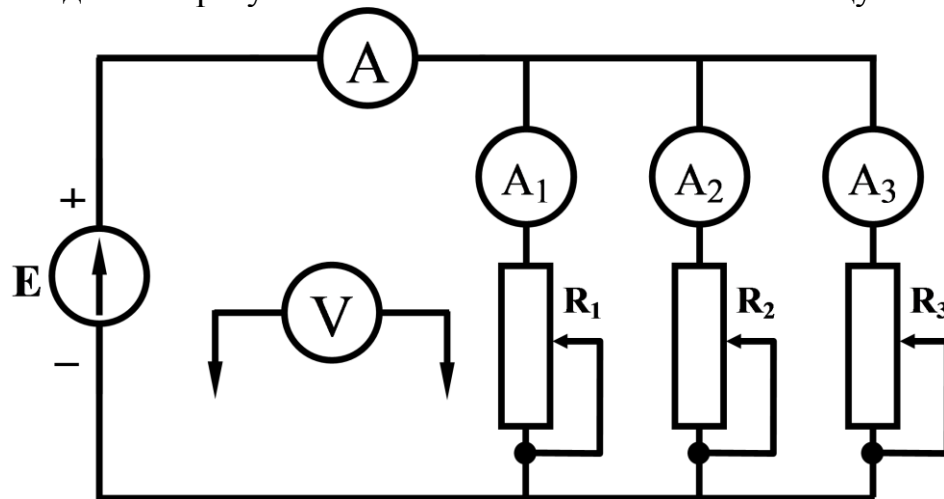


Рисунок 4 – Схема для исследования цепи с параллельным соединением резисторов

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

### Контрольные вопросы

1. В чем сходство и различие закона Ома для участка цепи и всей цепи?
2. Почему при определении ЭДС источника тока с помощью вольтметра необходимо разомкнуть цепь?
3. Какое соединение резисторов называют последовательным? параллельным?
4. Как распределяются токи, напряжения при последовательном соединении резисторов? При параллельном соединении резисторов?
5. Чему равно полное сопротивление цепи при последовательном соединении резисторов? При параллельном соединении?
6. По каким формулам можно найти мощность потребляемую резистором?

## Лабораторная работа № 4

### 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.

#### 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. Прочитать по второму закону Кирхгофа баланс напряжений и ЭДС для всех контуров цепи.
8. Произвести расчет цепи теоретически по методу узловых и контурных уравнений, считая известными значения ЭДС и сопротивлений, и сравнить полученные значения токов экспериментально.

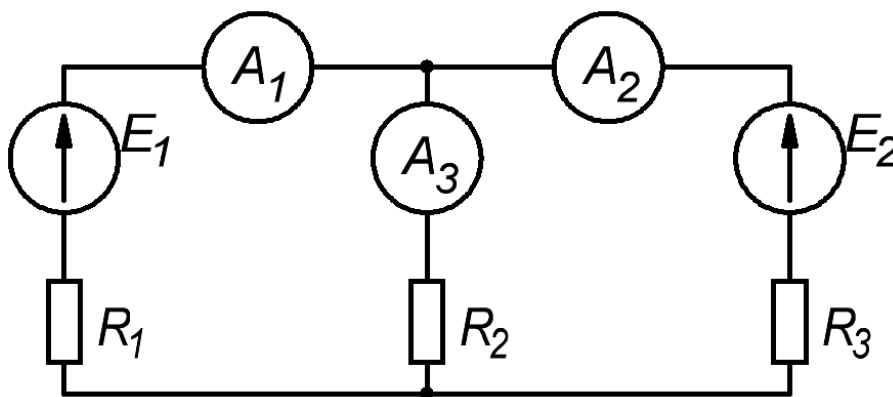


Рисунок 1 – Схема эксперимента

Таблица 1

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

## **Содержание отчета**

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

## **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается смысл первого закона Кирхгофа?
2. В чем заключается второй закон Кирхгофа?
3. Какие ЭДС и падения напряжений считаются положительными, а какие отрицательными?
4. Как изменится уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа, если обходить контур в обратном направлении?
5. Как выбирается знак перед падением напряжения на внутреннем сопротивлении источника?

## Лабораторная работа № 5

### 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.

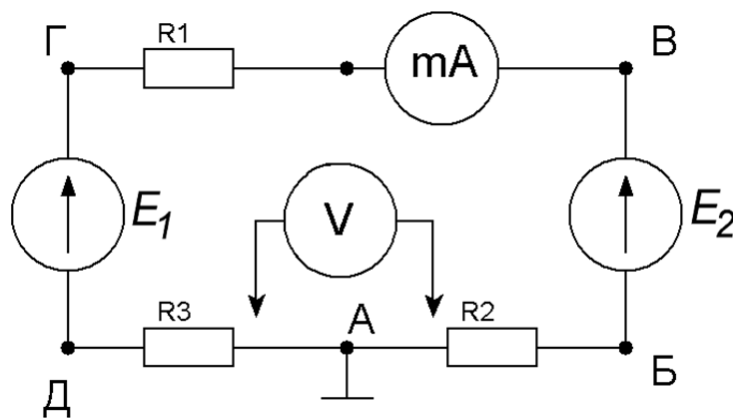


Рисунок 1 – Схема эксперимента

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

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

Знак «+» в числителе означает, что источники соединены согласно, и «-» – 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

$$\varphi_B = \varphi_A \pm I \cdot R_2$$

Знак плюс ставят при направлении тока в резисторе от точки Б к точке А, т.е.  $\varphi_B > \varphi_A$ , а минус при обратном направлении тока.

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

$$\varphi_B = \varphi_B \pm E_2$$

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

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

$$\varphi_B = \varphi_B \pm E_2 \pm I \cdot r_2$$

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

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое потенциал точки электрического поля?
2. Как рассчитать потенциал точки электрической цепи?
3. Как определить направление тока в неразветвленной цепи, имеющей несколько источников?
4. Можно ли определить направление тока в резисторе, если известны потенциалы на его зажимах?
5. В каком направлении следует двигаться по цепи при расчете потенциалов, по ходу или против хода часовой стрелки?
6. Как следует откладывать сопротивления при построении потенциальной диаграммы?

## Лабораторная работа № 6

### 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**. Цепь, содержащая такие элементы, будет являться так же нелинейной.

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

К нелинейным элементам относятся полупроводниковые, электровакуумные, газоразрядные и др. 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.

#### 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.

4. Собрать схему параллельного соединения нелинейных элементов рисунок 1.

5. Снять ВАХ двух параллельно соединённых диодов. Показания тока измерять в общей цепи  $I$  и в одной из ветвей  $I_1$ .

6. Результаты измерений занести в таблицу 2.

7. По результатам измерений построить ВАХ в одной системе координат.

Применяя графический метод для параллельного соединения построить ВАХ второго диода.

Таблица 1

$U$ , В							
$U_L$ , В							
$I$ , А							

Таблица 2

$U$ , В							
$I$ , А							
$I_L$ , А							

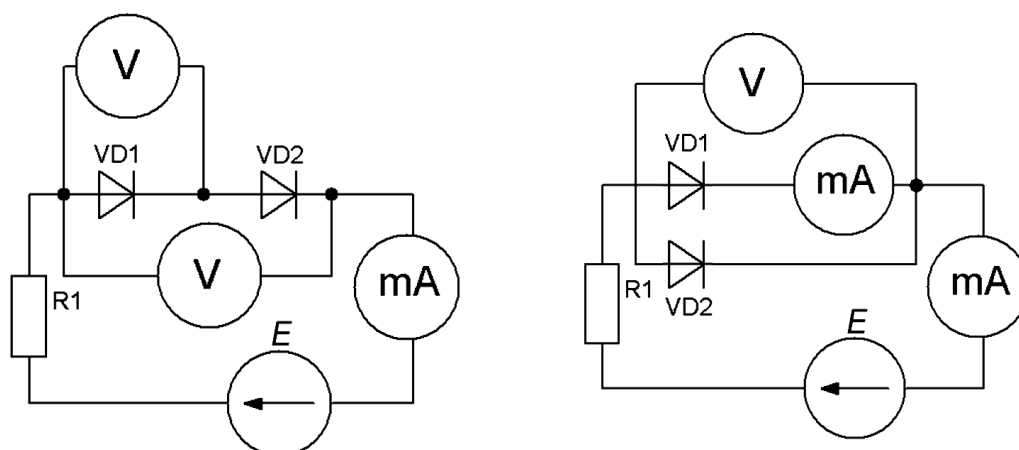


Рисунок 1 – Схемы экспериментов

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

1. Что такое нелинейный элемент, нелинейная цепь?
2. Что такое динамическое сопротивление?
3. Что такое статическое сопротивление?
4. В чём сущность графического и аналитического методов расчёта нелинейных цепей постоянного тока?
5. Почему характеристика выпрямительного диода несимметрична относительно начала координат? У каких элементов она симметрична?



## Лабораторная работа № 7

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

Цель: изучение законов электростатики и одного из методов измерения емкости конденсатора.

Приборы и оборудование: конденсатор с известной емкостью, конденсатор с неизвестной емкостью  $C_x$ , источник постоянного тока, переключатель, интегратор, цифровой вольтметр.

#### 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.

Емкостью 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.

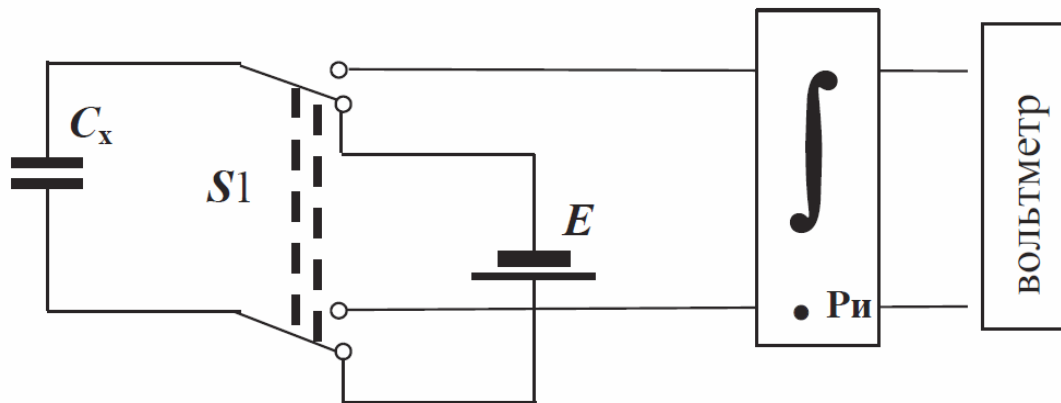
$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi}. \quad (1)$$

Емкость 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 ( $\Phi = \text{Кл/В}$ ).

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.

Емкость конденсатора может быть измерена различными методами. В данной работе использован метод, основанный на измерении накопленного конденсатором заряда. При этом емкость рассчитывается в соответствии с (1).



**Рисунок 1 – Схема электрической цепи для определения емкости конденсатора**  
 ( $C_x$  – конденсатор неизвестной емкости;  $E$  – источник питания, служащий для зарядки конденсатора до разности потенциалов, равной ЭДС источника ( $\Delta\varphi = E$ );  $\int$  – интегратор тока;  $R_i$  – кнопка разряда интегратора;  $S1$  – переключатель, позволяющий подключать конденсатор к источнику питания  $E$  при зарядке и к интегратору при разрядке.).

Для определения емкости неизвестного конденсатора  $C_x$  собирают цепь по схеме, приведенной на рисунке 1.

При подключении к источнику питания конденсатор заряжается. Заряд, накапливаемый на обкладках конденсатора, при неизменном значении разности потенциалов  $\Delta\varphi$  пропорционален его емкости. В стационарном состоянии разность потенциалов равна ЭДС источника  $E$ .

$$Q = C_x \cdot E \quad (2)$$

При разрядке конденсатора в цепи протекает убывающий во времени электрический ток. По определению, сила тока

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

Для определения заряда  $Q$ , необходимо вычислить  $Q = \int_0^{\infty} I dt$ . Этой цели служит электронное устройство, называемое интегратором.

При подключении заряженного конденсатора к интегратору, который в свою очередь подключен к вольтметру, в цепи интегратора протекает ток. Напряжение на выходе интегратора пропорционально интегралу от силы тока на его входе, т.е. заряду:

$$U_x = b \int I(t) dt = b \int \frac{dQ}{dt} \cdot dt = b \int dQ = bQ \quad (4)$$

где  $b$  – постоянная интегратора (она неизвестна).

Напряжение  $U_x$  измеряется цифровым вольтметром. Сопоставляя формулы (2) и (4), получаем:

$$\frac{U_x}{b} = C_x \cdot E \quad (5)$$

В полученном выражении постоянная интегратора  $b$  и разность потенциалов на конденсаторе  $E$  являются неизвестными. Поэтому только на основании (5) определить  $C_x$  оказывается невозможным. Для того, чтобы избежать определения величин  $b$  и  $E$ , в данной работе применяется хорошо известный метод калибровки. Включим вместо конденсатора  $C_x$  конденсатор с известной емкостью  $C_1$  и проведем аналогичные измерения. При этом на выходе интегратора получим отсчет  $U_1$  и по аналогии с (5) запишем:

$$\frac{U_1}{b} = C_1 \cdot E \quad (6)$$

Разделив друг на друга равенства (5) и (6), получим:

$$C_x = \frac{U_x}{U_1} \cdot C_1, \quad (7)$$

где  $U_x$  и  $U_1$  – показания вольтметра при разряде неизвестного и известного конденсаторов соответственно (максимальные значения показаний на индикаторном табло вольтметра);

$C_1$  – емкость известного конденсатора.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовьте цифровой вольтметр к работе согласно инструкции по эксплуатации, находящейся на лабораторном столе.
2. Подготовьте схему для измерения емкости неизвестного конденсатора  $C_x$ , для чего гибкими перемычками попарно соедините клеммы 1 и 3, 5 и 7, 6 и 8, а выходные клеммы интегратора 9 и 10 соедините с входом вольтметра (рисунок 2).
3. Включите лабораторный стенд тумблером

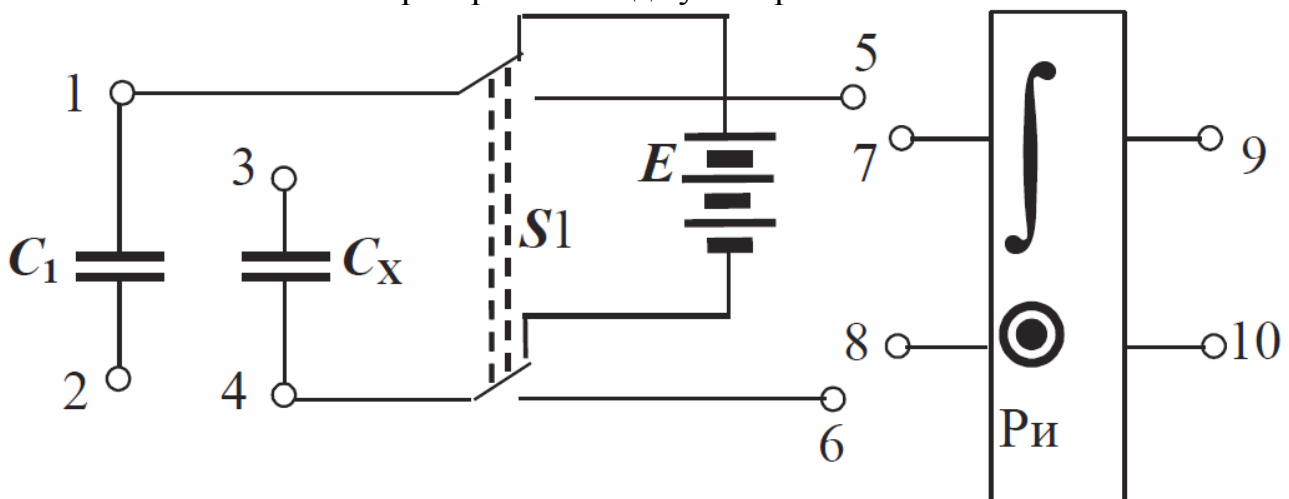


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

4. Переключателем  $S1$  конденсатор  $C_x$  подключается к источнику  $E$  (в верхнем положении) и заряжается (время полной зарядки конденсатора  $\sim 10$  с).
5. Интегратор разряжается нажатием кнопки  $Ри$ . Кнопка  $Ри$  на интеграторе предназначена для его принудительного разряда и подготовки прибора к новому измерению.

6. Затем переключателем  $S1$  неизвестный конденсатор подключается к интегратору (в нижнем положении). Поскольку используемый в данной работе интегратор не является идеальным, происходит его самопроизвольный разряд по окончании процесса интегрирования. Поэтому в качестве  $U_x$  следует принимать максимальное значение показаний на табло вольтметра. Показание  $U_x$  на табло вольтметра заносится в таблицу 1.

7. Измерения показаний вольтметра при разрядке неизвестного конденсатора проводят 5 раз.

8. После этого клеммы 1 и 3 размыкаются, а клеммы 2 и 4 замыкаются (рисунок 2). При этом вместо неизвестного конденсатора в цепь включается конденсатор с известной емкостью  $C_1$ . С ним проводят пять измерений, согласно вышеописанному порядку. Результаты также записываются в таблицу 1.

9. Конденсаторы  $C_x$  и  $C_1$  соединяются параллельно путем добавления перемычки между клеммами 1 и 3. Проводится пять измерений для цепи из двух параллельно соединенных конденсаторов.

10. Конденсаторы  $C_x$  и  $C_1$  соединяются последовательно, для чего удаляют перемычки 1–3, 2–4 и устанавливают перемычку между клеммами 2 и 3. Проводятся пять измерений для цепи из двух последовательно соединенных

**Таблица 1. Результаты измерений**

Номер опыта	Неизвестная емкость $C_x$	Известная емкость $C_1$	Параллельное соединение	Последовательное соединение
	$U_x, В$	$U_1, В$	$U_{ПАР}, В$	$U_{ПОС}, В$
1				
2				
3				
4				
5				
Средние значения				

11. По данным таблицы 1 определяются средние значения показаний вольтметра  $U_x$ ,  $U_1$ ,  $U_{пар}$ ,  $U_{пос}$ . По этим средним значениям вычисляются опытные значения величин емкостей:

$$C_x = \frac{U_x^{cp}}{U_1^{cp}} \cdot C_1; \quad (8)$$

$$C_{ПАР} = \frac{U_{ПАР}^{cp}}{U_1^{cp}} \cdot C_1; \quad (9)$$

$$C_{ПОС} = \frac{U_{ПОС}^{cp}}{U_1^{cp}} \cdot C_1. \quad (10)$$

12. Теоретическое значение емкости параллельного соединения конденсаторов вычисляется следующим образом:

$$C_{ПАР} = C_x + C_1. \quad (11)$$

Емкость последовательного соединения конденсаторов рассчитывается по следующей формуле:

$$\frac{1}{C_{\text{пос}}} = \frac{1}{C_x} + \frac{1}{C_1}; \quad (12)$$

из которой следует расчетная формула для вычисления емкости последовательного соединения конденсаторов:

$$C_{\text{пос}} = \frac{C_x \cdot C_1}{C_x + C_1}. \quad (13)$$

13. Используя значение  $C_x$ , рассчитанное по формуле (8), вычислите по формулам (11) и (13) значения емкостей параллельного и последовательного соединений конденсаторов. Результат расчетов сравните с экспериментальными значениями, определенными по формулам (9) и (10).

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение емкости конденсатора.
2. Объясните по схеме цепи назначение используемых приборов.
3. Подробно объясните принцип определения емкости в данной работе.
4. Выведите расчетные формулы для определения емкостей  $C_x$ ,  $C_{\text{пар}}$ ,  $C_{\text{пос}}$ .
5. Каковы единицы измерения емкости?
6. Изобразите схемы параллельного и последовательного соединений конденсаторов. Запишите формулы для результирующих емкостей.

# Лабораторная работа № 8

## Исследование магнитной цепи

Цель: 1. Изучить устройство милливексметра, научиться измерять магнитный поток.  
2. Проверить влияние воздушного зазора и магнитных шунтов на магнитное сопротивление цепи.

Приборы и оборудование: источник постоянного тока (выпрямитель или аккумуляторная батарея), сеть переменного тока, замкнутая магнитная цепь с регулируемым воздушным зазором, имеющая намагничивающую и измерительную обмотки, милливексметр, два амперметра, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), реостат, немагнитные прокладки, магнитные шунты, двухполюсный двухпозиционный переключатель, три двухполюсных переключателя, 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.

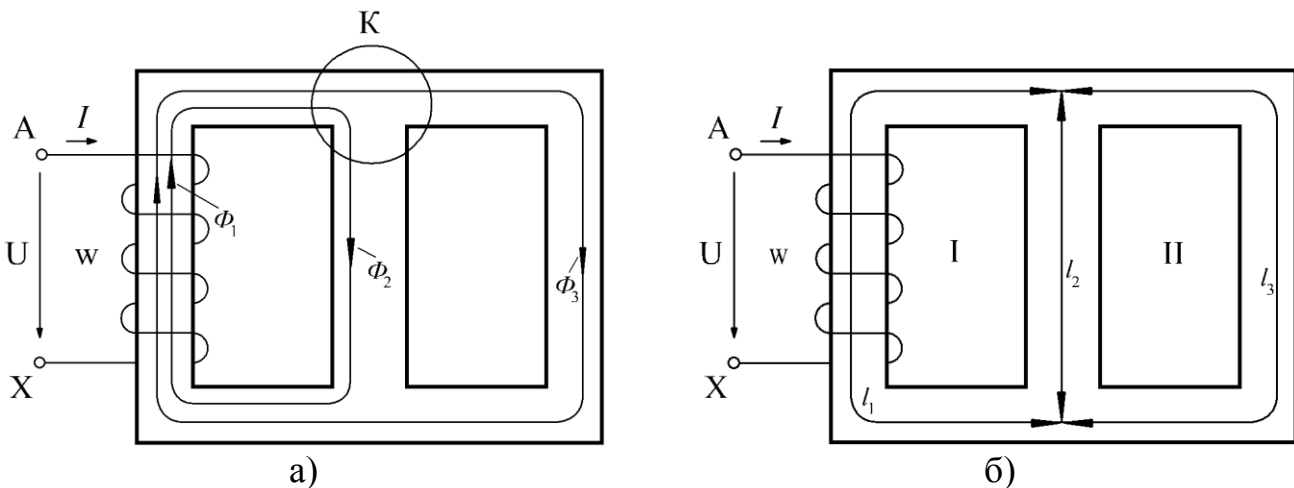


Рисунок 1 – Разветвленная магнитная цепь: а – распределения магнитных потоков; б – разделение цепи на однородные участки

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 (см. 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.

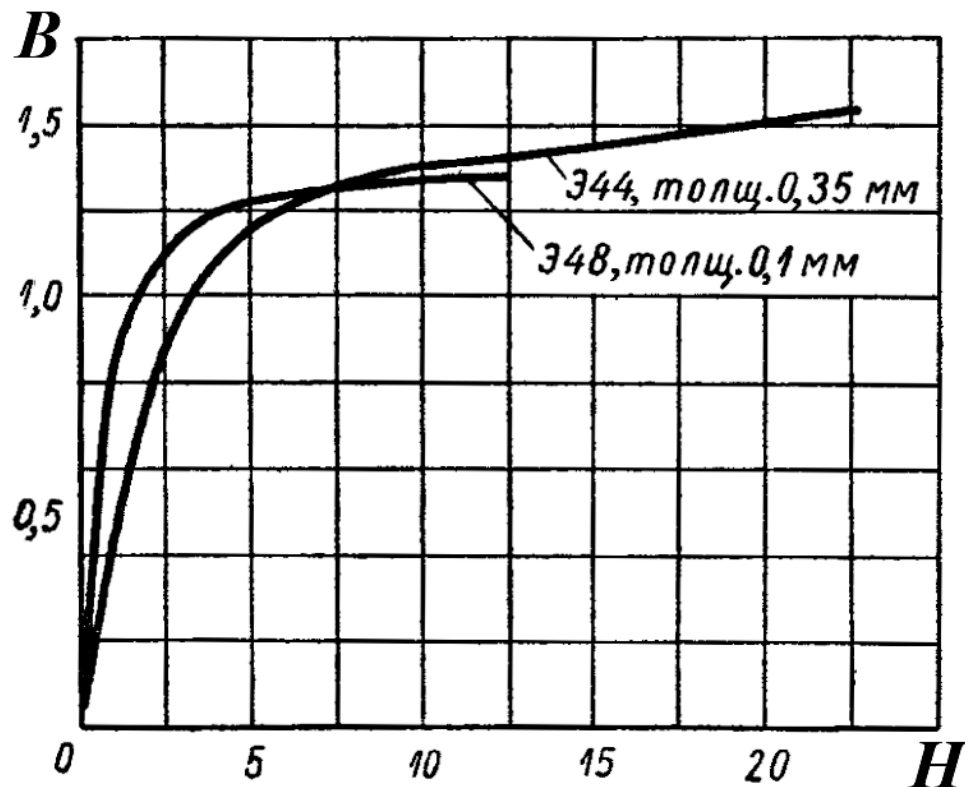


Рисунок 2 – Зависимость магнитной индукции  $B$  ферромагнетика от напряженности поля  $H$

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.б). 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

$$U_M = \frac{\Phi l}{\mu_a S}, \text{ откуда } \Phi = \frac{U_M}{l/(\mu_a S)}.$$

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  $\Phi = \frac{U_M}{R_M}$ , откуда  $\frac{I \cdot w}{\Phi} = R_M$ .

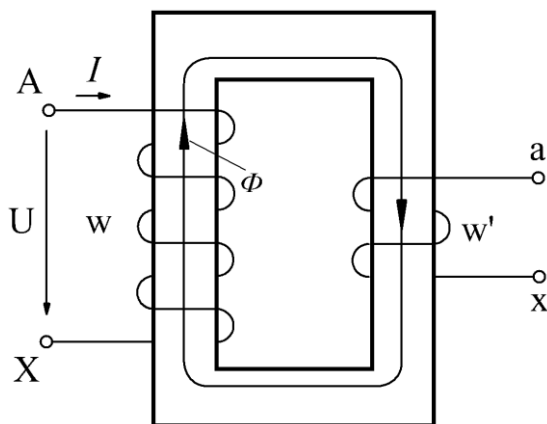


Рисунок 3 – Схема неразветвленной магнитной цепи

Для измерения магнитного потока однородной магнитной цепи на ней размещают измерительную обмотку  $ax$  с числом витков  $w'$ , которую присоединяют к миллиамперметру. При подаче на намагничивающую обмотку  $Ax$  постоянного



напряжения, в измерительной обмотке наводится ЭДС  $e = -\omega' \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ . Под влиянием этой

ЭДС, в подвижной обмотке прибора с безмоментными токоподводами возникает кратковременный ток, взаимодействие которого с полем постоянного магнита приводит к повороту подвижной части милливеберметра, прямо пропорциональному измеряемому потоку  $\Phi = C_\Phi \frac{\alpha_{\max}}{w'}$ , где  $C_\Phi$  – постоянная милливеберметра, мВб/дел;

$\alpha_{\max}$  – отклонение стрелки прибора;  $w'$  – число витков измерительной обмотки.

Для получения однозначных результатов измерения магнитного потока перед намагничиванием магнитопровод необходимо полностью размагнитить. Размагничивание проводят перед каждым измерением, установлением в обмотке  $AХ$  переменного тока частотой 50 Гц и изменением действующего тока от значения, равного намагничивающему постоянному току, до нуля.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, предназначенными для выполнения лабораторной работы, записать их технические характеристики.
2. По заводской инструкции ознакомиться с порядком и методом магнитных измерений, которые можно выполнить с помощью милливеберметра.
3. Собрать электрическую схему для исследования неразветвленной магнитной цепи (рисунок 4) и представить ее для проверки преподавателю.

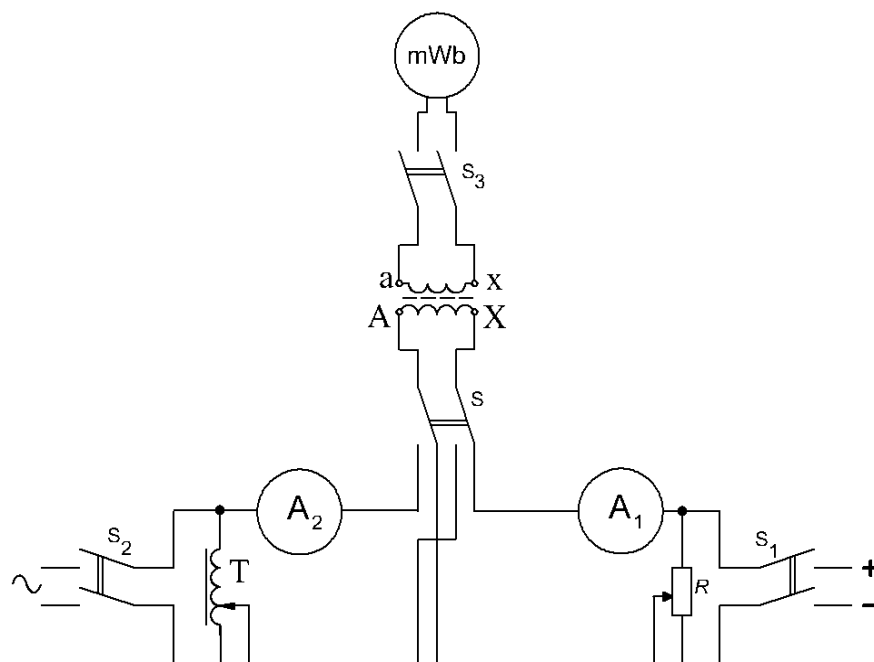


Рисунок 4 – Схема для исследования неразветвленной магнитной цепи

4. Замкнуть магнитную цепь, подключить к намагничивающей обмотке  $AХ$  источник постоянного тока и с помощью делителя напряжения  $R$  установить номинальный ток обмотки.

5. Размагнитить магнитопровод исследуемой магнитной цепи, для чего включить обмотку  $AХ$  в сеть переменного напряжения и отрегулировать с помощью ЛАТР ток в обмотке, так чтобы он был равен ее номинальному току, а затем медленно уменьшить его до нуля.

6. Присоединить милливеберметр  $mWb$  двухполюсным выключателем к измерительной обмотке  $ax$ , установить стрелку милливеберметра на нулевое деление шкалы, а затем подключить к обмотке  $AX$  постоянное напряжение с помощью переключателя  $S$ , что приведет к намагничиванию магнитной цепи. Показания приборов записать в таблицу 1 и отключить постоянное напряжение.

7. Произвести шесть измерений магнитного потока при значениях тока в намагничивающей обмотке, меньших номинального. При каждом измерении соблюдать последовательность, указанную в п. 4–6. Данные наблюдений занести в таблицу 1.

8. Установить в магнитопроводе воздушный зазор, для фиксации которого использовать немагнитные прокладки известной толщины. Выбранную прокладку ввести в воздушный зазор и плотно зажать подвижной частью магнитопровода. Произвести измерения согласно п. 4–6. Записать показания приборов в таблицу 1.

9. Произвести измерения согласно п. 8, заменив в магнитопроводе немагнитную прокладку магнитным шунтом заданной толщины. Показания приборов занести в таблицу 1.

10. Произвести вычисления согласно таблице 1. Используя результаты опытов 1–7, построить график  $\Phi = f(I \cdot w)$ .

11. Составить отчет по результатам выполненной работы.

**Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений**

Номер опыта	Магнитная цепь	$I, A$	$\Phi, Bб$	$Iw, A$	$R_M, \frac{A}{Bб}$
1–7	Без воздушного зазора				
8	С воздушным зазором $\delta_0 =$				
9	С магнитным шунтом $\delta =$				

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

1. Что называется магнитной цепью?
2. В чем заключается расчет магнитной цепи?
3. Как математически записывается закон полного тока? Сформулируйте этот закон.
4. По какому правилу устанавливают направление магнитного потока?
5. Напишите уравнения для разветвленной магнитной цепи, аналогичные уравнениям Кирхгофа для электрической цепи.
6. Как измерить магнитный поток однородного участка магнитной цепи?
7. Как полностью размагнитить магнитопровод?

## Лабораторная работа № 9

### Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и емкостью

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

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

#### Теоретические сведения

В цепи, содержащей активное сопротивление и емкость, вектор активного напряжения совпадает с вектором тока, вектор емкостного 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  $\varphi$ .

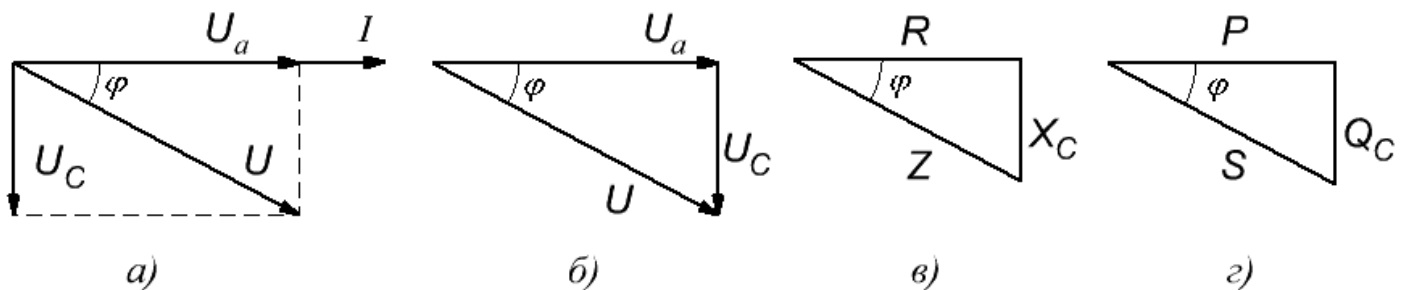


Рисунок 1

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

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

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

где  $P = U_a I$  — активная мощность;

$Q_C = U_C I$  — емкостная мощность.

Применяя закон Ома, можно записать формулы для расчета мощностей:

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

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.

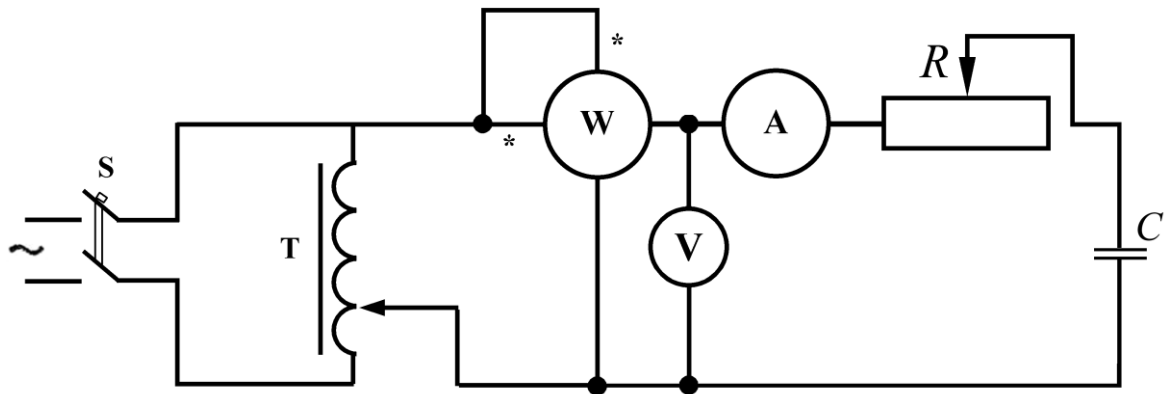
Последние формулы позволяют связать активное и реактивное сопротивления, напряжения и мощности с помощью тригонометрических функций:

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

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

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

### Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит сдвиг фаз между напряжением и током?
2. Запишите формулы для расчета косинуса угла сдвига фаз между векторами напряжения и тока.
3. Как рассчитать полное сопротивление цепи, если известны активное и емкостное сопротивление, соединенные последовательно?
4. Запишите формулу для расчета активной мощности в цепи с активно–емкостной нагрузкой.
5. Запишите формулы для расчета силы тока в цепи, содержащей реальный конденсатор.
6. Каковы особенности энергетических процессов в цепи с реальным конденсатором?

## Лабораторная работа № 10

### Изучение цепи переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью

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 напряжений, сопротивлений и мощностей.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», 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  $\varphi$ .

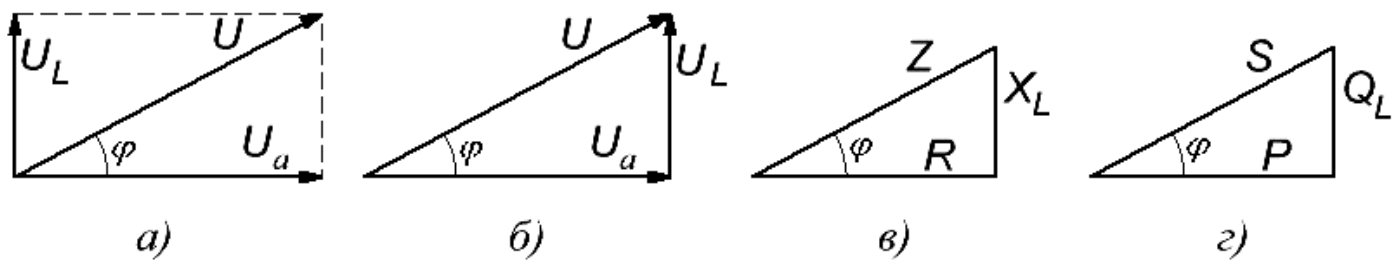


Рисунок 1

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  $S = UI = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$ ,

где  $P = U_a I$  – активная мощность;

$Q_L = U_L I$  – индуктивная мощность.

Применяя закон Ома, можно записать формулы для расчета мощностей:

$$S = I^2 Z = \frac{U^2}{Z};$$

$$P = I^2 R = \frac{U_a^2}{R};$$

$$Q_L = I^2 x_L = \frac{U_L^2}{x_L}.$$

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:

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

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

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

### 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.
5. Составить отчет по результатам выполненной работы.

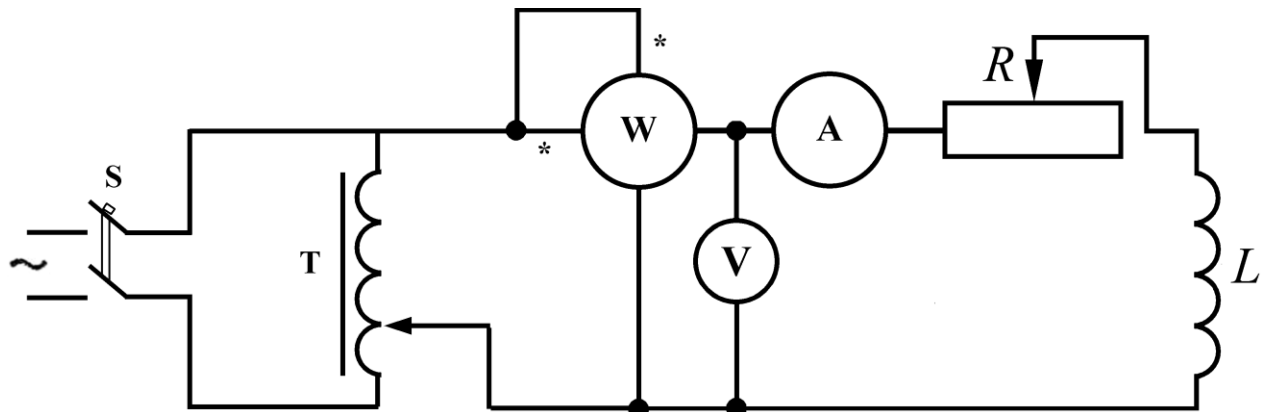


Рисунок 2 – Схема для исследования последовательной цепи переменного тока, содержащей реостат и катушку

Таблица 1

Номер опыта	Данные наблюдений			Результаты вычислений										
	U, В	I, А	P, Вт	Z, Ом	R, Ом	$X_L$ , Ом	L, Гн	Cos $\varphi$	Sin $\varphi$	$\varphi$ , рад	$U_a$ , В	$U_L$ , В	S, В·А	$Q_L$ , вар

### Содержание отчета

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

### Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит сдвиг фаз между напряжением и током?
2. 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. Каковы особенности энергетических процессов в цепи с реальной катушкой?



## Лабораторная работа № 11

### Исследование цепи переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора

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.

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

#### Теоретические сведения

При подведении к зажимам последовательно соединенных активного сопротивления  $r$ , индуктивности  $L$ , и емкости  $C$  синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$  (рис. 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 емкостное сопротивления.

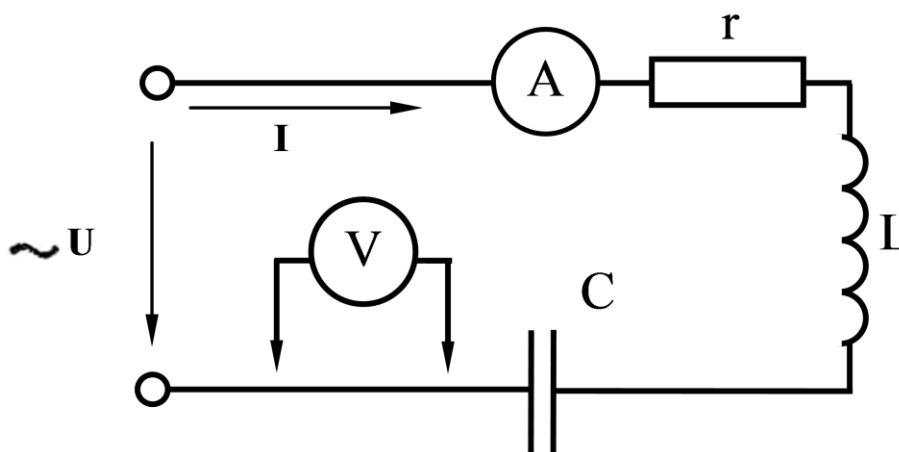
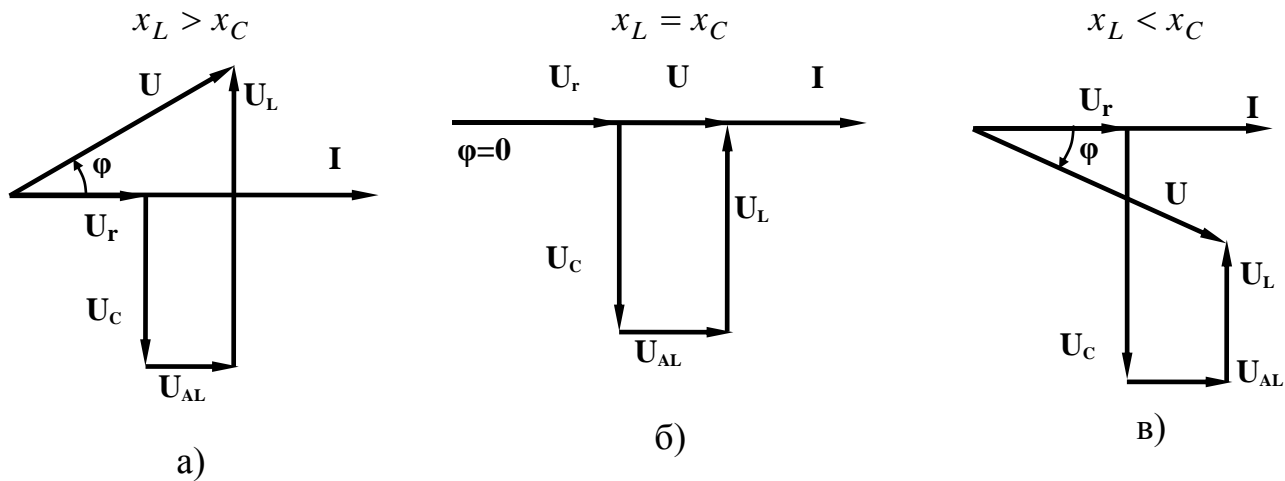


Рисунок 1 – Цепь переменного тока с последовательным соединением элементов

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 (рис. 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 цели. 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  $P = UI \cdot \cos \varphi$ , значение  $\varphi$  определим из выражения  $\varphi = \arcsin \frac{U_L - U_C}{U}$ .

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  $U_{AL} = IR_L$  и индуктивное  $U_{pL} = Ix_L$  напряжения катушки.

## Порядок выполнения работы (измерения и вычисления производить с точностью 0.0001)

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». Измерить напряжение на приемниках цепи. Результаты наблюдений занести в таблицу 1.
4. Повторить наблюдения при различных напряжениях. 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.
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 и цель лабораторной работы.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблица с результатами измерений и расчетов.
5. Векторные диаграммы.
6. Выводы, сделанные по лабораторной работе.

## Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит сдвиг фаз между напряжением и током?
2. Как рассчитать действующий ток линейной неразветвленной электрической цепи синусоидального тока с приемниками, характеризуемыми параметрами: r, L, C?
3. Как определяется полное сопротивление цепи переменного тока?
4. Какое явление называют резонансом напряжений и каковы его характерные признаки?
5. Чему равен коэффициент мощности при резонансе?

## Лабораторная работа № 12

### Исследование цепи переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора

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.

Приборы и оборудование: стенд «Интеграл», катушка индуктивности, 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.

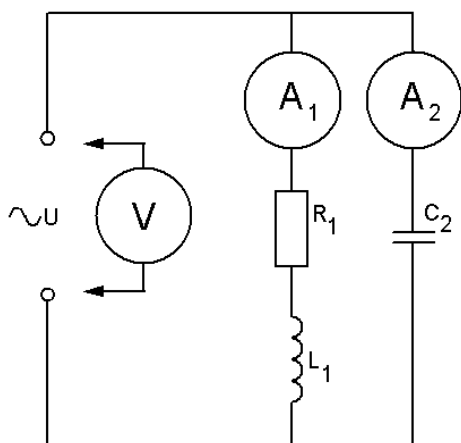


Рисунок 1 – Цепь переменного тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора

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  $L_1 = \frac{X_{L_1}}{\omega}$ .

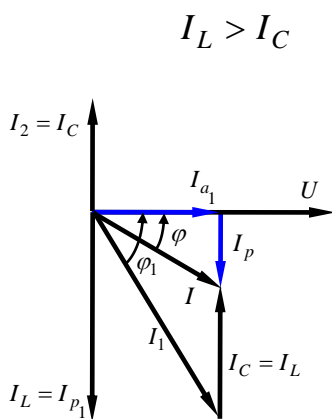


Рисунок 2

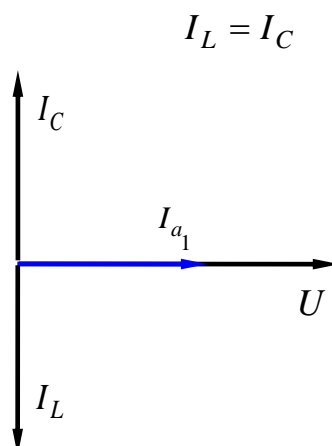


Рисунок 3

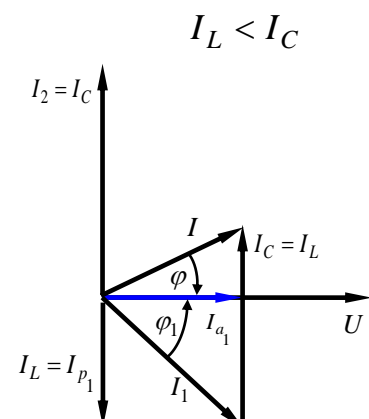


Рисунок 4

## Порядок выполнения работы (измерения и вычисления производить с точностью 0.0001)

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 напряжениях. 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.
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 и цель лабораторной работы.
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. Как рассчитать действующий ток в неразветвленной части линейной разветвленной электрической цепи синусоидального тока?
2. Что означает резонанс токов и при каких условиях он возникает?
3. Чему равен коэффициент мощности электрической цепи при резонансе?
4. Могут ли действующие токи параллельно соединенных ветвей электрической цепи превышать действующий ток в ее неразветвленной части?
5. Каким образом может быть получен резонанс токов?
6. Какими величинами нужно располагать для расчета емкости конденсаторной батареи, повышающий коэффициент мощности до заданного значения?

## Исследование трехфазной цепи при соединении приемника 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 приемника  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  не равны линейным напряжениям  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ . Эти напряжения связаны между собой векторными уравнениями  $U_{AB} = U_A - U_B$ ,  $U_{BC} = U_B - U_C$ ,  $U_{CA} = U_C - U_A$ .

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 приемника и его полного сопротивления  $Z_\phi$ , что следует из формулы  $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$ .

Ток в нейтральном проводе (для ветров)

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

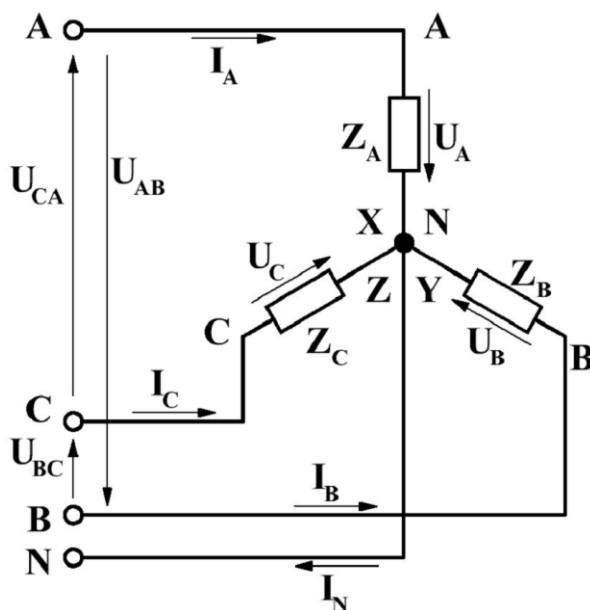


Рисунок 1– Схема соединения фаз приемника звездой

Если полные сопротивления  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  приемников одинаковые,  $Z_A = Z_B = Z_C = Z_\phi$ , и сдвиги фаз  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  между фазными напряжениями и соответствующими им фазными токами равны между собой, т. е.  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$ , нагрузку называют симметричной. При симметричной нагрузке фазные напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ , и  $U_C$  одинаковы, фазные токи равны между собой:  $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$ , 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:

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

где  $x_\phi$  – реактивное сопротивления фазы нагрузки;

$R_\phi$  – ее активное сопротивление.

В этом случае между линейными и фазными напряжениями существует зависимость

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

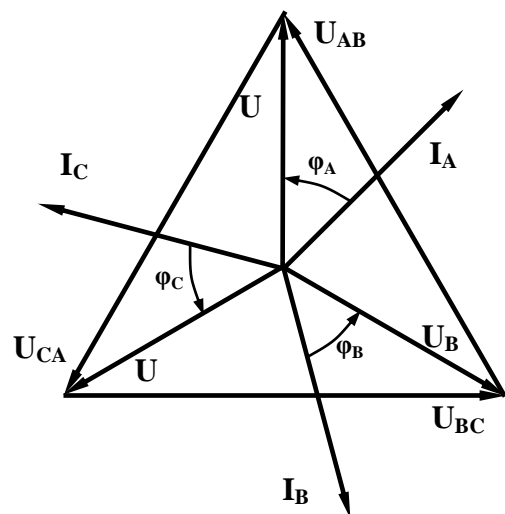


Рисунок 2 – Векторная диаграмма при соединении приемника звездой в случае симметричной нагрузки

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:  $I_N = I_A + I_B + I_C = 0$ .

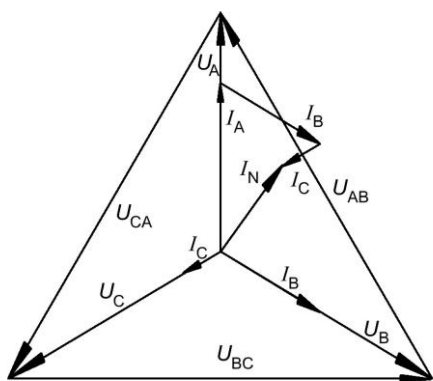


Рисунок 3 – Векторная диаграмма при соединении приемника звездой в случае несимметричной нагрузки и при наличии нейтрального провода

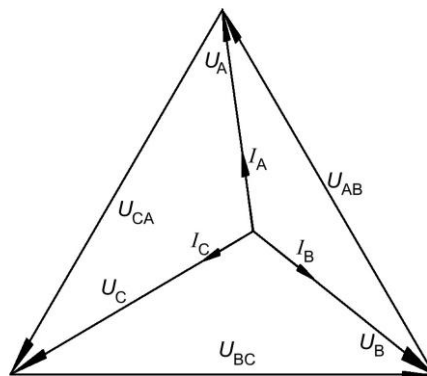
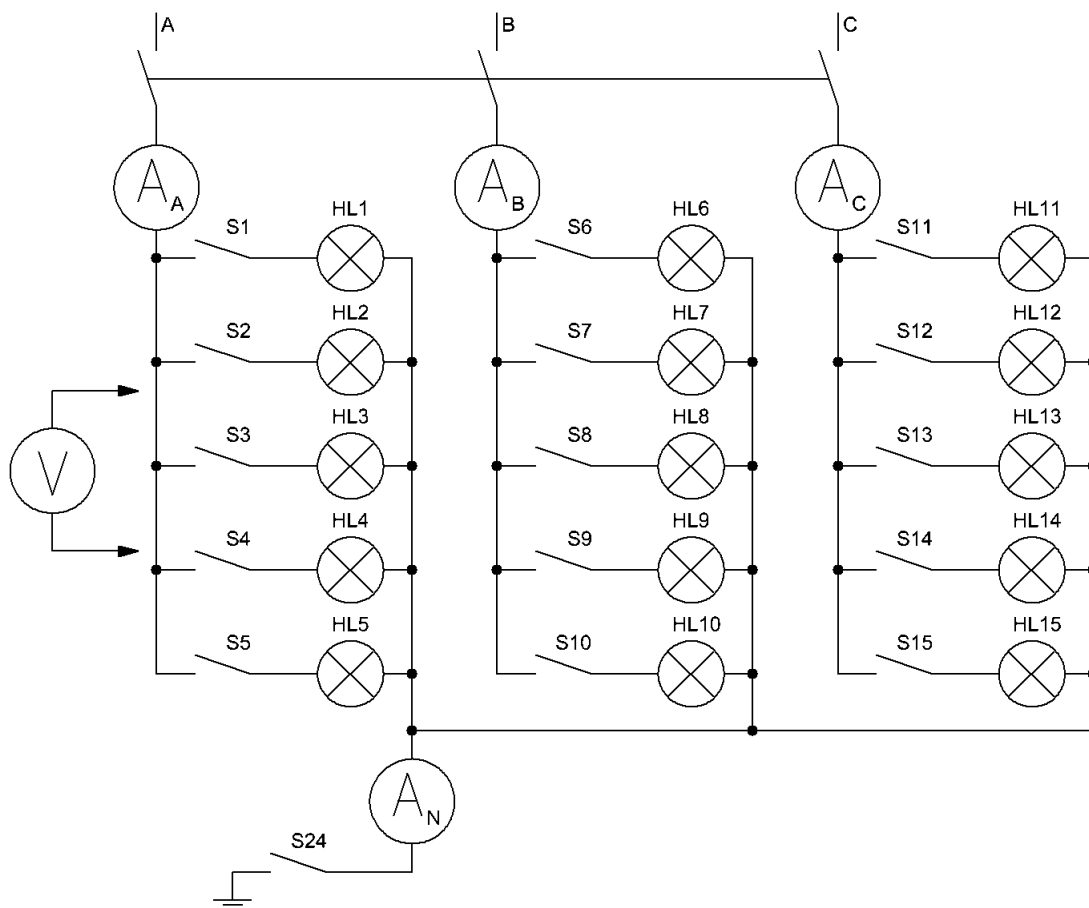


Рисунок 4 – Векторная диаграмма при соединении приемника звездой в случае несимметричной нагрузки и обрыве нейтрального провода





**Рисунок 5 – Схема для исследования трехфазной электрической цепи при соединении приемников 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 приемники можно включать в трехфазную четырехпроводную сеть как на фазное  $U_\phi$ , так и на линейное  $U_L$  напряжение, что позволяет питать от одной сети приемники, 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. Обратить 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 <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	I <sub>A</sub>	I <sub>B</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>N</sub>	P <sub>A</sub>	P <sub>B</sub>	P <sub>C</sub>	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 и цель лабораторной работы.
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. Как соединить фазы токоприемника звездой?
2. Какое напряжение называется фазным и какое – линейным?
3. Какие существуют зависимости между действующими линейными и фазными напряжениями трехфазной четырехпроводной сети?
4. При каких условиях трехфазная система называется симметричной?
5. В каких условиях можно обойтись без нейтрального провода?
6. Каково соотношение между фазными напряжениями для несимметричной нагрузки при наличии нейтрального провода?
7. Как определить ток в нейтральном проводе?
8. К чему может привести обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке?

## Лабораторная работа № 14

### Исследование трехфазной 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 приемника при соединении треугольником (рисунок 1) подключена к двум линейным проводам. Поэтому независимо от значения и характера сопротивлений приемника каждое фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению  $U_{\phi} = U_L$

Ток каждого приемника, входящего в соединение треугольника, является фазным:  $I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi}$ , где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение данного приемника;  $Z_{\phi}$  – 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:  $I_A = I_{AB} - I_{CA}$ ,  $I_B = I_{BC} - I_{AB}$ ,  $I_C = I_{CA} - I_{BC}$ .

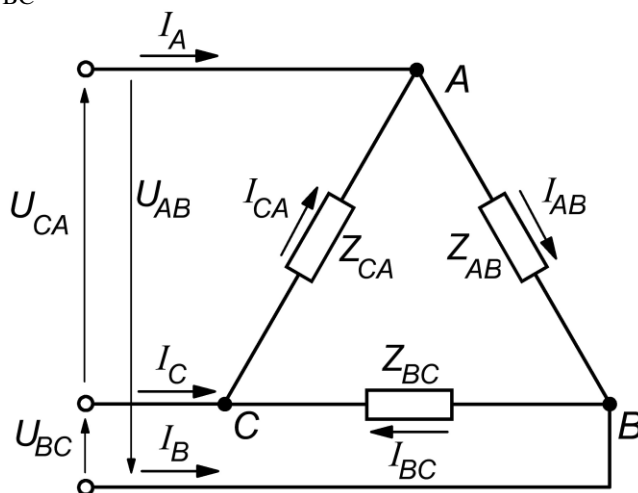
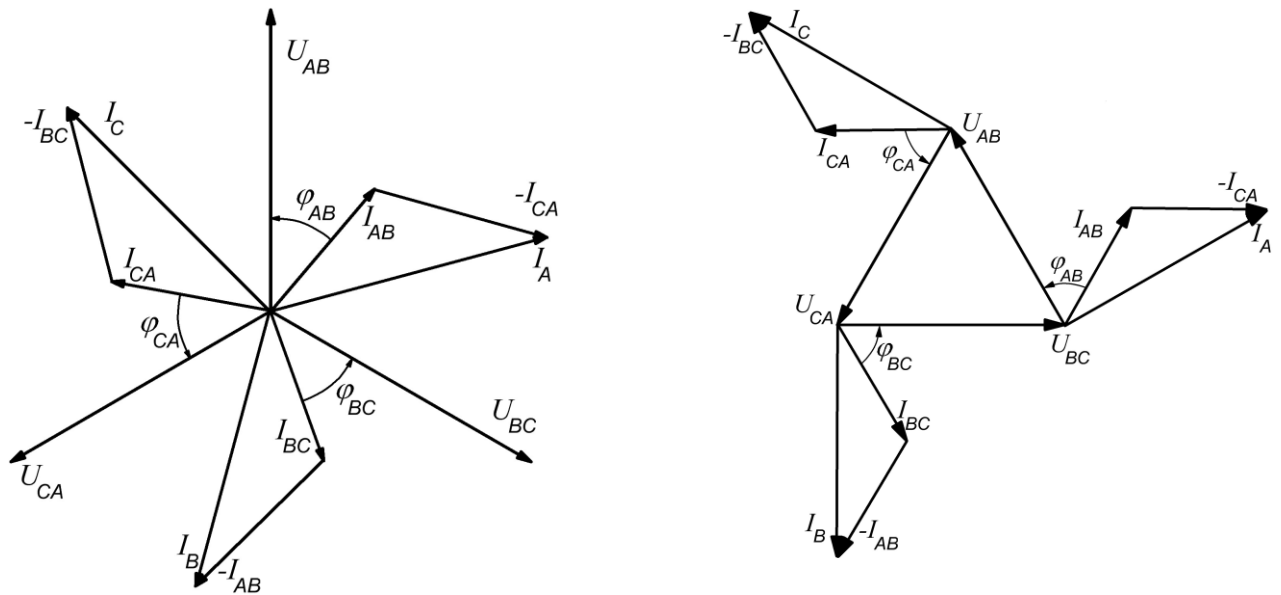


Рисунок 1 – Схема соединения фаз приемника треугольником

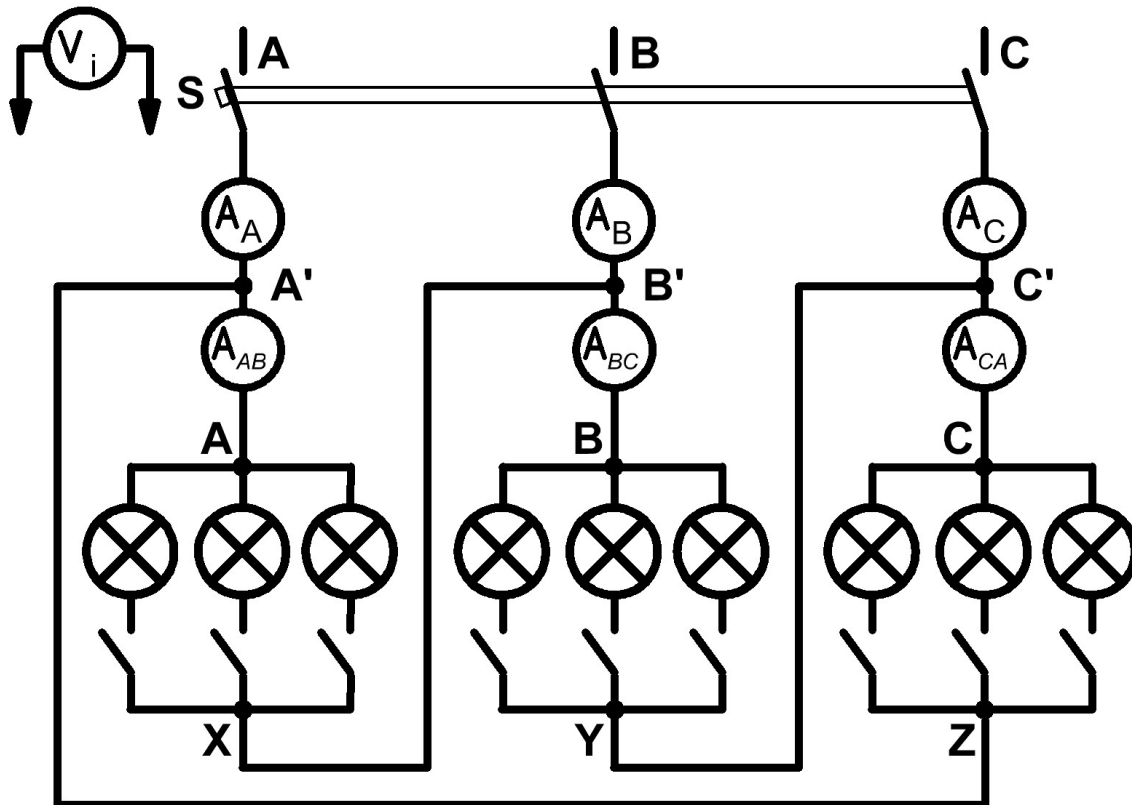
Нагрузку называют симметричной, если  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$  и  $Z_{CA}$  приемников одинаковы (по величине и характеру):  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_{\phi}$ ; сдвиги фаз  $\phi_{AB}$ ,  $\phi_{BC}$  и  $\phi_{CA}$  между фазными напряжениями и соответствующими им фазными токами равны между собой:  $\phi_{AB} = \phi_{BC} = \phi_{CA} = \phi$ . 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  $\phi = \arctg(X_{\phi} / R_{\phi})$ , где  $X_{\phi}$  – реактивное сопротивление фазных нагрузок;  $R_{\phi}$  – ее 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 приемника 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  $\phi_{AB} \neq \phi_{BC} \neq \phi_{CA}$  либо обоих равенств, нарушается симметрия как фазных, так и линейных токов.



**Рисунок 3 – Схема для исследования трехфазной электрической цепи при соединении приемника треугольником**

Всякое изменение нагрузки одной из фаз, при соединении приемников 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 приемники одной фазы находятся под номинальным фазным напряжением, а приемники двух других фаз оказываются последовательно соединенными и находятся под этим же напряжением. Фазные напряжения этих приемников прямо пропорциональны их полным сопротивлениям, т.е. приемники 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 приемников. 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 трехфазную 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 и цель лабораторной работы.
2. Порядок выполнения работы.
3. Принципиальная схема эксперимента.
4. Таблицы с результатами измерений и расчетов.
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. Как три однофазных приемника соединить треугольником?
2. Какие существуют зависимости между линейными и фазными токами трехфазной системы при соединении приемников треугольником?
3. Какую трехфазную нагрузку называют симметричной?
4. Какую трехфазную нагрузку называют несимметричной?
5. От каких факторов зависит угол сдвига между фазным напряжением и фазным током?
6. Каково соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями для симметричной нагрузки фаз?
7. Как изменятся токи в фазах симметричной нагрузки при обрыве линейного провода А, если, нагрузка соединена треугольником?

## Исследование переходных процессов зарядки и разрядки конденсатора

**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 «Интеграл», 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):

$$i = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

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.

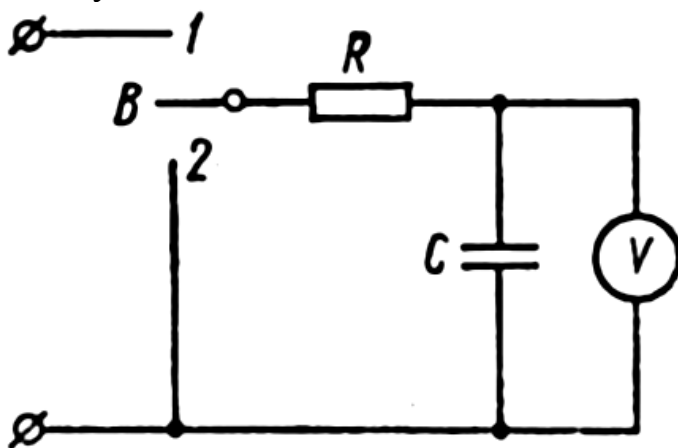


Рисунок 1 – Схема

Напряжение на резисторе равно:

$$u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

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

Напряжение на конденсаторе изменяется по возрастающей экспоненте.

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



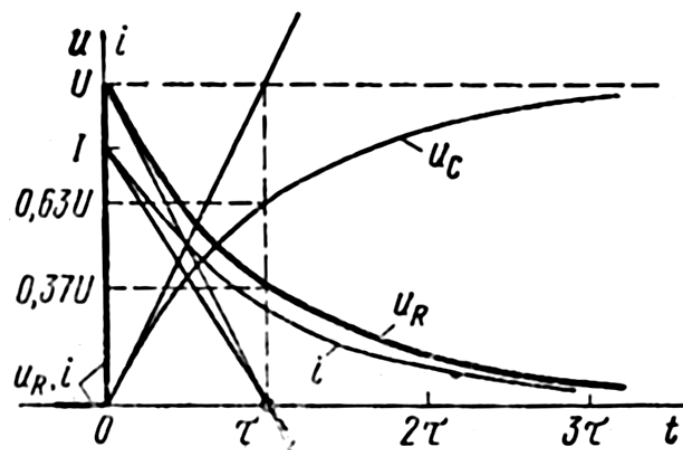


Рисунок 2

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):

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

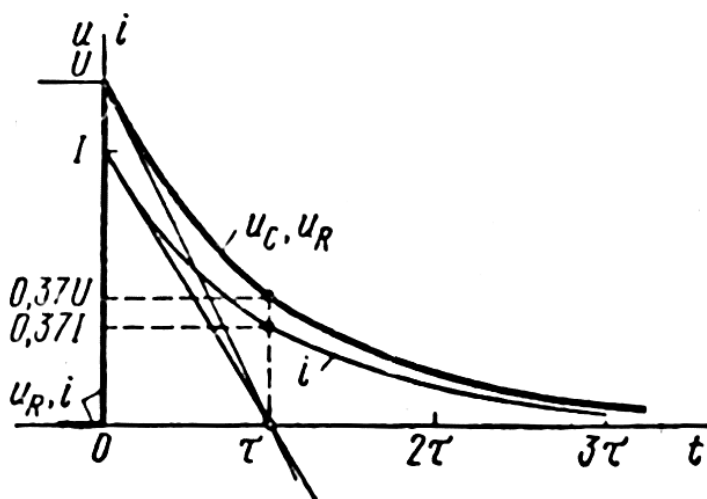


Рисунок 3

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 емкостное 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 ее преподавателю для проверки.
2. Замкнуть резистор проводником, установить заданную преподавателем емкость 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 емкости.
6. Повторить зарядку и разрядку конденсатора при другом каком-либо сопротивлении.

Таблица 1 – Результаты измерений

Задано			Расчет $\tau, \text{с}$	Зарядка				Разрядка			
$R, \text{Ом}$	$C, \text{мкФ}$	$U, \text{В}$		$t, \text{с}$	$u_C, \text{В}$	$u_R, \text{В}$	$i, \text{А}$	$t, \text{с}$	$u_C, \text{В}$	$u_R, \text{В}$	$i, \text{А}$

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 емкости цепи; б) причин неполного совпадения значения, полученного расчетным и графическим методами.
13. Выводы записать в отчет.

## Содержание отчета

1. Тема и цель лабораторной работы.
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. Что такое переходный процесс?
2. Изобразите графики тока и напряжений при зарядке конденсатора.
3. Запишите уравнения кривых тока и напряжения при зарядке конденсатора.
4. Что такое  $\tau$ , каким способом можно ее 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. Почему конденсатор не может зарядиться или разрядиться мгновенно?
9. Сформулируйте второй закон коммутации.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Евдокимов, Ф.Е.** Теоретические основы электротехники / Ф.Е. Евдокимов. М.,1981.
- [2] **Попов, В.С.** Теоретическая электротехника / В.С. Попов. М., 1990.
- [3] **Цейтлин, Л.С.** Руководство к лабораторным работам / Л.С. Цейтлин. М.,1977.