

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному техническому образованию в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений высшего образования по специальности 1-74-06-05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям) и направлению специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)*

**В трех частях**

**Часть I**

**Электрическое и магнитное поле постоянного тока.  
Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока**

Минск  
БГАТУ  
2015

УДК 621.3(07)  
ББК 31.21я7  
Т33

*Составители:*

кандидат технических наук, доцент *А. В. Крутов*,  
старший преподаватель *Т. Ф. Гузанова*,  
старший преподаватель *М. А. Бойко*,  
ассистент *С. С. Нефедов*

*Рецензенты:*

кафедра «Электротехника и электроника»  
Белорусского национального технического университета;  
заведующий лабораторией научного обеспечения испытаний  
и информационно-технических технологий Республиканского унитарного  
предприятия «Научно-практический центр Национальной академии наук  
Беларуси по механизации сельского хозяйства»,  
кандидат технических наук, доцент *В. К. Клыбик*

**Теоретические основы электротехники. Лабораторный практикум** : учебно-методическое пособие. В 3-х ч. Ч. 1. Электрическое и магнитное поле постоянного тока. Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока / сост.: А. В. Крутов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – 72 с.  
ISBN 978-985-519-702-8.

Содержит лабораторные работы по разделам «Электрическое и магнитное поле постоянного тока», «Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока» дисциплины «Теоретические основы электротехники». Представлены теоретические сведения по темам лабораторных работ, носящие справочный характер, справочные материалы по дисциплине ТОЭ, математике, методические указания по проведению экспериментов и обработки полученных результатов.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74-06-05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям) и направлению специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство).

УДК 621.3(07)  
ББК 31.21я7

ISBN 978-985-519-702-8 (ч. 1)  
ISBN 978-985-519-701-1

© БГАТУ, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	5
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	7
Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ НА МОДЕЛИ .....	9
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДНИКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ.....	15
Лабораторная работа № 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА.....	29
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	35
Лабораторная работа № 5. ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	44
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	47
Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	53
Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	60
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	68

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум составлен в соответствии с учебной программой курса «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и включает в себя работы по разделам «Электрическое и магнитное поле постоянного тока», «Линейные и нелинейные цепи постоянного тока». В описании каждой работы содержится ее цель, общие теоретические сведения, методика исследования, рекомендации по подготовке к выполнению задания и оформлению отчета, контрольные вопросы. Общие сведения по теории, которые приведены в начале каждой работы, не ставят целью заменить учебные пособия по курсу ТОЭ. Материалы изложены кратко, применительно к содержанию лабораторной работы. Для полного изучения темы студент обязан обратиться к учебникам и учебным пособиям, список которых приведен в конце издания.

В лабораторном практикуме использованы методические разработки научно-педагогических работников, ветеранов кафедры электротехники Г. А. Сапуна и Э. Л. Кочетовой.

## ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные занятия преследуют цель более глубокого усвоения теоретических вопросов путем экспериментальной проверки основных положений курса. Кроме того, эти занятия способствуют выработке навыков проведения исследований и анализа электрических цепей и электромагнитного поля.

Перед выполнением лабораторных работ, в начале семестра каждый студент должен изучить правила безопасности, относящиеся к данной лаборатории.

К каждому очередному лабораторному занятию необходимо изучить описание лабораторной работы и соответствующий теоретический материал по конспекту лекций и учебным пособиям. Электрические схемы и таблицы для записи наблюдений должны быть подготовлены заранее.

Перед началом выполнения каждой работы проводится проверка готовности студентов к ней. В случае неподготовленности студент к работе не допускается.

Прежде чем собирать электрическую цепь, следует ознакомиться с находящимся на рабочем месте оборудованием, выяснить его назначение, параметры каждого элемента цепи, а для приборов – пределы измерений, род тока и цену деления шкалы. При наличии на рабочем месте автотрансформаторов типа ЛАТР и реостатов следует установить в начальное положение их движки, чтобы после включения электрической цепи напряжение и ток в ней были минимальными. После этого необходимо собрать электрическую цепь.

Сборку сложной электрической цепи рекомендуется начинать с последовательно соединенных элементов и приборов, а затем подключать параллельные ветви как самой электрической цепи, так и приборов.

Каждая собранная электрическая цепь, а также произведенные в ней изменения должны быть проверены преподавателем или лаборантом и только с их разрешения цепь может быть включена под напряжение. Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила техники безопасности и соблюдать дисциплину. Лица, нарушающие правила техники безопасности, отстраняются от выполнения работы. К ним по ходатайству кафедры могут применяться меры дисциплинарного воздействия.

Проводя те или иные испытания, необходимо стремиться получить достоверные результаты. Следует помнить, что небрежность в снятии показаний приборов и записях обычно приводит к ошибкам, неправильным выводам о свойствах испытуемой цепи. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть проведены повторно.

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности между собой и периодически ими меняться. При этом все должны активно вникать в смысл проводимых испытаний, уметь собирать электрические схемы, определять цену деления прибора.

После окончания каждого опыта необходимо ознакомить с результатами замеров преподавателя и только с его разрешения разбирать электрическую цепь. По завершении лабораторных занятий необходимо оборудование и приборы аккуратно составить на рабочем месте, а провода, перемычки убрать со стола и сложить в установленное преподавателем место. После этого приступают к оформлению отчета.

Отчет по проведенной работе оформляется каждым студентом. Он должен содержать следующее: название работы, ее цель; электрические схемы цепей, исследованных в данной работе; заполненные таблицы, графики или иные результаты всех проведенных опытов; расчетные формулы и результаты вычислений; анализ результатов и выводы.

Отчеты оформляются на специальных бланках или в обычной тетради аккуратно, с использованием чертежных принадлежностей и с соблюдением стандартных графических и буквенных обозначений для элементов электрических схем.

Все графики должны быть выполнены в соответствующем масштабе и с обозначением величин. На графиках обязательно должны быть нанесены точки, по которым строились кривые.

Отчет по проведенной работе должен быть защищен студентом в конце занятия или перед началом следующей работы. В противном случае студент, не отчитавшийся за две работы, не допускается к выполнению следующей. Пропущенные лабораторные занятия по уважительным или неуважительным причинам должны быть отработаны в период, согласованный с преподавателем, с разрешения деканата.

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Исследование электрических цепей, установок и приборов неизбежно связано с применением небезопасных для здоровья и жизни напряжений. Поражение током может привести к тяжелым последствиям. Необходимо, чтобы лица, работающие в этих опасных условиях, постоянно и точно выполняли соответствующие правила техники безопасности.

В лаборатории ТОЭ применяются номинальные фазные и линейные напряжения 127, 220 В. Опасными являются напряжения выше 36 В, а также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с индуктивностями, напряжение незаряженных конденсаторов. Кроме того, при неправильных действиях с электрическим оборудованием, неверно собранных электрических схемах возможны короткие замыкания и перегрузки в цепях, что приводит к выходу из строя приборов, элементов цепи, повреждению изоляции, расплавлению токопроводящих частей оборудования, его перегреву. Брызги расплавленного металла опасны ожогом открытых участков тела, а возникшая электрическая дуга поражает органы зрения.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности.

1. Не допускать загромождения рабочего места личными вещами. Не отвлекаться. Во время лабораторных занятий мобильные телефоны должны быть отключены.

2. Прежде чем собирать цепь, необходимо убедиться, что сетевой выключатель отключен и сигнальная лампа на стенде не горит.

3. При сборке электрической цепи соединения проводниками следует выполнять так, чтобы они не ложились на шкалы приборов, имели наименьшее число пересечений между собой и были надежно присоединены, обеспечивая хороший контакт. Все неиспользованные проводники должны быть сложены отдельно, убраны со стола.

4. Включение цепи под напряжение разрешается только после проверки правильности соединений преподавателем или лаборантом.

5. Во время работы нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый включающий цепь под напряжение должен предупредить о своем действии остальных членов бригады.

6. При обнаружении каких-либо неисправностей (повышенный шум, искрение, перегрев обмоток или проводов, отсутствие свечения сигнальной лампы) или при попадании кого-нибудь под напряжение нужно немедленно отключить выключатель и пригласить преподавателя.

7. Во время работы не касаться изолированных частей электрических цепей, находящихся под напряжением.

8. Все изменения в цепи проводятся при отключенном выключателе. После этого цепь должен проверить преподаватель или лаборант. При выходе студентов на перерыв электрическая цепь должна быть отключена от источника питания.

9. После окончания работы необходимо показать преподавателю результаты замеров и только после этого разобрать цепь, привести в порядок рабочее место (сложить провода, составить приборы, стулья).

10. За порчу лабораторного оборудования, вызванную небрежным обращением с ним или невыполнением требований данного руководства, студенты несут моральную и дисциплинарную ответственность.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ НА МОДЕЛИ

#### 1. Цель работы

Экспериментальное исследование картины электростатического поля двухпроводной линии с помощью поля постоянного тока в проводящем листе.

#### 2. Общие сведения

Электромагнитное поле – особый вид материи. Оно является носителем энергии и обладает характерными для него электрическими и магнитными свойствами.

Электростатическое поле представляет собой частный вид электромагнитного поля. Оно создается неподвижными в пространстве по отношению к наблюдателю и неизменными по времени электрическими зарядами.

Электростатическое поле оказывает механическое воздействие на помещенный в него электрический заряд с силой, пропорциональной величине этого заряда.

Основными величинами, характеризующими электростатическое поле, являются напряженность электрического поля  $\vec{E}$  и потенциал  $\varphi$ .

Напряженность электрического поля численно равна силе, действующей со стороны поля на единицу положительного пробного заряда, помещенного в данную точку. Напряженность электрического поля есть векторная величина.

Потенциал электрического поля  $\varphi$  есть скалярная величина. Потенциал произвольной точки поля определяется как работа, совершаемая силами поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки поля в точку поля, потенциал которой равен нулю. Часто принимают, что точка с нулевым потенциалом находится в бесконечности.

Электростатическое поле можно наглядно изобразить совокупностью линий напряженности электрического поля (силовых линий) и эквипотенциальных линий.

Линия напряженности поля – это мысленно проведенная в поле линия, начинающаяся на положительно заряженном теле и оканчивающаяся на отрицательно заряженном теле. Касательная к каждой точке линии совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в этой точке. Вдоль линии напряженности электрического поля двигался бы весьма малый положительный заряд, если бы он имел возможность свободно перемещаться в поле и если бы он не обладал инерцией.

В электростатическом поле могут быть проведены эквипотенциальные поверхности. Под эквипотенциальной поверхностью понимают совокупность точек поля, имеющих один и тот же потенциал. Следы эквипотенциальных поверхностей на мысленно проведенной плоскости, пересекающей электростатическое поле, образуют эквипотенциальные линии.

Эквипотенциальные линии электростатического поля являются замкнутыми на себя. Эквипотенциальные линии и линии вектора напряженности электростатического поля в любой точке поля пересекаются под прямым углом.

Если форма граничных поверхностей (электродов) сложна, то аналитический расчет поля осуществить бывает довольно трудно. Непосредственное же определение потенциала электростатического поля путем помещения в отдельные точки поля зондов обычно также не удается, потому что зонды даже при малой мощности, потребляемой индикаторами, своим присутствием искажают поле.

В этом случае поле исследуют экспериментально на модели.

В настоящей лабораторной работе моделирование электростатического поля двухпроводной линии производится полем постоянного тока в проводящей среде – стальном листе.

Электрическое поле в каждой точке проводящей среды характеризуется вектором плотности тока  $\vec{J}$ , который численно равен пределу отношения тока проводимости сквозь некоторый элемент поверхности, нормальный к направлению движения заряженных частиц, к этому элементу, когда последний стремится к нулю:

$$J = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{dI}{dS}.$$

Вектор плотности тока по направлению совпадает с вектором электрической напряженности  $\vec{J} = \gamma \vec{E}$ . Поэтому линии вектора плотности тока будут совпадать с линиями вектора электрической напряженности (с силовой линией), эквипотенциальные линии, как и в электростатическом поле, будут перпендикулярны к силовым линиям, т.е. к линиям вектора плотности тока.

Постоянное электрическое поле в диэлектрике при отсутствии объемных зарядов и постоянное поле в проводящей среде в области вне источников ЭДС описываются аналогичными уравнениями, имеющими соответственно вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} = 0; \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi; \quad \vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}; \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0; \quad \nabla^2 \varphi = 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = 0; \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi; \quad \vec{J} = \gamma \vec{E}; \quad \operatorname{div} \vec{J} = 0; \\ \nabla^2 \varphi = 0, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$\gamma$  – удельная проводимость проводящей среды;

$D$  – вектор электрической индукции.

Поэтому при одинаковых граничных условиях картины этих полей будут одинаковыми.

Электростатическое поле двухпроводной линии является плоскопараллельным.

Под плоскопараллельным полем понимают поле, картина которого повторяется во всех плоскостях, перпендикулярных какой-либо одной оси декартовой системы координат, то есть в плоскопараллельном поле картина поля не зависит от какой-то одной координаты декартовой системы. Для двухпроводной линии картина поля будет одинаковой во всех плоскостях, перпендикулярных проводам линии.

### 3. Описание лабораторной установки

Для исследования плоскопараллельного электростатического поля двухпроводной линии использован стальной лист.

Как известно, линии напряженности электростатического поля двухпроводной линии представляют собой дуги окружностей, поэтому в соответствии с аналогией линии тока в проводящей среде также

являются дугами окружностей, проходящих через электрические оси электродов. Для исследования такого поля нет необходимости располагать бесконечной проводящей средой. Достаточно из всей среды вырезать её часть, ограниченную линиями тока. Именно такой частью является плоский круглый стальной лист, на окружности которого расположены зажимы для подвода тока. На листе нанесены неглубокими царапинами прямоугольная сетка, служащая для определения координат точек на поверхности листа. Зажимы расположены парами, причем каждая пара симметрична относительно средней диаметральной линии. К какой-либо из этих пар зажимов подводится постоянное напряжение, и через лист проходит ток. Установка содержит щупы и микровольтметр для определения опытным путем линий равного потенциала.

Схема электрической цепи установки представлена на рис. 1.1.

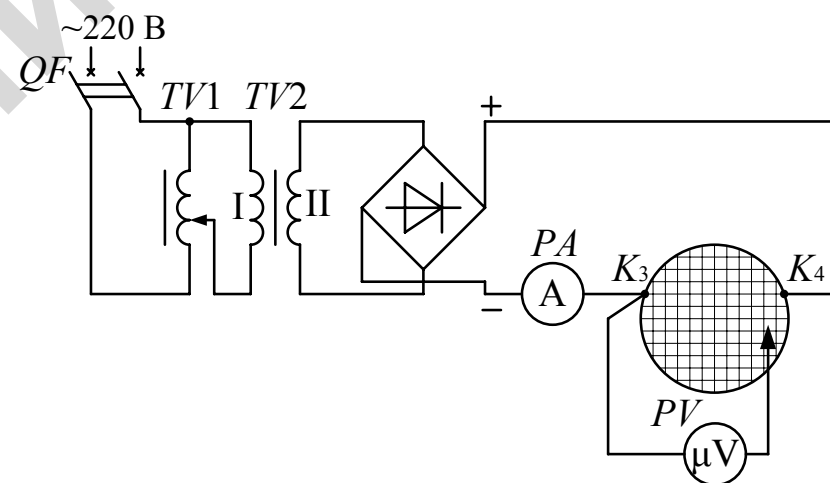


Рис. 1.1. Схема электрической цепи для исследования электростатического поля двухпроводной линии:

PA – амперметр 10 А; PV – микровольтметр

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 1.1.

4.2. Нарисовать на листе бумаги окружность диаметром 16 см, нанести прямоугольную сетку, расставить числовые значения координатных линий и указать расположение электродов  $K_3$  и  $K_4$  (целесооб-

разно использовать бумагу в клетку).

4.3. С помощью автотрансформатора установить ток в цепи 8 А и в дальнейшем строго поддерживать его величину постоянной. Щуп микровольтметра установить на оси симметрии – вертикальной черте в точке с координатами (0,10) и записать показание микровольтметра. Затем, перемещаясь со щупом вверх и вниз до краев листа, определить координаты других точек, имеющих то же значение напряжения (всего 6–7 точек, равномерно отстоящих друг от друга). Определенную таким образом эквипотенциальную линию следует зарисовать на чертеже и подписать величину потенциала. Аналогично определяются другие эквипотенциальные линии, находящиеся справа и слева от оси симметрии. Напряжение между соседними эквипотенциальными линиями следует брать равным 4 мкВ. Замерить и записать потенциалы электродов К<sub>3</sub> и К<sub>4</sub>.

4.4. С помощью построенных на чертеже эквипотенциальных линий построить линии вектора плотности тока, указав их направление.

Линия вектора плотности тока, как и совпадающая с ней линия напряженности электрического поля, пересекается с любой эквипотенциальной линией под прямым углом.

Первой линией вектора плотности тока является прямая, соединяющая центры клемм К<sub>3</sub> и К<sub>4</sub>. Как первая, так и последующие линии вектора плотности тока являются дугами окружностей, проходящих через точки К<sub>3</sub> и К<sub>4</sub> (рис. 1.2). Первая линия есть дуга окружности с радиусом, равным бесконечности.

Вторую линию проводят, как уже указывалось выше, как дугу окружности, например, через точку 2.

Третья силовая линия проводится так, чтобы

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \text{const},$$

где  $b_1; b_2$  – средняя длина ячейки;  
 $a_1; a_2$  – средняя ширина ячейки.

Последнее требование вытекает из того, что ширина полосы, очерченной новой линией вектора плотности тока, должна определяться током, проходящим через сечение этой полосы. Токи каждой полосы должны быть одинаковыми.

Ток в каждой ячейке первой полосы

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta R} = \frac{\Delta U}{\frac{1}{\gamma} \frac{a_1}{b_1}} = \Delta U \gamma \delta \frac{a_1}{b_1},$$

где  $\delta$  – толщина листа.

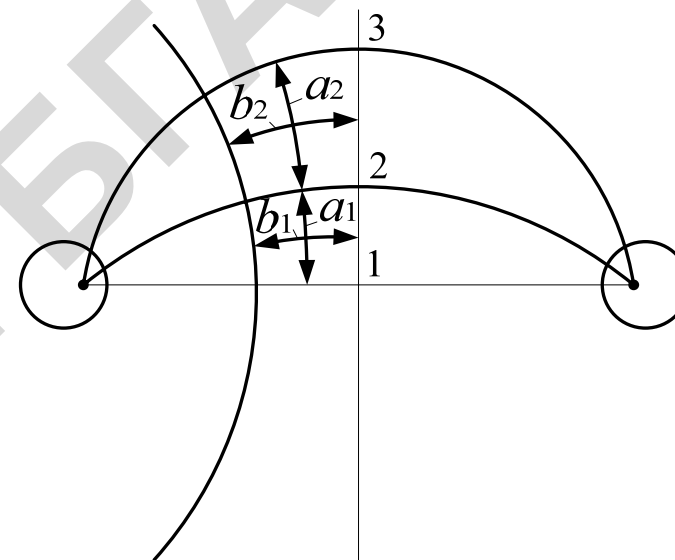


Рис. 1.2. Построение линий вектора плотности тока

Так как в каждой полосе  $\Delta U \gamma \delta$  – неизменная величина, то для выполнения условия  $I = \text{const}$  должно выполняться равенство:

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3} = \dots = \text{const}.$$

Следовательно, положение точки 3 (рис. 1.2) можно определить, рассчитав:

$$a_2 = \frac{a_1}{b_1} b_2.$$

Экспериментально снятая картина электрического поля постоян-

ного тока на модели соответствует картине электростатического поля двухпроводной линии, поскольку оба поля подчиняются одному и тому же уравнению Лапласа  $\nabla^2\varphi = 0$  и граничные условия для поля тока в среде, окружающей электроды (проводящем листе), совпадают с граничными условиями для электростатического поля в диэлектрике, окружающем провода двухпроводной линии.

## 5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение напряженности электрического поля.
2. Запишите выражение потенциала электрического поля.
3. Покажите на примере силовые линии электрического поля.
4. Дайте определение эквипотенциальной линии.
5. Запишите соотношение между потенциалом и напряженностью электростатического поля.
6. Что такое градиент потенциала?
7. В чем проявляется аналогия электростатического поля и электрического поля постоянного тока в проводящей среде?

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДНИКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ

#### 1. Цель работы

Экспериментальное исследование распределения напряженности магнитного поля в пространстве вокруг проводника с током, а также исследование распределения напряженности магнитного поля вдоль оси цилиндрической катушки с током. Целью работы является также выяснение и экспериментальная проверка закона полного тока.

#### 2. Общие сведения

Электромагнитное поле представляет собой вид материи. Магнитное поле является одной из двух сторон электромагнитного поля. Во всех случаях оно связано с электрическим током. Обнаруживается магнитное поле по механическому воздействию на движущийся элек-

трический заряд. Основной величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ . Направление и величина вектора  $\vec{B}$  определяются силой, с которой действует магнитное поле на помещенный в него проводник с током.

Воображаемая линия, касательная к каждой точке которой совпадает с направлением действия вектора  $\vec{B}$ , называется линией магнитной индукции (магнитной силовой линией). Линии магнитной индукции всегда замкнуты на себя. Магнитное поле изображается графически с помощью линий магнитной индукции, например, магнитное поле прямолинейного проводника с током выглядит в виде концентрических окружностей, а магнитное поле катушки без стального сердечника показано на рис. 2.1. Направление линий магнитной индукции вокруг проводника с током определяется по правилу правого винта.

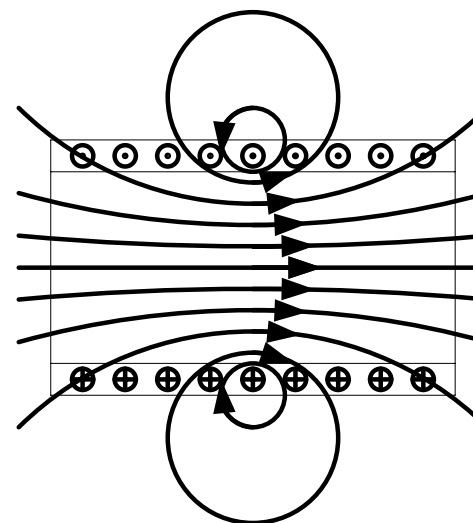


Рис. 2.1. Магнитное поле катушки

Поток вектора  $\vec{B}$  сквозь площадку  $d\vec{S}$  называется магнитным потоком

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$



Наряду с вектором  $\vec{B}$  магнитное поле также характеризуется второй векторной величиной  $\vec{H}$  – напряженностью магнитного поля. Эти векторные величины связаны между собой соотношением

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H},$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды.

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  вдоль любого произвольного замкнутого контура и алгебраической суммой токов  $\sum i$ , охваченных этим контуром, определяется законом полного тока:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum i.$$

Если контур интегрирования охватывает катушку с числом витков  $N$  и током  $i$ , то

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = iN.$$

С помощью закона полного тока можно рассчитать, например, напряженность поля в некоторой точке  $A$ , удаленной на расстояние  $R$  от уединенного проводника с током  $I$  (рис. 2.2).

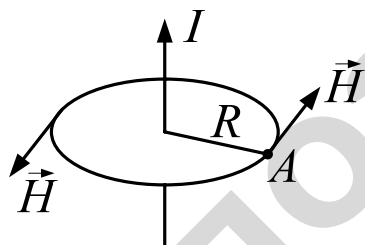


Рис. 2.2. Магнитное поле проводника с током

Проведем через точку  $A$  окружность радиусом  $R$  в плоскости, пер-

пендикулярной оси провода, так, чтобы центр ее находился на оси провода. В силу симметрии напряженность поля во всех точках окружности численно одна и та же. Направление вектора напряженности совпадает с касательной к окружности. Поэтому

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl \cos 0^\circ = H \oint dl = H 2\pi R = I,$$

$$H = \frac{I}{2\pi R}.$$

С увеличением радиуса напряженность убывает по гиперболическому закону.

Напряженность магнитного поля на оси однослойной цилиндрической катушки легче может быть вычислена при помощи закона Био – Савара – Лапласа. Согласно этому закону, ток  $i$  элемента проводника  $dl$  создает в точке, удаленной на расстояние  $r$  от элемента проводника, магнитное поле с напряженностью

$$dH = \frac{i dl \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

где  $\alpha$  – угол между вектором  $d\vec{l}$  (направлением тока в элементе  $dl$ ) и радиусом вектором  $\vec{r}$ , направленным от элемента  $dl$  к точке, в которой определяется  $d\vec{H}$ . Вектор  $d\vec{H}$  направлен перпендикулярно к  $d\vec{l}$  и перпендикулярно к  $\vec{r}$  в сторону, определяемую правилом правого винта.

Для приближенного расчета напряженности магнитного поля по оси катушки при отсутствии стального сердечника заменим действительную многослойную катушку однослойной с тем же общим количеством витков, с той же длиной и с радиусом витков, равным среднему радиусу витков действительной катушки (рис. 2.3). Найдем сначала напряженность магнитного поля в точке  $A$ , лежащей на оси кругового витка, по которому протекает ток  $i$ ,  $R$  – радиус витка. Так как для точек на оси  $\vec{r} \perp d\vec{l}$ ,  $\sin \alpha = 1$ .

Каждые два равные элемента витка  $dl$  и  $dl'$ , лежащие в противо-

ложных концах диаметра витка, обуславливают в точке  $A$  векторы  $\vec{dH}$  и  $\vec{dH}'$ , составляющие которых, нормальные к оси  $OX$ , взаимно компенсируются. Наоборот, составляющие этих векторов, направленные вдоль оси  $OX$ , складываются. Следовательно, при вычислении напряженности поля  $H$  в точке  $A$  достаточно учесть только составляющую каждого элемента вектора  $\vec{dH}$ , направленную вдоль оси  $OX$  и равную  $dH \sin \beta$ , где  $\beta$  – угол между осью  $OX$  и радиусом-вектором  $r$ .

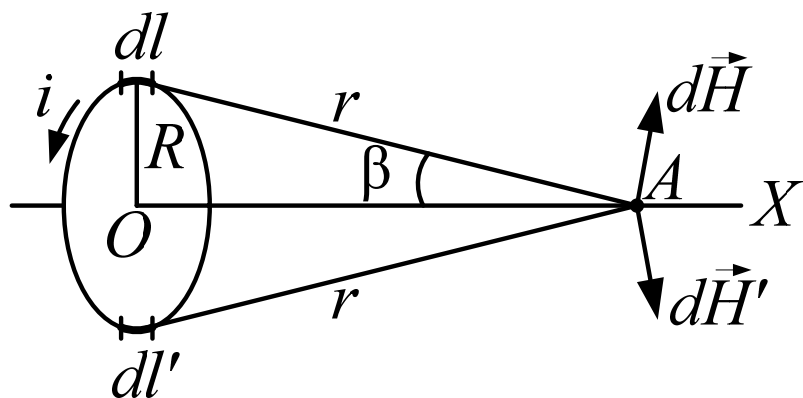


Рис. 2.3. Магнитное поле кругового витка с током

Интегрируя выражение напряженности поля вдоль всего витка, получим

$$H = \int_0^{2\pi R} \sin \beta \frac{i dl}{4\pi r^2} = \frac{i}{2R} \sin^3 \beta.$$

Пользуясь этим выражением, найдем напряженность магнитного поля в точке  $A$ , лежащей на оси однослойной цилиндрической катушки, имеющей длину  $l$ , число витков  $w$  и радиус витков  $R$  (рис. 2.4).

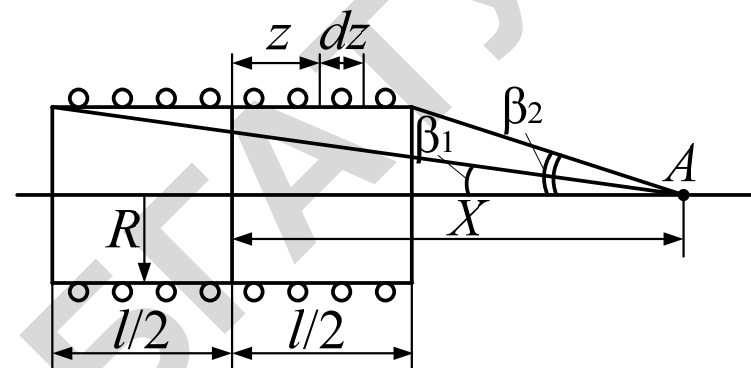


Рис. 2.4. Магнитное поле однослойной катушки

Выделим элемент длины  $dz$  катушки. Его можно рассматривать как тонкий круговой контур с током  $di = \frac{iN}{l} dz$ .

Напряженность магнитного поля, вызванная этим током,

$$dH = \frac{di}{2R} \sin^3 \beta = \frac{iN}{2l} \sin^3 \beta \frac{dz}{R}.$$

Искомая напряженность  $H$  в точке  $A$  магнитного поля, вызванного током во всей катушке, получается интегрированием вдоль всей катушки:

$$H = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{iN}{2l} \sin^3 \beta \frac{dz}{R}.$$

Так как  $\frac{X-Z}{R} = \text{ctg} \beta$ , то  $\frac{dz}{R} = \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}$ .

Следовательно,

$$H = \frac{iN}{2l} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta = \frac{iN}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2).$$

Полученная формула служит для определения  $H$  в различных точках осевой линии катушки при отсутствии стального сердечника.

Для проверки справедливости закона полного тока производят

измерение магнитного напряжения вдоль контура, охватывающего витки катушки.

Измерение производится с помощью магнитного пояса, который представляет собой гибкую ленту из изолирующего материала, обмотанную изолированным проводом (рис. 2.5).

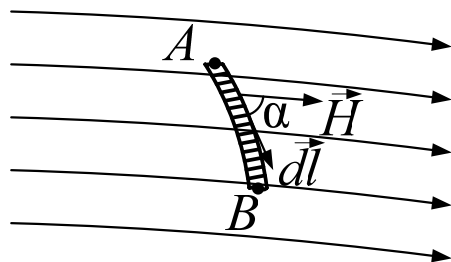


Рис. 2.5. Определение магнитного напряжения

Магнитное напряжение равно линейному интегралу напряженности магнитного поля вдоль некоторого пути между точками  $A$  и  $B$ :

$$U_{MAB} = \int_A^B H \cos \alpha \, dl.$$

Магнитное напряжение  $U_{MAB}$  вдоль оси пояса пропорционально потокоцеплению  $\psi$ , сцепляющемуся с обмоткой пояса. Действительно, поток, сцепляющийся с одним витком пояса,

$$\Phi = \mu_0 H \cos \alpha S,$$

где  $S$  – среднее значение поперечного сечения пояса;

$\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cong 1,25 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;

$H$  – напряженность поля в точках сечения;

$\alpha$  – угол между нормалью к сечению и вектором магнитной индукции  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ . Этот же угол  $\alpha$  есть угол между касательной к оси пояса и вектором  $\vec{H}$ .

На элемент длины  $d$  пояса приходится число витков, равное  $w' dl$ , где  $w'$  – число витков на единицу длины пояса.

Потокоцепление на участке  $AB$  находится следующим образом:

$$\psi = \int_A^B \Phi w' \, dl = \int_A^B \mu_0 w' S H \cos \alpha \, dl = \mu_0 S N U_{MAB}.$$

Таким образом, магнитный поток, сцепленный с магнитным поясом, пропорционален магнитному напряжению вдоль длины пояса:

$$U_{MAB} = \frac{1}{\mu_0 N S} \psi = C \psi,$$

где  $C$  – постоянная величина.

При включении катушки потокоцепление изменяется от нуля до  $\psi$ . При этом в витках пояса наведётся ЭДС, пропорциональная величине потокоцепления  $\psi$ . Эта ЭДС измеряется прибором, и его показания будут пропорциональны магнитному напряжению вдоль длины самого пояса. С помощью магнитного пояса можно измерить магнитодвижущую силу  $i w = F$  обмотки катушки. Это измерение основано на законе полного тока. Обхватив поясом всю обмотку катушки и сомкнув концы пояса, будем иметь:

$$I N = \oint_l \vec{H} \, d\vec{l} = \oint_l H \cos \alpha \, dl.$$

Для уединенного проводника  $N = 1$ . Поэтому  $F = I = \oint H \cos \alpha \, dl$ .

### 3. Описание лабораторной установки

Для измерения магнитной индукции в данной работе используется милливеберметр, подключённый к измерительной катушке. Измерительная катушка (ИК-1, ИК-2) помещается в исследуемую точку пространства. При включении цепи потокоцепление измерительной катушки изменяется от нуля до  $\psi$ , благодаря чему в катушке наводится ЭДС, которая и измеряется прибором. Отклонение стрелки милливеберметра от своего первоначального положения пропорционально индукции магнитного поля, пронизывающего измерительную катушку. Каждое измерение сопряжено с включением цепи в сеть. Эта операция производится специальной кнопкой «пуск».

#### 4. Программа и методика выполнения работы

##### Исследование магнитного поля проводника с током.

4.1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 2.6. Включить цепь в сеть, нажать кнопку *SA* и установить с помощью автотрансформатора *TV-1* ток  $I = 8$  А. Отпустить кнопку. Значение тока  $I = 8$  А должно оставаться неизменным в течение всего эксперимента. При этом вследствие наличия у амперметра шунта в данной схеме, по исследуемому проводнику будет проходить ток 144 А. Проводник расположен вертикально над столом.

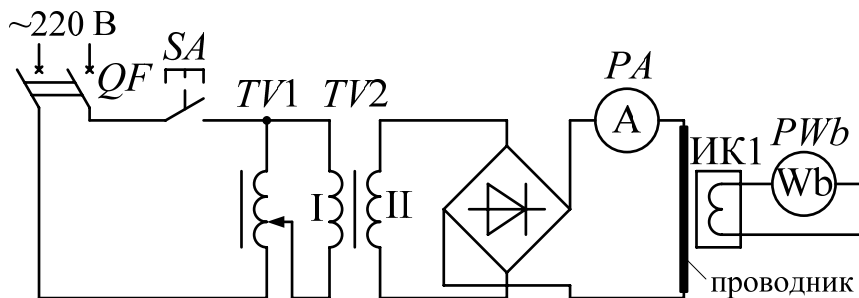


Рис. 2.6. Схема электрической цепи для исследования магнитного поля проводника с током:

РА – амперметр 10 А; PWb – милливольтметр; ИК-1 – измерительная катушка

4.2. С помощью магнитной стрелки исследовать направление вектора магнитной индукции в пространстве, окружающем проводник. Для этого установить магнитную стрелку на расстоянии  $R = 10$  см от провода на одном из радиальных направлений. Замкнуть цепь кнопкой и нарисовать положение магнитной стрелки относительно провода на рисунке. Отпустить кнопку. Аналогичные эксперименты провести на других трех (или более) радиальных направлениях.

По положению северного (красного) полюса стрелки в различных точках вокруг проводника нарисовать линию вектора магнитной индукции (магнитную силовую линию).

Поменять направление тока в проводнике на противоположное и с помощью магнитной стрелки убедиться, что направление вектора магнитной индукции также изменилось на противоположное.

4.3. Измерить значение магнитной индукции вдоль 4-х взаимно перпендикулярных радиальных направлений, указанных на стенде.

Измерительную катушку ИК-1 располагать так, чтобы стрелка на ее корпусе совпала с выбранным радиальным направлением, а вертикальная стенка корпуса под концом стрелки совпала с отметкой, указывающей расстояние от центра проводника.

Для измерения необходимо записать сначала начальное положение стрелки милливольтметра  $\alpha_0$ . Затем кнопкой «пуск» замкнуть цепь и зафиксировать максимальный отброс стрелки милливольтметра  $\alpha$ , после чего отпустить кнопку «пуск». Измерения сделать на расстоянии 2,5; 5; 10; 15; 20 см от центра проводника. Данные измерений записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Магнитное поле проводника с током

Направление	I					II					III					IV							
	R, см	2,5	5	10	15	20	2,5	5	10	15	20	2,5	5	10	15	20	2,5	5	10	15	20		
$\alpha_0$																							
$\alpha$																							
$B$ , Тл																							
$H$ , А/м																							
$H_{расч}$ , А/м																							
$B_{расч}$ , Тл																							

Здесь  $R$  – расстояние измерительной катушки от центра проводника;

$\alpha_0$  – начальное отклонение стрелки милливольтметра;

$\alpha$  – максимальное отклонение стрелки милливольтметра;

$B$  – магнитная индукция;  $B = C_1(\alpha - \alpha_0)$ ;  $C_1 = 450 \cdot 10^{-6}$  Тл;

$H$  – напряженность магнитного поля;  $H = \frac{B}{\mu_0}$ ;  $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

##### Исследование магнитного поля цилиндрической катушки.

4.4. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 2.7, а. Включить цепь в сеть, нажать кнопку и с помощью автотрансформатора *TV-1* установить ток  $I = 3$  А. Отпустить кнопку. Значение тока  $I = 3$  А должно оставаться неизменным в течение всего эксперимента.

Таблица 2.2

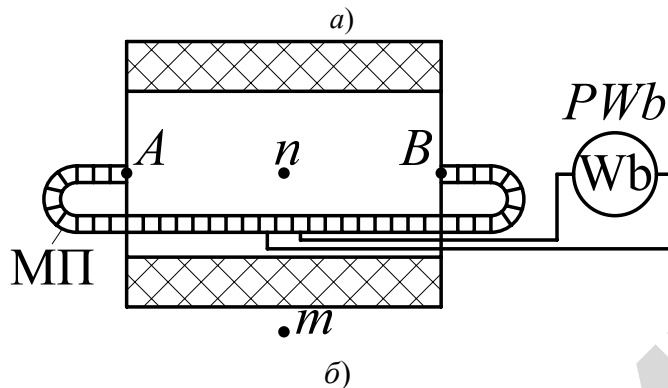
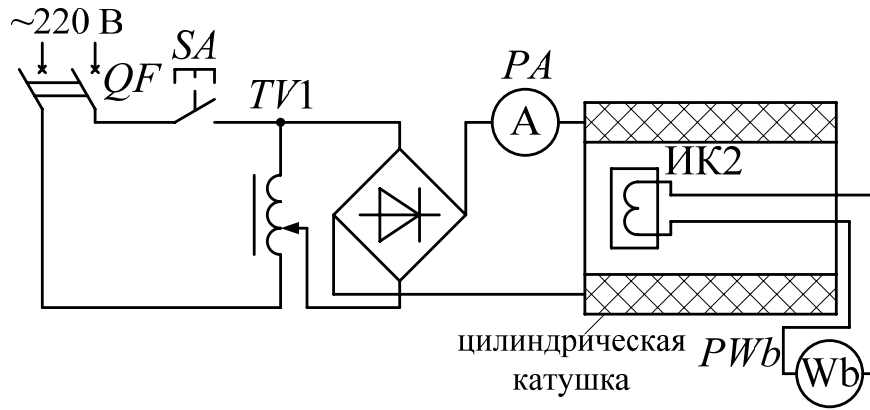


Рис. 2.7. Схема электрической цепи для исследования магнитного поля катушки:

РА – амперметр 10 А; PWb – милливольтметр;  
ИК-2 – измерительная катушка; МП – магнитный пояс

4.5. Измерить величину магнитной индукции вдоль оси цилиндрической катушки. Для этого разместить измерительную катушку ИК-2 внутри исследуемой цилиндрической катушки. Измерения произвести в последовательности, изложенной в пункте 4.3, для следующих делений на стержне измерительной катушки: 0; 2; 4; 6; 9; 12; 14; 16; 18; 20; 24 см.

Данные измерений занести в табл. 2.2.

Магнитное поле на оси катушки

X	Измерено				Вычислено	
	$\alpha_0$	$\alpha$	B	H	$B_{расч}$	$H_{расч}$
см			Тл	А/м	Тл	А/м

Здесь X – деления на стержне (см), определяющие положение измерительной катушки ИК-2;

$\alpha_0$  – начальное отклонение стрелки милливольтметра;

$\alpha$  – максимальное отклонение стрелки милливольтметра;

B – магнитная индукция;  $B = C_2(\alpha - \alpha_0)$ ,  $C_2 = 1,4 \cdot 10^{-2}$  Тл;

H – напряженность магнитного поля.

4.6. Вынуть из цилиндрической катушки измерительную катушку ИК-2 и отключить ее от милливольтметра. Продеть в катушку магнитный пояс, подключив его к милливольтметру, согласно схеме (рис. 2.7, б). Произвести измерение магнитного напряжения вдоль участка пути  $AnB$  – внутри катушки и затем, вынув магнитный пояс из катушки, вдоль участка  $Amb$  – вне катушки, а также вдоль замкнутого пути  $AnBmA$ , охватывающего все витки катушки. Измерения произвести в последовательности, изложенной в пункте 4.3.

Данные измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Магнитное напряжение на участках вокруг катушки

Участок пути	$AnB$	$Amb$	$AnBmA$
$\alpha_0$			
$\alpha$			
$U_M, A$			

$$U_M = C_3(\alpha - \alpha_0); \quad C_3 = 6430 A.$$

4.7. По результатам измерений пункта 4.3 убедиться, что магнитное поле уединенного проводника симметрично относительно центра проводника. По данным измерений построить кривую распределения напряженности магнитного поля в одном из радиальных направлений  $H = f(R)$ . На этом же рисунке построить кривую  $H_{расч} = f(R)$ .

4.8. По результатам измерений пункта 4.5 построить кривую рас-

пределения напряженности магнитного поля вдоль оси катушки  $H = f(X)$ , указав на ней пунктиром расположение катушки.

4.9. Пользуясь кривой распределения напряженности магнитного поля вдоль оси катушки  $H = f(X)$ , методом графического интегрирования найти значение магнитного напряжения вдоль участка  $A n B$  внутри катушки.

Определение магнитного напряжения графическим интегрированием производится согласно выражению:

$$U_{MA n B} = \int_A^B \vec{H} d\vec{l} = H_{1cp} l_1 + H_{2cp} l_2 + \dots = \sum H_{kcp} l_k,$$

где  $H_{kcp}$  – среднее значение напряженности на отрезке  $l_k$ ;

$l_k$  – длина короткого отрезка.

Отрезки следует брать длиной 0,02 м.

4.10. Рассчитать магнитное напряжение вдоль замкнутого контура  $A n B m A$  по закону полного тока:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = IN = U_{MA n B m A}.$$

4.11. Расчетные значения  $U_{MA n B}$  и  $U_{MA n B m A}$  (п. 4.9 и 4.10) сравнить с данными табл. 2.3.

## 5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. Расчетное значение напряженности магнитного поля  $H_{расч}$  проводника находится по закону полного тока:

$$H_{расч} = \frac{I}{2\pi R}, \quad I = 144 \text{ А.}$$

$$B_{расч} = \mu_0 H_{расч}.$$

5.2. Расчетное значение магнитной индукции на оси цилиндрической катушки  $B_{расч}$  находится по формуле

$$B_{расч} = \mu_0 \frac{iN}{2l} (\cos\beta_1 - \cos\beta_2),$$

где  $N$  – число витков катушки,  $N = 3000$ ;

$l$  – длина катушки,  $l = 0,155$  м;  $i = 3$  А;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cong 1,25 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\beta_1, \beta_2$  – значения углов (см. рис. 2.8), которые определяются расчетным путем, исходя из положения измерительной катушки и размеров катушки.

Значения  $\cos \beta_1$  и  $\cos \beta_2$  приведены в табл. 2.4. На рис. 2.8  $X$  – расстояние от точки отсчета до измерительной катушки,  $d = 0,135$  м – средний диаметр витков.

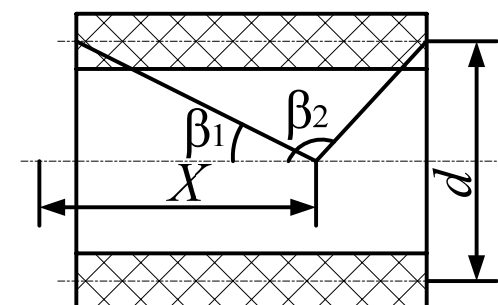
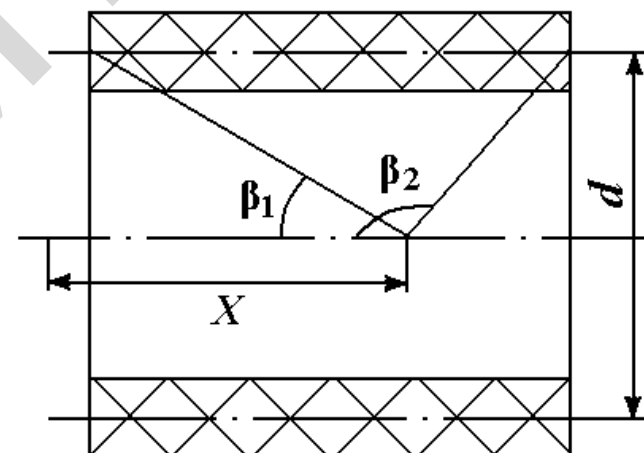


Рис. 2.8. Определение углов  $\beta_1, \beta_2$

Таблица 2.4

Значения  $\cos \beta_1$  и  $\cos \beta_2$  для различных положений измерительной катушки

$X, \text{ см}$	0	2	4	6	9	12	14	16	18	20	24
$\cos \beta_1$	-0,28	0	0,26	0,5	0,74	0,83	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96
$\cos \beta_2$	-0,92	-0,91	-0,9	-0,87	-0,76	-0,63	-0,45	-0,21	0,17	0,46	0,72

## 6. Контрольные вопросы

1. Назовите основные величины, характеризующие магнитное поле.
2. В чем состоит принцип непрерывности магнитного потока?
3. Как выражается магнитный поток через магнитную индукцию?
4. Как выражается магнитная индукция через напряженность магнитного поля?
5. Запишите закон полного тока. По какому правилу определяется направление линий магнитной индукции вокруг проводника с током?

## Лабораторная работа № 3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА

#### 1. Цель работы

Целью работы является опытная проверка законов Кирхгофа, изучение метода расчета сложных электрических цепей, основанного на законах Кирхгофа, и построение потенциальной диаграммы электрической цепи.

#### 2. Общие сведения

Сложная электрическая цепь имеет ветви и узлы.

Ветвью электрической цепи называют участок, вдоль которого протекает один и тот же ток. Узлом цепи называют точку соединения не менее трех ветвей. На рис. 3.1 представлена схема электрической цепи с двумя узлами и тремя ветвями.

Контуром в электрической цепи называют замкнутый путь, проходящий в общем случае по нескольким ветвям, при этом каждый

узел в рассматриваемом контуре встречается не более одного раза. В качестве примера на рис. 3.1 можно указать контур *abcdefa*.

Все электрические цепи подчиняются первому и второму законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи и формулируется следующим образом: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

$$\sum I = 0.$$

Подтекающие к узлу токи считаются положительными, а оттекающие – отрицательными.

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи и имеет следующую формулировку: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур.

$$\sum E = \sum RI.$$

При составлении уравнения по второму закону Кирхгофа выбирают контур и направление его обхода. Если направление ЭДС совпадает с обходом контура, то эту ЭДС записывают со знаком плюс, если не совпадает, то – со знаком минус. Если направление напряжения совпадает с обходом контура, то напряжение записывают со знаком плюс, если не совпадает, то – со знаком минус.

Направление напряжения на участке с сопротивлением совпадает с направлением тока на этом участке.

ЭДС имеют следующие буквенные обозначения на схемах: *e* или *E*. Как в первом, так и во втором обозначении ЭДС направлены слева направо (от минуса к плюсу).

Расчет сложных электрических цепей осуществляется путем решения системы уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Как правило, подлежат определению токи в ветвях при известных ЭДС и сопротивлениях элементов цепи. Число независимых уравнений в этом случае должно равняться числу токов или числу ветвей схемы.

При составлении уравнений по законам Кирхгофа рекомендуется придерживаться такой последовательности: сначала обозначить на схеме произвольные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи, затем составить уравнения на основании

первого закона Кирхгофа для узлов. Число этих уравнений должно быть на единицу меньше числа узлов. Недостающее число уравнений составляется на основании второго закона Кирхгофа. Для этого выбираются контуры и задаются направлением их обхода. Для того чтобы уравнения по второму закону Кирхгофа, а, следовательно, и сами контуры были независимыми, достаточно (но не всегда необходимо), чтобы каждый последующий контур отличался от предыдущего хотя бы одной новой ветвью.

Потенциальной диаграммой называют график распределения потенциала вдоль какого-либо участка электрической цепи или замкнутого контура. На графике по оси абсцисс откладываются в масштабе сопротивления в том порядке, в каком они встречаются при обходе контура. По оси ординат откладывают потенциалы точек электрической схемы. Потенциал точки, с которой начинается обход контура, принимается равным нулю.

Потенциальная диаграмма позволяет определить напряжение между любыми точками цепи.

Потенциалы точек могут быть определены относительно определенной точки цепи замером с помощью вольтметра или расчетом, если известны ЭДС, сопротивления, величина и направление токов электрической цепи.

При расчете потенциала какой-либо точки необходимо учитывать, что на участке цепи без ЭДС ток течет от более высокого потенциала к более низкому. Следовательно, если мы перемещаемся по направлению тока, то происходит понижение потенциала на величину падения напряжения на данном участке цепи.

При переходе через источник ЭДС от отрицательного зажима к положительному, потенциал повышается на величину ЭДС источника. При переходе через источник в обратном направлении – потенциал падает на величину ЭДС источника.

### 3. Описание лабораторной установки

Для исследования цепей постоянного тока на лабораторном стенде имеются набор резисторов и два источника постоянной ЭДС:  $E_1$  и  $E_2$ . Внешний вид панели стенда показан на рис. 3.1.

Для измерения токов предусмотрены миллиамперметры с пределами измерения 100–150 мА, для измерения напряжений – электрон-

ный цифровой вольтметр на 15 В (М 253, М 330).

Объектом исследования в данной лабораторной работе является сложная электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками ЭДС в разных ветвях (рис. 3.2).

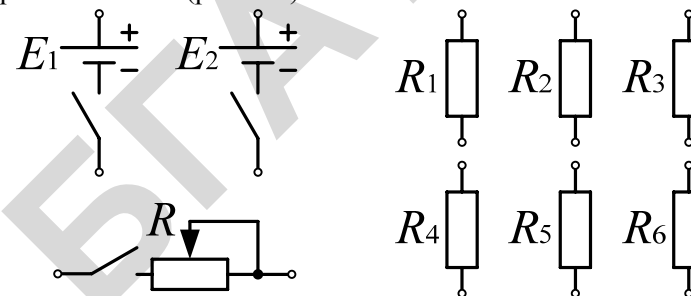


Рис. 3.1. Элементы цепи постоянного тока

Буквами  $a, b, c, d, e, f$  на схеме обозначены точки, потенциалы которых необходимо измерить.

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 3.2. Амперметры подключить левой (отрицательной) клеммой к узлу «с».

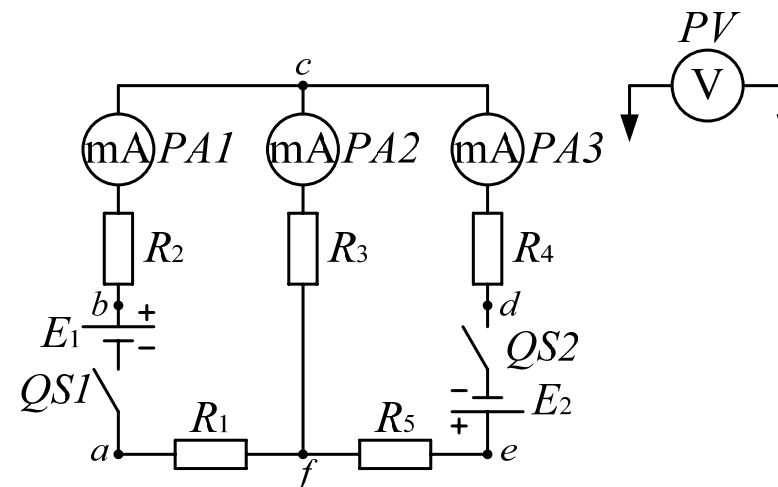


Рис. 3.2. Схема сложной цепи постоянного тока



4.2. Записать значения сопротивлений резисторов.

Таблица 3.3

Таблица 3.1

Сопротивления резисторов

R1	R2	R3	R4	R5
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

4.3. Убедиться в справедливости первого закона Кирхгофа: включить источники ЭДС, измерить ЭДС и токи. При этом токи амперметров, имеющих отклонение стрелки вправо, записать со знаком плюс, влево – со знаком минус.

Токи со знаком плюс подходят к узлу «с», со знаком минус отходят от узла «с». Данные измерений занести в табл. 3.2. На схеме электрической цепи указать направления токов в ветвях.

Таблица 3.2

Проверка первого закона Кирхгофа для узла «с»  
и расчетные значения токов

Измерено						Вычислено		
$E_1$	$E_2$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$\sum I$	$I_1$	$I_1$	$I_1$
В	В	мА	мА	мА	мА	мА	мА	мА

4.4. Убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа:

$$\sum E = \sum U.$$

Обходя контур, согласно табл. 3.3, по часовой стрелке, записать значения ЭДС и напряжений на резисторах, входящих в этот контур, с учетом знака (плюс или минус).

Знаки перед ЭДС расставить согласно направлениям этих ЭДС, указанным в схеме (рис. 3.2).

Знаки перед напряжениями на резисторах расставить согласно направлениям токов в этих резисторах (см. пункт 4.3).

Проверка второго закона Кирхгофа для контуров электрической цепи

Контур	$E_1$	$E_2$	$U_{R1}$	$U_{R2}$	$U_{R3}$	$U_{R4}$	$U_{R5}$	$\sum E$	$\sum U$
	В	В	В	В	В	В	В	В	В
<i>abcdefa</i>									
<i>abcfa</i>									
<i>acdef</i>									

4.5. Измерить и записать в табл. 3.4 потенциалы точек относительно точки, заданной преподавателем. Потенциал этой точки следует принять равным нулю и к ней подключить отрицательный зажим вольтметра. При отклонении стрелки вольтметра вправо потенциал точки записывается со знаком плюс, влево – со знаком минус (вольтметр М 330).

Таблица 3.4

Потенциалы точек электрической цепи

Потенциалы	$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_e$	$\varphi_f$
Измерено, В						

4.6. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для расчета токов в ветвях электрической цепи по схеме, изображенной на рис. 1.2. Пользуясь заданными значениями сопротивлений и измеренными значениями ЭДС (табл. 3.1, 3.2) рассчитать токи, занести их в табл. 1.2 и сравнить с измеренными. Отчет должен содержать расчеты по данному пункту.

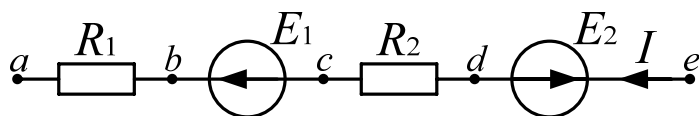
4.7. Построить потенциальную диаграмму для контура *abcdefa*.

## 5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение ветви, узла, контура в электрической схеме.
2. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа. Запишите их аналитическое выражение. Сформулируйте правила знаков при составлении уравнений по законам Кирхгофа.
3. Каков порядок расчета токов в сложной цепи на основании законов Кирхгофа?

4. Объясните построение потенциальной диаграммы.

5. Для приведенной ниже схемы определите потенциалы точек, приняв  $\varphi_a = 0$ .



#### Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Цель работы состоит в экспериментальной проверке эквивалентных преобразований схем электрических цепей, а также в установлении связей между напряжениями и токами при изменении сопротивления одного из элементов цепи.

#### 2. Общие сведения

По закону Ома электрический ток через приемник с сопротивлением  $R$  равен напряжению  $U$  на этом приемнике, деленному на сопротивление  $R$  этого приемника:

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

При расчетах электрических цепей с одним источником электрической энергии, как правило, известны напряжение источника, т.е. напряжение на входе цепи, и сопротивления приемников, которые могут быть соединены между собой различными способами. В этом случае целесообразно упростить схему цепи, заменив группу приемников или все приемники одним эквивалентным приемником. Преобразования называют эквивалентными, если токи и напряжения ветвей в тех частях схемы, которые не затронуты преобразованиями, остаются неизменными.

Последовательным соединением приемников называют такое их соединение, при котором через все приемники проходит один и тот же ток (рис. 4.1).

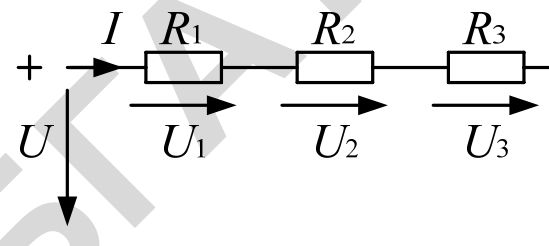


Рис. 4.1. Последовательное соединение приемников

При последовательном соединении приемников напряжение  $U$ , приложенное к цепи, согласно второму закону Кирхгофа, равно сумме напряжений на зажимах отдельных приемников:  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Так как во всех последовательно соединенных приемниках течет один и тот же ток, то по закону Ома можно записать

$$U_1 = R_1 I, U_2 = R_2 I, U_3 = R_3 I,$$

откуда  $U = R_1 I + R_2 I + R_3 I = R_{\text{экв}} I$ , где  $R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3$ , то есть эквивалентное сопротивление цепи при последовательном соединении приемников равно сумме сопротивлений отдельных приемников.

Полученное эквивалентное сопротивление цепи  $R_{\text{экв}}$  позволяет заменить цепь с несколькими последовательно соединенными приемниками эквивалентной цепью с одним приемником, имеющим сопротивление  $R_{\text{экв}}$  (рис. 4.2).

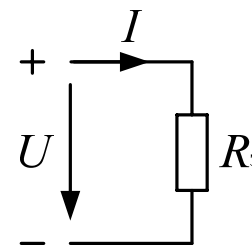


Рис. 4.2. Схема эквивалентной электрической цепи

Только после такого преобразования можно использовать закон Ома для расчета тока, поскольку напряжение  $U$  на эквивалентном приемнике (на входе цепи) известно:

$$I = \frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}}.$$

**Параллельным соединением приемников** называют такое их соединение, при котором все приемники подключены к одним и тем же двум узлам и находятся под одним и тем же напряжением (рис. 4.3).

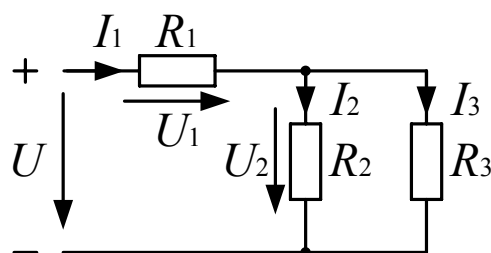


Рис. 4.3. Параллельное соединение приемников

Применяя первый закон Кирхгофа, можем записать

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Так как при параллельном соединении приемники находятся под одним и тем же напряжением, токи в них найдем из выражений

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3},$$

поэтому

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R_{\text{ЭКВ}}},$$

откуда  $\frac{1}{R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$  или  $g_{\text{ЭКВ}} = g_1 + g_2 + g_3$ ,

где  $g$  – проводимость.

Таким образом, эквивалентная проводимость цепи при параллельном соединении приемников равна сумме проводимостей отдельных приемников.

Определив эквивалентную проводимость при параллельном соединении приемников, можно найти эквивалентное сопротивление как

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{g_{\text{ЭКВ}}}.$$

В частном случае для двух параллельно соединенных приемников

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Найденное эквивалентное сопротивление цепи  $R_{\text{ЭКВ}}$  позволяет заменить цепь с параллельным соединением приемников эквивалентной цепью с одним приемником (рис. 4.2). Схема первоначальной цепи значительно упрощается, что широко используется при расчете разветвленных цепей.

Схема простейшей цепи со смешанным соединением приемников представлена на рис. 4.4.

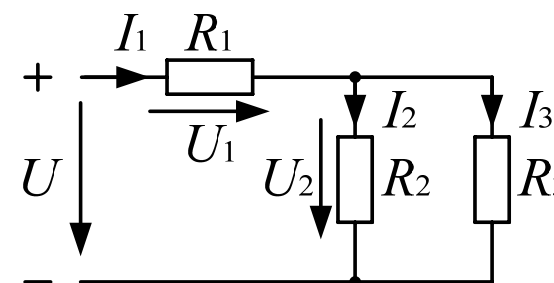


Рис. 4.4. Смешанное соединение приемников

Для такой цепи справедливы соотношения  $U = U_1 + U_2$  и  $I_1 = I_2 + I_3$ .

Эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением приемников находится путем последовательных преобразований схемы цепи. Для цепи (рис. 2.4) сначала заменяют параллельно соединенные приемники  $R_2$  и  $R_3$  одним эквивалентным  $R_{23}$ , затем в по-

лучившейся схеме цепи с последовательным соединением приемников  $R_1$  и  $R_{23}$  (рис. 4.5, а) находят эквивалентное сопротивление всей цепи:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

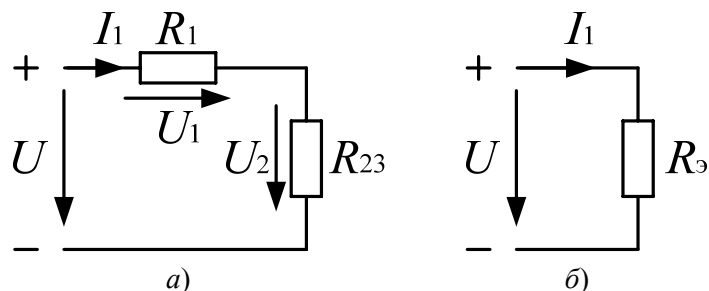


Рис. 4.5. Схемы последовательных преобразований цепи, изображенной на рис. 4.4

В результате разветвленная цепь со смешанным соединением приемников может быть заменена эквивалентной цепью с одним приемником с сопротивлением  $R_{\text{экв}}$  (рис. 4.5, б). Это позволит использовать закон Ома для расчета тока  $I_1$ , поскольку напряжение  $U$  на эквивалентном приемнике (на входе цепи) известно.

### 3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования являются электрические цепи с одним источником ЭДС  $E_1$  с последовательным, параллельным и смешанным соединениями приемников.

В качестве приемников используются резисторы  $R, R_1, R_2, R_6$ .

Для измерения токов на стенде предусмотрены миллиамперметры с пределами измерения 100–150 мА, для измерения напряжений – электронный цифровой вольтметр на 15 В (М 253, М 330).

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Последовательное соединение двух приемников.

а) Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на

рис. 4.6, измерить ток в цепи и напряжения на обоих приемниках и на входе цепи для шести различных значений переменного сопротивления  $R$ .

Первый замер – при  $R = \infty$  (участок цепи с сопротивлением  $R$  разомкнут).

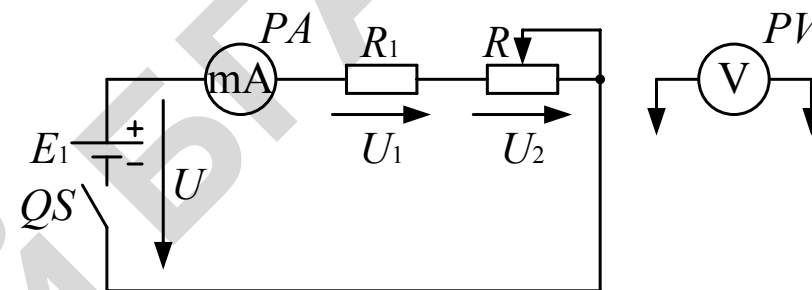


Рис. 4.6. Электрическая цепь с последовательным соединением приемников

Таблица 4.1

Напряжения и ток при последовательном соединении приемников

Измерено				Вычислено			
$U$	$U_1$	$U_2$	$I$	$R_1$	$R$	$R_{\text{экв}}$	$R_{\text{экв}} = \frac{U}{I}$
В	В	В	мА	Ом	Ом	Ом	Ом

б) По данным опыта убедиться в справедливости соотношения

$$U = U_1 + U_2.$$

в) Построить в одних осях координат графики зависимостей:

$$U = f(I),$$

$$U_1 = f(I),$$

$$U_2 = f(I).$$

4.2. Параллельное соединение приемников.

а) Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 4.7. Измерить токи и напряжения для шести различных значений пе-

ременного сопротивления  $R$ . Первый замер – при  $R = \infty$  (участок цепи с сопротивлением  $R$  разомкнут).

б) По данным опыта проверить соблюдение первого закона Кирхгофа  $I_1 = I_2 + I_3$ .

в) Построить в одних осях координат графики зависимостей

$$I_1 = f(I_3) \text{ и } I_2 = f(I_3).$$

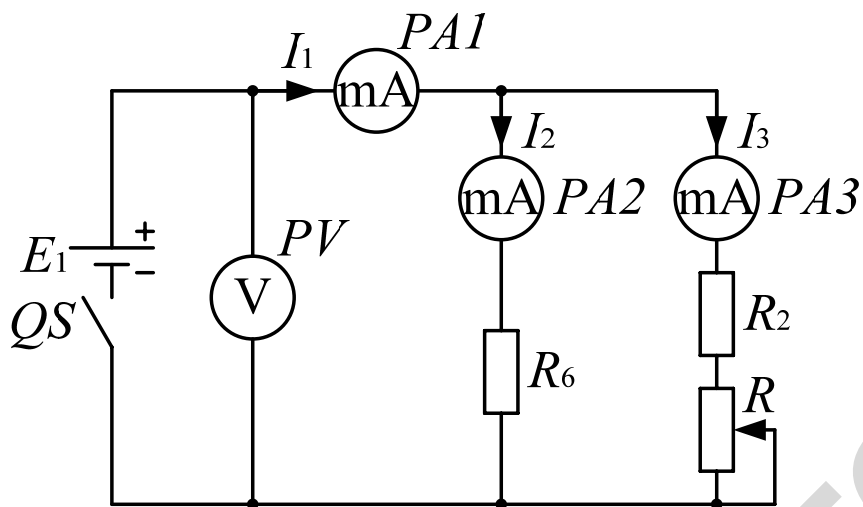


Рис. 4.7. Электрическая цепь с параллельным соединением приемников

Таблица 4.2

Напряжение и токи при параллельном соединении приемников

Измерено				Вычислено			
$U$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$R_6$	$R_2+R$	$R_{\text{экв}}$	$R_{\text{экв}} = \frac{U}{I}$
В	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	Ом

4.3. Смешанное соединение приемников.

а) Собрать схему, изображенную на рис. 4.8, измерить токи и напряжения для трех различных значений сопротивления  $R$ .

б) Проверить справедливость соотношений

$$U = U_1 + U_2, \quad I_1 = I_2 + I_3.$$

в) Записать формулы, по которым рассчитаны сопротивления  $R_1, R_6, R$ .

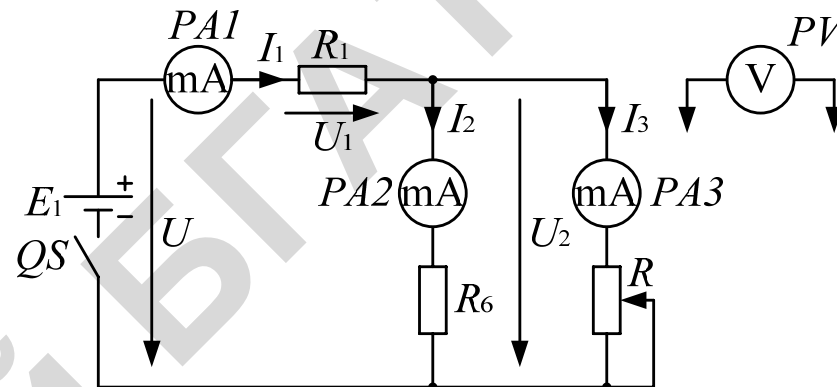


Рис. 4.8. Электрическая цепь со смешанным соединением приемников

Таблица 4.3

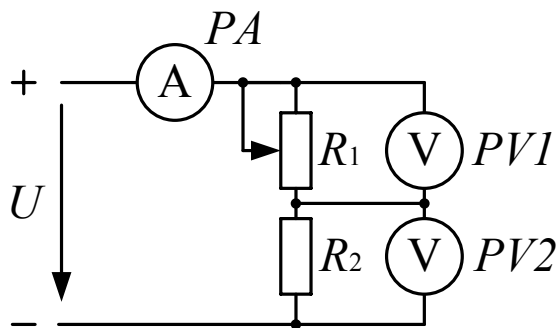
Напряжения и токи при смешанном соединении приемников

Измерено						Вычислено				
$U$	$U_1$	$U_2$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$R_1$	$R_6$	$R$	$R_{\text{экв}}$	$R_{\text{экв}} = \frac{U}{I}$
В	В	В	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

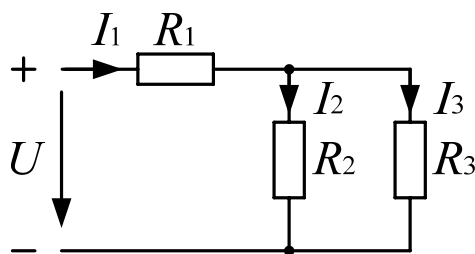
4.4. Руководствуясь законами Ома и Кирхгофа, объяснить, как изменятся токи и падения напряжений в цепи при уменьшении или увеличении одного из сопротивлений при последовательном, параллельном и смешанном соединении приемников.

## 5. Контрольные вопросы

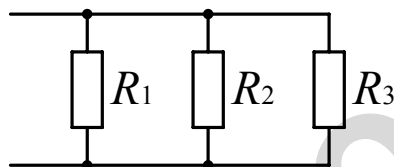
1. Какое соединение приемников называют последовательным и какое – параллельным?
2. Как определяется эквивалентное сопротивление при последовательном, параллельном и смешанном соединениях сопротивлений?
3. Как изменятся показания приборов при перемещении движка реостата  $R1$  вниз, если  $U = \text{const}$  ?



4. Определить токи  $I_1, I_2, I_3$ , если известно:  
 $U = 100 \text{ В}; R_1 = 8 \text{ Ом}; R_2 = 20 \text{ Ом}; R_3 = 30 \text{ Ом}.$

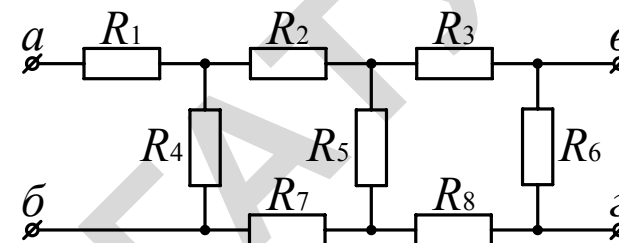


5. Найти эквивалентное сопротивление цепи, если  
 $R_1 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 20 \text{ Ом}; R_3 = 20 \text{ Ом}.$



6. Дано:  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом};$   
 $R_4 = R_5 = R_6 = 5 \text{ Ом};$   
 $R_7 = R_8 = 2 \text{ Ом}.$

Определить эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов  $a-b, в-г.$



7. Сформулируйте закон Ома и законы Кирхгофа.  
 8. Для цепи, приведенной в примере 6, нарисуйте схемы эквивалентных преобразований участков цепи при определении эквивалентного сопротивления всей цепи относительно зажимов  $a-b.$

### Лабораторная работа № 5

#### ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 1. Цель работы

Исследование линии электропередачи постоянного тока с переменной нагрузкой.

##### 2. Общие сведения

В настоящее время имеются линии электропередачи постоянного тока на дальние расстояния. Кроме того, передача энергии постоянным током встречается на электрифицированных железных дорогах, в трамвайной сети и на промышленных предприятиях, где имеются двигатели постоянного тока.

Передача энергии от источника электрической энергии к приемнику может осуществляться по различным схемам. В простейшем случае она производится по двум проводам, при этом источник, провода и приемник энергии образуют замкнутую неразветвленную цепь.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа напряжение  $U_1$  в начале линии выше напряжения  $U_2$  в конце ее на величину падения напряжения в проводах:  $U_1 = U_2 + R_{л} I$ ,  $R_{л} = 2R_{пр}$  – сопротивление проводов линии.

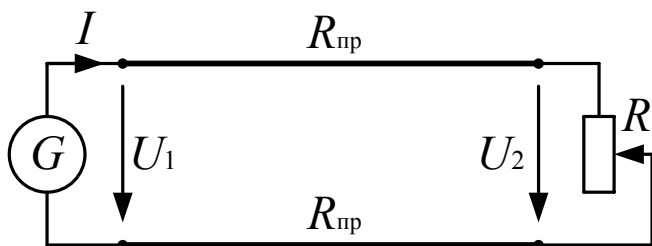


Рис. 5.1. Принципиальная электрическая схема линии электропередачи:  $G$  – генератор;  $R$  – приемник;  $R_{\text{пр}}$  – провода линии электропередачи

Сопротивление приемника  $R = \frac{U_2}{I}$ .

Мощность источника  $P_1 = U_1 I$ .

Мощность приемника  $P_2 = U_2 I$ .

Коэффициент полезного действия линии электропередачи

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

В реальных линиях электропередачи при передаче больших мощностей (например, нескольких десятых мегаватт) КПД составляет 0,94...0,97. В таких линиях электропередачи  $R \gg R_{\text{л}}$ .

В частном случае при холостом ходе, когда  $R = \infty$  и  $I = 0$ , КПД равен 1. Это видно из выражения

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_{\text{л}}}{P_1} = \frac{U_1 I - I^2 R_{\text{л}}}{U_1 I} = 1 - \frac{I R_{\text{л}}}{U_1}$$

Анализ выражения мощности приемника показывает, что при  $R = R_{\text{л}}$  мощность приемника максимальна при заданном направлении генератора  $U_1$ . Однако в этом случае  $\eta = 0,5$ .

Если мощность  $P_1$  значительна, то работать с таким низким КПД, как 0,5, совершенно недопустимо. Но если мощность мала, как, например, в устройствах автоматики и радиотехники, то с низким КПД можно не считаться, поскольку в этом режиме приемник имеет максимальную мощность.

В режиме короткого замыкания, когда сопротивление потребителя

$R = 0$ , ток в цепи ограничивается только сопротивлением проводов  $R_{\text{л}}$  линии передачи,  $I = \frac{U}{R_{\text{л}}}$  и достигает максимального значения. Од-

нако напряжение на потребителе в этом случае  $U_2 = 0$ , поэтому  $\eta = 0$ .

Чем длиннее линия электропередачи, тем больше сопротивление проводов  $R_{\text{л}}$ . Для обеспечения высокого КПД длинной линии электропередачи необходимо повышать ее напряжение. Действительно, чем выше напряжение  $U_1$ , тем меньше ток, необходимый для создания требуемой мощности  $P_1 = U_1 I$ . Чем меньше ток, тем меньше потери мощности в линии  $\Delta P_{\text{л}} = I^2 R_{\text{л}}$ .

### 3. Описание лабораторной установки

Для создания модели двухпроводной линии передачи постоянного тока предлагается использовать в качестве источника энергии ЭДС  $E1$ , в качестве приемника – переменный резистор  $R$ . Сопротивления проводов линии передачи могут быть представлены резисторами  $R4$  и  $R5$ . Все элементы расположены на панели стенда (рис. 5.1).

Для измерения тока нагрузки на стенде имеется миллиамперметр на 100 или 150 мА, для измерения напряжений – вольтметр на 15 В (М 330).

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Руководствуясь разделами 2 и 3 данной работы, самостоятельно составить схему электрической цепи линии электропередачи. В схеме предусмотреть амперметр для измерения тока нагрузки и вольтметр со свободными концами для измерения напряжений на разных участках электрической цепи. Схему цепи представить для проверки преподавателю и включить в отчет. Подготовить таблицу для записи показаний приборов.

4.2. Собрать электрическую цепь. Изменяя сопротивление переменного резистора  $R$  от бесконечности до нуля, что соответствует изменению режима работы линии электропередачи от холостого хода до короткого замыкания, измерить ток  $I$ , напряжения на источнике  $U_1$  и на приемнике  $U_2$  и падение напряжения на проводах  $\Delta U_4$  и  $\Delta U_5$  (осуществить не менее девяти замеров). Данные измерений свести

в таблицу.

4.3. По данным замеров рассчитать сопротивление проводов линии электропередачи  $R_{л}$ .

4.4. Построить на одном рисунке графики зависимостей  $U_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\eta$  от тока.

## 5. Контрольные вопросы

1. Чему равно падение напряжения в линии?
2. Как определить потерю мощности в проводах?
3. Чему равен КПД линии электропередачи?
4. При каких условиях возможна передача максимальной мощности потребителю?
5. Почему для передачи электроэнергии на дальние расстояния используют повышенное напряжение?
6. Что означают режимы холостого хода и короткого замыкания линии передачи?
7. Почему и как изменится напряжение  $U_2$ , если при неизменном подводимом напряжении  $U_1$  увеличить количество параллельно включенных потребителей?
8. Поясните формы зависимостей  $P_1 = f(I)$ ,  $P_2 = f(I)$ ,  $U_2 = f(I)$ ,  $\eta = f(I)$ .

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

#### 1. Цель работы

Экспериментальная проверка справедливости принципа наложения и принципа эквивалентного генератора.

#### 2. Общие сведения

Наряду со знанием основных методов расчета электрических цепей (таких, как метод уравнений Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых потенциалов), полезно знание отдельных свойств электрических цепей, позволяющих в некоторых случаях упростить как расчет электрической цепи, так и экспериментальное исследова-

ние ее. Эти свойства часто именуется теоремами или принципами. К ним относятся принцип наложения, принцип компенсации, принцип линейности и др.

Справедливость этих принципов вытекает из анализа уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

#### Принцип наложения.

Ток в любой ветви сложной электрической цепи равен алгебраической сумме токов, вызываемых каждой ЭДС в отдельности. Принцип наложения используется в методе расчета, получившем название метода наложения. При расчете цепей по методу наложения поступают следующим образом: поочередно рассчитывают токи от каждой ЭДС, считая все остальные ЭДС источников равными нулю, но сохраняя их внутреннее сопротивление. Ток в любой ветви определяется путем алгебраического суммирования частичных токов.

#### Принцип эквивалентного генератора.

Ток в ветви  $ab$  с сопротивлением  $R$  не изменится, если всю остальную цепь, содержащую источники ЭДС, заменить эквивалентным генератором с ЭДС, равной напряжению на зажимах  $a$  и  $b$  при разомкнутой ветви  $ab$  (при холостом ходе)  $U_{abx}$ , и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению  $R_{вх}$  цепи относительно зажимов  $a$  и  $b$  при разомкнутой ветви  $ab$  и замкнутых накоротко источниках ЭДС.

Ток  $I$  в ветви  $ab$  в схеме цепи с эквивалентным генератором (рис. 6.1) находится из выражения

$$I = \frac{U_{abx}}{R_{вх} + R}.$$

Напряжение  $U_{abx}$  и входное сопротивление  $R_{вх}$  определяются экспериментальным или расчетным путем.

На принципе эквивалентного генератора основан метод расчета, получивший название метода эквивалентного генератора. Этот метод используется, когда требуется определить ток в одной ветви сложной цепи. При определении  $U_{abx}$  и  $R_{вх}$  расчетным путем ветвь  $ab$  с сопротивлением  $R$  размыкают и рассчитывают токи в изменившейся цепи. Затем выбирают контур, в который входило бы напряжение  $U_{abx}$  на



месте разрыва ветви  $ab$ , и составляют уравнение по второму закону Кирхгофа. Из этого уравнения и определяют  $U_{abx}$ .

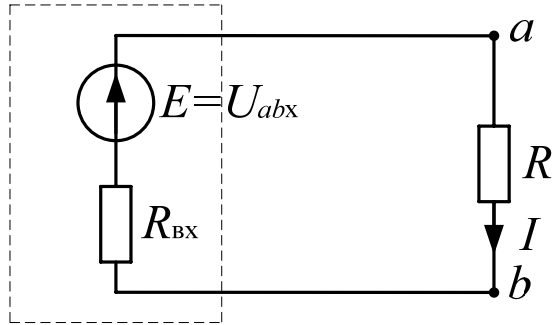


Рис. 6.1. Схема цепи с эквивалентным генератором

Входное сопротивление цепи  $R_{вх}$  относительно зажимов  $a$  и  $b$  при разомкнутой ветви  $ab$  и замкнутых накоротко источниках ЭДС определяется, как правило, путем последовательных преобразований схемы цепи, то есть аналогично нахождению  $R_{экв}$ . При определении  $U_{abx}$  и  $R_{вх}$  опытным путем выполняют два опыта.

1) Опыт холостого хода. Ветвь  $ab$  размыкают и измеряют напряжение  $U_{abx}$  на зажимах  $a$  и  $b$ .

2) Опыт короткого замыкания. Сопротивление ветви  $ab$  замыкают накоротко и измеряют в этой ветви ток короткого замыкания  $I_k$ . Как видно из схемы, изображенной на рис. 6.1, ток  $I_k$  определяется выражением

$$I_k = \frac{U_{abx}}{R_{вх}}.$$

Откуда следует, что  $R_{вх} = \frac{U_{abx}}{I_k}$ .

#### Принцип взаимности.

Если ЭДС  $E_{ab} = E_1$ , действуя в ветви  $ab$  сколь угодно сложной цепи при отсутствии в цепи прочих ЭДС, вызывает в другой ветви  $cd$  этой цепи ток  $I_{cd} = I_1$ , то такая же ЭДС  $E_{cd} = E_1$ , действуя в ветви  $cd$  при

отсутствии прочих ЭДС, вызовет в ветви  $ab$  такой же ток  $I_{ab} = I_1$ .

Принцип взаимности в сочетании с принципом наложения дает возможность существенно снизить трудоемкость расчета сложной цепи, в которой действуют одновременно несколько ЭДС, особенно в случае, когда требуется определить ток в одной ветви этой цепи.

Пусть, например, цепь имеет три ветви, в каждой из которых имеется ЭДС  $E_1, E_2, E_3$ . Исходя из принципа наложения, ток в первой ветви будет равен  $I_1 = I_1^{(1)} + I_1^{(2)} + I_1^{(3)}$ . Здесь верхний индекс в скобках показывает, под действием какой ЭДС возникает ток.

Если в цепи оставить только одну ЭДС  $E_1$ , а  $E_2$  и  $E_3$  принять равными нулю, но сохранить их внутренние сопротивления, то токи в ветвях  $I_1^{(1)}; I_2^{(1)}; I_3^{(1)}$  найдутся достаточно просто, так как в цепи действует только одна ЭДС  $E_1$ . Если эту ЭДС  $E_1$  перенести из 1-й ветви во вторую, то в первой ветви, согласно принципу взаимности, будет ток равный  $I_2^{(1)}$ , но в действительности во второй ветви действует ЭДС не  $E_1$ , а  $E_2$ , которая в  $\frac{E_2}{E_1}$  раз больше ЭДС  $E_1$ , следовательно,

но, и составляющая тока первой ветви от ЭДС  $E_2$  в  $\frac{E_2}{E_1}$  раз больше, то

есть  $I_1^{(2)} = I_2^{(1)} \frac{E_2}{E_1}$ . Аналогично составляющая тока первой ветви от

ЭДС  $E_3$  будет равна  $I_3^{(1)} \frac{E_3}{E_1}$ . Истинный ток первой ветви будет

равен алгебраической сумме составляющих:

$$I_1 = I_2^{(1)} + I_1^{(2)} + I_1^{(3)} = I_1^{(1)} + I_2^{(1)} \frac{E_2}{E_1} + I_3^{(1)} \frac{E_3}{E_1}.$$

В последнем выражении составляющие тока записываются со знаком плюс, если направление ЭДС ветви совпадает с направлением тока в этой ветви при действии в цепи только ЭДС  $E_1$ . В противном случае ставят знак минус.

### 3. Описание лабораторной установки

Таблица 6.1

Объектом исследования является сложная электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками ЭДС в различных ветвях (рис. 6.2). Элементы, из которых составляется электрическая цепь, расположены на панелях стенда, внешний вид которых показан на рис. 1.4 (в описании работы № 1).

Для измерения токов необходимо использовать амперметры на 100–150 мА, для измерения напряжений – вольтметр М253 или М 330 на 15 В.

### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 6.2. Амперметры левой (отрицательной) клеммой присоединить к узлу *c*.

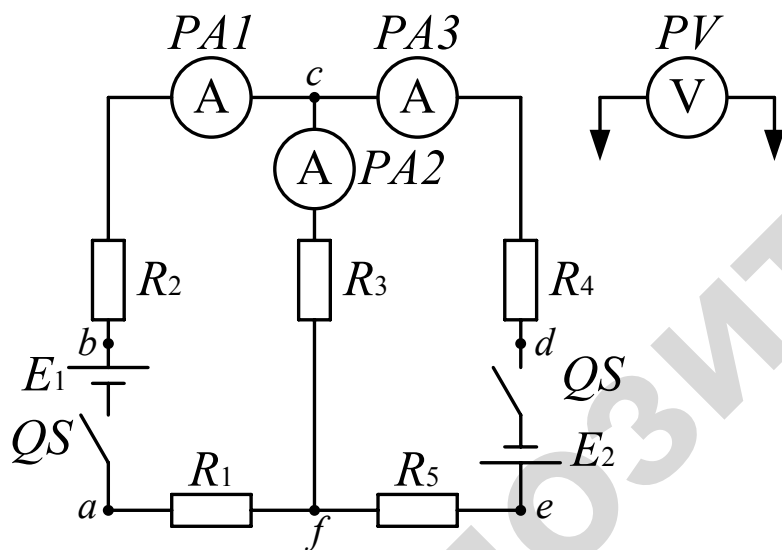


Рис. 6.2. Схема сложной цепи постоянного тока

4.2. Выписать с панели стенда значения сопротивлений резисторов.

Сопротивления резисторов

$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_5, \text{ Ом}$

4.3. Включить источники ЭДС, измерить вольтметром величину каждой ЭДС и записать показания амперметров с учетом знаков. При отклонении стрелки амперметра вправо ток записывается со знаком плюс, влево – со знаком минус.

Таблица 6.2

Значения ЭДС и токов цепи

Измерено				
$E_1, \text{ В}$	$E_2, \text{ В}$	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$I_3, \text{ мА}$

4.4. Проверка принципа наложения:

а) исключить из цепи источник ЭДС  $E_2$ , для чего перенести конец проводника с зажима  $e$  на зажим  $d$ . Включить источник ЭДС  $E_1$  и измерить токи с учетом знаков. Данные измерений занести в табл. 6.3;

б) восстановить исходную цепь с двумя источниками ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . Исключить из цепи источник ЭДС  $E_1$ , для чего перенести конец проводника с зажима  $b$  на зажим  $a$ . Включить источник ЭДС  $E_2$  и измерить токи с учетом знаков. Данные измерений занести в табл. 6.3;

Таблица 6.3

Значения токов при исследовании принципа наложения

Порядок действий	Частичные токи, мА					
	Измерено			Вычислено		
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
Включена $E_1$ Включена $E_2$ Алгебраически сложить частичные токи Записать истинные токи из табл. 6.2						

- в) убедиться в справедливости принципа наложения;  
г) рассчитать токи в ветвях по методу наложения и сравнить их с результатами измерений (табл. 6.3). Схемы цепей при действии каждой из ЭДС в отдельности и полный расчет токов привести в отчете.

#### 4.5. Проверка принципа эквивалентного генератора:

а) восстановить цепь по схеме (рис. 6.2). Разомкнуть ветвь с резистором  $R_2$ . Измерить напряжение  $U_{cfx}$ ;

б) восстановить исходную цепь, замкнуть накоротко резистор  $R_3$  в ветви  $cf$ . Измерить амперметром РА2 ток  $I_k$ ;

в) по результатам измерений определить:

$$R_{вх} = \frac{U_{cfx}}{I_k};$$

г) вычислить ток в ветви  $cf$  через  $U_{cfx}$  и  $R_{вх}$  при заданном  $R_3$  и сравнить его с результатом измерения тока  $I_2$  (табл. 6.2).

4.6. Определение параметров эквивалентного генератора расчетным путем:

а) начертить схему с разомкнутой ветвью  $cf$ ;

б) по известным ЭДС и сопротивлениям рассчитать напряжение  $U_{cfx}$  и сравнить его с замеренной величиной;

в) определить входное сопротивление схемы  $R_{вх}$  относительно зажимов  $cf$  при замкнутых источниках ЭДС. Сравнить эту величину с  $R_{вх}$  из пункта 5, в;

г) определить ток  $I_2$ , сравнить его величину с замеренной. Схемы цепей и расчеты привести в отчете.

### Лабораторная работа № 7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

### 1. Цель работы

Знакомство с вольт-амперными характеристиками диода, стабилитрона и динистора и возможностями их практического использования в электротехнических устройствах.

## 2. Общие сведения

Зависимость напряжения на зажимах элемента с сопротивлением от тока в нем  $U = f(I)$ , а также обратную зависимость  $I = \varphi(U)$  называют вольт-амперными характеристиками элемента (ВАХ). Электрическое сопротивление нелинейного элемента зависит от значений или от направлений токов и напряжений на нем, поэтому вольт-амперная характеристика нелинейного элемента имеет вид кривой.

Электрическое сопротивление линейного элемента является постоянной величиной, поэтому связь между током и напряжением на нем выражается линейным уравнением, и вольт-амперная характеристика линейного элемента есть прямая линия.

Цепи, содержащие хотя бы один нелинейный элемент, называют нелинейными. Нелинейные цепи обладают рядом примечательных свойств, которые отсутствуют у линейных цепей. Эти свойства позволяют создать основанные на них автоматические системы управления и регулирования, устройства для преобразования электромагнитной энергии, устройства для электрических измерений и передачи информации, вычислительные машины и т.д.

Использование несимметричных нелинейных элементов, обладающих при одном направлении тока малым сопротивлением и при другом направлении тока – большим сопротивлением, дает возможность осуществить преобразование переменного тока в постоянный.

При подключении цепи с любым нелинейным элементом к синусоидальному напряжению ток будет изменяться по периодическому, но несинусоидальному закону.

### 3. Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе исследуются полупроводниковые элементы: диод, стабилитрон, динистор. Вольт-амперные характеристики этих элементов представлены на рис. 7.1.

Полупроводниковый диод обладает малым сопротивлением в проводящем направлении и большим сопротивлением при обратной полярности приложенного напряжения. Его вольт-амперная характеристика несимметрична и в том и другом направлениях нелинейна (рис. 7.1, а).

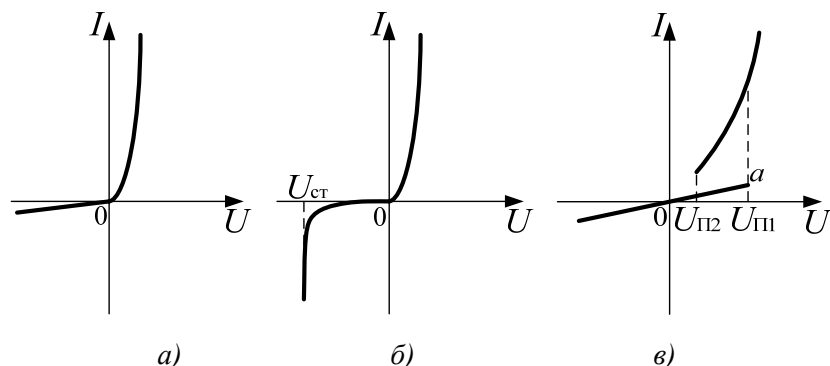


Рис. 7.1. Вольт-амперные характеристики диода (а), стабилитрона (б), динистора (в)

Стабилитрон – полупроводниковый диод с уменьшенной шириной  $p$ - $n$ -перехода. В прямом направлении его вольт-амперная характеристика (рис. 7.1, б) подобна характеристике диода. В обратном направлении при напряжении источника, равном напряжению стабилизации  $U_{ст}$ , наступает пробой перехода. После пробоя ток возрастает, но напряжение на стабилитроне остается практически постоянным. На этом свойстве стабилитрона основано построение схем стабилизаторов напряжения на постоянном токе.

Динистор – полупроводниковый прибор с релейным характером изменения сопротивления в прямом направлении (рис. 7.1, в). При одной полярности приложенного напряжения и монотонном возрастании этого напряжения от нуля вольт-амперная характеристика динистора до напряжения пробоя  $U_{п1}$  подобна характеристике полупроводникового диода в непроводящем направлении. При напряжении  $U_{п1}$  наступает пробой переходов динистора, сопротивление его резко уменьшается, и вольт-амперная характеристика подобна характеристике диода в проводящем направлении. С уменьшением напряжения этой же полярности сопротивление динистора при пороговом напряжении  $U_{п2}$  вновь резко возрастает, и его вольт-амперная характеристика возвращается на участок  $0$ – $a$  (рис. 7.1, в). При другой полярности приложенного напряжения вольт-амперная характеристика динистора аналогична вольт-амперной характеристике полупроводникового диода в непроводящем направлении.

Нелинейные свойства рассмотренных полупроводниковых приборов эффективно используются в различных устройствах автоматики,

электротехники и радиотехники.

На рис. 7.2, а приведена схема однополупериодного выпрямителя переменного тока. При отрицательном напряжении сопротивление диода очень велико по сравнению с сопротивлением приемника. Соответственно и падение напряжения на диоде будет большим, примерно равным напряжению на входе цепи, а напряжение на приемнике – ничтожно малым. При положительном напряжении сопротивление диода очень мало по отношению к сопротивлению приемника, поэтому напряжение на приемнике будет примерно равным напряжению на входе цепи.

С помощью стабилитрона можно ограничить амплитуду выпрямленного диодом напряжения, при этом стабилитрон включается параллельно приемнику согласно схеме, изображенной на рис. 7.2, б.

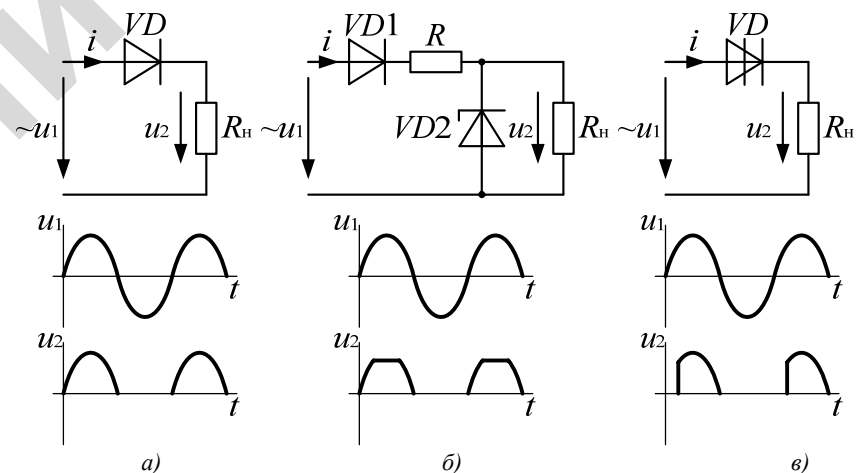


Рис. 7.2. Принципиальные схемы включения диода (а), стабилитрона (б), динистора (в) в цепь с источником синусоидального напряжения и осциллограммы напряжений на источнике и на приемнике

При возрастании в проводящий полупериод напряжения на приемнике  $u_2 = u_1 - Ri$  до значения  $U_{ст}$ , равного напряжению стабилизации стабилитрона, сопротивление стабилитрона уменьшается, последующее увеличение напряжения  $u_1$  приводит к резкому возрастанию величины тока через стабилитрон, вследствие чего возрастает общий ток  $i$ . Соответственно возрастает падение напряжения на ограничительном

сопротивлении  $R$ . При этом напряжение на приемнике и равное ему напряжение на стабилитроне остается неизменным, равным  $U_{ст}$ .

Если использовать в качестве выпрямителя не диод, а динистор (рис. 7.2, в), то выпрямленное напряжение будет представлено участком полуволны, начинающейся с напряжения, равного напряжению пробоя динистора  $U_{п1}$ . При этом напряжении сопротивление динистора скачком уменьшается и он превращается в обычный диод.

Наблюдение кривых напряжения на входе цепи и на приемнике для всех трех схем производится с помощью осциллографа.

#### 4. Исследование вольт-амперных характеристик нелинейных элементов

4.1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 7.3. Снять вольт-амперную характеристику диода, изменяя ток от 0 до 100 мА в прямом направлении (10 измерений). Предел измерения вольтметра – 1,5 В. Поменять полярность напряжения на диоде и снять вольт-амперную характеристику диода в обратном направлении, изменяя напряжение от 0 до 15 В. Данные измерений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Вольт-амперные характеристики

Наименование полупроводникового прибора	В прямом направлении			В обратном направлении		
	Измерено		Вычислено	Измерено		Вычислено
	$U$	$I$	$R_{ст}$	$U$	$I$	$R_{ст}$
	В	мА	Ом	В	мА	Ом

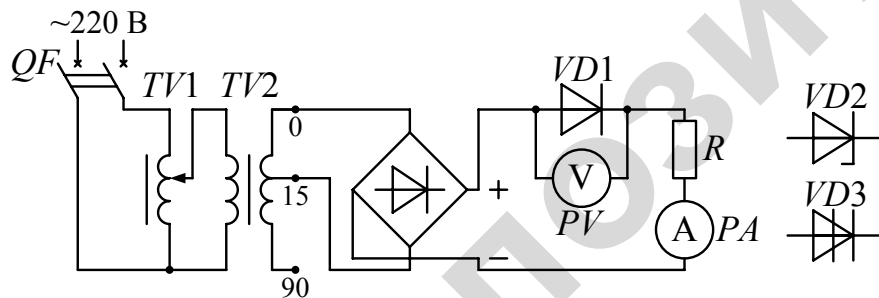


Рис. 7.3. Схема электрической цепи для снятия вольт-амперных характеристик: VD1 – диод; VD2 – стабилитрон; VD3 – динистор; PV – вольтметр 1,5; 15; 90 В; PA – амперметр 100 мА

4.2. В цепь (рис. 7.3) вместо диода подключить стабилитрон VD2. Снять вольт-амперную характеристику стабилитрона, изменяя ток от 0 до 100 мА в прямом и обратном направлениях (10 измерений).

4.3. В цепь (рис. 7.3) вместо диода подключить динистор VD3 и в трансформаторе TV2 вместо клемм 0; 15 использовать клеммы 0; 90. Снять вольт-амперную характеристику динистора, изменяя напряжение от 0 до 75 В в прямом и обратном направлениях. При снятии характеристики в прямом направлении и постепенном увеличении напряжения будет наблюдаться скачок тока (пробой динистора) – переход на новую характеристику. При снижении напряжения также будет наблюдаться скачок тока, поэтому данные приборов необходимо записывать как при увеличении напряжения от 0 до 75 В, так и при дальнейшем снижении его от 75 до 0 В.

Характеристика при обратном направлении напряжения снимается обычным путем.

4.4. По данным пунктов 4.1, 4.2, 4.3 построить вольт-амперные характеристики и рассчитать статические сопротивления  $R_{ст}$  диода, стабилитрона и динистора.

#### 5. Исследование нелинейной цепи с источником синусоидального напряжения

5.1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 7.4.

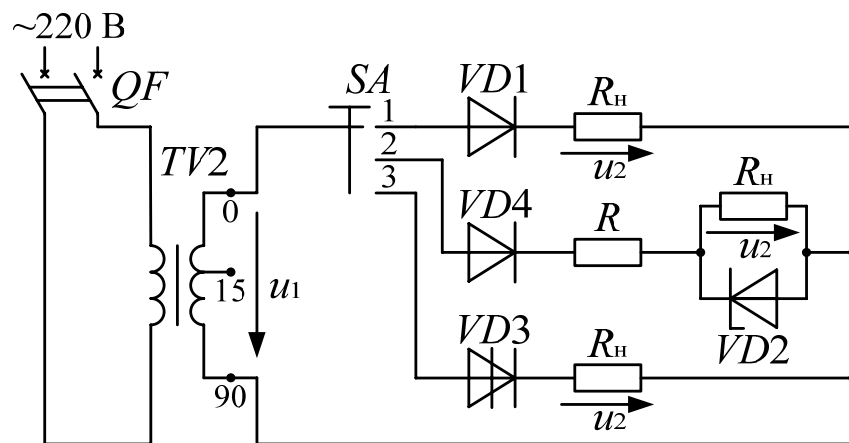


Рис. 7.4. Схема электрической цепи для исследования кривых напряжений в цепи с полупроводниковыми элементами

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное и графическое определение вольт-амперной характеристики нелинейной цепи.

#### 2. Общие сведения

Расчет нелинейной цепи основывается на законах Кирхгофа. Графический расчет нелинейной цепи постоянного тока производится с помощью вольт-амперных характеристик (ВАХ) цепи. Вольт-амперная характеристика цепи, представляющая собой зависимость тока от напряжения на входе цепи, как правило, определяется графически.

##### 2.1. Расчет неразветвленной цепи.

Рассмотрим цепь (рис. 8.1), состоящую из двух последовательно соединенных нелинейных элементов, вольт-амперные характеристики которых  $I = f_1(U_1)$  и  $I = f_2(U_2)$  даны (рис. 8.2). Требуется по известному напряжению на входе цепи  $U$  определить значение тока  $I$  и напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

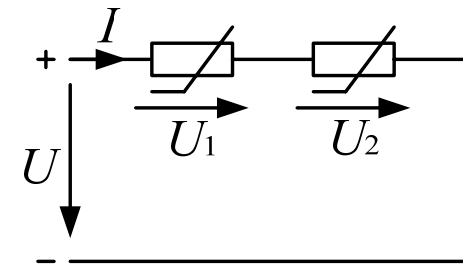


Рис. 8.1. Последовательное соединение нелинейных элементов

Для решения задачи строится вспомогательная (результатирующая) вольт-амперная характеристика всей цепи  $I = f(U)$ . Так как по нелинейным элементам идет один и тот же ток, а напряжение  $U = U_1 + U_2$  согласно второму закону Кирхгофа, то результирующую характеристику  $I = f(U)$  строят путем суммирования абсцисс вольт-амперных

5.2. Включить осциллограф в сеть. На вход осциллографа подать сначала общее напряжение цепи  $u_1$ , затем – напряжение на приемнике  $u_2$  для цепи с диодом, при этом трехпозиционный переключатель SA должен быть в положении 1.

Зарисовать с экрана осциллографа кривые напряжений  $u_1$  и  $u_2$ .

5.3. Аналогично пункту 5.2 зарисовать с экрана осциллографа кривые напряжений на входе цепи  $u_1$  и на приемнике  $u_2$  для цепей со стабилитроном и с динистором (трехпозиционный переключатель – в положениях 2 и 3).

5.4. По данным пунктов 5.2 и 5.3 привести схемы цепей с использованием полупроводниковых приборов (рис. 7.2, а, б, в) и кривые напряжений на входе цепи  $u_1$  и на приемнике  $u_2$ .

#### 6. Методические указания по обработке результатов эксперимента

6.1. Статическое сопротивление  $R_{ст}$  находится как частное от деления напряжения на ток:  $R_{ст} = \frac{U}{I}$ .

6.2. Для построения ВАХ полупроводниковых приборов рекомендуемый масштаб по оси тока  $m_I = 10$  мА/см. По оси напряжений как для положительных, так и для отрицательных значений напряжения для диода и стабилитрона  $m_U = 1$  В/см, для динистора  $m_U = 10$  В/см.

#### 7. Контрольные вопросы

1. Дайте определение нелинейной цепи.
2. Что такое вольт-амперная характеристика?
3. Как определяются статическое сопротивление и дифференциальное сопротивление?
4. Что такое нелинейный элемент?
5. Почему вольт-амперная характеристика нелинейного элемента имеет вид кривой?
6. Какую вольт-амперную характеристику имеют линейные элементы и почему?
7. Охарактеризуйте нелинейные полупроводниковые элементы: диод, стабилитрон, динистор. Опишите использование этих элементов в электротехнических устройствах.

характеристик  $I = f_1(U_1)$  и  $I = f_2(U_2)$ . Построение результирующей характеристики  $I = f(U)$  позволяет заменить цепь с последовательным соединением нелинейных элементов цепью с одним эквивалентным нелинейным элементом.

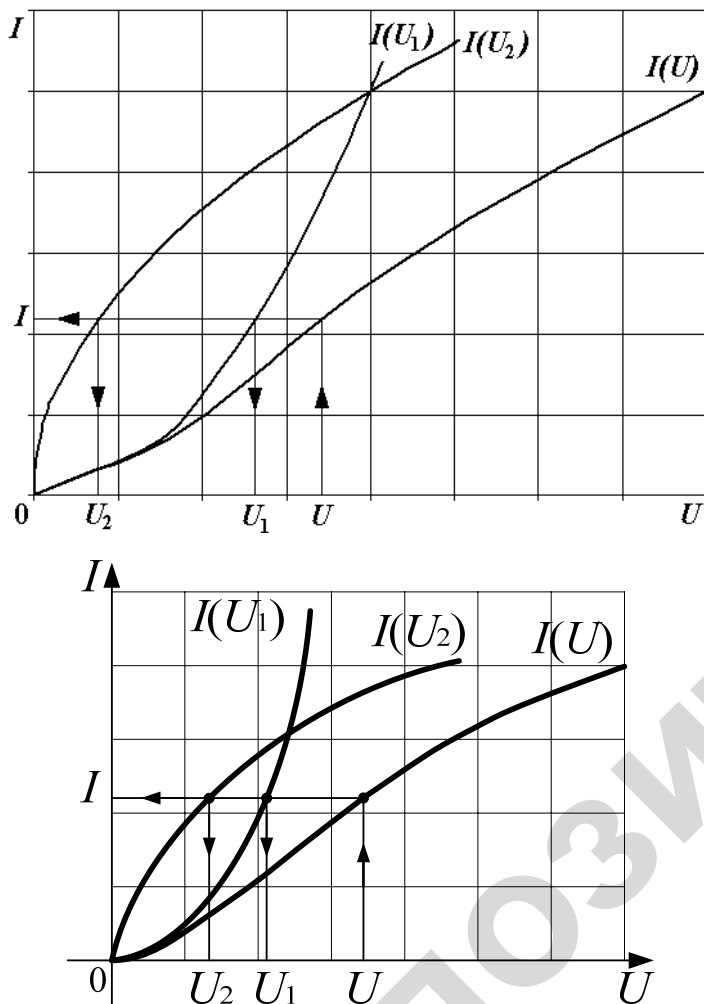


Рис. 8.2. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при последовательном соединении

С помощью характеристики  $I = f(U)$  (рис. 8.2) по заданному значению напряжения находят значение тока  $I$  и затем значения напряжений  $U_1, U_2$  по соответствующим характеристикам  $I = f(U)$  и  $I = f_2(U_2)$ .

### 2.2. Расчет разветвленной цепи.

Рассмотрим цепь, состоящую из двух параллельно соединенных нелинейных элементов (рис. 8.3), вольт-амперные характеристики которых  $I_1 = f_1(U)$  и  $I_2 = f_2(U)$  заданы (рис. 8.4). Построим вольт-амперную характеристику всей цепи  $I = f(U)$ . Так как напряжения на входе цепи и на каждом нелинейном элементе одинаковые, а общий ток согласно первому закону Кирхгофа  $I = I_1 + I_2$ , то результирующую вольт-амперную характеристику  $I = f(U)$  строят путем суммирования ординат вольт-амперных характеристик  $I_1 = f_1(U)$  и  $I_2 = f_2(U)$ .

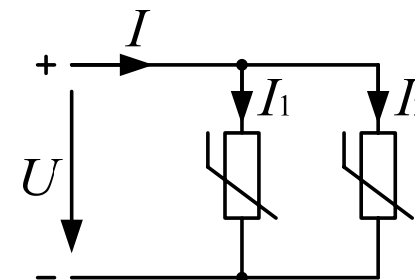


Рис. 8.3. Параллельное соединение нелинейных элементов

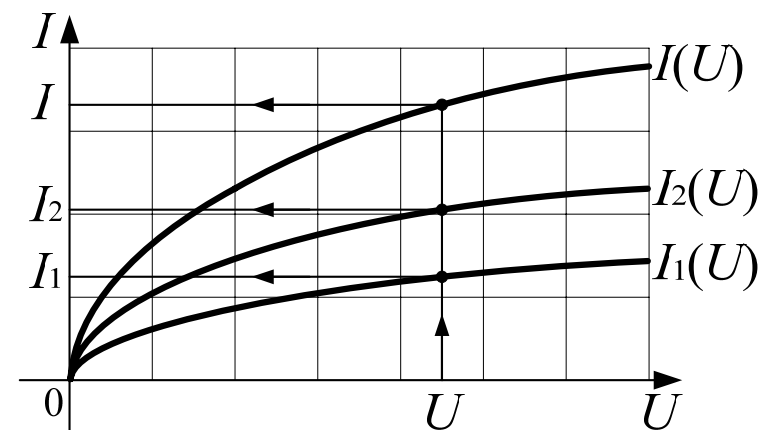


Рис. 8.4. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при параллельном соединении

Построенная результирующая характеристика  $I = f(U)$  позволяет заменить цепь с параллельным соединением нелинейных элементов цепью с одним эквивалентным нелинейным элементом. Если напряжение задано, то токи  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  находят с помощью соответствующих вольт-амперных характеристик  $I = f(U)$ ,  $I_1 = f_1(U)$ ,  $I_2 = f_2(U)$ .

Если требуется рассчитать сложную цепь, то, произведя последовательно преобразования участков цепи с параллельным или последовательным соединением нелинейных элементов, строят результирующую вольт-амперную характеристику всей цепи и с помощью её и промежуточных вольт-амперных характеристик находят все токи и напряжения.

### 3. Описание лабораторной установки

В данной работе используются три элемента цепи: 1, 2 – нелинейные резистивные элементы, 3 – резистор  $R$  с линейной ВАХ.

Схема электрической цепи для снятия вольт-амперных характеристик элементов, а также для снятия вольт-амперных характеристик цепей, составленных из этих элементов, представлена на рис. 8.5.

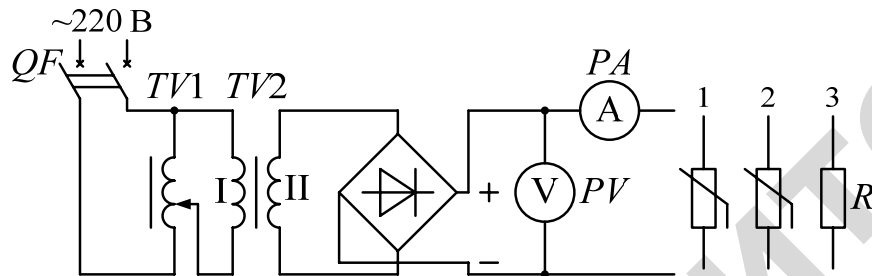


Рис. 8.5. Электрическая схема для исследования нелинейных цепей:  
PA – амперметр 100 мА; PV – вольтметр 30 В

### 4. Программа и методика выполнения работы

- 4.1. Собрать цепь по схеме, изображенной на рис. 8.5.
- 4.2. Снять вольт-амперные характеристики первого и второго нелинейного элементов и линейного сопротивления  $R$ . Показания снимать через 10 мА от 0 до 100 мА. Данные измерений занести в табл. 8.1.

Вольт-амперные характеристики элементов цепи

Нелинейный элемент № 1		Нелинейный элемент № 2		$R$	
$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА

4.3. Снять результирующую вольт-амперную характеристику цепи, содержащей нелинейные элементы 1 и 2, соединенные последовательно. Измерения производить с интервалом по току 10 мА. Данные измерений занести в табл. 8.2.

4.4. Снять результирующую вольт-амперную характеристику цепи, содержащей нелинейные элементы 1 и 2, соединенные параллельно. Измерения производить с интервалом по току 10 мА. Данные измерений занести в табл. 8.2.

4.5. Снять результирующую вольт-амперную характеристику цепи при смешанном соединении элементов 1, 2, 3, при этом нелинейные элементы 1 и 2 должны быть соединены параллельно. Измерения производить с интервалом по току 10 мА. Данные измерений занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Вольт-амперные характеристики нелинейных цепей

Последовательное соединение		Параллельное соединение		Смешанное соединение	
$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА

4.6. Для цепи с последовательным соединением нелинейных элементов 1 и 2 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики этих элементов и результирующие вольт-амперные характеристики этой цепи, полученные опытным путем и графическим способом. Рядом нарисовать схему цепи с последовательным соединением нелинейных элементов.

4.7. Для цепи с параллельным соединением нелинейных элементов 1 и 2 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики этих элементов и результирующие вольт-амперные характеристики этой цепи, полученные опытным путем и графическим способом. Рядом нарисовать схему цепи с параллельным соединением нелинейных элементов.

4.8. Для цепи со смешанным соединением элементов 1, 2, 3 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики элементов



1, 2, 3 и результирующие вольт-амперные характеристики этой цепи, полученные опытным путем и графическим способом. Рекомендуется графики выполнять разным цветом. Рядом нарисовать схему цепи, указав на ней токи и напряжения. Вольт-амперным характеристикам цепи дать соответствующие обозначения.

### 5. Контрольные вопросы

1. Какая цепь называется нелинейной?
2. На основании каких законов выполняют графическое построение результирующих ВАХ нелинейных электрических цепей?
3. Покажите, как графическим способом строят результирующие вольт-амперные характеристики последовательно и параллельно соединенных нелинейных элементов.
4. Постройте вольт-амперную характеристику линейного резистора, сопротивления которого  $R = 10 \text{ Ом}$ ;  $R = 20 \text{ Ом}$ .
5. Покажите, как графически определить токи в ветвях при смешанном соединении элементов нелинейной цепи, если напряжение на входе цепи известно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2007. – 704 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2003. – 320 с.
3. Теоретические основы электротехники : в 3 т. / К. С. Демирчян [и др.]. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 3 т.  
Т. 1. – 463 с. – Содерж. : Основные понятия и законы теории электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей. Теория линейных электрических цепей.  
Т. 2. – 576 с. – Содерж. : Теория линейных электрических цепей. Теория нелинейных электрических и магнитных цепей.  
Т. 3. – 377 с. – Содерж. : Теория электромагнитного поля.
4. Сборник задач по теоретическим основам электротехники : учебное пособие / Л. А. Бессонов [и др.]; под ред. Л. А. Бессонова. – Москва : Высшая школа, 2003. – 528 с.

### Дополнительная

5. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов. В 3 ч. Ч. 1 / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2008. – 353 с.
6. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов. В 3 ч. Ч. 3 / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2010. – 321 с.
7. Теоретические основы электротехники : курс лекций. В 2 ч. Ч. 1. Линейные электрические цепи / сост.: В. С. Корко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2002. – 170 с.

8. ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.01.1975. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 32 с.

9. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. – Взамен ГОСТ 1994-61; введ. 01.07.1978. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 36 с.

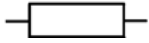
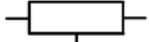

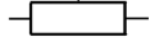
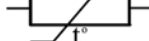
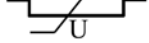
10. ГОСТ 2.710-81. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – Взамен ГОСТ 2.710-75; введ. 01.07.1981. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 15 с.

11. ГОСТ 2.723-68. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушка индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. – Введ. 01.01.1971. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 15 с.











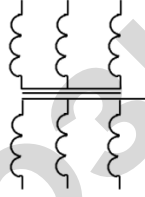
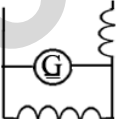
12. ГОСТ 2.728-74. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – Взамен ГОСТ 2.728-68, ГОСТ 2.729-68 в части п. 12, ГОСТ 2.747-68 в части подп. 24, 25 таблицы [переизд. май 2002 г. с изменен. № 1, 2, утв. в августе 1980 г., июле 1991 г.]; введ. 01.07.1975. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

13. ГОСТ 2.755-87. ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – Взамен ГОСТ 2.738-68; ГОСТ 2.755-74; введ. 01.01.1988. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 21 с.


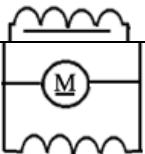









**ГРАФИЧЕСКИЕ И БУКВЕННЫЕ  
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ**


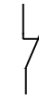

Наименование	Графическое обозначение	Буквенное обозначение
1	2	3
Постоянный ток	—	I
Полярность постоянного тока положительная	+	
Полярность постоянного тока отрицательная	—	
Переменный ток	~	
Переменный ток частотой 50 Гц	~50 Гц	
Трехфазный ток частотой 50 Гц, напряжением 220 В	3~50 Гц, 220 В	
Трехфазный ток, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	3N~50 Гц, 220/380 В	
Резистор постоянный		R
Резистор постоянный с дополнительными отводами		R
Шунт измерительный		R
Резистор переменный		R
Терморезистор		RK
Варистор		RU

Продолжение приложения 1

1	2	3
Потенциометр		R
Конденсатор постоянной ёмкости		C
Конденсатор постоянной ёмкости электролитический		C
Конденсатор переменной ёмкости		C
Вариконд		C
Катушка индуктивности*		L
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом*		L
Трансформатор однофазный двухобмоточный с ферромагнитным сердечником*		TV
Автотрансформатор с ферромагнитным сердечником*		TV
Измерительный трансформатор тока*		TA
Трансформатор трехфазный с ферромагнитным магнитопроводом двухобмоточный с соединением обмоток звезда – звезда с выведенной нейтральной точкой*		TV
Генератор постоянного тока со смешанным возбуждением		G

Продолжение приложения 1

1	2	3
Синхронный генератор трехфазный с обмотками, соединенными в звезду с невыведенной нейтралью		G
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением		M
Асинхронный двигатель трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором		M
Амперметр		PA
Вольтметр		PV
Ваттметр		PW
Счетчик активной энергии		PI
Частотомер		PF
Фазометр		
Омметр		PR
Гальванометр		

1	2	3
Контакт замыкающий коммутационного устройства		QS
Контакт размыкающий коммутационного устройства		QS
Контакт переключающий с нейтральным центральным положением		SA
Разъединитель трехполюсный		QS
Контакт выключателя замыкающий трехполюсный с автоматическим срабатыванием максимального тока		QF
Переключатель однополюсный шестипозиционный		SA
Предохранитель плавкий		FU

\* Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливается.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

В трех частях

Часть 1

Электрическое и магнитное поле постоянного тока.  
Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока

Составители:

**Крутов** Анатолий Викторович,  
**Гузанова** Татьяна Федоровна,  
**Бойко** Михаил Анатольевич,  
**Нефедов** Святослав Святославович

Ответственный за выпуск *В. А. Ковалев*  
Редактор *Н. А. Антипович*  
Компьютерная верстка *Н. А. Антипович*

Подписано в печать 22.06.2015 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 80 экз. Заказ 9.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.